

Document public

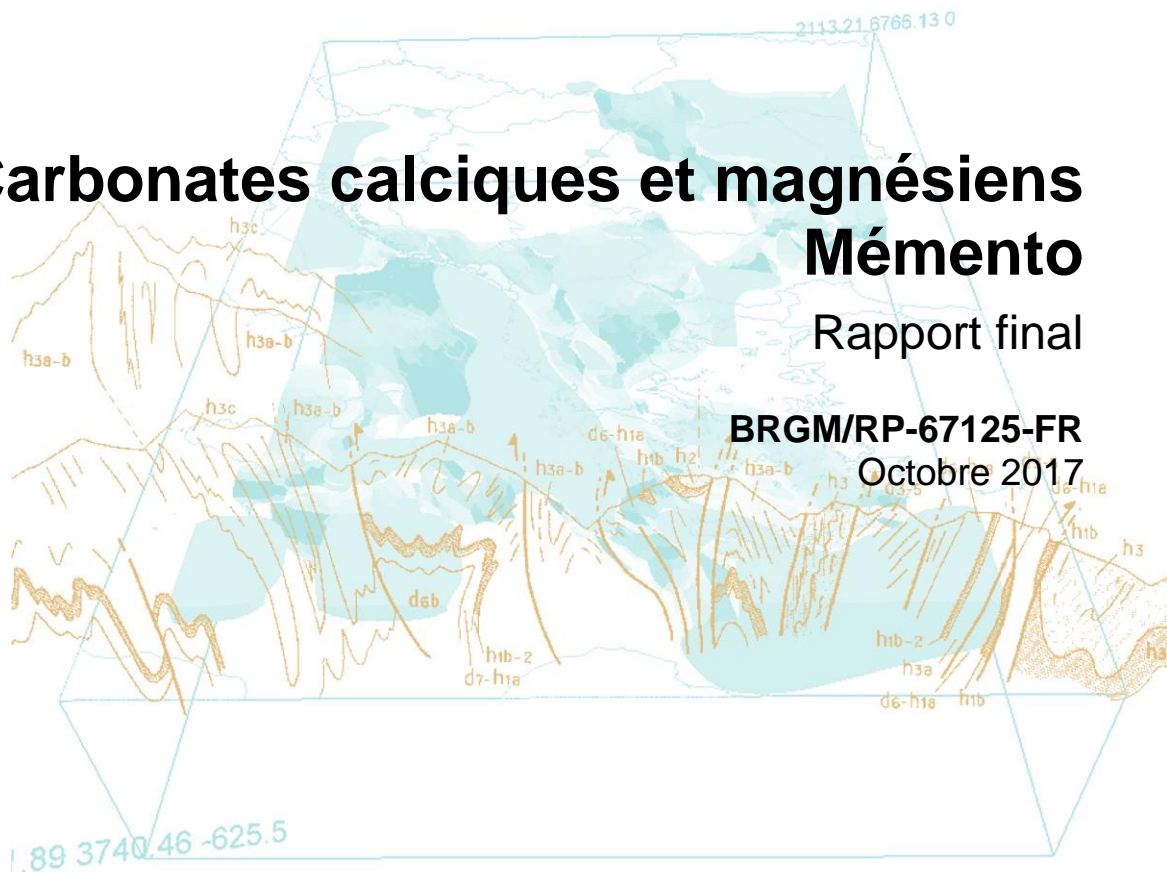


Carbonates calciques et magnésiens Mémento

Rapport final

BRGM/RP-67125-FR

Octobre 2017



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Carbonates calciques et magnésiens Mémento

Rapport final

BRGM/RP-67125-FR

Octobre 2017

Charles N., Colin S., Lefebvre G.

Vérificateur :

Nom : Jean-François LABBE

Date : 30/08/2017

Signature :



Approbateur :

Nom : Didier Bonijoly

Date : 07/11/2017

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : Carbonates, Calcaire, Dolomie, Marbre, Craie, Marne, Ressources, Réserves, Gisements, Production, Utilisations, Marchés, Verre, Chaux, Charge, Sidérurgie, Chimie, Approvisionnement, Prospective, France.

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

Charles N., Colin S., Lefebvre G. (2017) - Mémento Carbonates calcaïques et magnésiens. Rapport final. Rapport BRGM/RP-67125-FR, 85 p. 33 fig., 9 tab.

Synthèse

Le présent mémento est un panorama, sur le plan national, de l'activité extractive des carbonates calciques et magnésiens à l'exclusion des granulats pour le BTP et des matériaux pour le ciment. Il présente un état des lieux des filières industrielles utilisant ces carbonates sous toutes leurs formes.

Productions, ressources et réserves

La France métropolitaine a un potentiel géologique varié permettant l'exploitation d'un grand nombre de roches carbonatées de natures diverses (calcaire, dolomie, marne, craie, marbre). En 2015, 87 carrières exploitent les carbonates en France, pour une production moyenne de 24,3 Mt. La production de matières premières carbonatées à partir des gisements français se répartit comme suit :

- environ 20 Mt/an de calcaires traités pour usages industriels (chaux, charges minérales, chimie, sidérurgie, verrerie, agro-alimentaire, construction, etc.), provenant de gisements situés sur l'ensemble du territoire français. Cette production est en légère hausse depuis la fin des années 1990 du fait d'usages croissants et diversifiés dans l'industrie ;
- environ 1,9 Mt/an de dolomie, provenant essentiellement des gisements du Bassin aquitain, et destinées en premier lieu à la sidérurgie, verrerie, chaux, l'industrie des céramiques et réfractaires ;
- environ 1,5 Mt/an de craie, produites essentiellement dans le nord de la France, pour des usages principaux en charges et amendements ;
- environ 465 kt/an de marbres, produits dans le sud de la France notamment dans le bassin de Saint-Béat, utilisés avant tout sous forme de poudres dans l'industrie ;
- environ 156 kt/an de marnes, produites dans le nord de la France pour un usage principal en amendements agricoles.

Les ressources géologiques en carbonates sont importantes, mais les réserves exploitables sont plus limitées, du fait des contraintes environnementales et d'occupation des sols. De nouvelles ouvertures de carrières ou extensions apparaissent nécessaires d'ici 2030.

Acteurs industriels, marchés et filières

À partir des chiffres de production recueillis en 2015 dans la base de données nationale des carrières (BDCM) sur les 87 carrières concernées par l'étude (hors usages pour ciments), il est possible de faire les estimations globales suivantes : 26 % des matériaux carbonatés sont destinés à la fabrication de chaux, 18 % pour les charges minérales, 9 % en agro-alimentaire et 4 % environ pour les amendements agricoles. Le reste de la production (43 %) se répartit selon divers usages en industrie pour lesquels il est plus difficile de détailler la répartition précise. Ceux-ci comprennent, parmi les principaux, la sidérurgie, la verrerie, la chimie, les céramiques et les réfractaires, ainsi que les usages moins élaborés destinés à la construction et le BTP.

Il existe une grande diversité de produits, dont certains très élaborés comme le GCC (carbonate de calcium naturel ultrafin) finement broyé et très pur, entrant en concurrence avec le carbonate de calcium précipité (PCC) produit synthétiquement. Ces produits haut de gamme ont des prix de vente de l'ordre de 300-400 €/t et sont destinés à des usages spécialisés, par exemple en pharmacie et en cosmétique. D'autres, comme les castines, éléments de carbonates crus simplement concassés et broyés à des tailles diverses, ont un prix unitaire de 10-20 €/t et sont utilisés en sidérurgie ou en verrerie.

Les filières de transformation et vente des carbonates calciques et magnésiens implantées en France comptent un grand nombre d'entreprises de taille et spécialités diverses.

Le principal acteur d'envergure internationale est le groupe suisse OMYA, avec plus de 20 sites industriels sur le territoire français et leader sur le marché des charges minérales à base de carbonate de calcium à destination de l'industrie du papier, des matières plastiques, de la peinture, du bâtiment, de l'environnement, la pharmacie, l'agriculture et la nutrition animale.

Les entreprises Provençale SA et Novacarb, sont également spécialisées dans les charges minérales à base de carbonate de calcium, et exploitent plusieurs sites industriels en France, avec des productions conséquentes. Le groupe Imerys, s'il n'exploite qu'une carrière de carbonate en France, est numéro 2 mondial de la production de carbonate de calcium finement broyé (GCC) et numéro 3 pour la production de carbonate de calcium précipité (PCC) avec 26 usines dans le monde.

Les entreprises de taille inférieure constituent un ensemble de producteurs au périmètre d'action davantage cantonné au territoire national voire régional et à un nombre plus restreint d'usages industriels ou agro-alimentaires, ainsi que de petites sociétés, parfois familiales, dont la production en carbonates est uniquement dédiée au marché local, notamment celle destinée aux amendements pour sols.

La situation de la France en termes de commerce extérieur est contrastée, avec des excédents commerciaux sur certains produits carbonatés comme les castines ou la craie, et des situations de déficit sur d'autres, comme les dolomies crues, calcinées ou frittées. Les quantités échangées sont néanmoins faibles au regard des chiffres de production nationale. Les flux commerciaux restent essentiellement limités aux pays européens limitrophes (Allemagne, Belgique, Espagne).

Les produits issus des carbonates sont diversement recyclés selon leurs usages. Certaines filières de recyclage existent ou se mettent en place, en particulier dans l'industrie verrière et celle des peintures. Toutefois, un certain nombre d'autres usages par nature dispersifs n'autorisent pas à ce jour de procédés de récupération économiques.

À moyen et long terme, l'activité extractive et industrielle liée aux carbonates devrait continuer à se développer, car les besoins dans de nombreux secteurs comme la construction, l'agro-alimentaire ou la chimie sont incompressibles, et d'autre part parce que de nouvelles applications de plus en plus spécifiques sont sans cesse élaborées et mises sur le marché.

Les mémentos du BRGM sont réalisés dans le cadre de la Convention 2017 N° 2102186360, signée entre la Direction de l'Eau et de la Biodiversité (DGALN/DEB) du Ministère de la Transition écologique et solidaire (MTES) et le BRGM.

Ces documents sont diffusés sur le site MinerallInfo (<http://www.mineralinfo.fr/page/roches-mineraux-industriels-0>) et InfoTerre (www.infoterre.brgm.fr).

Sommaire

1. Introduction	9
1.1. CONTEXTE DE L'ETUDE.....	9
1.2. SOURCE DES DONNEES.....	9
2. Définitions.....	11
2.1. SUBSTANCES : MINERAUX, ROCHES ET MATÉRIAUX CARBONATÉS.....	11
2.1.1. Minéraux carbonatés	11
2.1.2. Roches carbonatées	11
2.1.3. Matériaux carbonatés	17
2.2. RESSOURCES / RESERVES.....	17
2.3. PRODUITS ET FILIERES	18
2.3.1. Produits	18
2.3.2. Filières	19
3. Géologie des carbonates en France	21
4. L'activité extractive des carbonates en France.....	25
4.1. LOCALISATION DES CARRIERES ACTIVES	25
4.2. STATISTIQUES DES CARRIERES	26
4.3. RESSOURCES ET RESERVES PLAFONNEES	27
4.4. QUELQUES EXEMPLES DE GISEMENTS DE CARBONATES CALCIQUES ET MAGNESIENS EN FRANCE.....	28
4.5. CRITERES D'EXPLOITABILITE, MODES D'EXTRACTION ET PRINCIPES DE TRAITEMENT	44
4.5.1. Les critères d'exploitabilité et les modes d'extraction	44
4.5.2. Les principes de traitement.....	47
5. Filières industrielles des carbonates en France	53
5.1. DOMAINES D'UTILISATION DE LA CHAUX	53
5.2. DOMAINES D'UTILISATION DES CARBONATES DANS L'INDUSTRIE.....	62
5.2.1. Charges minérales.....	62
5.2.2. Sidérurgie	64
5.2.3. Verrerie.....	65
5.2.4. Réfractaires et isolants.....	65
5.2.5. Céramiques et néocéramiques	65
5.2.6. Construction/ BTP.....	66

5.2.7. Autres	66
5.3. DOMAINES D'UTILISATION DES CARBONATES DANS L'AGRO-ALIMENTAIRE..	66
5.3.1. Amendement	66
5.3.2. Alimentation animale et humaine	66
6. Marchés et perspectives.....	67
6.1. MARCHÉ INTERIEUR : REVUE DES PRINCIPALES SOCIÉTÉS ET LEUR POSITIONNEMENT SUR LE MARCHÉ FRANÇAIS	67
6.1.1. OMYA	67
6.1.2. Provençale SA	68
6.1.3. Novacarb	70
6.1.4. Solvay Carbonates France.....	70
6.1.5. Samin	70
6.1.6. Imerys.....	70
6.1.7. Autres	71
6.2. COMMERCE EXTERIEUR	71
6.3. EVOLUTION DES PRIX.....	75
7. Recyclage et développement durable.....	77
8. Conclusions et perspectives	79
9. Références.....	81

Liste des figures

Figure 1 : Les différents domaines de sédimentation des roches carbonatées d'origine sédimentaire.....	12
Figure 2 : Calcaires marins d'âge Barrémien (faciès Urgonien) de la calanque d'En-Vau (Bouches-du-Rhône).....	13
Figure 3 : Dolomies d'âge Bajocien à Callovien issues de la transformation de calcaires par la circulation de fluides (Cirque de Mourèze, Hérault).....	15
Figure 4 : Marbre du Dévonien d'origine métamorphique (Cirque de Troumouse, Pyrénées).	16
Figure 5 : Principales phases de traitement pour passer de la roche carbonatée aux produits.	18
Figure 6 : Carte géologique simplifiée de la France avec la localisation des gisements potentiels (exploités ou non) en roches carbonatées à usage industriel et agricole. Les symboles aux bordures en tiretés indiquent une aire géographique et non un point géographique précis (Source : BRGM).	23
Figure 7 : Carte des carrières actives en France, exploitants de roches carbonatées en 2015, à l'exception des carbonates pour un usage en cimenterie, non traitées dans ce mémento (Source : BRGM).	25
Figure 8 : Nombre de carrières autorisées classées par nature des substances exploitées (Source : BDCM).	26
Figure 9 : Production de carbonates par type de substances pour l'année 2015 (en tonnes). Source : BDCM.	26
Figure 10 : Nombre de carrières exploitant les carbonates entre 2015 et 2030.	27
Figure 11 : Productions autorisées des carrières de carbonates entre 2015 et 2030, sur la base des autorisations actuelles.	28
Figure 12 : Carte géologique du bassin carrier de Marquise (Source : BRGM).	29
Figure 13 : La carrière du Boulonnais est la plus grande carrière de France (Cliché : Pierre Thomas, ENS de Lyon).....	29
Figure 14 : Coupe de la série carbonatée du Boulonnais, exploitée en carrières (Vidier, 2014 et modifié d'après Vidier 2004).	30
Figure 15 : Fronts de taille de la carrière du Revoi (Meuse) exploitée par Novacarb (Cliché : http://www4.ac-nancy-metz.fr/base-geol/fiche.php?dossier=012&p=3descrip).	31
Figure 16 : Coupe géologique interprétative de la carrière du Revoi (simplifié d'après Lathuilière <i>et al.</i> , 2003 et Olivier <i>et al.</i> , 2004).	32
Figure 17 : Carte géologique du bassin carrier de Tautavel (Source : BRGM).	33
Figure 18 : Carte géologique du bassin carrier d'Orgon. Les calcaires à rudistes du Crétacé inférieur (Barrémien ou faciès « Urgonien ») sont exploités par la société OMYA (Source : BRGM).....	34
Figure 19 : L'usine d'OMYA avec en arrière-plan la carrière de calcaire d'Orgon (Cliché : OMYA).	34
Figure 20 : Carrière de marbre de Lez, Haute-Garonne (Cliché : OMG).	35
Figure 21 : Carte géologique du bassin carrier de la Marne (Source : BRGM).	36
Figure 22 : Carte géologique du bassin carrier de la Somme pour la craie phosphatée. Les niveaux à phosphates prennent place dans la craie blanche âgée du Santonien au Campanien (Source : BRGM).	37
Figure 23 : Carte géologique simplifiée de la Charnie et des Coëvrons où sont exploitées en carrière les dolomies du Cambrien (Source : BRGM).	38
Figure 24 : Carrière de dolomie de Jas-de-Rhodes exploitée par SAMIN pour un usage en verrerie, production autorisée de 200 kt/an (Cliché : SAMIN).	39

Figure 25 : Carte de localisation des indices et gîtes de magnésite/giobertite dans les Pyrénées (Source : BRGM). Eugui est un gîte présent dans les Pyrénées espagnoles, il ne sera donc pas traité ici.	40
Figure 26 : Carte de localisation des indices à magnésite du secteur de Saint-Michel (d'après Quemeneur, 1974).	42
Figure 27 : Abbattage à l'explosif dans une carrière à ciel ouvert de calcaire, Carrière de Saint-Germain-sur-Meuse (Cliché : Philippe Martin, Didier Zany).	46
Figure 28 : Carrière souterraine de calcaire dans le massif du Rie (31) (Cliché : OMG). Plus de 40 km de galeries réparties sur plusieurs niveaux permettent l'exploitation de la roche carbonatée.	46
Figure 29 : Classification des différents types de chaux.	51
Figure 30 : Utilisations des chaux produites en France en 2008, en pourcentage des volumes produits (Source : Union des producteurs de chaux).	57
Figure 31: Implantations des usines du groupe OMYA en France (Source: MEAC).	68
Figure 32 : Implantations de Provençale SA en France et en Espagne (Source : Provençale SA).	68
Figure 33 : Carrière de Candelon (Brignoles,Var) avec une production autorisée de 50 kt/an (Cliché : Provençale SA).	69

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les principaux minéraux carbonatés.	11
Tableau 2 : Nomenclature des marnes avec les proportions de carbonates et d'argiles.	13
Tableau 3 : Les roches et matériaux carbonatés utilisés dans l'industrie et l'agro-alimentaire en France.	17
Tableau 4 : Représentation simplifiée des usages des roches carbonatées en France par produits et filières (à l'exception des usages pour chaux et ciments, ne faisant pas l'objet de ce mémento)	20
Tableau 5 : Géologie des ressources en roches carbonatées à usage industriel et agricole en France (en lien avec la carte de la Figure 6).	22
Tableau 6 : Proportion de CaCO ₃ dans les peintures décoratives et industrielles (OMYA, 2012).	63
Tableau 7 : Proportion de CaCO ₃ dans les adhésifs et mastics (OMYA,2012).	63
Tableau 8 : Proportions des matières premières servant à la fabrication de verre d'emballage (Verallia, 2010).	65
Tableau 9 : Chiffres du commerce extérieur 2014-2016 des principaux produits carbonatés disponibles concernés par l'étude.	73

1. Introduction

La réactualisation du mémento sur les carbonates calciques et magnésiens a été menée dans le cadre de la Convention 2017 N° 2102186360, signée le 20 juillet 2017 entre la Direction de l'Eau et de la Biodiversité (DGALN/DEB) du Ministère de la Transition écologique et solidaire et le BRGM.

1.1. CONTEXTE DE L'ETUDE

Cette étude a été réalisée par l'unité Ressources Minérales de la Direction des Géoressources du BRGM, afin de réactualiser le précédent mémento (rapport BRGM RP-50806-FR) datant de 2000. Ce mémento permet de faire un état des lieux des carrières en activité, des utilisations et des marchés en France en 2016.

Ont également contribué à l'étude : E. Bouarouk et M. Thollon (stagiaires de l'Institut polytechnique La Salle-Beauvais au BRGM, projet Base de Données Carrières et Matériaux, en 2016) pour l'inventaire des carrières et sites d'extraction et de production de matériaux carbonatés et pour certaines utilisations des produits de transformation.

Les carbonates utilisés dans l'élaboration du ciment sont exclus de cette étude. Il s'agit en effet d'une filière à part entière, avec un certain nombre des spécificités techniques, et faisant appel à l'utilisation de plusieurs ressources primaires (calcaire, argile, gypse) dépassant le cadre de cette étude. Un mémento spécifique est donc nécessaire pour analyser de manière indépendante la filière ciment et mettre en évidence l'importance de cette matière première dans l'économie française. En France, 32 cimenteries et 11 centres de broyage produisent du clinker, pour une production totale de 28 Mt de ciment par an.

1.2. SOURCE DES DONNEES

Ce rapport a été élaboré à partir de la documentation et des sources suivantes :

- documentation technique et scientifique du BRGM, dont les cartes géologiques, les anciens mémentos, les rapports sur les gisements français (recherches, inventaires ou expertises), et ceux concernant les traitements des matériaux, les utilisations, les marchés ;
- les informations de la Base de Données Carrières et Matériaux du BRGM (BDCM), qui est alimentée en permanence selon les nouvelles informations recueillies ;
- les statistiques douanières du commerce extérieur concernant les matériaux carbonatés et certains produits industriels.

Par ailleurs, ont été intégrées les informations disponibles sur les sites Internet des nombreuses entreprises concernées (sociétés productrices, utilisatrices ou transformant les carbonates), sur les sites des syndicats professionnels, ainsi que ceux d'organismes scientifiques. Cependant, malgré l'utilisation de l'ensemble des sources d'information disponibles, cette étude n'est pas en mesure de garantir l'exhaustivité ni l'exactitude absolue des données collectées.

2. Définitions

2.1. SUBSTANCES : MINÉRAUX, ROCHES ET MATÉRIAUX CARBONATÉS

2.1.1. Minéraux carbonatés

Les minéraux carbonatés entrant dans la composition des roches carbonatées, cristallisent presque tous dans le système rhomboédrique, parfois orthorhombique, associant l'anion CO_3^{2-} à un ou des cations métalliques. Les minéraux considérés dans ce mémento sont les minéraux les plus communs des carbonates anhydres à métaux bivalents. Ces minéraux sont à cations soit monométalliques, soit polymétalliques. Dans ce dernier cas, leur composition peut être variable, liée aux nombreuses substitutions dans le réseau cristallin, où Ca est souvent remplacé par Mg, Fe ou encore Mn, voire Sr et Ba.

Les principales familles de minéraux carbonatés sont la calcite, la dolomite et l'aragonite (Tableau 1). La calcite et la dolomite sont les minéraux les plus abondants et constituent plus de 90 % des minéraux carbonatés.

	Dénomination	Formule	Système cristallin	Dureté	Densité	Solubilité
Famille de la calcite	Calcite	CaCO_3	Rhomboédrique	3	2,6-2,8	Rapide avec l'HCl à froid
	Magnésite/Giobertite	MgCO_3		4-4,5	3	Lente à l'HCl
	Sidérite	FeCO_3		4-4,5	3,7-3,9	Lente à l'HCl et l'eau
Famille de la dolomite	Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$		3,5-4	2,8	Acides (pas à l'HCl)
	Ankérinite	$\text{CaFe}(\text{CO}_3)_2$		3,5-4	2,9-3,1	Acides
Famille de l'aragonite	Aragonite	CaCO_3	Orthorhombique	3,5-4	2,9-3	Dilution par l'HCl
	Cérusite	PbCO_3		3-3,5	-	Acide nitrique

Tableau 1 : Les principaux minéraux carbonatés.

2.1.2. Roches carbonatées

Les roches constituées de minéraux carbonatés sont mono ou polyminérales et sont qualifiées de roches carbonatées lorsqu'elles contiennent plus de 50 % de ces minéraux.

Les roches carbonatées représentent environ 20 % des roches sédimentaires à la surface des continents. L'essentiel des roches carbonatées sont d'origine sédimentaire et sont spatialement associées aux domaines continentaux et de plate-forme continentale, entre le lacustre et le marin franc (Figure 1). Les principales roches carbonatées d'origine sédimentaire sont le calcaire (CaCO_3), la dolomie ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), la craie (constituée de squelettes d'organismes calciques), les marnes (calcaires comprenant une proportion variable d'argiles).

Les classifications des roches carbonatées habituellement utilisées sont celles de Folk (1959) et Dunham (1961) mais ne font pas l'objet de ce présent mémento. La classification de Folk prend en compte la nature du ciment (micrite, sparite, rudite, etc.) et des éléments (intraclastes, bioclastes, pellets, oolithes, etc.), et leur proportion relative. La classification de Dunham insiste sur la texture ou liaison des constituants entre eux (ex. boundstone récifal, grainstone oolithique, wackestone à bioclastes, mudstone, etc.) et établit un lien avec l'environnement de dépôt des calcaires lors de leur formation précoce.

Les roches carbonatées d'origine primaire non sédimentaires sont plus rares et sont issues de processus magmatiques (carbonatite à calcite et dolomite), hydrothermaux (filon à calcite,

dolomite, ankérite, sidérite, cérusite) et du métamorphique régional ou de contact (marbre, dolomie secondaire).

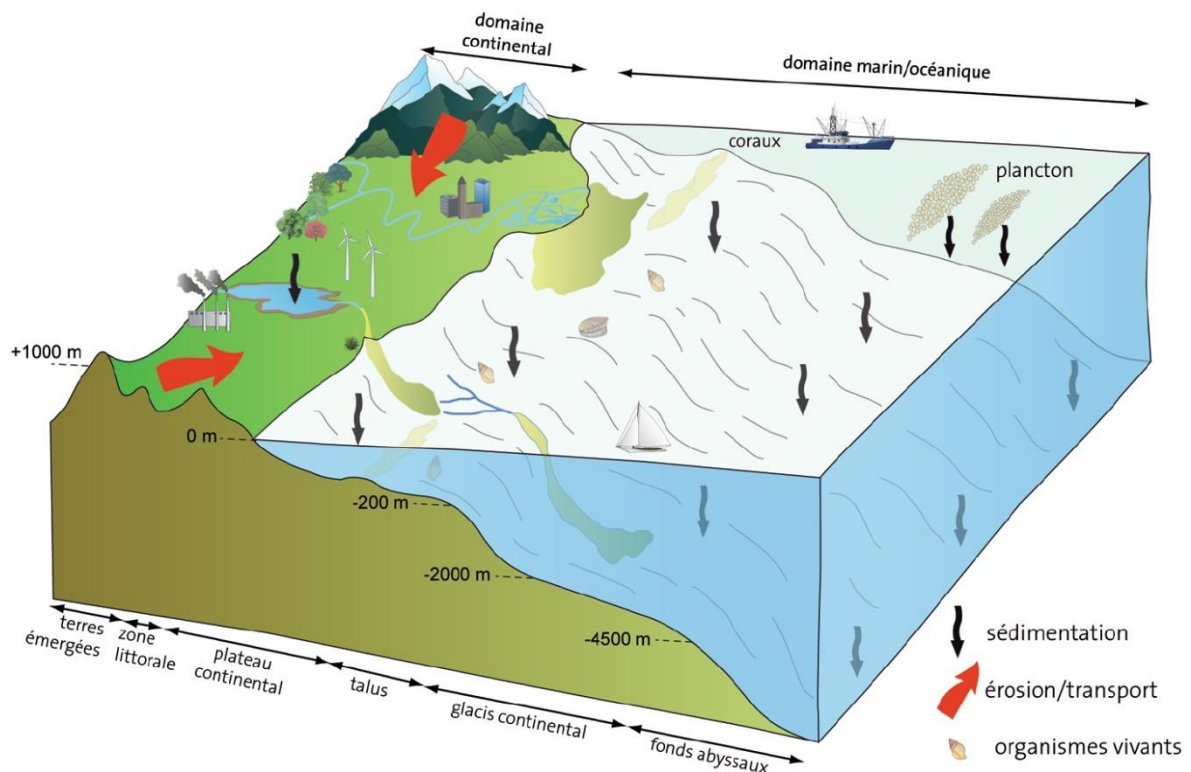


Figure 1 : Les différents domaines de sédimentation des roches carbonatées d'origine sédimentaire.

Les roches carbonatées d'origine sédimentaire

Les roches carbonatées d'origine sédimentaire se forment dans des bassins sédimentaires dans une tranche d'eau comprise entre quelques mètres et la limite inférieure de fabrication des carbonates située à 200-250 m. La plate-forme continentale constitue le principal domaine marin de dépôt des roches carbonatées même si l'importance relative de la sédimentation continentale lacustre à certaines époques géologiques fournit aussi de beaux gisements. Ces roches peuvent être d'origine organique ou biochimique et physico-chimique ou détritique.

- **Les roches carbonatées organiques** sont constituées des tests (aragonite-calcite) d'organismes vivants marins ou lacustres, tels que les polypiers, rudistes, crinoïdes, lamellibranches, gastéropodes, brachiopodes, bryozoaires, foraminifères, algues unicellulaires, etc. Sont distingués les calcaires construits (à stromatolithes, récifs coralliaires, encroûtements d'algues, etc.) des calcaires d'accumulation de tests entiers (lumachelles) et/ou fragmentés, soumis à la dynamique sédimentaire marine, fluvio-marine ou lacustre.

La craie résulte ainsi de l'accumulation très importante en mer ouverte et peu profonde (domaine néritique) de tests calcaires de végétaux unicellulaires marins, les Coccolithophoridés (les coccolithes ont une taille comprise entre quelques microns à une vingtaine de microns), auxquels s'ajoutent des foraminifères et ostracodes planctoniques, des spicules de spongiaires, et des débris d'organismes divers tels que les bryozoaires, mollusques, échinides, etc. La craie peut aussi renfermer des éléments détritiques comme la glauconie (silicate de fer apparenté aux argiles qui témoigne d'une bathymétrie élevée >200 m).

Le maërl résulte de l'accumulation littorale des squelettes calcaires d'une algue coralliaire, *Lithothamnium calcareum*. Le maërl n'est plus exploité sur le territoire français depuis 2013 (Cf. loi n° 2009-967 dite Grenelle 1). Il n'est pas traité dans ce rapport.

- **Les roches carbonatées biochimiques et physico-chimiques** sont formées par la précipitation du carbonate de calcium et/ou de magnésium dissous dans l'eau de mer ou dans les eaux saumâtres à douces (Figure 2).

Les calcaires oolithiques sont un parfait exemple de ce type de roche formée en domaine marin dit de « barrière » à haute dynamique sédimentaire. Il s'agit d'un ensemble d'éléments sphériques (oolithe si $<0,2$ mm, ou pisolithe si $>0,2$ mm) issus pour chacun d'entre eux de l'accumulation concentrique d'enveloppes calcaires autour d'un noyau préexistant.

Les marnes sont des calcaires comprenant une proportion variable d'argiles (Tableau 2). Elles peuvent avoir pour origine une précipitation chimique et/ou une accumulation de squelettes de micro-organismes. Tendres, poreuses, friables (sèches), plastiques lorsqu'elles sont mouillées (partie argileuse), les marnes font effervescence aux acides (partie calcaire). De nombreuses variétés de marnes existent : magnésiennes, micacées, gypseuses, marnes bleues, blanches, noires, dolomitiques, etc. Les marnes sont utilisées pour l'amendement des sols et la fabrication du ciment.

	Carbonates	Argiles
Calcaires	90 à 95 %	0 à 5 %
Calcaires argileux	65 à 95 %	5 à 35 %
Marnes	35 à 65 %	35 à 65 %
Argiles calcaires	5 à 35 %	65 à 95 %

Tableau 2 : Nomenclature des marnes avec les proportions de carbonates et d'argiles.



Figure 2 : Calcaires marins d'âge Barrémien (faciès Urgonien) de la calanque d'En-Vau (Bouches-du-Rhône).

La précipitation de calcite en milieu supratidal évaporitique n'est pas rare, mais ses produits sont dépourvus des qualités habituellement recherchées. Il en va de même pour la précipitation de dolomite en milieu évaporitique conduisant à la formation de la dolomie primaire, une roche dont le gisement est globalement peu abondant avec des lits très peu épais et contenant des impuretés (argiles, sels). Au cours de la diagenèse, dans des conditions marines chaudes, un phénomène d'épigénisation des roches calcaires peut conduire à la formation de dolomie secondaire par la substitution du calcium par le magnésium disponible dans l'eau de mer.

La précipitation de sels magnésiens saturés en milieu évaporitique et qui résulterait d'une réaction de double décomposition entre du sulfate de magnésium et du carbonate de sodium peut donner naissance à de la magnésite ou giobertite. Ce type de gisement est rare. Une giobertite amorphe riche en Fe^{2+} peut aussi provenir de l'altération par des eaux riches en CO_2 de silicates magnésiens (péridotites, serpentines).

La précipitation de $CaCO_3$ en milieu continental et d'importance économique faible peut se faire (1) à partir d'eaux thermales sous la forme de tufs et de travertins, (2) par dissolution-recristallisation dans les cavités : stalagmites, stalactites (calcite, parfois aragonite) ou dans le cas des paragenèses d'altération supergène (aragonite), (3) par altération des laves (aragonite fibreuse).

- **Les calcaires détritiques** sont formés par l'accumulation d'éléments biodétritiques (tests cassés) et lithiques dans les différents types d'environnement dynamique cités précédemment. Existente (1) les éléments remaniés pénécontemporains ou fraîchement déposés du proche environnement sédimentaire du carbonate détritique en question, c'est-à-dire les intraclastes (auto-bréchifications) et les extraclastes (sédiments remaniés allochtones à l'échelle considérée) ; (2) les éléments terrigènes (origine par érosion continentale), tels que le quartz et les feldspaths détritiques, les roches métamorphiques, les minéraux lourds. Les marnes peuvent posséder une fraction détritique.
- **D'autres phases minérales** sont fréquemment mélangées aux calcaires, qui dépassent rarement 95 % de $CaCO_3$, et aux dolomies, pour constituer des calcaires composites ou d'origine complexe à partir d'une certaine abondance, les calcaires marneux (avec argile), les calcaires phosphatés, les calcaires sapropéliens (riche en matière organique). Ces phases minérales associées aux carbonates sont (1) les argiles intimement liées à la texture ou concentrées, (2) la glauconie (silicate de fer apparenté aux argiles qui témoigne d'une bathymétrie élevée >200 m), (3) la matière organique diffuse ou concentrée, (4) la silice d'origine organique et/ou terrigène propre diagénétique dans l'exemple des cherts et silex, (5) les sulfures et/ou oxydes formés *in situ* et non détritiques.

Ainsi, peut être soulignée la variabilité de constitution des roches carbonatées (calcaires, marnes, dolomies) d'origine marine ou lacustre dans l'espace et dans le temps. Le milieu dans lequel se forment ces roches est « vivant » (marées, courants, topographie variée) et va mouler des corps sédimentaires de tailles variables aux limites plus ou moins nettes. Le milieu de sédimentation est changeant en fonction de l'espace (transgression-régression marine) et dans le temps (mouvements épirogéniques, érosion, climat, composition de l'atmosphère terrestre). La diagenèse (transformation du sédiment meuble en roche dure) est aussi un phénomène variable qui induit des changements fondamentaux sur les liaisons entre les constituants compactés du sédiment, sur le ciment, sur d'éventuelles recristallisations et néocristallisations, ainsi que sur la porosité résiduelle. Enfin, le phénomène d'épigénèse est également variable.

Les roches carbonatées d'origine non sédimentaire

- **Les roches d'origine hydrothermale** telles que les gangues filoniennes peuvent contenir des minéraux carbonatés tels que la calcite, la dolomite, l'ankérite, la sidérite dans des paragenèses généralement de basse à moyenne température, parfois de haute température. La dolomie secondaire peut aussi se former par la circulation de fluides hydrothermaux au sein d'un massif calcaire, mais avec une dolomitisation irrégulière et discontinue (Figure 3). Les volumes affectés sont plus importants mais la transformation est souvent plus ou moins complète (faciès de dolomies calcaires à calcaires dolomitiques). La magnésite (également appelée giobertite qui est synonyme) peut se former par l'action hydrothermale de solutions bicarbonatées magnésiennes sur des roches dolomitiques. Les cations Mg^{2+} vont se substituer en totalité aux cations Ca^{2+} pour former des masses cristallines dans lesquelles les cations Fe^{2+} sont aussi présents et bien représentés, mais le remplacement est lenticulaire et incomplet.



Figure 3 : Dolomies d'âge Bajocien à Callovien issues de la transformation de calcaires par la circulation de fluides (Cirque de Mourèze, Hérault).

- **Les roches magmatiques alcalines** contenant de la calcite et/ou de la dolomite. Il s'agit des carbonatites qui résultent de la cristallisation de magmas enrichis en calcium sous l'action de CO_2 d'origine sub-crustale. Il n'existe aucun gisement de carbonatite en France.

- **Les roches métamorphiques** issues d'un métamorphisme régional ou de contact. Lors d'un épisode de métamorphisme de contact, des roches calcaires préexistantes peuvent subir des transformations physico-chimiques sous l'effet d'une élévation importante de température (>200-300 °C) et de pression, à proximité d'une intrusion magmatique se mettant en place. Les roches calcaires se transforment alors en marbre (Figure 4).



Figure 4 : Marbre du Dévonien d'origine métamorphique (Cirque de Troumouse, Pyrénées).

Lors de phases orogéniques majeures, les roches calcaires ou dolomitiques préexistantes sont intimement transformées par un métamorphisme régional contemporain. La calcite des calcaires ou la dolomite des dolomies sont recristallisées amenant à la formation de marbre. Cette transformation se traduit généralement par une épuration de la roche d'origine ou par la concentration d'éléments non-carbonatés dans les minéraux néoformés.

2.1.3. Matériaux carbonatés

Le terme de matériaux carbonatés fait référence aux substances (avant transformation) utilisées dans l'industrie et l'agro-alimentaire. Le classement est le suivant (Tableau 3).

Matériaux carbonatés	Formation	Origine(s)
Calcaire	Peuvent être construits (stromatolithes, récifs coralliens, encroûtements d'algues, etc.), massifs, lités, à accumulation de tests entiers (lumachelles) ou fragmentés par la dynamique marine, oolithiques, lacustre, de précipitation (stalactites et stalagmites), etc.	Organique, biochimique/physico-chimique, détritique
Marbre	Calcaires ayant subi un métamorphisme à pression/température plus ou moins importantes et se traduisant notamment par une recristallisation de la calcite. Il est souvent plus pur que le calcaire.	Métamorphique
Craie	Roche formée par l'accumulation massive de Coccolithophoridés.	Organique
Marne	Calcaires ayant une part importante d'argiles dans sa composition.	Chimique, organique, détritique
Dolomie	Dolomie primaire : accumulation de fins cristaux de dolomite dans l'eau en milieu évaporitique ou dans les lacs donnant des gisements peu importants ou des croûtes dans les régions arides. La dolomie primaire est rare.	Physico-chimique
	Dolomie secondaire : formée soit par l'apport de fluides magnésiens substituant les ions Ca^{2+} contenus dans les roches calcaires par les ions Mg^{2+} en milieu marin chaud ; soit après la diagenèse par apport de Mg^{2+} par des fluides hydrothermaux. Elle devient friable par action météorique.	Épigénisation (diagenèse). Hydrothermale
Magnésite/Giobertite	Dolomies ayant subi un remplacement total de ses ions Ca^{2+} par des ions Mg^{2+} lors d'épigénisation ou d'hydrothermalisme.	Épigénisation (diagenèse)
	Altération par des eaux riches en CO_2 des silicates magnésiens de roches basiques (péridotites, serpentines).	Altération
	Par précipitation de giobertite en milieu évaporitique (très rare).	Physico-chimique

Tableau 3 : Les roches et matériaux carbonatés utilisés dans l'industrie et l'agro-alimentaire en France.

2.2. RESSOURCES / RESERVES

En France, les gisements de roches carbonatées à potentiel économique industriel concernent essentiellement les calcaires, les dolomies, les craies, les marnes et les marbres.

Ressources géologiques en roches et matériaux carbonatés : gisement dont l'extension et le volume sont connus dans leur ensemble, et ont pu faire l'objet d'une première estimation, avec prospection en surface, reconnaissance par sondages, petits travaux d'extraction, etc. Les ressources géologiques en calcaire, dolomie, craie, marne, et marbre sont importantes en France, mais sont souvent soumises à des contraintes de différentes natures (environnement, occupations agricoles ou urbaines, AEP, usages divers, etc.).

Reserves de roches et matériaux carbonatés : il s'agit de la partie de la ressource géologique accessible, dont l'exploitabilité technico-économique est démontrée, après une reconnaissance détaillée et des études techniques et économiques de faisabilité, dans un contexte réglementaire et environnemental non réhivitoire.

2.3. PRODUITS ET FILIERES

2.3.1. Produits

Après extraction, les matériaux carbonatés subissent plusieurs transformations aboutissant à l'obtention de produits commercialisables sous formes de divers oxydes et hydroxydes de calcium et de magnésium aux propriétés physico-chimiques spécifiques. La Figure 5 résume ces différentes phases de traitement, pour passer de la roche carbonatée naturelle à des matériaux carbonatés bruts, puis aux trois grands types de produits : cuits, frittés et fondus.

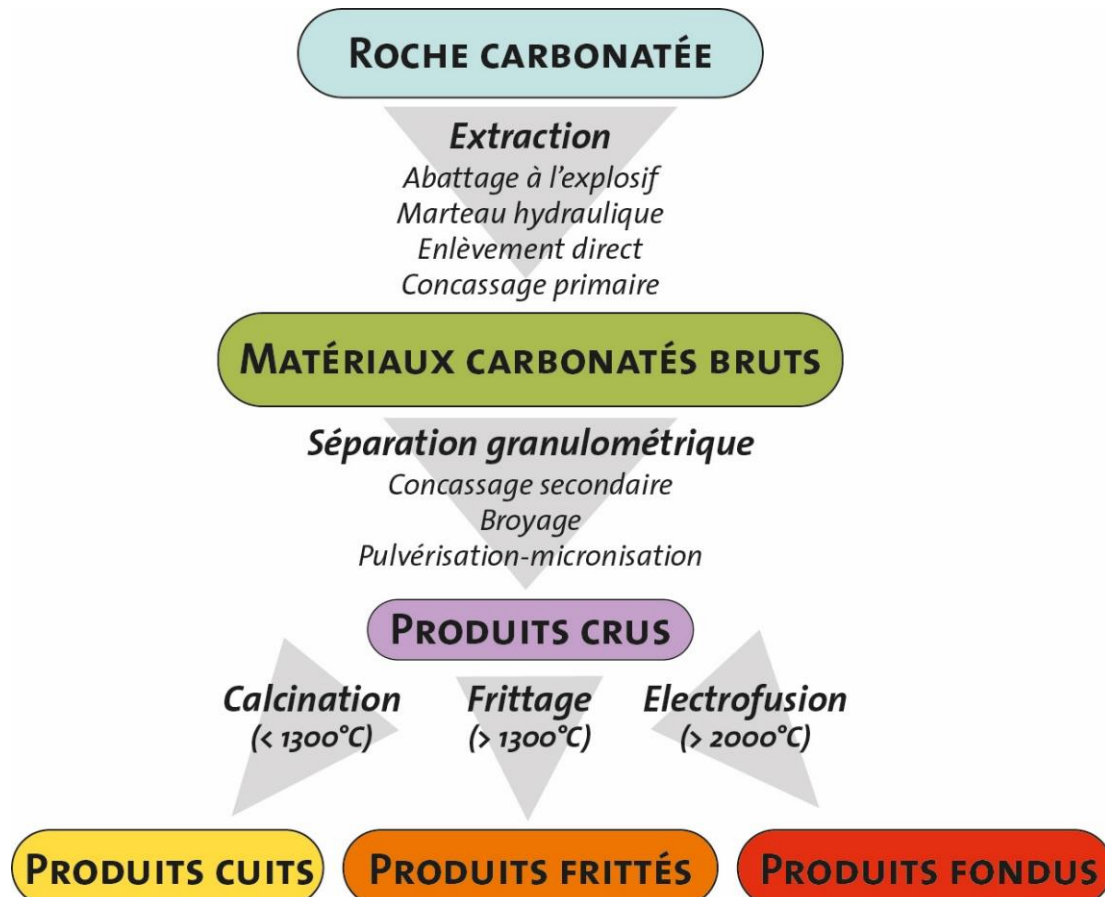


Figure 5 : Principales phases de traitement pour passer de la roche carbonatée aux produits.

On distingue ainsi les différents produits par nature :

produits bruts : roche extraite dans les carrières sans y avoir subi d'intervention mécanique excepté lors de l'extraction où elle a pu être fragmentée ;

produits crus : roche obtenue après une intervention mécanique telle que le concassage ou le broyage ;

produits cuits, frittés ou fondus : selon leur utilisation, les produits crus subissent une cuisson à des températures plus ou moins élevées aboutissant à des oxydes et hydroxydes de calcium et de magnésium utilisés dans diverses applications. On distingue :

- les produits cuits, dont la chaux, obtenus par calcination en four ($800 < T^{\circ}\text{C} < 1250$),

- les produits frittés obtenus par frittage ($1\ 300 < T^{\circ}\text{C} < 2\ 000$). Le processus provoque la fusion partielle des éléments de carbonates donnant un aspect aggloméré,
- les produits fondus obtenus par électrofusion ($T^{\circ}\text{C} > 2\ 000$).

Une autre distinction concerne la granulométrie et la finalité des produits :

- **castines** : éléments de carbonates crus concassés puis broyés à des tailles diverses utilisés en sidérurgie et dans la verrerie ;
- **charges** : calcaires blancs/purs ou dolomie de haute qualité, réduits très finement en poudre ($< 80\ \mu\text{m}$) par micronisation et utilisés pour le papier, le plastique, la peinture, la pharmacie, etc. Ces charges peuvent être inertes (elles substituent les substances principales sans diminuer drastiquement la qualité du produit) ou fonctionnelles (bonifient et apportent des propriétés supplémentaires aux produits telles que la couleur, la viscosité, l'isolation thermique, etc.). Elles sont également différenciables selon leur qualité. Ainsi, les charges communes sont de moindre qualité que les charges blanches qui sont fabriquées à partir des calcaires ou dolomies les plus purs et utilisées en particulier en pharmacie ou pour l'alimentation humaine ;
- **fillers** : poudres de dimension inférieure à $80\ \mu\text{m}$ et à haute teneur en CaCO_3 utilisées pour les enrobés routiers bitumineux et pour les revêtements étanches. Ils permettent de réduire les vides intergranulaires et d'améliorer le comportement des éléments au frottement ;
- **poudres** : granulats finement broyés utilisés entre autres pour l'amendement et l'alimentation animale.

2.3.2. Filières

Du point de vue économique, le concept de filière fait référence à une succession d'opérations concourant d'amont en aval, à la réalisation d'un produit fini ou d'un service. Chaque filière constitue une chaîne d'activités qui se complètent, liées entre elles par des opérations d'achats et de ventes et représentées par un certain nombre d'acteurs depuis l'extraction de matières premières et leur transformation, en amont, jusqu'à la distribution et aux services liés au produit, en aval. Le Tableau 4 synthétise les différents usages possibles des produits carbonatés en fonction du matériau en distinguant trois filières: l'industrie (charges minérales, sidérurgie, verrerie, etc.), l'agro-alimentaire (amendement, alimentation), et le BTP (enrobés routiers, viabilisation).

		Industrie			Agro-alimentaire		BTP
Filières		Castine	Poudres	Charges	Poudres	Charges	Fillers
Produits							
Type de matériaux carbonatés	Calcaires, craie et marbre	Sidérurgie, fonderie	Industries chimiques	Papier, Carton	Amendement	Alimentation humaine	Viabilisation
		Verrerie	Métallurgie non ferreuse	Peinture	Alimentation animale	Pharmacie et cosmétique	Enrobés routiers bitumineux
			Néocéramiques	Plastiques, caoutchoucs			Revêtements étanches
			Epaississement de boues	Mastics, enduits, adhésifs	Insecticides, pesticides		
	Dolomie	Réfractaires	Réfractaires	Peinture	Amendement	Pharmacie et cosmétique	Viabilisation
		Sidérurgie	Industries chimiques	Mastics, enduits, adhésifs	Fertilisants		Enrobés routiers bitumineux
			Verrerie	Plastiques, caoutchoucs	Alimentation animale		Revêtements étanches
			Métallurgie				
			Céramiques et Néocéramiques				
	Giobertite/ Magnésite	Réfractaires, Verrerie	Réfractaires	Caoutchoucs	Amendement	Pharmacie et cosmétique	

Tableau 4 : Représentation simplifiée des usages des roches carbonatées en France par produits et filières (à l'exception des usages pour ciment, ne faisant pas l'objet de ce mémento).

3. Géologie des carbonates en France

Les calcaires, craies, marnes et dans une moindre mesure les marbres sont des roches très répandues en France. Les dolomies plus ou moins pures sont présentes dans bon nombre de formations carbonatées, mais la magnésite est, elle, beaucoup plus rare. Ces roches présentent ainsi une grande variété de composition et d'aspect associé à des gisements d'une grande diversité en termes de situation géographique, d'âge et de contexte géologique.

Les roches carbonatées affleurent ou sub-affleurent dans les grands bassins sédimentaires français (Bassin Parisien, Bassin d'Aquitaine, Bassin du Sud-Est) et dans les zones orogéniques récentes (Alpes, Pyrénées, Jura). Elles sont en revanche quasi inexistantes dans les massifs anciens (Massif Central, Massif Armoricaire, Corse, Vosges, Maures).

Les formations géologiques renfermant des roches carbonatées couvrent une large période géologique (Tableau 5 et Figure 6) :

- Paléozoïque :
 - les roches carbonatées du Cambro-Silurien (-540 à -420 Ma) sont peu abondantes et principalement localisées dans les Pyrénées, en Montagne Noire, et dans le Massif Armoricaire. À noter que les roches carbonatées du Cambrien inférieur (-540 à -510 Ma) sont très souvent métamorphosées localement et donnent des marbres ;
 - les roches carbonatées du Dévonien (-420 à -360 Ma) et du Carbonifère inférieur (-360 à -330 Ma) peuvent présenter une grande extension géographique dans les Pyrénées et dans les Ardennes où elles sont souvent elles-aussi métamorphosées en marbres. Ces roches affleurent aussi dans le Boulonnais. Leur milieu de dépôt correspond généralement à un domaine récifal à périrécifal ;
 - les roches carbonatées du Carbonifère supérieur (-330 à -300 Ma) sont assez rares sur le territoire national ;
- Mésozoïque et Cénozoïque :
 - les roches carbonatées du Trias sont assez rares et se localisent dans l'est et le sud-est de la France (ex. Lorraine, Vosges, Alsace, Var). Certains niveaux triasiques du Pays Basque renferment des indices de magnésite ;
 - les roches carbonatées du Jurassique au Miocène (-200 à -5 Ma) constituent les ressources les plus importantes en France. Il s'agit essentiellement de formations sédimentaires épaisses et d'origine marine d'âge Jurassique (Provence, Jura, Quercy-Périgord, Grands Causses, Pyrénées, Lorraine, Morvan, Boulonnais), Crétacé (Nord, Champagne, Lorraine, Pyrénées, sillon rhodanien, Provence, Normandie), Éocène et Miocène (Picardie, Bas-Languedoc, Bassin d'Aquitaine), mais existent aussi des formations lacustres d'âge Éocène et Miocène (ex. Beauce).

Roche	Âge(s)	Localisation(s)
<i>Calcaire</i>	Jurassique ¹ , Crétacé ² , Éocène ³ , Miocène ⁴	¹ Boulonnais, ² Bassin parisien, Jura, Périgord-Quercy, Grands Causses, Pyrénées ; ³ Bas Languedoc, Alpilles ; ²⁺³ Provence (Aix-Marseille), Alpes-Maritimes (Nice), Pyrénées ; ⁴ Picardie, Bassin d'Aquitaine ; ⁵ Beauce, Bassin d'Aquitaine.
<i>Marbre</i>	Dévonien ¹ , Jurassique ² , Crétacé ²	¹ Pyrénées (Saint-Béat, Haute-Garonne), Montagne Noire; ² Pyrénées (Saint-Béat), Provence (Var), Corbières (Tautavel).
<i>Craie</i>	Crétacé supérieur (Cénomanien au Campanien). Faciès les plus purs du Coniacien.	Bassin parisien (Picardie, Champagne, Normandie).
<i>Marne</i>	Jurassique, Crétacé	Bassin parisien (Berry, Touraine, Picardie, Normandie).
<i>Dolomie</i>	Cambrien ¹ , Carbonifère ² , Jurassique ³ , Crétacé ⁴ , Éocène ⁵ plus accessoirement.	¹ Massif armoricain, Montagne Noire, Pyrénées ; ² Boulonnais, Pyrénées ; ³ Grands Causses, Bassin d'Aquitaine, Provence (Estaque), Alpes-Maritimes (Antibes-Tourette/Loup) ; ⁴ Pyrénées (haute vallée de l'Aude), ⁵ Bassin parisien, Bassin d'Aquitaine.
<i>Magnésite/Giobertite</i>	Paléozoïque (roches ultrabasiques hercyniennes) ¹ , Cambrien ² , Trias ³	¹ Corse (Biguglia) ; ¹ Massif armoricain (La Chapelle-Neuve, Kerméno). Pyrénées (² Pyrénées-Orientales à Montner, ³ Pyrénées-Atlantiques à Urepel, Saint-Michel, Sainte-Engrâce, Larrau) ;

Tableau 5 : Géologie des ressources en roches carbonatées à usage industriel et agricole en France (en lien avec la carte de la Figure 6).

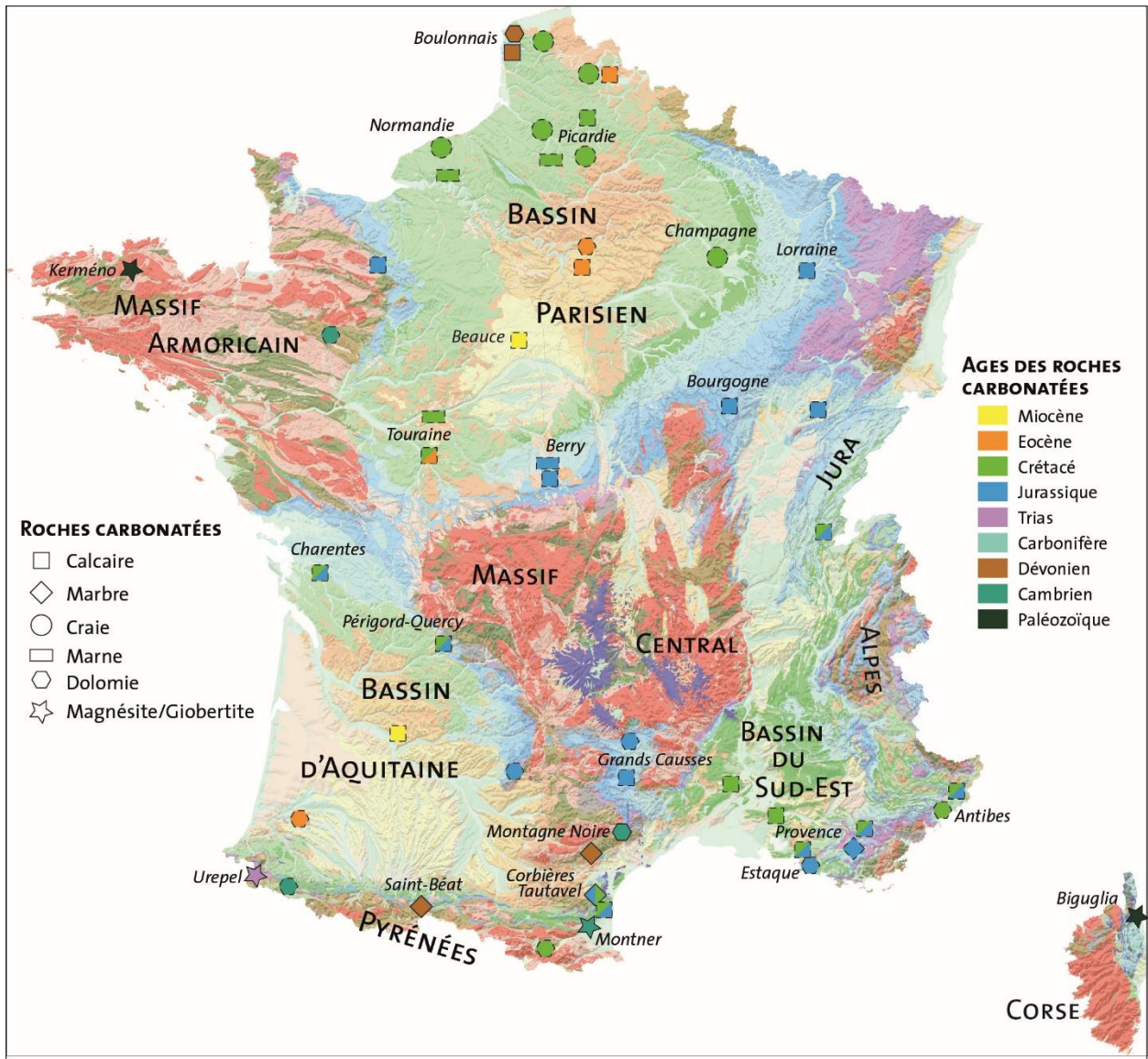


Figure 6 : Carte géologique simplifiée de la France avec la localisation des gisements potentiels (exploités ou non) en roches carbonatées à usage industriel et agricole. Les symboles aux bordures en tiretés indiquent une aire géographique et non un point géographique précis (Source : BRGM).

4. L'activité extractive des carbonates en France

4.1. LOCALISATION DES CARRIÈRES ACTIVES

Les carrières actives qui extraient des carbonates sont réparties sur l'ensemble du territoire national comme le montre la carte de la Figure 7, illustrant également certaines régionalisations par nature des roches carbonatées.

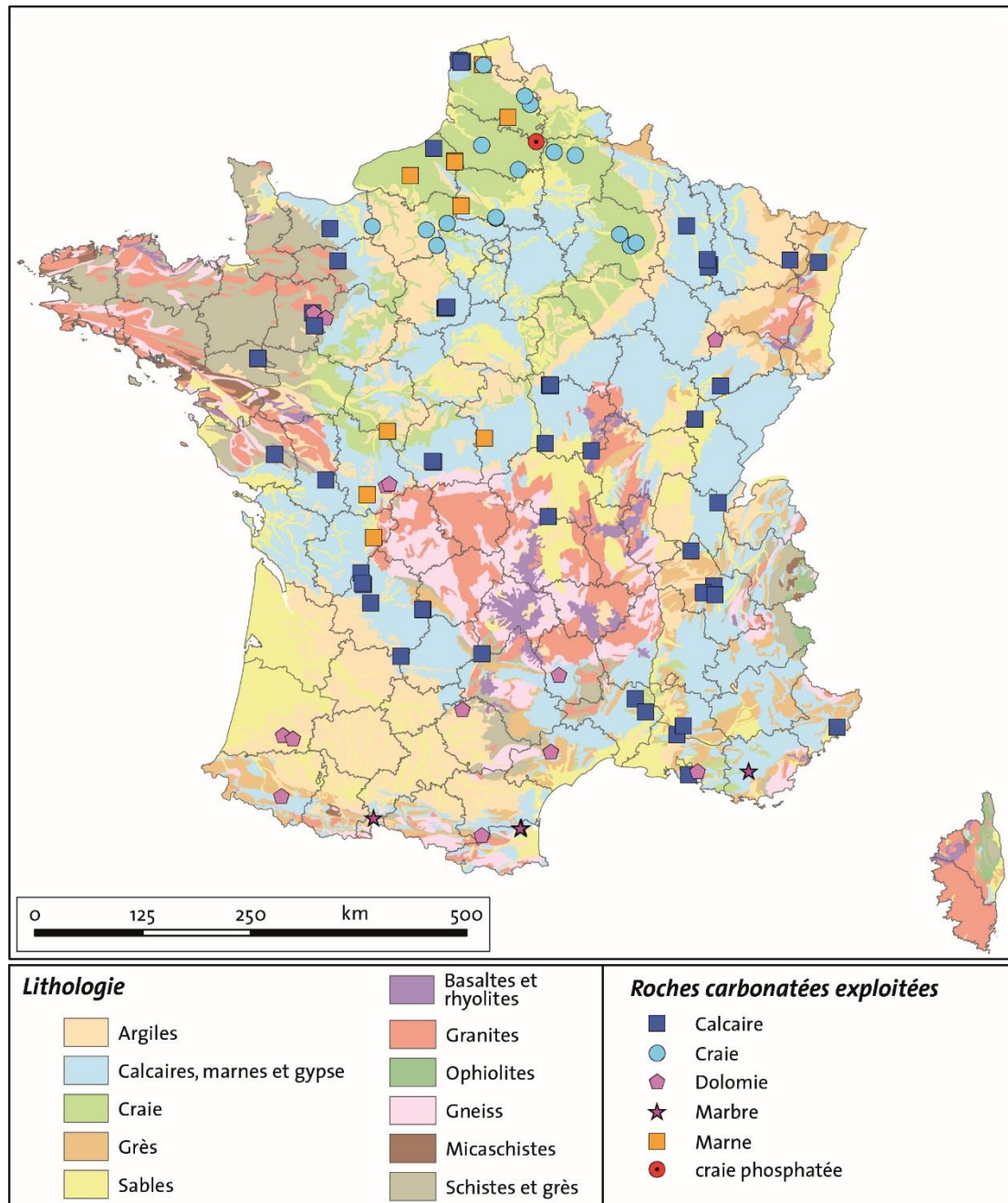


Figure 7 : Carte des carrières actives en France, exploitants de roches carbonatées en 2015, à l'exception des carbonates pour un usage en cimenterie, non traitées dans ce mémento (Source : BRGM).

4.2. STATISTIQUES DES CARRIERES

En 2015, 87 carrières exploitent les carbonates en France hors usages cimentiers. Plus de la moitié des carrières exploitent des calcaires (47). Pour le reste, ce sont des carrières de craie (15), de dolomie (12), de marne (8), de marbre (4) et de craie phosphatée (1) (Figure 8).

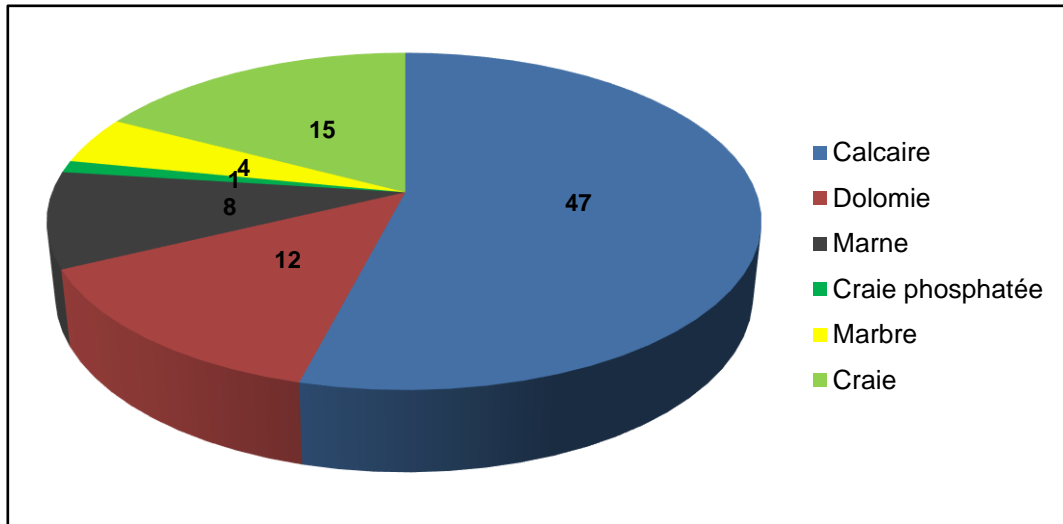


Figure 8 : Nombre de carrières autorisées classées par nature des substances exploitées (Source : BDCM).

L'ensemble des carrières montre une production moyenne de 24,3 Mt pour l'année 2015, avec plus de 80% dédiés aux calcaires (Figure 9). La production totale autorisée est de 37,3 Mt.

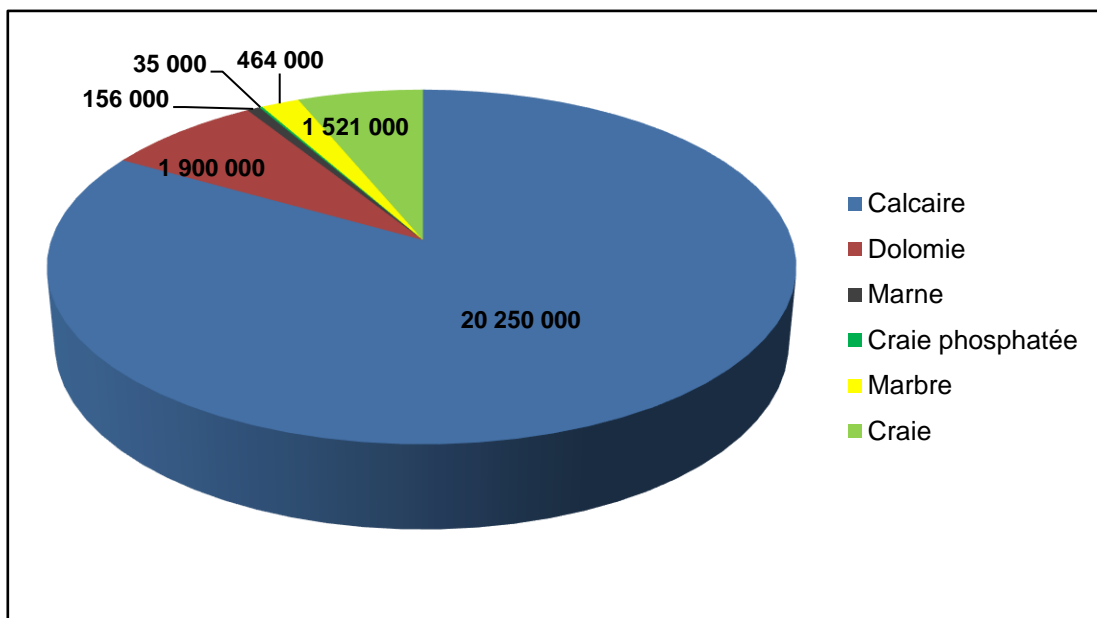


Figure 9 : Production de carbonates par type de substances pour l'année 2015 (en tonnes). Source : BDCM.

4.3. RESSOURCES ET RESERVES PLAFONNEES

La diversité géologique de la France permet l'exploitation de roches carbonatées variées sur l'ensemble du territoire métropolitain¹. Cependant, les réserves des 87 carrières en activité en 2015 n'ont pas été fournies par les industriels.

Sur la base des autorisations d'exploitation actuelles (sans tenir compte des renouvellements et nouvelles ouvertures de carrières), il apparaît qu'en 2030, seules 46 de ces carrières pourraient être encore en activité (Figure 10).

Il est entendu qu'un exploitant implantant une usine de transformation minérale est à priori conscient du potentiel de renouvellement de ses gisements et soucieux de la pérennisation de ses approvisionnements dans le temps. Néanmoins, au regard de ces chiffres, la question du renouvellement d'autorisations et d'ouvertures de nouvelles carrières de carbonates semble incontournable à l'horizon 2030, faute de quoi la production pourrait chuter aux environs de 15 Mt (Figure 11).

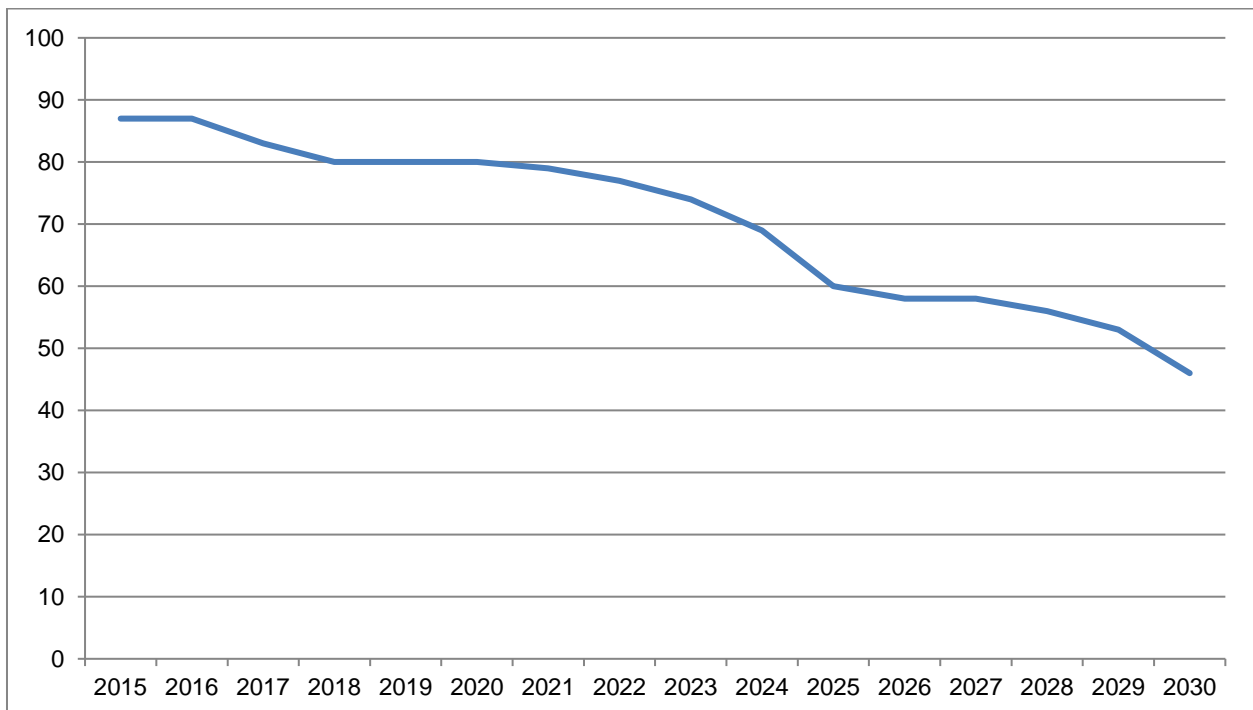


Figure 10 : Nombre de carrières exploitant les carbonates entre 2015 et 2030.

Il reste en France de vastes étendues non exploitées à ce jour qui peuvent encore permettre d'accueillir des carrières de carbonates pour un usage industriel. Un degré d'anticipation suffisant est toutefois nécessaire, du fait des délais créés par les nombreuses contraintes réglementaires, environnementales et sociétales. La Figure 11 montre de façon indicative l'évolution des tonnages autorisés à l'horizon 2030 sans renouvellement d'autorisation.

¹ Il n'y a pas de carrières exploitant des carbonates pour un usage industriel dans les DOM.

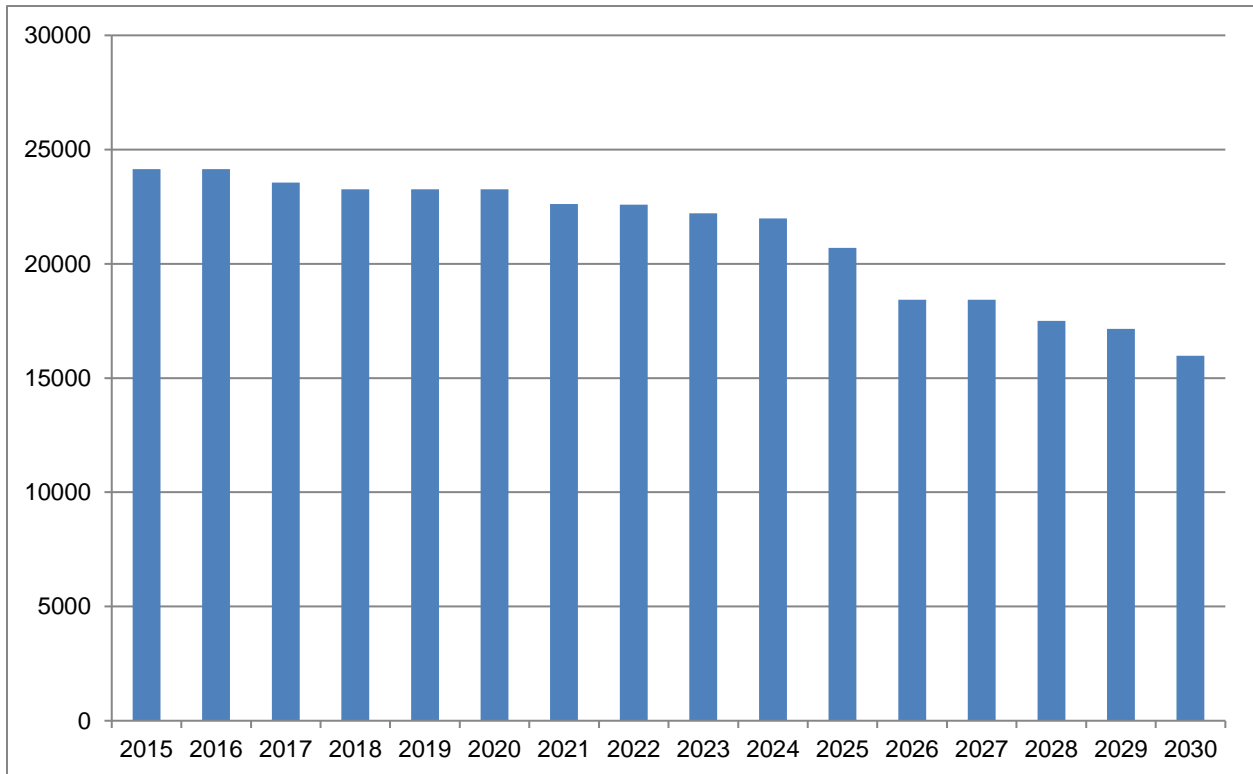


Figure 11 : Productions autorisées des carrières de carbonates entre 2015 et 2030, sur la base des autorisations actuelles.

4.4. QUELQUES EXEMPLES DE GISEMENTS DE CARBONATES CALCIQUES ET MAGNÉSIENS EN FRANCE

La géologie de quelques importants gisements français de carbonates calciques et magnésiens est décrite ci-dessous. Les principaux gisements sont présentés par type de roches carbonatées exploitées (i.e. calcaire, marbre, craie/craie phosphatée, marne, dolomie) ou non exploitées (i.e. magnésite).

- **Calcaire**

Le bassin de Marquise (Boulonnais)

Le bassin carrier de Marquise se situe dans le Boulonnais et comprend plusieurs sites d'extraction de carbonates calciques et magnésiens (Figure 12) :

- la carrière du Boulonnais (Figure 13) ;
- la carrière de la Vallée Heureuse ;
- la carrière de Dolomie et Magnésie de France.

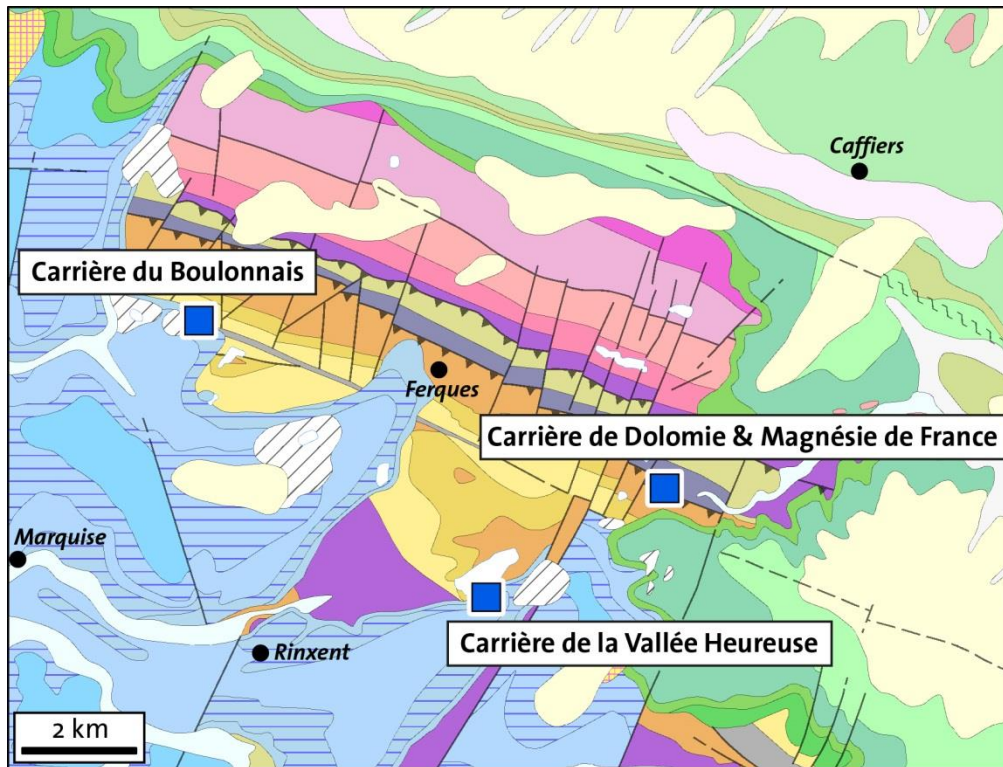


Figure 12 : Carte géologique du bassin carrier de Marquise (Source : BRGM).

Les trois carrières exploitent les calcaires et les dolomies d'âge Paléozoïque et plus précisément d'âge Dévonien (en rose sur la carte géologique) et Carbonifère inférieur (Viséen, en ocre et beige sur la carte géologique). Les couches sédimentaires sont inclinées d'une quarantaine de degrés vers le sud-ouest et sont recouvertes en discordance par des calcaires du Jurassique (en bleu sur la carte géologique), ces derniers étant décapés par les carrières pour extraire les carbonates du Paléozoïque. La série carbonatée du Carbonifère inférieur est représenté par un empilement de formations d'environ 400 m d'épaisseur (Figure 14).



Figure 13 : La carrière du Boulonnais est la plus grande carrière de France (Cliché : Pierre Thomas, ENS de Lyon).

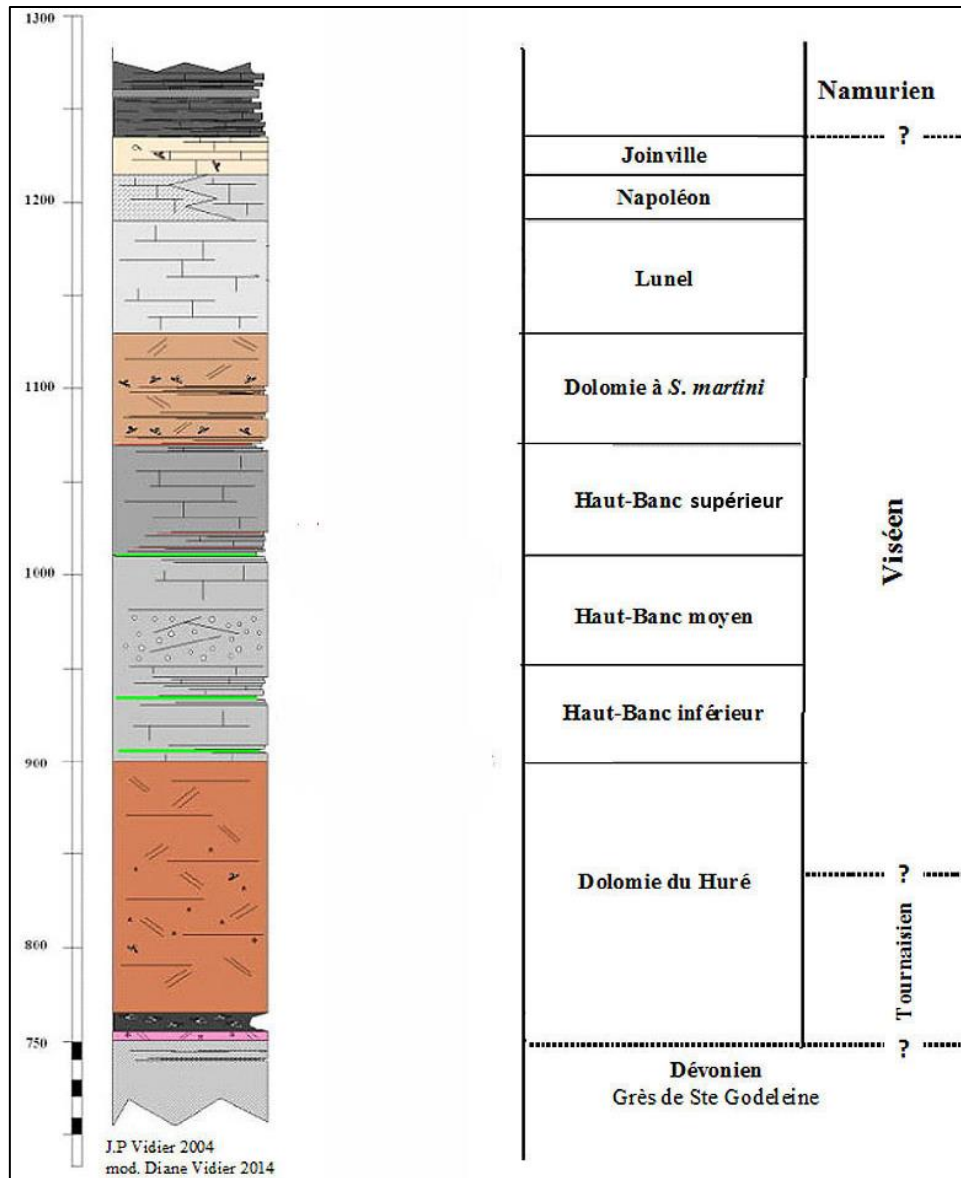


Figure 14 : Coupe de la série carbonatée du Boulonnais, exploitée en carrières (Vidier, 2014 et modifié d'après Vidier 2004).

Bassin de Pagny-sur-Meuse (Meuse)

Dans le département de la Meuse, trois importantes carrières de calcaire sont exploitées près de la commune de Pagny-sur-Meuse : La Mansolle (autrement appelée Saint-Germain-sur-Meuse), Le Revoi (Figure 15) et celle de La Côte du Menton.

Les niveaux géologiques (Figure 16) exploités en carrière sont les calcaires en plaquettes, âgés du Jurassique supérieur (Oxfordien moyen à supérieur ou « argovo-rauraciens ») et les calcaires à Astartes inférieurs et supérieurs, toujours du Jurassique supérieur (Oxfordien supérieur).

La carrière de La Mansolle (1 000 kt/an de production moyenne) est exploitée par le groupe Solvay ; celle du Revoi (2 000 kt/an de production autorisée) par la société Novacarb ; et celle de La Côte du Menton (3 500 kt/an de production autorisée) est exploitée par la Société des Fours à Chaux de Sorcy (groupe belge Lhoist).

Ces carrières de calcaire très purs (de 98 % à 99,5 % CaCO_3) sont principalement destinées à la fabrication de carbonate de sodium (fondant en verrerie ou composant des lessives et de la laine de verre) et de bicarbonate de sodium (aussi appelé bicarbonate de soude, ingrédient de nombreux produits pharmaceutiques ou alimentaires). Deux soudières² sont en activité, l'une à Dombasle (Solvay) et l'autre à Laneuveville-devant-Nancy (Novacarb). Les fours à chaux liés à la carrière de La Côte du Menton sont quant à eux implantés en contre-bas de la carrière.



*Figure 15 : Fronts de taille de la carrière du Revoi (Meuse) exploitée par Novacarb
(Cliché : <http://www4.ac-nancy-metz.fr/base-geol/fiche.php?dossier=012&p=3descrip>).*

² Usines destinées à la synthèse de produits dérivés du carbonate de sodium.

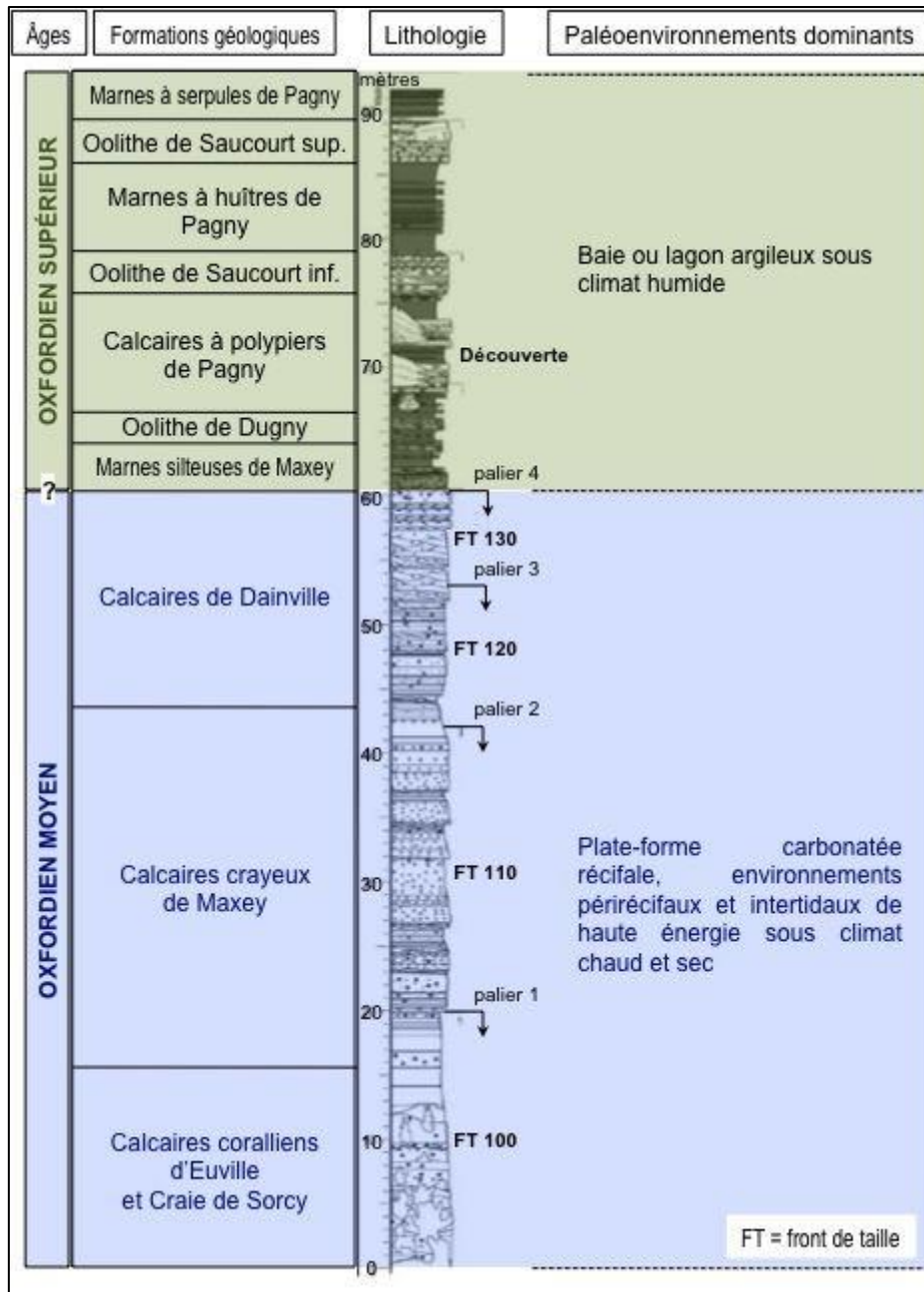


Figure 16 : Coupe géologique interprétative de la carrière du Revoi (simplifié d'après Lathuilière et al., 2003 et Olivier et al., 2004).

Bassin de Tautavel (Pyrénées-Orientales)

Dans le département des Pyrénées-Orientales, deux carrières de calcaires marbriers sont encore en activité, celles de La Narède et de La Loubatière respectivement sur les communes de Tautavel et Vingrau. La carrière de La Narède est exploitée par la société Provençale SA et celle de La Loubatière par la société OMYA.

Les niveaux géologiques exploités dans ces carrières (Figure 17) correspondent aux calcaires et dolomies âgés du Jurassique moyen à supérieur, ainsi qu'aux calcaires blancs à rudistes et orbitolines âgés du Crétacé inférieur (Valanginien-Aptien, ou « Urgonien inférieur »). Ces derniers, très blancs sont d'une grande pureté (jusqu'à 99,9 % CaCO₃). La finalité est l'obtention de poudre pour une utilisation comme charge dans diverses industries (peinture, enduits de façade, papiers plastiques, abrasifs doux).

La carrière de La Narède (Provençale SA) possède une production autorisée de 145 kt/an et celle de La Loubatière (OMYA) de 550 kt/an.

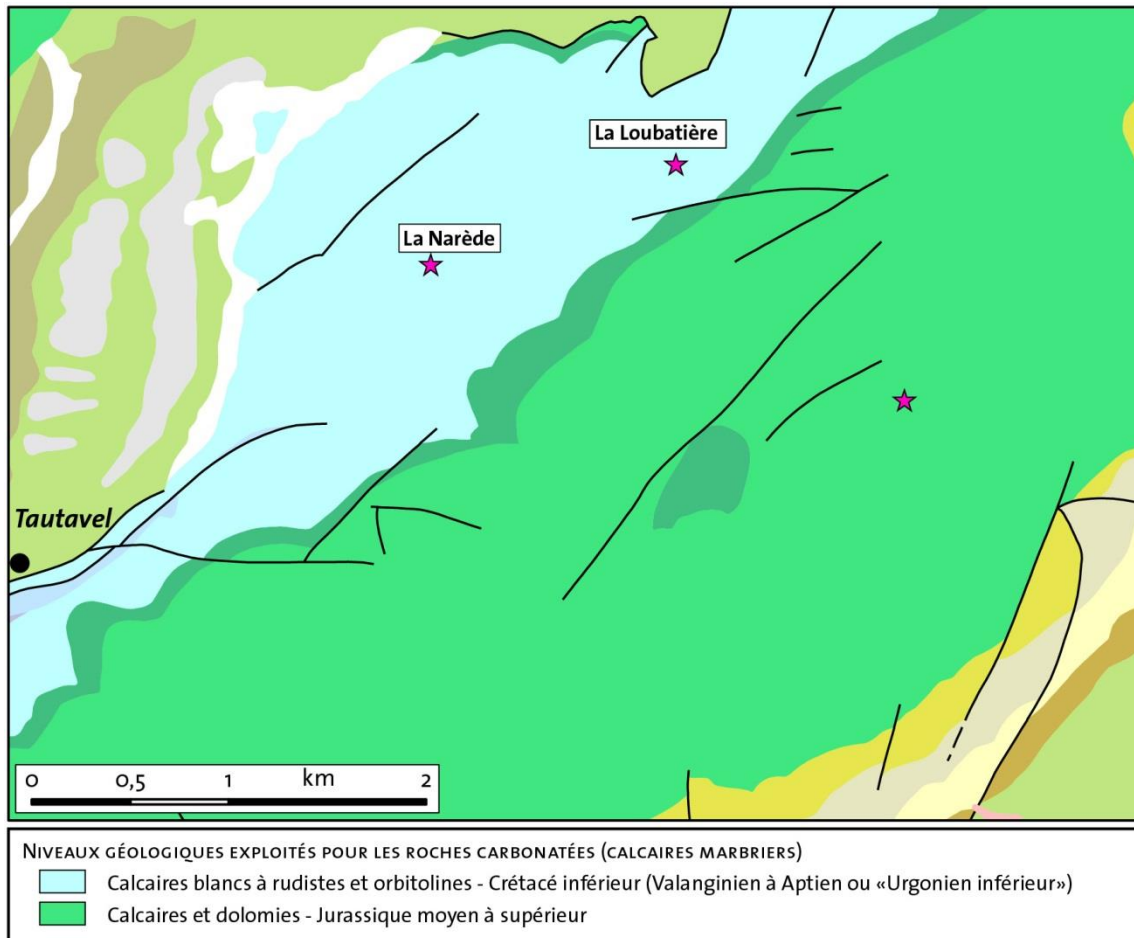


Figure 17 : Carte géologique du bassin carrier de Tautavel (Source : BRGM).

Bassin d'Orgon (Bouches-du-Rhône)

Dans le département des Bouches-du-Rhône, la société OMYA exploite les calcaires à texture crayeuse et à rudistes du Crétacé inférieur (Barrémien supérieur ou faciès « Urgonien s.s. ») dans la carrière dite « Les Perrières » (Figure 18). Le niveau crayeux atteint environ 90 mètres d'épaisseur. Il s'agit d'un calcaire d'une extrême blancheur et d'une grande pureté (99% CaCO_3). La roche est réduite en une poudre qui est utilisée comme charge dans les peintures (matériaux à haut indice de blancheur), dans la fabrication des cosmétiques, des pneumatiques ou des aliments pour les élevages avicoles. L'usine OMYA est présente sur le site de la carrière (Figure 19). La carrière « Les Perrières » a une production annuelle autorisée de 1 200 kt.

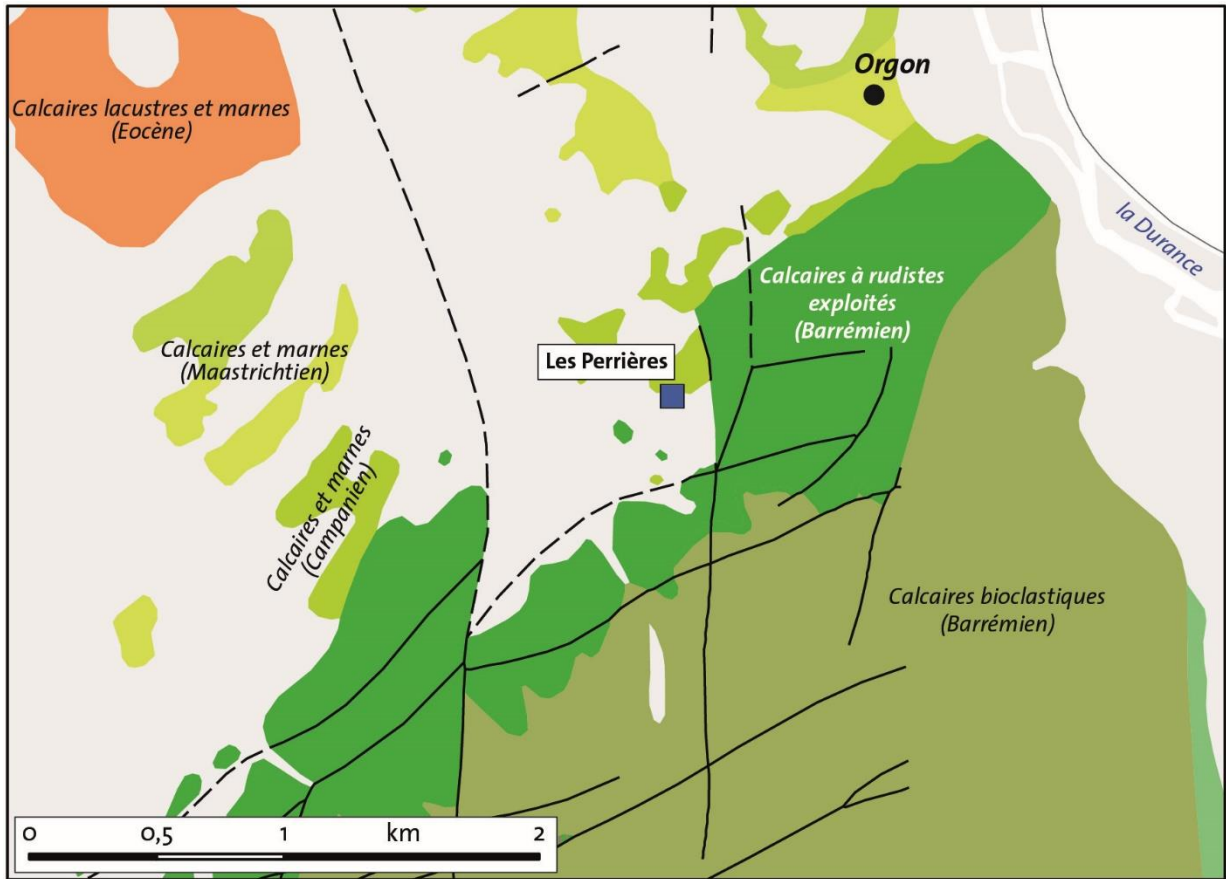


Figure 18 : Carte géologique du bassin carrier d'Orgon. Les calcaires à rudistes du Crétacé inférieur (Barrémien ou faciès « Urganien ») sont exploités par la société OMYA (Source : BRGM).



Figure 19 : L'usine d'OMYA avec en arrière-plan la carrière de calcaire d'Orgon (Cliché : OMYA).

- **Marbre**

Bassin de Saint-Béat (Haute-Garonne)

Dans le département de la Haute-Garonne, une exploitation de marbre est active sur la commune de Lez, au sud de Saint-Béat. La société OMG (Onyx et Marbres Granulés, détenue à 50 % par le groupe OMYA (Cf. 6.1.1)) exploite ces gisements pour la fabrication de granulés et poudres de marbre, de carbonates de calcium broyés et des produits dérivés (sable stabilisé, tapis de pierre, pierres à bâtir, etc.). Le niveau géologique exploité à l'heure actuelle correspond à des dolomies et des calcaires marmoréens métamorphisés âgés du Jurassique moyen à supérieur (Aalénien à Oxfordien).

Concernant la pierre ornementale, plusieurs anciennes carrières exploitaient le marbre des niveaux géologiques suivants :

- les calcaires amygdaloïdes gris, verts ou rouges (griottes) du Dévonien supérieur (à Cierp, Signac, Sost) ;
- les calcaires métamorphiques donnant des marbres gris, rubanés, parfois blancs et âgés du Jurassique moyen au Crétacé inférieur (à Saint-Béat, Marignac, Sost) ;
- les brèches sédimentaires ou tectoniques des terrains âgés du Jurassique moyen au Crétacé inférieur (à Beyrède-Jumet, Ilhet, Troubat, Lez, Nistos).

Le marbre de Saint-Béat a bénéficié d'une belle renommée internationale et fait aujourd'hui l'objet d'une valorisation patrimoniale.



Figure 20 : Carrière de marbre de Lez, Haute-Garonne (Cliché : OMG).

La société O.M.G. exploite au total 9 carrières pour une production annuelle totale de l'ordre de 350 kt par an. Si la plupart des carrières sont de petites carrières extérieures comme celle de Lez (Figure 20), la plus imposante est celle de Saint-Béat. Cette dernière comprend une partie souterraine s'étendant sur plus de 40 km de galeries pour 20 m de puissance (Figure 28) et une production de 200 kt/an, contre 9 kt/an pour la partie à ciel ouvert.

Le marbre blanc exploité (dit la « brèche romaine ») du Jurassique moyen (Bathonien) sert à produire notamment plusieurs types de poudres de marbres. Le premier type de poudres est

appelé « *béatites* », représente la majorité (120 kt), utilisé dans l'industrie pour les enduits, les peintures, les colles, le linoléum, les poudres à récurer, le caoutchouc et les revêtements de sol. Le deuxième type de poudres est utilisé pour les amendements agricoles et le troisième type de poudres dit « poudres industrielles non blanches » est utilisé pour l'alimentation du bétail et des poules pondeuses.

- **Craie / Craie phosphatée**

Bassin de la Marne

Dans le département de la Marne, plusieurs carrières importantes de craie se concentrent autour de Châlons-en-Champagne (Figure 21). Les quatre carrières principales (Le Haute de Verjuelle, Triboulots-Cugnots, La Voie des Vaches et La Petite Nau) sont toutes exploitées par le groupe OMYA SAS. Ces carrières exploitent principalement le niveau de craie à *Micraster coranguinum* datée du Crétacé supérieur (Santonien) ainsi que le niveau de craie à *Micraster decipiens* âgée du Coniacien. Il s'agit de craie grise à blanche et relativement tendre.

La carrière de La Voie des Vaches a une production moyenne de 500 kt/an pour une production autorisée de 750 kt/an. La carrière des Triboulots-Cugnots a une production moyenne de 412 kt/an. La carrière de La Haute de Verjuelle a une production moyenne de 200 kt/an pour une production autorisée de 250 kt/an. Enfin, la carrière de La Petite Nau a une production autorisée de 40 kt/an.

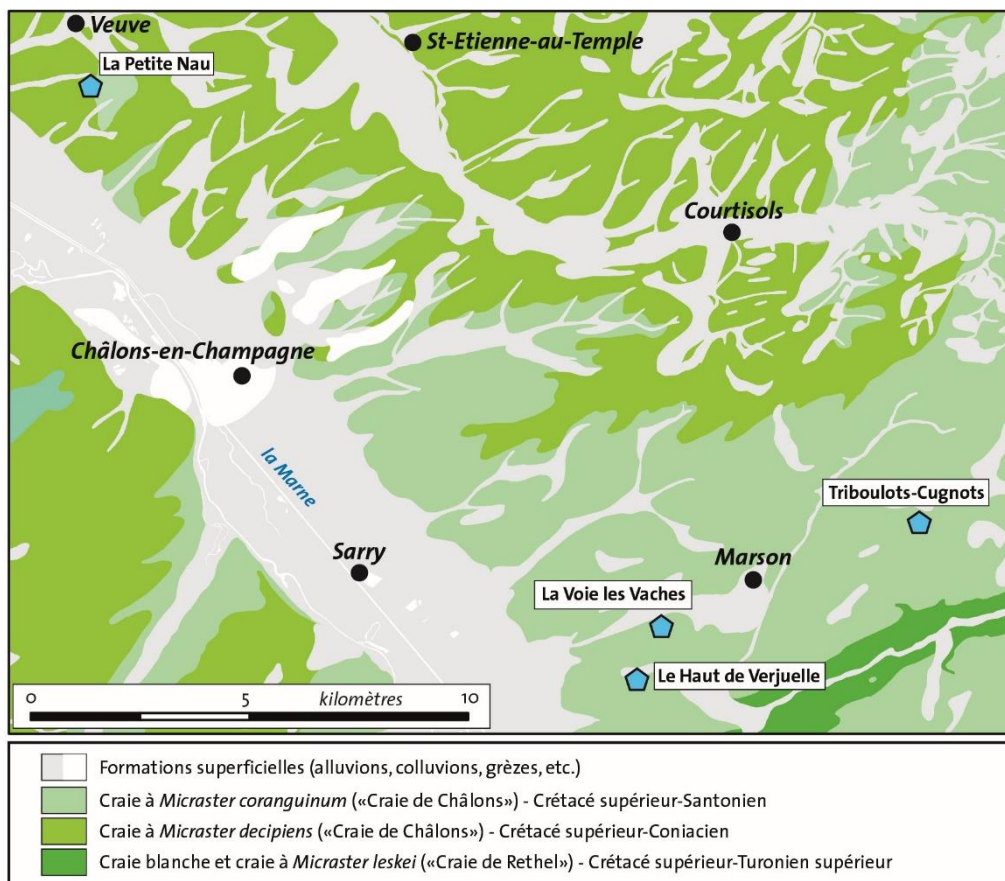


Figure 21 : Carte géologique du bassin carrier de la Marne (Source : BRGM).

Les phosphatières de la Somme

Dans le département de la Somme (Figure 22), au nord-est de Péronne sur la commune de Nurlu, une carrière nommée « Les Phosphatières » exploite de la craie phosphatée issues des formations crayeuses du Crétacé supérieur (Santonien à Campanien). Il s'agit d'une craie blanche plus ou moins riche en silex et riche en phosphates.

Le phosphate de calcium a été extrait sous forme de sables phosphatés tapissant des poches atteignant parfois 10 m de profondeur dans la craie blanche phosphatée ou blanche. Très localisées et riches en P_2O_5 , ces poches sont depuis longtemps épuisées. Le phosphate est exploité à l'état de craie grise qui est enrichi avant d'être commercialisé. Au début du XX^e siècle, les carrières de Templeux-le-Guérand exploitaient à la fois les poches de sables phosphatés et la craie phosphatée. Dans cette région, la craie phosphatée repose dans des dépressions ellipsoïdales de craie blanche où le contact est souligné par une surface durcie et perforée sur laquelle repose un conglomérat de petits nodules de craie phosphatée et quelques gros nodules vernissés. Les divers niveaux transgressifs de craie phosphatée peuvent atteindre une douzaine de mètres d'épaisseur dans le grand axe du bassin. Au-dessus se trouvait soit une autre couche de craie phosphatée, soit des poches de sables phosphatés.

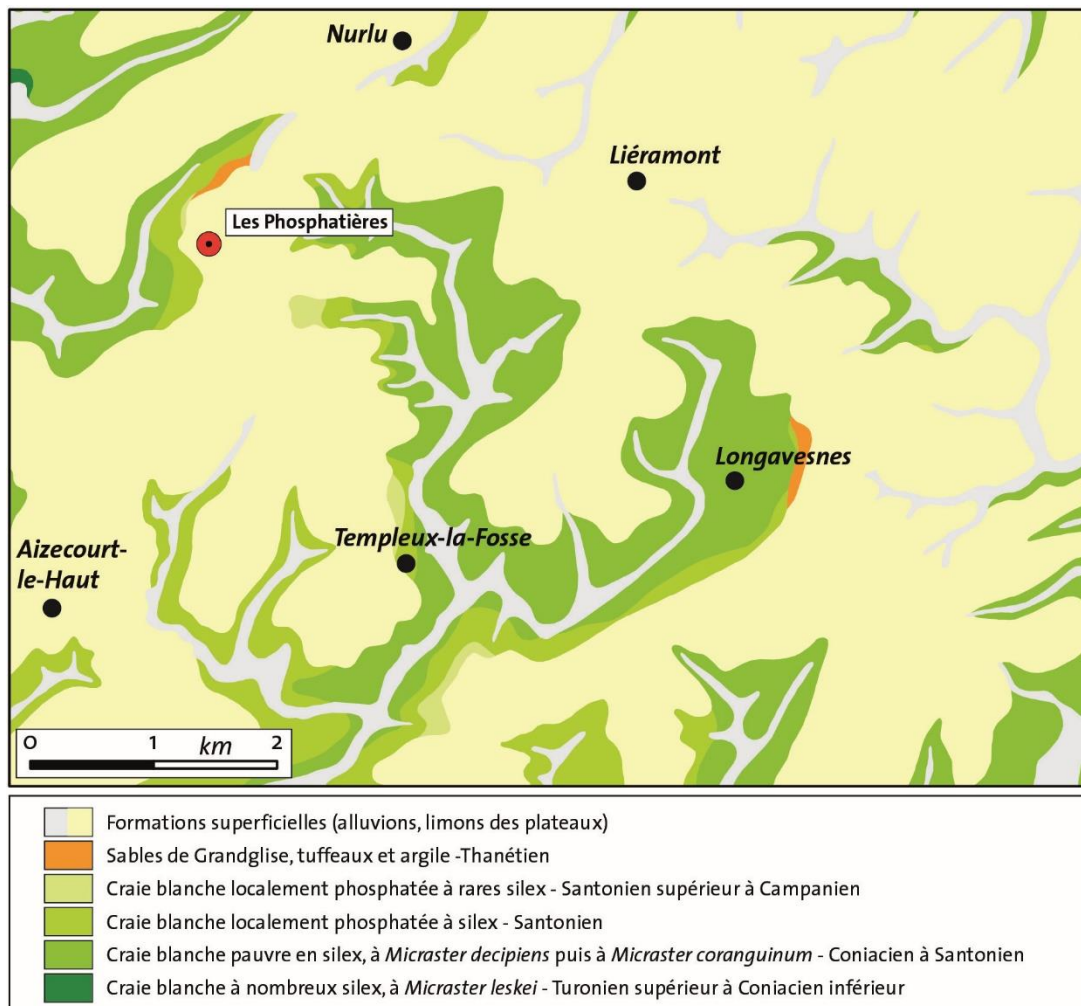


Figure 22 : Carte géologique du bassin carrier de la Somme pour la craie phosphatée. Les niveaux à phosphates prennent place dans la craie blanche âgée du Santonien au Campanien (Source : BRGM).

Dans l'ensemble des gîtes, la base de la craie phosphatée présente généralement un caractère noduleux, conglomératique, encroûté et perforé. Certains nodules arrondis, gris, riches en phosphate de calcium et indurés sont recouverts d'un enduit brun. D'autres sont crayeux et blancs, plus irréguliers et corrodés.

Les conditions de dépôt du phosphate de calcium sont complexes et marquées par une grande agitation du milieu marin, relativement peu profond, avec lessivage et durcissement du fond. Beaucoup de grains ou de nodules résultent du remaniement de niveaux phosphatés préexistants et leur abondance dans la craie décroît rapidement vers le sommet de la couche. D'autres ont une origine épigénétique comme en témoignent certaines structures reliques pseudo-oolithiques. Enfin certains débris proviennent d'une activité organique intense.

La craie phosphatée, après broyage, peut-être enrichie ou utilisée soit directement comme amendement, soit associée à d'autres éléments fertilisants sous forme d'engrais composés.

- **Dolomie**

Bassin carrier de la Charnie (Mayenne)

Dans le département de la Mayenne, deux importantes carrières de dolomies sont exploitées par la société Lhoist : celle de Geslin (commune de Neu) et celle de La Jametière (commune de Torce-Viviers-en-Charnie). Les deux carrières exploitent la dolomie âgée du Cambrien inférieur faisant partie de la formation carbonatée d'Evron et plus précisément du membre dolomitique de Neu. Cette formation géologique se situe dans le synclinal de la Charnie (Figure 23).

Ces deux carrières exploitent de la dolomie et des calcaires dolomitiques pour la production de chaux. La production autorisée moyenne s'établit à 800 kt/an pour la carrière de La Jametière et à 500 kt/an pour la carrière de Geslin.

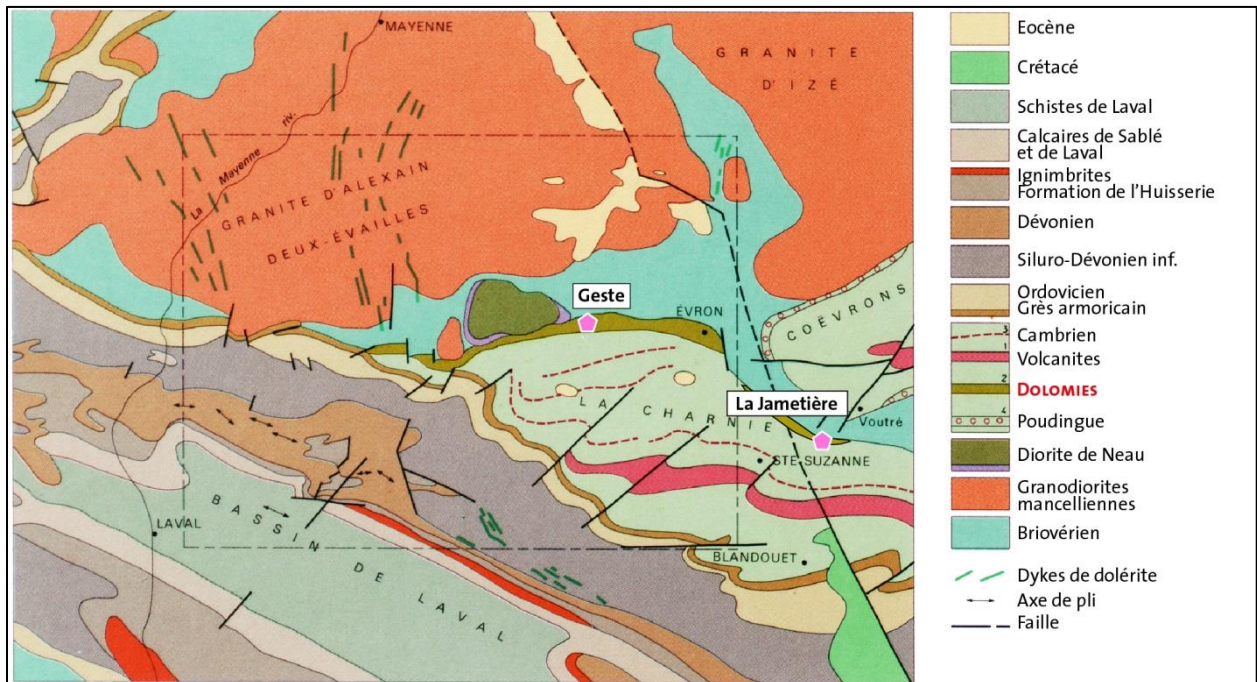


Figure 23 : Carte géologique simplifiée de la Charnie et des Coëvrons où sont exploitées en carrière les dolomies du Cambrien (Source : BRGM).

Les carrières de Jas-de-Rhodes (Bouches-du-Rhône) et de Cros Haut (Lozère)

Dans le département des Bouches-du-Rhône, sur la commune des Pennes-Mirabeau, la société SAMIN (groupe Saint-Gobain) exploite de la dolomie à très basse teneur en fer (entre 0,03% et 0,06% Fe_2O_3) à destination d'une utilisation en verrerie (verres extra-clairs utilisés dans l'industrie solaire, les flacons de luxe et les emballages de prestige). La carrière de dolomie de Jas-de-Rhodes possède une production autorisée de 200 kt/an (Figure 24).

Le niveau géologique exploité correspond à des dolomies « gris sale » âgées du Jurassique supérieur (Kimméridgien) appartenant au massif de la Nerthe. L'épaisseur générale de cette formation est estimée à environ 50 mètres.



Figure 24 : Carrière de dolomie de Jas-de-Rhodes exploitée par SAMIN pour un usage en verrerie, production autorisée de 200 kt/an (Cliché : SAMIN).

Il est à noter qu'une autre carrière de dolomie à très basse teneur en fer est exploitée par SAMIN à destination de l'industrie verrière. Il s'agit de la carrière du Cros Haut sur la commune de Chanac dans le département de la Lozère, avec une production autorisée de 130 kt/an. Le niveau géologique exploité correspond aux dolomies grises et cavernueuses âgées du Jurassique moyen (Bathonien supérieur) dans la région des Grands Causses, sur le causse de Sauveterre.

- **Magnésite (= Giobertite)**

En 2017, il n'existe aucune carrière en activité pour l'extraction de magnésite. Seuls existent des indices et gîtes recensés dans le Pays Basque, les Pyrénées-Orientales, la Corse et la Bretagne.

Deux grands types de gîtes et d'indices existent :

- ceux issus de la substitution de niveaux carbonatés (sous la forme de lentilles plus ou moins stratiformes dans des calcaires souvent dolomités) : Pyrénées ;
- ceux issus de l'altération de roches ultrabasiques comme les serpentinites (sous la forme de lentilles, de filons ou de stockwerks) : Corse, Bretagne.

En France, les gîtes et indices de magnésite recensés ne constituent pas de gisements économiquement exploitables étant donné leur faible importance en termes de ressources.

- Les Pyrénées :

Dans le détail, les gîtes de magnésite sont presque tous situés dans les Pyrénées (Figure 25). Ces gisements pyrénéens sont présents dans (i) des terrains âgés du Paléozoïque (Montner, Urepel) et (ii) des terrains de la couverture sédimentaire âgée du Trias (Saint-Michel, Sainte-Engrâce, Larrau).

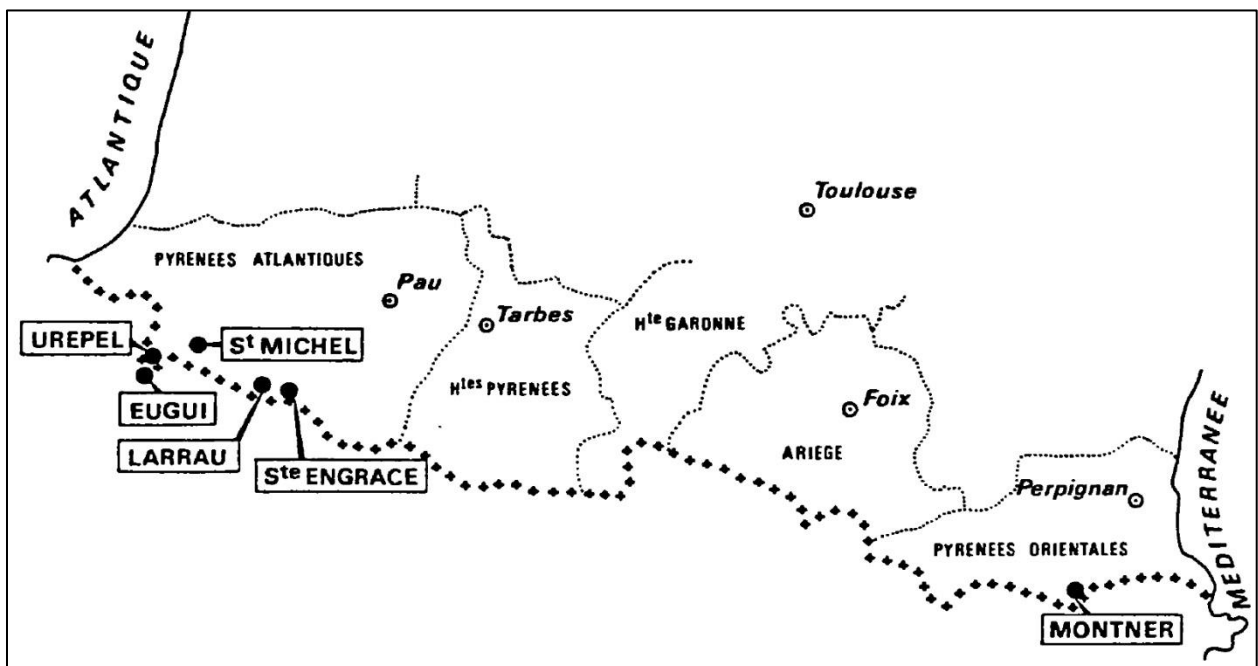


Figure 25 : Carte de localisation des indices et gîtes de magnésite/giobertite dans les Pyrénées (Source : BRGM). Eugui est un gîte présent dans les Pyrénées espagnoles, il ne sera donc pas traité ici.

Montner (Pyrénées-Orientales)

Situé à Arles-sur-Tech dans les Pyrénées-Orientales, le gîte de Montner est situé à environ 4,5 km au sud de la commune. C'est l'un des plus importants gîtes à magnésite de France avec des ressources estimées à environ 700 000 t @ 42,25 % MgO et 3,48 % CaO. Le gîte a été découvert en 1959 et a fait l'objet de travaux jusqu'en 1961 avec 50 tranchées,

100 sondages carottés à la maille 50 x 25 m. Une carrière avait d'ailleurs été ouverte pour alimenter une installation expérimentale d'enrichissement.

Ce gîte est encaissé dans les marbres calcaïres ou dolomitiques présents dans le membre inférieur de la série de Canaveilles, datée entre l'Édiacarien et le Briovérien supérieur *p.p.* Cette série est principalement constituée pour sa partie inférieure de métapélites, de métagrès et de métagrauwackes.

La magnésite s'y est déposée par substitution de la dolomie, en plusieurs lentilles stratoïdes de 25 m de puissance maximum, reconnues sur 1,5 km d'est en ouest. La magnésite, spathique, montre une couleur beige et peut être associée à de la dolomie, du talc, de la chlorite se présentant en petits bancs interstratifiés.

Saint-Michel (Pyrénées-Atlantiques)

Les gîtes de Saint-Michel et de Sainte-Engrâce sont inclus dans les terrains du Trias moyen (Ladinien-Anisien ou « Muschelkalk »), ces assises carbonatées pouvant atteindre 55 mètres d'épaisseur dans la région de Saint-Michel.

Dans la région de Saint-Michel, la série carbonatée est composée de trois membres principaux avec de haut en bas : (1) calcaire et dolomie, (2) calcaire ondulé et calcaire noir en plaquettes et (3) dolomie à pseudomorphoses de gypse. Découverts en 1947, ce secteur regroupe quatre indices aux localités suivantes : Ciçarry Bas, Champ de Marie-Jeanne, Ithalatzé et Ahadoberry (Figure 26).

Les indices de magnésite ont fait l'objet en 1961-1962 puis en 1968, d'actives recherches de la part de la Division Sud-Ouest du BRGM, avec des travaux miniers : 200 m de galerie sur Ahadoberry et une campagne de sondages (1 200 m). Des possibilités de tonnage moyen ont été démontrées (400 000 t @ 37 % MgO à Camp de Marie-Jeanne, 260 000 t @ 37-38 % MgO à Ciçarry-Bas), mais les teneurs sont assez basses et la présence de silice dévalorise le minerai.

De façon générale, la magnésite se présente en lentilles interstratifiées dans les calcaires dolomitiques du Trias moyen et présente un aspect spathique (cristallin) sombre, qui localement a laissé le surnom de « petit granite ».

Larrau-Lessartia (Pyrénées-Atlantiques)

Le gîte de Larrau est inclus dans les terrains du Trias moyen (Ladinien-Anisien ou « Muschelkalk »), composés de dolomies saccharoïdes noires au contact avec des ophites. Le gîte contiendrait environ 800 000 t @ 35 % MgO selon les travaux effectués autrefois par la société Denain-Anzin.

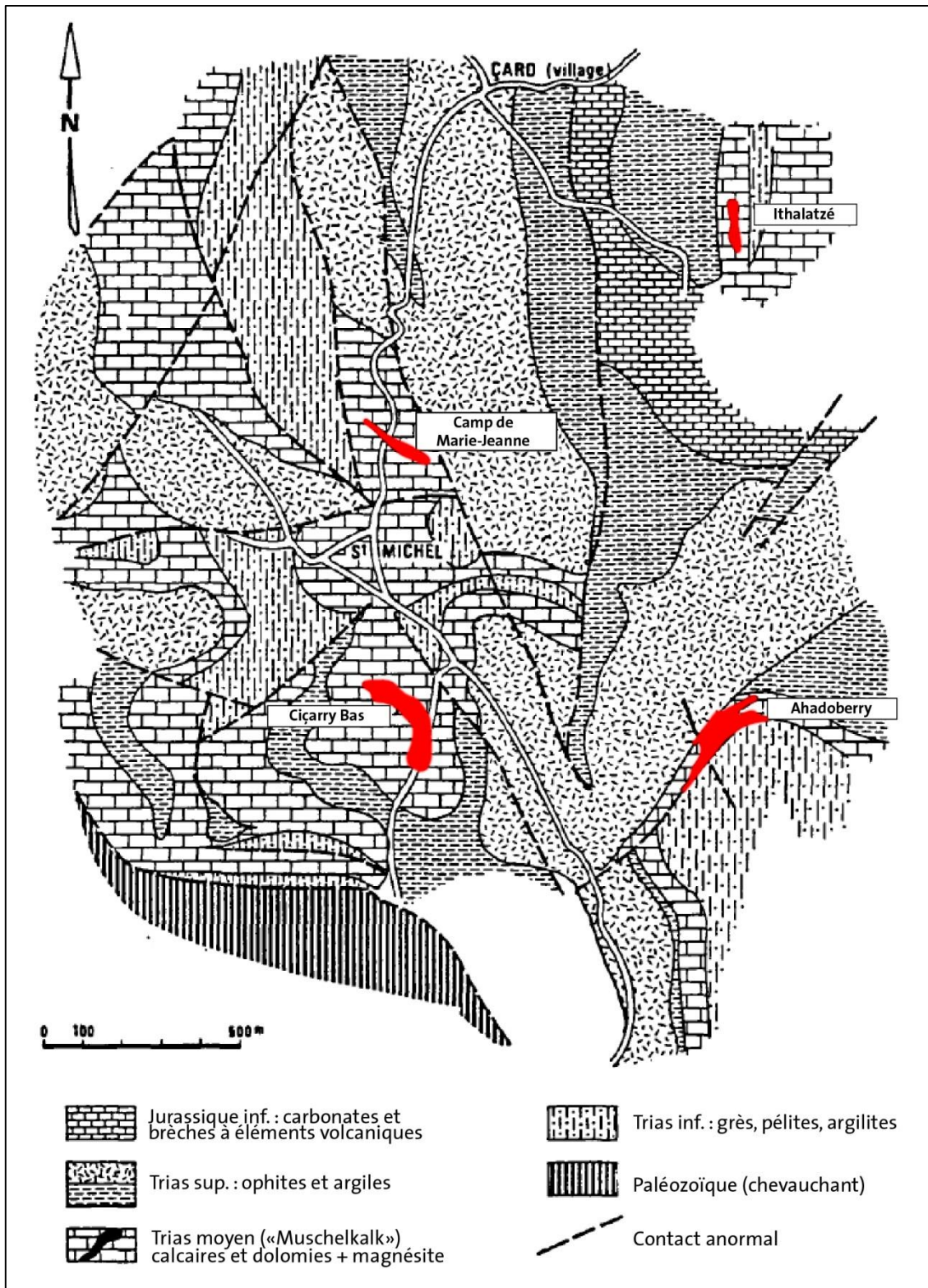


Figure 26 : Carte de localisation des indices à magnésite du secteur de Saint-Michel (d'après Quemeneur, 1974).

- Corse

Le gîte identifié en Corse est celui de Biguglia, au nord de l'île, à environ 12 km au sud de Bastia. Ce gîte a fait l'objet de travaux de recherche entre 1925 et 1927 par la Société d'Electrochimie et d'Electrometallurgie d'Ugine, puis de 1939 à 1942 par la Société Hydroélectrique de Moyenne-Garonne.

La magnésite se présente sous la forme de filons au sein de serpentinites altérées. Onze filons ont été reconnus et trois ont été exploités. La puissance maximale de ces filons atteint 1,7 m. Les teneurs du minerai étaient de l'ordre de 30 à 45 % MgO. La production entre 1941 et 1942 a été faible et de l'ordre de 250 t.

- Bretagne

Deux indices de magnésite ont été reconnus en Bretagne. L'un à La Chapelle-Neuve, le second à Kerméno (Côtes-d'Armor). Il s'agit de veinules blanchâtres présentes au sein de serpentinites paléozoïques altérées et ne constituant que des indices d'ordre minéralogique.

4.5. CRITERES D'EXPLOITABILITE, MODES D'EXTRACTION ET PRINCIPES DE TRAITEMENT

4.5.1. Les critères d'exploitabilité et les modes d'extraction

Avant de procéder à l'extraction ou l'exploitation des matériaux, une recherche et une évaluation des gisements de carbonate de calcium sont requis pour connaître si le matériau potentiellement exploitable sera susceptible de répondre en qualité comme en quantité aux exigences. Les méthodes mises en œuvre sont alors semblables à celles utilisées lors de l'exploration minière : recherches bibliographiques, cartographie géologique détaillée, échantillonnage et sondages carottés. La géophysique peut aussi contribuer à l'analyse des structures susceptibles d'affecter la continuité et l'homogénéité des formations géologiques identifiées.

Des études spécifiques peuvent être menées en fonction de la finalité du matériau. Par exemple, une attention particulière pourra être portée sur certains éléments structuraux (stratification, fracturation, vides karstiques avec ou sans remplissage argileux) ou lithologiques (variations texturales et minéralogiques) pouvant entraîner une altération susceptible de diminuer la blancheur du matériau.

L'étude géologique ainsi que la synthèse et l'interprétation des analyses géotechniques permettent de construire un modèle géologique servant de base au dimensionnement du projet d'exploitation (économique ou non) et à l'étude de son phasage dans le cas d'un intérêt économique avéré.

Ainsi, un gisement exploité ou un projet d'exploitation présente ou doit présenter un bilan économique positif, impliquant une plus-value finale par rapport à la somme investie et aux coûts d'exploitation. Ce bilan suit des caractéristiques ou « **critères d'exploitabilité** » qui peuvent correspondre aux paramètres suivants :

- qualités intrinsèques du matériau conforme à la norme recherchée ;
- volume suffisant avec la 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 ;
- contraintes environnementales dans le respect de la séquence Éviter-Réduire-Compenser (ERC);
- adéquation des moyens humains et techniques.

- Les critères de sélection du matériau peuvent être détaillés comme suit :

- la composition chimique en éléments de base doit satisfaire aux normes exigées de la filière choisie et est exprimée en pourcentage de CaCO_3 ou CaO , ou MgO contenus. Ainsi, pour les calcaires, 85 % ou moins de CaCO_3 suffisent en agriculture, mais 80-90 % sont nécessaires aux castines industrielles, et plus de 95 % pour les charges. Concernant les dolomies, il est exigé une teneur supérieure à 18 % MgO dans les hauts fourneaux, et plus de 19 % dans bon nombre d'applications industrielles, sachant que l'agriculture utilise des teneurs inférieures et variables ;
- la composition en éléments mineurs ou en traces peut bonifier le produit ou l'exclure en partie ou en totalité selon les usages. Par exemple, l'absence d'oxydes de fer pour la verrerie est un atout sauf pour les réfractaires, et l'absence de silice est indispensable pour certaines charges ;

- les caractéristiques physico-chimiques et éventuellement géotechniques sont évaluées à travers de nombreux indices techniques comme la blancheur, la résistance à la compression pour les matériaux à calciner (> 400 kg/cm²), le comportement au broyage, les indices de porosité, etc.
- Les critères de sélection du gisement peuvent être détaillés comme suit :
 - l'extraction la plus fréquente dite « à ciel ouvert », car elle allie moindre coût et technicité simplifiée. Elle peut inclure une découverte faible (ratio de volumes couverture sur gisement 1/10), parfois plus forte si la valeur marchande le permet ;
 - l'extraction souterraine, plus rare, suppose une valeur marchande et/ou un besoin local et conjoncturel décisifs ;
 - l'adéquation volume/géométrie satisfaisante, prenant 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 peuvent être détaillés comme suit :
 - la localisation éventuelle dans une formation sédimentaire identifiée d'intérêt économique à l'échelle locale ou régionale ;
 - la disponibilité des infrastructures, accessibilité de base (routière et/ou ferroviaire, parfois hydrographique) et énergie ;
 - l'adéquation en globalité des coûts de transport aux différentes étapes : i- extraction du brut, ii- traitement primaire, iii- produit semi-fini ou fini, iv- zones de consommation. Les produits plus rares et/ou à forte valeur ajoutée comme 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 qu'hydrologique, de rejets divers, paysager, logistique, etc.

La grande majorité des gisements de roches carbonatées en France est exploitée à ciel ouvert. L'abattage est réalisé à l'aide d'explosifs (Figure 27) pour les matériaux les plus indurés ou à la pelle hydraulique pour les matériaux plus friables (ex. craie). L'usage de l'abattage mécanique au moyen de haveuses est privilégié dans les gisements dédiés en priorité à la production de roches ornementales, puisque les explosifs peuvent détériorer les roches en question.



Figure 27 : Abbattage à l'explosif dans une carrière à ciel ouvert de calcaire, Carrière de Saint-Germain-sur-Meuse (Cliché : Philippe Martin, Didier Zany).

L'exploitation en carrière souterraine est le plus souvent liée à des contraintes locales d'ordre géologique (épaisseur des recouvrements), économique (rareté du gisement) ou environnemental (zones protégées). La méthode par chambres et piliers est la plus répandue sous certaines conditions structurales (Figure 28).

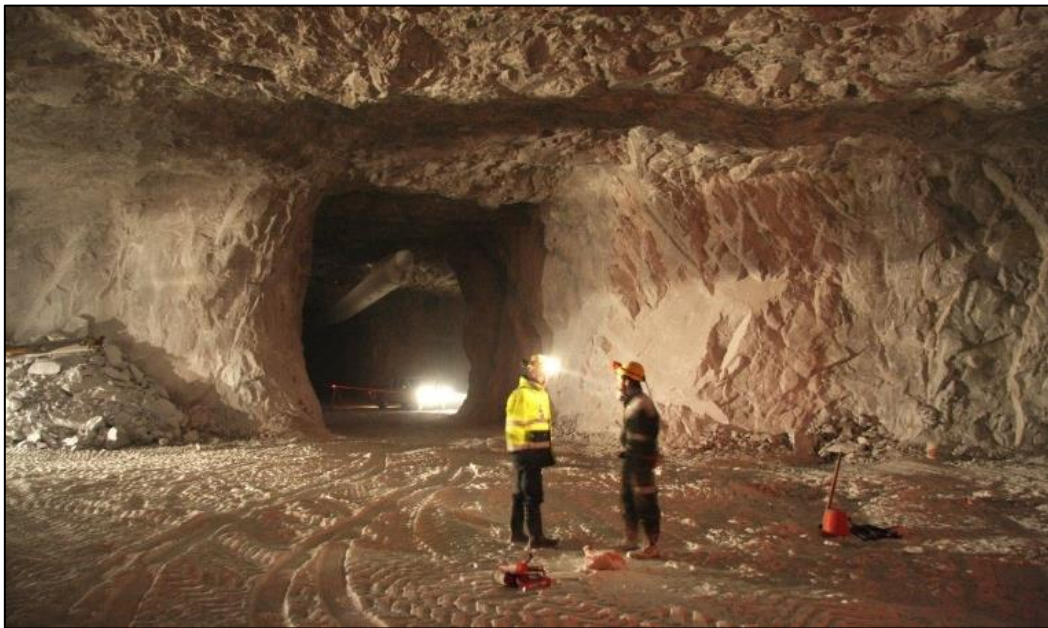


Figure 28 : Carrière souterraine de calcaire dans le massif du Rie (31) (Cliché : OMG). Plus de 40 km de galeries réparties sur plusieurs niveaux permettent l'exploitation de la roche carbonatée.

4.5.2. Les principes de traitement

Comme déjà évoqué en 2.3, on distingue différentes phases de traitement pour passer de la roche carbonatée naturelle à des matériaux carbonatés bruts, puis transformés en produits (Figure 5). Trois grands types de produits existent : cuits, frittés et fondus. Cela permet d'obtenir divers oxydes et hydroxydes de calcium et de magnésium aux propriétés physico-chimiques spécifiques.

- Passage d'un matériau carbonaté brut à un produit cru :

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 le plus souvent effectué par voie sèche et plus rarement 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, 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'1 mm) 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. Cette dernière s'applique par exemple pour la séparation magnésite - dolomie.

- Passage d'un produit cru à un produit cuit :

Les produits cuits sont ceux obtenus après une **calcination** (inférieure à 1 300 °C). Ce ne sont plus des carbonates mais divers oxydes et hydroxydes de calcium et de magnésium aux propriétés physico-chimiques spécifiques. La fabrication de chaux fait partie de cette catégorie. Quelques précisions sur la fabrication de la chaux (et toutes ses variétés) sont apportées dans l'encart ci-dessous.

- Passage d'un produit cru à un produit fritté :

Le processus de **frittage** (ou ultra-calcination) s'observe à partir d'une température de cuisson supérieure à 1 300 °C, et correspond pour le matériau à une sorte de vitrification obtenue par début de fusion. Le frittage s'accompagne d'une perte de porosité allée 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 conductivité électrique limitée (isolants). Très utilisée dans la fabrication des réfractaires, la dolomie frittée est généralement calcinée entre 1 800°C-1 900°C et 2 000°C, alors que la magnésie frittée (aussi appelée « magnésie calcinée à mort ») est obtenue à plus de 1 450°C à 1 500°C.

- Passage d'un produit cru à un produit fondu :

Le processus d'**électrofusion** se fait à l'aide d'un four à arc électrique où le produit cru de haute pureté est porté à très haute température (> 2 000°C) ce qui va amener à la fusion du matériau. Les oxydes liquides formés sont ensuite coulés dans des moules placés dans des caissons remplis de matériaux isolants où ils se solidifient. Cette technique est essentiellement utilisée pour fabriquer des réfractaires haute-résistance utilisés en sidérurgie à partir de magnésie.

Ainsi, la magnésie hautement pure s'obtient par électrofusion de magnésite placée dans un four à arc, trois électrodes étant implantées dans la masse du minerai (*fused magnesia*) ; portée à 2 800°C, la partie centrale autour des électrodes fond en s'épurant pour donner du MgO très pur, la partie externe servant de réfractaire.

La chaux

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, etc.), soit 4 000 ans av. J.-C. Son apparition pourrait remonter à 8 000 ans av. J.-C. 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. À 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.

* Classification des chaux

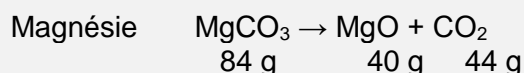
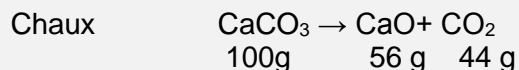
Le premier critère de classification de la chaux concerne la composition chimique du produit de base, qui va permettre la définition des deux grands groupes (Figure 29) :

- **les chaux aériennes** : à partir de calcaires renfermant de 65 à 99% de CaCO₃ / MgCO₃, plus quelques autres substances, principalement des oxydes (voir plus loin), sans argile ;

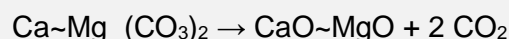
- **les chaux hydrauliques** : à partir de calcaires renfermant de 40 à 95% de CaCO₃ plus quelques autres substances, principalement des oxydes, avec de l'argile (5 à 22%, en général 15 à 20%).

Chaux aériennes vives

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

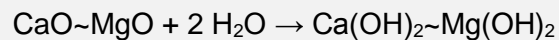
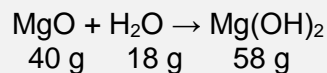
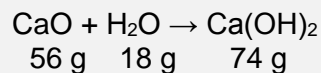


Dans tous les cas de figure, la chaux produite est dite « vive » du fait de sa réactivité en présence d'eau (réhydratation), la réaction étant fortement exothermique ; il résulte des considérations faites sur le degré de cuisson, telles que les chaux obtenues aux températures les plus basses sont plus 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 CO₂ 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. À 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).

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 :



Chaux hydrauliques :

Les calcaires argileux qui se prêtent à la transformation (moins de 95% de CaCO₃), doivent être calcinés à une température supérieure à 1 200°C, 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 (MgO), 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).

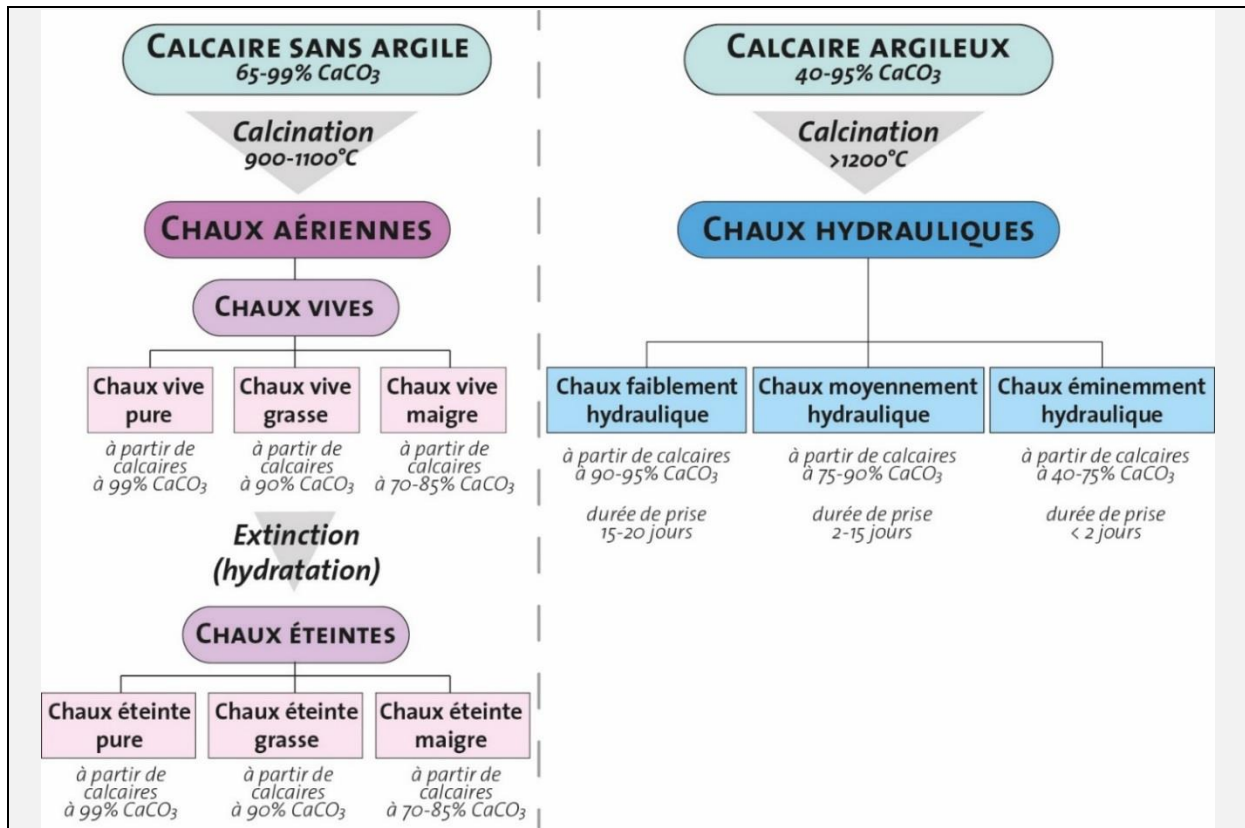


Figure 29 : Classification des différents types de chaux.

5. Filières industrielles des carbonates en France

À partir des chiffres de production recueillis en 2015 sur les 87 carrières concernées par l'étude, il est possible de faire les estimations globales suivantes : 26 % des matériaux carbonatés extraits étaient destinés à la fabrication de chaux, 18 % pour les charges minérales, 9 % en agro-alimentaire et 4 % environ pour les amendements agricoles. Le reste de la production (43 %) se répartit dans divers usages en industrie pour lesquels il est plus difficile de détailler la répartition précise. Ceux-ci comprennent, parmi les principaux, la sidérurgie, la verrerie, la chimie, les réfractaires et céramiques, ainsi que les usages moins élaborés destinés à la construction et le BTP.

Les principales caractéristiques des carbonates calciques et magnésiens recherchées dans leurs différents domaines d'utilisations sont décrites ci-après par filière.

5.1. DOMAINES D'UTILISATION DE LA CHAUX

Cette partie est tirée de plusieurs articles concernant la chaux et ses usages dans la revue scientifique « *Techniques de l'ingénieur* » (Martinet, 2009 ; Herrier, 2010 ; Gres-Roque, 2016).

Comme illustré dans l'encart du chapitre précédent, le terme chaux est générique. Il désigne l'oxyde, et/ou l'hydroxyde de calcium, et l'oxyde, et/ou l'hydroxyde de calcium et de magnésium, issus de la décomposition thermique (calcination) de carbonate de calcium (par exemple : calcaire, craie, coquillages), ou de carbonate de calcium et de magnésium (par exemple : calcaire dolomitique, dolomite).

Il est donc abusif de parler de la chaux au singulier, car ce matériau obtenu par calcination de calcaires plus ou moins argileux donne différentes chaux : les chaux hydrauliques et les chaux aériennes (voir Figure 29). Les chaux aériennes ont la propriété de ne durcir qu'à l'air. Les chaux hydrauliques font prises au contact de l'eau, à l'instar des ciments, avant de réagir elles-mêmes avec l'air.

Ces différentes chaux ont des usages très variés dans différentes industries, détaillés dans les paragraphes suivants.

Chaux hydrauliques

Les chaux hydrauliques sont des liants puisqu'elles assurent la cohésion des matériaux avec lesquels elles sont mélangées, dès l'instant où de l'eau est ajoutée.

Le caractère hydraulique des chaux n'a véritablement été maîtrisé qu'à l'issue des travaux de Louis Vicat sur l'hydraulicité (dès 1820). L'essor industriel des chaux hydrauliques a connu son apogée au cours des premières décennies du XX^e siècle puisqu'en 1925, la France produisait plus de chaux hydrauliques que de ciments (3,2 Mt contre 2,3 Mt). La tendance s'est ensuite très fortement inversée avec l'essor de la fabrication du ciment (apparition du four rotatif en 1910). Directement corrélé aux matières premières disponibles, gisements calcaires plus ou moins riches en silice notamment, le caractère hydraulique est variablement marqué.

Les chaux hydrauliques naturelles sont régies par la norme européenne des chaux de construction NF EN 459-1. Les utilisations principales du matériau sont le bâtiment et les travaux publics.

La norme NF EN 459-1, qui définit les chaux de construction, aussi bien aériennes qu'hydrauliques, distingue plusieurs types de chaux ayant des propriétés hydrauliques. Elles sont principalement constituées d'hydroxyde de calcium, de silicates de calcium et d'aluminates de calcium :

- NHL (Natural Hydraulic Lime) : chaux hydrauliques naturelles. Elles ne contiennent généralement pas d'autres matériaux ajoutés. Seuls les agents de mouture sont permis jusqu'à 0,1 %. Les chaux hydrauliques naturelles commercialisées sont, la plupart du temps, hydrauliques ou éminemment hydrauliques ;
- FL (Formulated Lime) : chaux formulées. Chaux ayant des propriétés hydrauliques mais constituées de chaux aérienne et/ou de chaux hydraulique naturelle avec des matériaux hydrauliques et/ou pouzzolaniques ajoutés ;
- HL (Hydraulic Lime) : chaux hydrauliques. Chaux principalement constituées par mélange des constituants appropriés : chaux hydraulique naturelle, ciment, cendres volantes, filler calcaire et autres matériaux.

Usages dans le bâtiment

Si la chaux hydraulique naturelle peut intervenir à tous les stades de la maçonnerie d'un édifice, du montage aux enduits, en passant par le scellement de carrelage, les classes de résistances les prédestinent à des utilisations spécifiques :

- NHL 2 est plutôt destinée aux travaux d'enduits ou de montage (avec précautions), associée à des matériaux naturels ou fragilisés, tels que le chanvre, la pierre tendre, le torchis, ou encore la terre ;
- NHL 3.5 peut couvrir tous les usages de la construction, tels que le montage, les enduits, la couverture de tuiles, la pose de sols scellés ;
- NHL 5 couvre tous les usages des deux précédentes chaux hydrauliques naturelles. Elle peut également servir à la réalisation de bétons de chaux, destinés aux chais, ou encore de bétons de restauration du patrimoine (ponts anciens en pierre, maçonneries anciennes, etc.).

Les chaux de construction FL et HL peuvent notamment contenir du ciment ou des adjuvants qui modifient les performances mécaniques, la rhéologie, ou encore la teinte. Ces produits sont généralement dédiés à des applications particulières, comme la mise en œuvre mécanique des enduits (machine à projeter).

Dans toutes les applications et quelle que soit la nature de la chaux (NHL, FL ou HL), les produits blancs mettent en valeur les pigments ou sables employés et sont destinés aux travaux de finition (enduits, rejointements de pierres ou de briques par exemple).

Usages en produits de stabilisation des sols

Depuis toujours, la chaux a été employée pour stabiliser les sols, qu'il s'agisse de routes romaines ou médiévales en galets, ou de routes modernes pour les fonds de forme.

La chaux hydraulique naturelle est employée pure, juste mélangée à du sable pour les « calades » de galets des anciennes cités ou centres historiques. Il existe des liants hydrauliques pour le traitement des sols en place ou rapportés, constitués notamment de chaux hydrauliques naturelles.

La mise en œuvre par épandage modifie les caractéristiques physiques et chimiques des sols en place. En zones humides, les traitements à la chaux vive précèdent parfois la mise en œuvre d'un liant hydraulique routier.

La chaux facilite le travail des engins par temps pluvieux, ou dans les zones à humidité excessive, en baissant la teneur en eau des sols et en floculant les argiles. Elle permet donc d'améliorer la portance des sols en place, de faciliter leur travail et la pose ultérieure d'un mélange bitumineux. Son action bénéfique perdure dans le temps.

La chaux hydraulique naturelle ralentit le vieillissement des revêtements.

Laissés apparents, les traitements de sables sont fréquemment employés en milieu urbain, ou paysager, pour stabiliser les sols, tout en leur conférant un pouvoir esthétique.

Chaux aériennes

La chaux aérienne est un matériau utilisé depuis plusieurs millénaires. Malgré l'apparente simplicité de la réaction chimique à l'origine de sa formation, les procédés de fabrication d'aujourd'hui n'ont évidemment plus rien à voir avec ceux utilisés à l'origine. Ils se sont considérablement perfectionnés et diversifiés pour mieux répondre aux exigences des utilisateurs actuels. Il en est de même, pour les applications au point que la construction, un des premiers domaines d'application dans l'antiquité, représente une part relativement modeste des applications actuelles.

La norme européenne harmonisée des chaux de construction NF EN 459-1 distingue deux catégories de chaux aériennes utilisées en construction :

- CL : chaux aérienne calcique, obtenue à partir de carbonate de calcium, qui désigne l'oxyde de calcium : CaO et/ou l'hydroxyde de calcium : Ca(OH)_2 ;
- DL : chaux aérienne dolomitique, obtenue à partir de carbonate mixte de calcium et de magnésium, qui désigne l'oxyde de calcium et de magnésium : CaO.MgO , et/ou l'hydroxyde de calcium et de magnésium : $\text{Ca(OH)}_2.\text{Mg(OH)}_2$.

La chaux vive, de formule chimique brute CaO est un solide se présentant sous forme de roche ou de poudre, et qui est très avide et réactif vis-à-vis de l'eau. La chaux vive est disponible sous différentes granulométries, discontinues ou continues, pouvant aller, du bloc sortant du four (ou « roche » selon la terminologie des chauffourniers), à la poudre obtenue par broyage.

La chaux hydratée (notation S selon la norme EN 459-1), aussi appelée « chaux éteinte » ou encore « hydroxyde de calcium » [Ca(OH)_2] se présente essentiellement sous forme d'hydroxyde obtenu par hydratation – ou extinction – contrôlée de l'oxyde. C'est une poudre sèche obtenue par addition contrôlée d'eau à la chaux vive. Cette opération se pratique industriellement dans un hydrateur. La chaux hydratée peut être disponible à l'état de poudre, d'une part, et en suspension dans l'eau, d'autre part. Dans ce dernier cas, on obtient, du plus concentré au plus dilué, une pâte, un coulis, ou un lait de chaux.

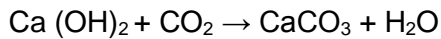
Il faut signaler que la chaux dolomitique est également produite sous forme de chaux dolomitique semi-hydratée, c'est-à-dire constituée d'hydroxyde de calcium et d'oxyde de magnésium (notation S1 selon la norme EN 459-1) : $\text{Ca(OH)}_2.\text{MgO}$.

Propriétés physico-chimiques des chaux aériennes calciques

La chaux vive possède une grande affinité vis-à-vis de l'eau et est, de ce fait, un dessiccant efficace. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire de maintenir les stocks et échantillons de chaux vive à l'abri de l'atmosphère, sous peine de voir la réactivité diminuer suite à une hydratation partielle.

Une fois la chaux vive au contact avec l'eau, il se produit une réaction très exothermique (1 155 kJ/kg de CaO) qui, en conditions et quantités d'eau contrôlées, mène à la formation de chaux hydratée solide dont les molécules d'eau sont liées chimiquement. Le suivi de la production de chaleur au cours du temps est, par ailleurs, mis à profit pour tester la réactivité d'une chaux vive.

Contrairement à la chaux vive, la chaux hydratée est capable de fixer le dioxyde de carbone de l'air, en atmosphère humide, pour donner du carbonate de calcium selon la réaction suivante :



Ces deux formes de la chaux aérienne ont des caractéristiques propres et des propriétés utilisables dans un panel étendu d'applications dépassant largement le cadre de la construction et du génie civil. En outre, l'industrie de la chaux, par sa maîtrise des procédés de production, a pu développer des qualités de chaux vives, chaux hydratées, laits de chaux, chaux magnésiennes et dolomitiques, ainsi que des calcaires, dont la composition et les propriétés physico-chimiques sont désormais modulables en fonction de l'application concernée.

La liste suivante illustre les nombreuses fonctionnalités de ces produits :

- source de calcium et de magnésium ;
- pouvoir neutralisant ;
- déshydratant ;
- agent purifiant ;
- agent flocculant et précipitant ;
- fondant ;
- caustifiant ;
- filler ;
- pouvoir réfractaire ;
- agent de blanchiment.

Ces propriétés fonctionnelles des chaux aériennes sont mises à profit dans de nombreuses applications industrielles décrites ci-dessous.

- Sidérurgie et industrie des métaux non-ferreux
- Environnement
- Agriculture
- Industrie chimique
- Industries alimentaire et sucrière
- Industrie verrière
- Industrie papetière
- Construction
- Génie civil

Usages en sidérurgie et dans l'industrie des métaux non-ferreux

Si, historiquement, la chaux a surtout été utilisée abondamment dans le domaine de la construction, l'essor industriel du début du XX^e siècle a inversé cette situation, l'industrie sidérurgique étant devenue jusqu'au milieu des années 2000 un secteur très consommateur

de chaux calcique et dolomitique, ainsi que de calcaire de grande pureté, comme le montre la Figure 30. Depuis, la part de l'utilisation en sidérurgie a baissé avec la fermeture progressive des hauts fourneaux sur le territoire français.

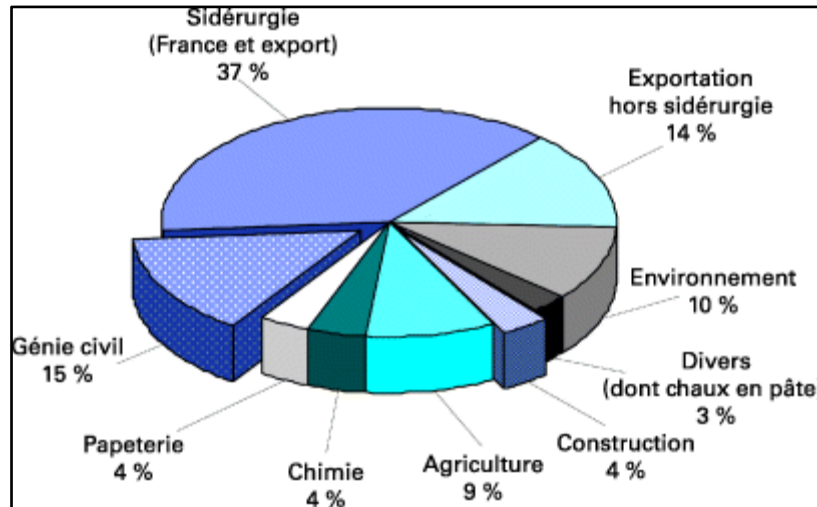


Figure 30 : Utilisations des chaux produites en France en 2008, en pourcentage des volumes produits (Source : Union des producteurs de chaux).

En sidérurgie, la chaux est exploitée essentiellement comme fondant et purifiant, tout comme le calcaire et la dolomie (cf. 5.1.3), pour concentrer les impuretés du minerai de fer à haute température dans le haut fourneau, afin de procéder à la séparation de la fonte et de ses impuretés (essentiellement silicium, phosphore, soufre et manganèse) qui se retrouvent sous forme de laitier, dont l'évacuation devient plus aisée.

La fonte est ensuite épurée et appauvrie en carbone en vue de la fabrication de l'acier dans le convertisseur à oxygène. Le rôle purifiant de la chaux intervient à nouveau dans ce processus. La chaux dolomitique présente, elle, en outre, l'avantage de préserver les matériaux réfractaires des fours en limitant leur dissolution par les composés des scories formées.

Les spécifications relatives à la pureté et à la réactivité de la chaux dite « sidérurgique » sont particulièrement sévères. De plus, le secteur exige une granulométrie régulière et constante.

L'industrie métallurgique (métaux non-ferreux), tire également profit de l'utilisation de la chaux :

- comme agent de flottation des minerais renfermant le cuivre, le zinc, le nickel, ou encore le plomb ou l'uranium ;
- comme agent de basicité pour un ajustement précis du pH (par exemple d'une solution de cyanure, en vue des extractions de métaux précieux) ;
- pour régénérer la lessive de soude nécessaire à l'extraction de l'aluminium de la bauxite (procédé Bayer) ;
- comme source de calcium ou de magnésium métallique.

Usages dans l'environnement

Les applications environnementales de la chaux se manifestent dans plusieurs registres.

Le traitement des eaux domestiques ou industrielles, où l'action de la chaux permet la neutralisation de l'acidité de l'eau, son adoucissement, sa reminéralisation, ou encore sa purification (par floculation des matières en suspension, précipitation des éléments toxiques, ou stérilisation).

On utilise également la chaux dans le traitement des boues industrielles pour ses facultés d'absorption de l'eau et d'évaporation, l'apport de matière sèche qu'elle procure, et ses capacités à bloquer les étapes de fermentation.

Des chaux hydratées développant une grande surface spécifique et un volume poreux important ont été élaborées pour la captation des composés acides contenus dans les rejets gazeux des incinérateurs ou des installations industrielles. Sont particulièrement visés ici des composés, tels le dioxyde de soufre, l'acide chlorhydrique ou fluorhydrique. La chaux forme, avec ces gaz acides, des solides qui sont captés et évacués au niveau des installations de dépoussiérage. En fonction du procédé utilisé, la chaux sera injectée sous forme de chaux éteinte pulvérulente, ou de lait de chaux.

Usages en agriculture

La tendance naturelle des sols est à l'acidification qui, à terme, entraîne une diminution de la fertilité vis-à-vis des cultures. La chaux améliore la structure des sols argileux ou limoneux, devenus lourds, plastiques et difficilement travaillables au cours du processus d'acidification. Le calcium et le magnésium apportés par la chaux sont aussi des éléments nutritifs, indispensables à la croissance des plantes, qui compensent les carences du sol naturel.

Usages dans l'industrie chimique

La chaux est un produit de base polyvalent et peu onéreux, intervenant à différents stades dans de nombreux processus industriels de fabrication d'autres composés. On peut citer, pêle-mêle :

- production de soude caustique et autres alcalis, par réaction avec les carbonates de sodium ;
- fabrication des carbures de calcium, intermédiaires de production de l'acétylène et du cyanamide de calcium ;
- fabrication d'hypochlorites de calcium (agent de blanchiment) ;
- fabrication des sels de déneigement ;
- production de glycols ;
- production d'intermédiaires de l'industrie pharmaceutique (bromures, fluors, phosphates de calcium, etc.). Ce sont surtout les propriétés de réactivité de la chaux avec les acides qui sont mises en avant ;
- saponification des huiles ;
- production des phosphates ;
- production de magnésie au départ de calcaire dolomitique, en vue de la fabrication de matériaux réfractaires ;

Usages dans les industries alimentaire et sucrière

La chaux est un intermédiaire important dans l'industrie alimentaire pour l'élaboration, la transformation ou la conservation de produits. Citons notamment :

- en sucrerie, la chaux hydratée est un agent de correction d'acidité du jus issu des betteraves. De plus, elle coagule les impuretés indésirables dans les produits finaux ;
- dans l'industrie laitière : la réduction de l'acidité du lait avant pasteurisation, la séparation de la caséine, le prétraitement du maïs... ;
- dans l'industrie pâtissière : la préparation d'ingrédients divers, de gélatines ;
- la purification de l'acide citrique ;
- la conservation des fruits et légumes : la chaux hydratée absorbe le CO₂ émis par le processus de mûrissement et régule l'équilibre oxygène/CO₂.

Usages dans l'industrie verrière

La chaux, mélangée à du sable siliceux et du carbonate de sodium, a la faculté de former, à haute température, une pâte de verre. La chaux vive, le calcaire et le calcaire dolomitique sont utilisés, non seulement pour assurer la fusion du mélange, mais aussi pour stabiliser la structure du verre afin d'empêcher sa dévitrification à l'issue du refroidissement.

Usages dans l'industrie papetière

Dans l'industrie papetière, la chaux, et différentes formes de calcaires, interviennent à plusieurs niveaux :

- régénération de la soude caustique intervenant dans la fabrication de la pâte de papier (procédé Kraft) ;
- neutralisation par le lait de chaux des eaux acides issues de la fabrication de la pâte par le procédé au bisulfite ;
- production d'hypochlorite de calcium pour le blanchiment ;
- fabrication du carbonate de calcium précipité (PCC) à partir de lait de chaux

Usages dans les activités de la construction

De nos jours, la chaux est utilisée, tant pour restaurer et rénover, que pour construire des bâtiments neufs. Elle s'emploie (sous forme de chaux aérienne hydratée, ou de chaux en pâte) dans les travaux de maçonnerie, d'enduits (intérieurs et extérieurs) et de décoration. Elle est aussi utilisée dans la fabrication de blocs structurels porteurs, tels que les briques silico-calcaires et le béton cellulaire.

Mortiers, enduits et badigeons

Par mortiers, on entend ici des mélanges de charges minérales (essentiellement du sable) et de liants (chaux, ciment, etc.), ou de mélanges appropriés de liants, utilisés principalement en travaux de maçonnerie et d'enduisage. Ils peuvent être fabriqués sur chantier ou en usine. Dans ce dernier cas, on parle de mortiers industriels prêts à l'emploi.

La chaux aérienne possède des propriétés qui lui confère des usages importants pour les mortiers de construction (mortiers à maçonner, pour enduits) :

- Après gâchage, elle forme une pâte qui améliore l'ouvrabilité et la rétention d'eau des mortiers frais ;

- Par la suite, la fixation de dioxyde de carbone, présent dans l'air, par l'hydroxyde de calcium et l'hydroxyde de calcium et de magnésium, conduit à la formation de carbonates qui contribuent à la résistance mécanique et à la durabilité des mortiers durcis.

La chaux améliore les propriétés rhéologiques des mortiers et leur ouvrabilité. Elle augmente l'adhérence des mortiers sur leurs supports, tout en leur procurant la souplesse s'opposant à l'apparition de fissures. En augmentant la perméabilité à la vapeur d'eau, et en diminuant la conductivité thermique des mortiers, elle contribue à la régulation de l'hygrométrie dans les habitations et à l'amélioration du confort de vie. Sur le plan esthétique, elle donne aux enduits une luminosité appréciée.

Briques silico-calcaires et bétons cellulaires

Les briques silico-calcaires et les bétons cellulaires sont des matériaux de construction mis au point au tout début du XX^e siècle. Ils sont fabriqués à partir de sable, de chaux vive et d'eau pour les briques silico-calcaires, et des mêmes composants, auxquels on ajoute une faible quantité d'aluminium métallique, à l'origine de la forte porosité du matériau, pour les bétons cellulaires.

Ces mélanges subissent un autoclavage au cours duquel une réaction chimique se produit entre la chaux, la silice et l'eau, avec formation de silicates de calcium hydratés (CSH) qui entraîne une rigidification du système. En autoclave, cette réaction est, non seulement accélérée, mais aussi mûrie, de sorte que les CSH se transforment en un cristal plus ordonné : la tobermorite-11Å, qui confère au matériau néoformé des propriétés mécaniques élevées.

Dans le cas du béton cellulaire, la réaction de l'aluminium en milieu basique provoque un dégagement gazeux à l'origine de la grande porosité du matériau et de ses propriétés d'isolation thermique intéressantes.

Usages dans les activités du Génie civil

Par Génie civil, il faut entendre toutes les activités liées à la construction des infrastructures et, notamment, de transports (routes, voies ferrées, ouvrages portuaires, aéroportuaires et hydrauliques, plates-formes de tous types, travaux souterrains, etc.). Il peut s'agir, aussi bien de travaux publics, que de travaux privés.

C'est probablement dans ce domaine d'activité que la chaux exprime le mieux ses fonctionnalités, tant les applications y sont nombreuses et diversifiées.

Traitement des sols

La chaux est surtout connue pour ses qualités dans le domaine du traitement des sols en place. Les réactions sont complexes et multiples et peuvent se résumer comme suit :

- réduction immédiate de la teneur en eau par hydratation de la chaux vive :

$$\text{CaO} + \text{K}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{dégagement de chaleur ;}$$
- modifications rapide des caractéristiques des sols argileux, en particulier grâce à la réduction de l'activité des argiles et à leur floculation ;
- augmentation instantanée de la portance du sol facilitant les opérations de terrassement (extraction, transport et mise en œuvre) ;
- dans le cas des sols argileux, combinaison lente et progressive de la chaux avec les argiles pour former un liant dit « pouzzolanique » qui améliore les performances mécaniques finales. Cette dernière réaction peut aussi se produire avec des sols argileux secs, à

condition de fournir l'eau nécessaire à la réaction. Cette opération peut se faire en une seule étape en faisant appel à du lait de chaux.

Le traitement à la chaux permet aussi, en modifiant le comportement des minéraux argileux, de préparer certains matériaux en vue d'un traitement ultérieur d'une autre nature telle que :

- traitement mécanique par tamisage, en carrière notamment, pour éliminer les fines d'un matériau granulaire argileux et optimiser la production de l'installation (Figure 15) ;
- traitement chimique par un liant hydraulique dont on sait qu'il s'accommode mal de la présence d'argile. On parle alors de traitement mixte ;
- recyclage de matériaux chargés en fines argileuses.

Il faut également signaler que la chaux convient aussi au traitement de matériaux calcaires, tels que les craies humides et les calcaires tendres. Dans ce cas, elle apporte une amélioration des performances mécaniques imputable à sa carbonatation, une fois mélangée au matériau.

Complément de prise des liants hydrauliques et pouzzolaniques

La chaux, essentiellement sous forme vive, entre dans la composition de certains liants à base de laitiers de hauts-fourneaux et/ou de cendres volantes silico-alumineuses de centrales thermiques. Ces liants sont fabriqués sur chantier ou en usine, pour les besoins des travaux routiers.

Renforcement des sols et travaux en souterrains

Sous forme hydratée, la chaux, en suspension dans l'eau, seule ou en mélange avec d'autres composants, est utilisée en injection dans les sols pour modifier leurs caractéristiques (porosité, stabilité mécanique, etc.).

Elle est aussi utilisée dans le même but, sous forme vive, en poudre ou granulaire, pour réduire la teneur en eau en profondeur. L'incorporation se fait avec malaxage à la tarière verticale, ou par cartouches dans des forages.

Enfin, la chaux hydratée intervient dans les mortiers spéciaux pour usage spécifique dans les ouvrages souterrains, par exemple dans les mortiers de bourrage des tunnels.

Agent modifiant des enrobés bitumineux

La chaux, sous forme d'hydrate, est considérée comme un agent modifiant multifonctionnel, qui permet :

- d'améliorer l'adhésivité bitume/granulat ;
- de s'opposer à l'orniérage en augmentant la viscosité du bitume ;
- de ralentir le vieillissement chimique de ce dernier ;
- de ralentir la propagation des fissures de fatigue dans l'enrobé et donc globalement d'augmenter la durée de vie des matériaux bitumineux.

Autres usages

Les vertus antiseptiques et médicinales de la chaux sont exploitées depuis des siècles. L'eau de chaux est encore employée de nos jours pour ses vertus thérapeutiques. De façon artisanale ou industrielle, la chaux est utilisée dans les activités de tannerie, de savonnerie, et bien d'autres encore...

La chaux a accompagné de tous temps l'activité humaine, artisanalement et industriellement. Elle fait partie intégrante de notre environnement, et se révèle un ingrédient indissociable de l'ensemble de nos activités. La modernisation et la maîtrise de sa fabrication ont permis, et permettent encore à l'heure actuelle, le développement de produits à haute valeur ajoutée, adaptés aux besoins de tous les secteurs.

5.2. DOMAINES D'UTILISATION DES CARBONATES DANS L'INDUSTRIE

5.2.1. Charges minérales

Les charges carbonatées sont obtenues à partir de calcaires blancs/purs ou de dolomie de haute qualité, réduits très finement en poudre (<80 µm) par micronisation. Les charges dont la teneur en carbonate de calcium (CaCO₃) est supérieure ou égale à 98 % font partie des domaines des charges blanches et sont utilisées dans la fabrication des papiers, peintures, enduits et mastics et dans le pharma-cosmétique. Les charges dont la teneur en CaCO₃ est comprise entre 95 et 98 % sont utilisées dans la fabrication des plastiques, caoutchoucs, etc.

Le carbonate de calcium utilisé pour ces charges peut se présenter sous plusieurs formes. Les deux principales sont le carbonate de calcium précipité (PCC) produit synthétiquement, et le carbonate de calcium naturel finement broyé (GCC). Ils sont principalement utilisés comme charges blanches et rentrent en concurrence dans certains usages. Le GCC garantit une forte valeur ajoutée au produit grâce à ses caractéristiques particulières telles que la luminosité, la blancheur et la pureté, qualités recherchées en particulier dans les produits pharmaceutiques, stucs, papiers, peintures.

Charges pour papiers

Le papier est constitué de fibres de cellulose principalement extraites du bois ou de papiers recyclés et de charges minérales telles que le calcaire. Ces charges permettent de remplir les interstices entre les fibres de cellulose et d'améliorer l'imprimabilité des feuilles de papier. Elles ont l'avantage de remplacer partiellement les autres charges plus onéreuses (fibres, kaolin, talc). Les charges carbonatées sont également utilisées lors du couchage du papier. Le couchage est l'un des processus de fabrication du papier durant lequel la feuille est recouverte sur une ou deux faces d'une couche de pigments minéraux (souvent des charges minérales, latex et eau). Cette étape permet l'impression du papier en couleur. Les charges sont également utilisées dans le papier à cigarette, les billets, les papiers-sécurité etc. La dolomie est peu utilisée à cause de sa dureté trop élevée qui favorise la dégradation des machines.

Charges pour peintures

Les charges pour peintures servent en majorité à réduire l'utilisation de substances plus onéreuses (ex. oxyde de titane). La proportion de charges carbonatées agit sur la qualité de la peinture et est fonction de son utilisation. Ainsi, la proportion moyenne de carbonates est de 10 à 35 %, et jusqu'à 50 % pour les peintures de haute qualité (ex. peintures mates). Elle peut atteindre 60 % pour les peintures décoratives à émulsion intérieure (Tableau 6). Les granulométries varient aussi selon le type de peintures désirées. Par exemple, elles seront grossières pour les peintures mates. Généralement, elles varient de 0,5 à 10,0 µm.

Les carbonates calciques ont de nombreuses qualités telles qu'une faible prise d'huile, une blancheur élevée, une résistance aux intempéries, une faible abrasivité, une faible teneur en électrolyte, une stabilisation du pH, des propriétés rhéologiques et anticorrosives améliorées. La craie améliore la dispersion des pigments en se mélangeant au blanc de titane.

Cependant, ils sont sensibles aux attaques chimiques et ils sont plutôt transparents à l'état humide. C'est pour cela que la dolomie est privilégiée pour les peintures d'extérieur, notamment pour la protection des navires car elle est plus résistante aux attaques acides et à la corrosion.

Types de peintures	Teneur en carbonate de calcium
Peintures émulsions intérieures	jusqu'à 60 %
Peintures émulsions extérieures	jusqu'à 50 %
Laques	jusqu'à 15 %
Peintures poudres	5 - 20 %
Peintures industrielles	5 - 20 %
Peintures routières	30 - 50 %
Primaires	5 - 20 %
Encres	jusqu'à 15 %

Tableau 6 : Proportion de CaCO_3 dans les peintures décoratives et industrielles (Source : OMYA, 2012).

Charges pour mastics, enduits et adhésifs

Les charges carbonatées entrent également dans la composition des enduits (substances appliquées sur un support brut et s'y collant de façon permanente) et des adhésifs (substances qui permettent d'adhérer tous types d'objets entre eux), jusqu'à 80 % pour les enduits et 60 % pour les adhésifs (Tableau 7). Ces charges peuvent être fonctionnelles ou inertes et sont utilisées pour leur blancheur, leurs qualités (absorption d'huile, granulométrie, résistance à l'eau, etc.) ou encore pour leurs coûts.

Les mastics (pâtes plastiques) utilisés notamment pour réparer, coller et effectuer des joints sont constitués jusqu'à 60 % de carbonates calciques (Tableau 7) et d'une certaine proportion d'huile de lin (15 %). Les poudres de carbonates utilisées doivent avoir une granulométrie « moyenne » (15-20 μm) pour éviter de rendre le mastic trop fluide ou trop visqueux.

Applications des adhésifs	Teneur en carbonate de calcium
Construction (revêtements de sols)	jusqu'à 60%
Papier en carton	5 - 50%
Collage du bois	jusqu'à 50%
Applications des mastics	Teneur en carbonate de calcium
Construction	
Verre isolant	50 - 60%
Coatings	jusqu'à 50%
Mastics pour pièce humide	jusqu'à 60%
Transport	
Coatings	40 - 65%
Réduction phonique & vibratoire	jusqu'à 60%

Tableau 7 : Proportion de CaCO_3 dans les adhésifs et mastics (Source : OMYA, 2012).

Charges pour plastiques et caoutchoucs

Les charges utilisées pour les plastiques et caoutchoucs ont une teneur en CaCO_3 comprise entre 95 et 98 %. Elles peuvent être ajoutées jusqu'à hauteur de 40 % en remplacement de la résine, pour baisser le prix des produits finis sans en altérer les caractéristiques de base. Elles sont également utilisées pour le PVC (17 à 40 % de charges carbonatées) pour jouer un rôle fonctionnel (résistance thermique). Les charges carbonatées sont ainsi couramment utilisées dans les câbles, les tuyaux, les profilés de fenêtre, les composites, les pièces polyoléfiniques, les caoutchoucs, les mousses polyuréthanes, les revêtements de sol, le cuir synthétique.

Charges en pharmacie et cosmétique

Dans ces applications, les carbonates (calcaires blancs/purs ou de dolomie de haute qualité) sont également utilisés sous formes de charges très fines ($<80 \mu\text{m}$) et très pures, avec des teneurs en CaCO_3 supérieures ou égales à 98 %.

En pharmacie, les carbonates magnésiens (magnésite et dolomie) sont utilisés pour fabriquer du carbonate de magnésium synthétique. Ils servent d'agent inerte ou d'absorption. Les carbonates calciques, quant à eux, sont utilisés dans la fabrication de pilules et cachets comme excipient ou agent actif (cachets facilitant la digestion). Ou encore pour la fabrication de pâte dentifrice.

En cosmétique, ils sont utilisés pour leurs qualités de rétention d'essences de parfum.

Sous forme de poudres crues, les carbonates peuvent aussi entrer dans la composition d'insecticides et de pesticides.

5.2.2. Sidérurgie

La sidérurgie est un important secteur de consommation de carbonates crus en France, malgré une réduction de cette part avec la fermeture progressive des hauts fourneaux sur le territoire national. Ils interviennent à deux étapes de la production d'acier.

Production de fonte

Lors de la production de fonte, le calcaire et la dolomie sous forme de castines jouent le rôle de fondants en abaissant la température de fusion des minerais non auto-fondants dans les hauts fourneaux. La production de fonte est en effet effectuée dans des hauts-fourneaux par le mélange de minerai de fer, de castines et de coke, le coke provenant de la pyrolyse de charbon dans un four et dans un environnement sans oxygène. Lors de ce processus se forment la fonte et le laitier. La fonte est redirigée vers une aciérie pour produire de l'acier alors que le laitier est réutilisé dans le BTP notamment pour faire des enrobés routiers bitumineux.

En outre, le calcaire permet de contrôler la basicité du laitier et donc la teneur en soufre qui doit diminuer, ainsi que d'éliminer d'autres impuretés (oxyde de phosphore, silice). La dolomie, quant à elle, permet une meilleure fluidité du laitier et une protection des revêtements des fours contre l'attaque de la silice produite lors de la fusion du laitier.

Agglomération

L'étape de l'agglomération fait également intervenir des carbonates. L'agglomération est un processus qui intervient avant l'intégration du minerai de fer dans les hauts-fourneaux. Il consiste à brûler le coke pour atteindre la température de frittage du minerai et ainsi optimiser l'utilisation des hauts-fourneaux. Les produits obtenus sont appelés « agglomérés ». L'ajout de poudres de calcaire et de dolomie est essentiel lors de l'agglomération, la dolomie amenant

de la résistance aux réfractaires présents dans les fours. Il faut de l'ordre de 100 à 200 kg de calcaire pour produire 1 t d'acier.

5.2.3. Verrerie

Le calcaire, la dolomie et la magnésite sous forme de castines crues entrent dans la fabrication du verre en tant qu'éléments stabilisateurs. Ils permettent une meilleure résistance mécanique (dureté, compression) et chimique (résistance à l'eau, aux acides, etc.). La magnésite permet l'apport de MgO et abaisse ainsi la température de fusion et augmente le lustre du verre. La proportion de calcaire est d'un peu plus de 10 % en général (Tableau 8) et celle de la magnésite entre 0 et 4%.

Constituants	Proportions (en %)
Sable	71
Soude (carbonate de sodium)	14
Calcaire, dolomie	11
Autres (coloration du verre, etc.)	4

Tableau 8 : Proportions des matières premières servant à la fabrication de verre d'emballage (Source : Verallia, 2010).

5.2.4. Réfractaires et isolants

Les réfractaires sont des matériaux à haute résistance thermique. Ils sont utilisés comme mur, bouclier ou enceinte thermique pour des applications de chauffe dans les fours, les chambres de combustion, les réacteurs, les fourneaux, etc.

Les castines et poudres frittées de dolomie et magnésite sont utilisées en tant que matière première pour la fabrication de réfractaires basiques. Concernant les dolomies, il est exigé une teneur généralement supérieure à 19 % MgO. Concernant la magnésite, elle est utilisée pour la fabrication de magnésie fondue qui est un autre produit réfractaire de qualité supérieure à celle des réfractaires basiques.

Dans le domaine des isolants, la dolomie est incorporée avec des roches silicatées pour la fabrication de laine de roche.

5.2.5. Céramiques et néocéramiques

Les carbonates entrent dans la composition des céramiques en tant que matière première, les plus utilisés étant la craie, la magnésite et la dolomie à hauteur de 20 à 30 %. Ils ont principalement le rôle d'additifs dans les mélanges de céramiques. La dolomie est préférée au calcaire étant donné sa meilleure résistance au feu.

Les poudres de carbonates sont également ajoutées dans la fabrication des néocéramiques, comme fondants. Ce sont des céramiques dont la composition est sans produits argileux mais avec des poudres d'oxydes, de carbures, de nitrures ou de carbone qui sont obtenues en grande partie chimiquement. Les pièces obtenues sont utilisées dans les domaines aéronautique, spatial, nucléaire, électronique et biomédical. Les néocéramiques sont donc des produits de haute qualité dont les propriétés sont une bonne résistance mécanique, une faible densité, une dureté élevée et une forte résistance à l'usure.

5.2.6. Construction/ BTP

Les matériaux carbonatés pour l'usage en BTP sont généralement de qualité moindre en termes de blancheur ou de pureté chimique, néanmoins caractérisés par une haute teneur en CaCO_3 . Ils sont broyés pour obtenir des poudres de dimension inférieure à 80 μm , les fillers. Les calcaires ou dolomies sous forme de fillers sont utilisés pour produire des asphaltes d'étanchéité en étant mélangés au bitume. Ils entrent également dans la composition des enrobés routiers bitumineux. Dans l'asphalte, le carbonate de calcium sous forme de filler agit comme correcteur granulaire pour augmenter la résistance mécanique du mélange et pour remplir les interstices entre les éléments. Il améliore la cohésion avec le bitume et augmente son ouvrabilité. Les fillers doivent être conformes à la norme européenne standard EN 13043 ou aux réglementations locales en vigueur.

5.2.7. Autres

Un faible pourcentage de carbonates (calcaire, dolomie) est utilisé pour les boues de forage afin de les rendre plus visqueuses et denses si besoin est.

La dolomie est également utilisée comme poudre à récurer et à polir les métaux en tant qu'abrasif doux.

En métallurgie, les carbonates jouent également le rôle de fondant dans le traitement des minerais oxydés. Par exemple, un mélange de calcite et de silice, le tout broyé, permet d'extraire le cobalt des minerais arséniés (ex. Bou Azzer, Maroc).

5.3. DOMAINES D'UTILISATION DES CARBONATES DANS L'AGRO-ALIMENTAIRE

5.3.1. Amendement

Les carbonates calciques (calcaire, craie, marne) et magnésiens (dolomie) sont très utilisés pour les amendements. En effet, leur épandage sous forme de poudres crues permet de corriger l'acidité du sol, d'en améliorer sa texture et de fournir les minéraux (CaO et MgO) indispensables aux plantes (rôle de fertilisant). Les granulométries fines, en poudres de l'ordre de 80 μm par exemple, sont plus efficaces et agissent plus rapidement que les granulométries plus grossières. En outre, les carbonates bruts sont plus lents à réagir que les variétés calcinées. La Bretagne est un des plus importants consommateurs étant donné l'acidité de son sol. Les prix peuvent varier de 55 à 85 €/t.

5.3.2. Alimentation animale et humaine

Les poudres de carbonates (calcaires, dolomies) sont mélangées aux farines qui alimentent les bovins, les porcins ou les volailles avec une teneur moyenne de 1,0 à 1,5 % et jusqu'à 6,0 % pour les volailles. Les poudres de calcaires peuvent être utilisées en confiserie et en boulangerie pour son rôle d'antiagglomérant et pour la fabrication de pâtes à mâcher (chewing-gum). Dans ce cas, les poudres sont plus pures que celles utilisées pour l'alimentation animale.

6. Marchés et perspectives

6.1. MARCHÉ INTERIEUR : REVUE DES PRINCIPALES SOCIÉTÉS ET LEUR POSITIONNEMENT SUR LE MARCHÉ FRANÇAIS

6.1.1. OMYA

OMYA (<http://www.omya.com/fr-fr>) est une entreprise suisse, présente sur le plan mondial dans la distribution de produits chimiques de spécialité. C'est un producteur international de charges minérales à base de carbonate de calcium pour l'industrie, et le numéro 1 en France. Ses principaux marchés sont l'industrie du papier, des matières plastiques, de la peinture, vernis et adhésifs, ainsi que l'industrie du bâtiment, l'environnement, la pharmacie, l'agriculture et la nutrition animale. Le groupe OMYA compte aujourd'hui plus de 180 sites industriels dans une cinquantaine de pays. En France, le groupe dispose d'un bon maillage territorial, favorisé par de nombreux rachats et la diversification de ses activités ces dernières années.

Ainsi, la filiale CMF Products est née le 1^{er} février 2015 après le rachat de la totalité des activités carbonates de calcium et négoce associées de Carmeuse France, comprenant l'ensemble des sites de production, soit une dizaine de carrières réparties sur le territoire national, et tout l'outil de production. Cette stratégie a été complétée par le rachat de l'usine d'Imerys de Sainte Croix de Mareuil. Le groupe OMYA possède en outre des parts dans les entreprises Carrélis, Charges minérales du Périgord, Société des carbonates de Chateaupanne, et O.M.G (Onyx et Marbres Granulés www.omg-sa.com/fr/, Cf. 4.4, Figure 20) exploitant les marbres du bassin de Saint Béat.

Le groupe MEAC SAS, dont l'expertise est le chaulage³ est également une filiale du groupe OMYA, avec une production totale autorisée de 3 020 kt et 10 usines en France (Figure 31). Les autres carrières OMYA en France représentent une production totale autorisée de 4 775 kt/an, pour une production moyenne de 3 200 kt/an (BDCM, 2015).

³ Ajout d'amendements calciques ou calco-magnésiens à un sol pour en corriger l'acidité et en améliorer la fertilité.



Figure 31: Implantations des usines du groupe OMYA en France (Source: MEAC).

6.1.2. Provençale SA

Provençale SA (www.provencale.com) a son siège social dans le Var et exploite 3 carrières en France à Brignoles (Figure 33), Pouzilhac, et Tautavel (La Narède, Cf. 4.4, Figure 17) ainsi qu'une carrière en Espagne (Marcael, Figure 32).

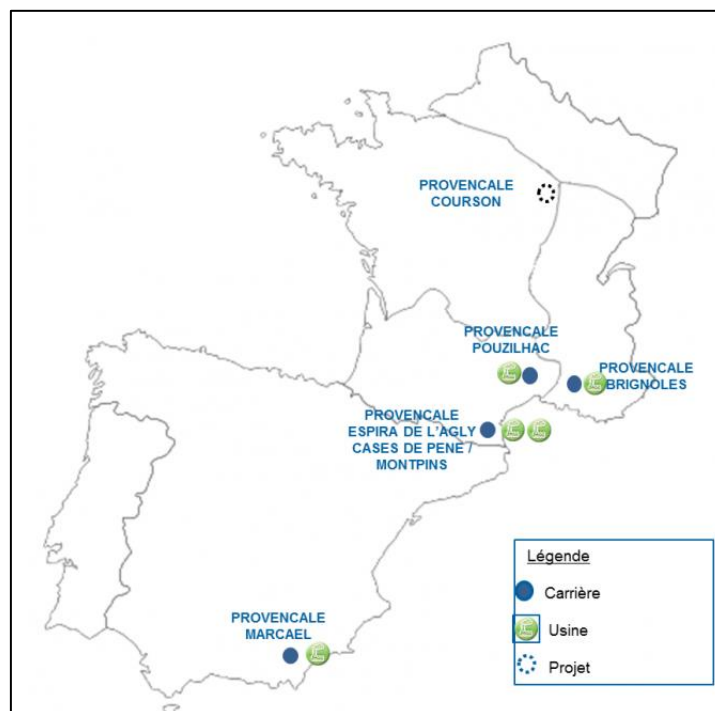


Figure 32 : Implantations de Provençale SA en France et en Espagne (Source : Provençale SA).

La production totale de ces carrières est de l'ordre de 600 kt/an de calcaires et calcaires marbriers caractérisés par leur blancheur et leur grande pureté, principalement destinés à la production de carbonate de calcium pour charges minérales. Provençale SA se dit 2^e fabricant européen de carbonate de calcium et a développé sa propre gamme de produits spécifiques pour peintures, papiers, plastiques, enduits et mastics, etc. ainsi que pour l'alimentation humaine et animale.

Quelques exemples de ses produits sont :

- **AH Mikhart®** : gamme de carbonates de calcium répondant aux exigences de l'alimentation humaine pour l'additif E170. Issue des gisements de marbre blanc des Pyrénées Orientales, caractérisé par sa très grande blancheur et sa pureté chimique. La gamme complète Mikhart® peut être utilisée dans toutes les applications industrielles du CaCO₃ ;
- **Alica®** : gamme de carbonate de calcium naturel pour alimentation animale, également issue des gisements de marbre blanc du sud de la France, et élaborée dans les usines de Pouzilhac (Gard) et Cases de Pène (Pyrénées-Orientales) ;
- **Calprec®** : carbonate de calcium précipité (PCC) ;
- **Procarb®** : pulpe de carbonate de calcium destiné à la fabrication de peintures aqueuses ;
- **Calgar®** : issue des gisements de marbre de la Vallée du Rhône, adaptée à toutes les applications industrielles nécessitant une grande pureté et un niveau de blancheur intermédiaire ;
- **Criscal®** : issue des gisements de marbre les plus blancs d'Espagne, adaptée à toutes les applications industrielles où un haut niveau de blancheur est exigé.

La société complète son offre par une gamme de granulés de marbre naturel dans différentes teintes et granulométries, comme le marbre rosé de Brignoles extrait de la carrière de Candelon (Figure 33), pouvant notamment être utilisés dans l'industrie du bâtiment (dalles et margelles, mobiliers urbains etc.) ainsi que quelques produits carbonatés pour usages en amendements.



Figure 33 : Carrière de Candelon (Brignoles, Var) avec une production autorisée de 50 kt/an (Cliché : Provençale SA).

6.1.3. Novacarb

La Société NOVACARB (www.novacarb.fr) exploite les carrières de Pagny et du Revoi, à Pagny-sur-Meuse (Cf. 4.4, Figure 15) qui ont production totale de 2 000 kt/an. Le matériau est un calcaire très pur (98 % à 99,5 % CaCO₃), traité sur le site de la Madeleine.

Les produits obtenus sont principalement du carbonate de sodium utilisé notamment pour la fabrication des verres creux (bouteilles, ampoules) et des verres plats (automobile, construction) et du bicarbonate de sodium à destination des marchés de la pharmacie, de l'alimentation, de la détergence et services à l'environnement (traitement des eaux).

Novacarb est regroupée au sein du groupe Novacap, spécialisé dans les industries pharmaceutique, cosmétique et de la santé, et en phase d'internationalisation progressive (récentes implantations d'usines en Amérique et en Asie (Singapour)).

6.1.4. Solvay Carbonates France

Le groupe chimique belge Solvay (www.solvay.com) n'exploite qu'une carrière de calcaire sur le territoire français, celle de La Mansolle (Cf. 4.4) avec une production moyenne de 1 000 kt/an. Le matériau est un calcaire très pur (98 % à 99,5 % CaCO₃) principalement destiné à produire du carbonate de sodium et du bicarbonate de soude. La soudière de Dombasle-sur-Meurthe, où sont traités les produits, abrite un laboratoire de recherche et de développement d'envergure internationale pour l'ensemble des activités carbonate, bicarbonate et dérivés du groupe Solvay.

6.1.5. Samin

Filiale de Saint-Gobain, SAMIN (www.samin.fr) exploite trois carrières de carbonates en France, une de calcaire et deux de dolomies. La capacité totale de production est de l'ordre de 500 kt/an et le principal débouché de ces produits est l'industrie verrière.

Les matériaux carbonatés de ces carrières sont en effet caractérisés par une très basse teneur en fer (entre 0,03 % et 0,06 % Fe₂O₃), permettant des usages en verrerie spécialisée (verres extra-clairs utilisés dans l'industrie solaire, les flacons de luxe et emballages de prestige). Les matériaux d'une pureté inférieure sont destinés aux marchés plus classiques de la chimie et des charges minérales, en sidérurgie et fonderie, pour l'isolation, dans le bâtiment, ou encore en agriculture.

La carrière de calcaire est située à Châtillon-en-Michaille et a une production autorisée est de 150 kt. Les carrières de dolomie sont celles de Jas de Rhodes (Bouches-du-Rhône) et du Cros Haut (Lozère) (Cf. 4.4, Figure 24) avec des productions autorisées respectives de 200 kt/an et 130 kt/an.

6.1.6. Imerys

Le groupe Imerys (www.imerys.com), s'il n'exploite en 2015 qu'une carrière de carbonates en France (la carrière de craie de Précy-sur-Oise avec une production autorisée de 200 kt/an, après fermeture de la carrière de dolomie de Sainte-Colombe-sur-Guette), est toutefois très présent dans les filières aval. L'entreprise est ainsi est numéro 2 de la production de carbonate de calcium finement broyé (GCC) avec une production de 2 Mt/an dans 26 usines dont 6 en Europe, et numéro 3 pour la production de carbonate de calcium précipité (PCC), avec 17 usines et le rachat en 2015 des activités de Solvay comprenant 4 usines en Europe, Egensee (Autriche), Lostock (Royaume Uni), Rheinberg (Allemagne) et Salin-de-Giraud en France.

N.B. : Le leader mondial de production de PCC est la société nord-américaine Minerals Technologies, avec une production annuelle de 4 Mt/an et 59 usines dans le monde dont 3 en France à Alizay (27), Docelles (88) et Saillat-sur-Vienne (87), notamment sur les sites des industries papetières. Le numéro 2 est Omya.

6.1.7. Autres

Au-delà de ces quelques entreprises, souvent d'envergure internationale et disposant d'une gamme variée de produits dont certains à haute valeur ajoutée, on retrouve un nombre importants d'acteurs de taille plus modeste.

Parmi ceux-ci, on peut citer le groupe **Carrière du Boulonnais** (www.groupepcb.fr), dont les produits principaux sont des granulats calcaires et des matériaux pour BTP. La carrière de Ferques (Cf. 4.4, Figure 13) est la plus grande carrière à ciel ouvert sur un seul site de France, et le plus important producteur individuel de calcaire en volume avec 6 000 kt produites par an (production autorisée de 12 000 kt/an et des réserves estimées à plus de 100 ans par l'exploitant). D'autres produits sont obtenus à partir du calcaire Viséen (Carbonifère inférieur), caractérisé par une grande pureté et une forte teneur en CaCO₃ (>99 %). Ce sont des calcaires industriels pour l'industrie chimique, des castines (0-4 mm) pour la sidérurgie et la verrerie, des pierres à chaux, et des fillers pour l'alimentation animale. Le groupe dispose également de deux filières spécifiques pour l'industrie du béton et les solutions réfractaires, ainsi que d'une présence industrielle en Amérique du Nord et en Asie.

On retrouve ensuite un ensemble de producteurs au périmètre d'action davantage cantonné au territoire national et à un nombre plus restreint d'usages industriels ou agro-alimentaires spécifiques. Ce sont par exemple les exploitants groupe Daniel (www.groupe-daniel.fr) ou Carrières Iribarren (www.carrieres-iribarren.fr), focalisés sur des produits moyennement ou peu élaborés (granulats calcaires pour empierrement et BTP) et davantage régionalisés, ou des petites sociétés parfois familiales, dont la production en carbonates est uniquement dédiée au marché local, notamment celles destinées aux amendements pour sols.

Remarque : Ne sont pas traités ici les exploitants de carbonates pour la fabrication de chaux. Le plus important en termes de volume est le groupe Lhoist avec des volumes autorisés de 9 750 kt/an de carbonates et dolomies (production 2015 : 3 790 kt de calcaires et 901 kt de dolomies), suivi par de nombreux acteurs de taille modeste à petite (Chaux de Boran, Fours à chaux de l'Ouest, etc.). La production de carbonates pour chaux représente près d'un quart des usages des carbonates extraits en France en 2015.

6.2. COMMERCE EXTERIEUR

Les données du commerce extérieur ne sont disponibles que pour certains produits carbonatés aux nomenclatures douanières (codes NC8) spécifiques. Ce sont :

- 25210000 – castines, pierres à chaux ou à ciment ;
- 25090000 – craie ;
- 25181000 – dolomie, non-calcinée ni frittée, dite « crue [à l'état brut] » ;
- 25182000 – dolomie, calcinée ou frittée (à l'exclusion de la dolomie concassée des types généralement utilisés pour le bétonnage ou pour l'empierrement des routes, des voies ferrées ou autres ballasts) ;
- 25174100 – granulés, éclats et poudres de marbre, même traités thermiquement.

Ces chiffres sont publiés sur le site <http://lekiosque.finances.gouv.fr> . Pour les années 2014 à 2016, les échanges sont compilés dans le ci-après. De manière générale, on observe que quel que soit le produit carbonaté concerné, les principaux partenaires sont des pays limitrophes, la Belgique et l'Allemagne occupant très régulièrement la première place, tant pour les imports que les exports. Ces forts échanges peuvent s'expliquer en partie par l'implantation dans ces deux pays d'importants acteurs de la transformation et du marché des carbonates (ex. Omya, Lhoist, Carmeuse).

En ce qui concerne les castines, pierres à chaux ou à ciment, la craie, la dolomie calcinée ou frittée, et les poudres de marbres, les prix à l'importation sont toujours plus élevés que les prix à l'exportation, pouvant aller du double ou triple. La dolomie crue est la seule exception (prix à l'export près du double ou du triple du prix à l'import) pouvant s'expliquer par des considérations sur la qualité des matériaux primaires.

La France est malgré cela excédentaire sur les échanges de castines, pierres à chaux ou à ciment, et de craie. À l'inverse, les quantités de dolomies (tous produits) exportées sont très inférieures aux importations, causant une situation déficitaire sur ces produits.

On remarque aussi qu'il n'y a en général pas de variations annuelles conséquentes concernant les ordres de grandeur des quantités échangées (tant monétaires que massiques), ce qui n'est pas le cas pour d'autres matières premières minérales (ex. métaux) et constitue un facteur de stabilité. Les échanges commerciaux de produits manufacturés à haute valeur ajoutée ne sont pas analysés dans le cadre de cette étude.

	2014			2015			2016			Evolution 2015-2016		Principaux partenaires en 2016 (% des tonnages)
	Valeur	Masse	val.unit.	Valeur	Masse	val.unit.	Valeur	Masse	val.unit.	En valeur	En masse	
Castines, pierres à chaux ou à ciment												
Exportations	5 896 k€	592 636 t	10 €/t	6 279 k€	559 213 t	11 €/t	5 492 k€	710 353 t	8 €/t	-12.5%	27%	Luxembourg 63%, Allemagne 36%
Importations	2 863 k€	136 948 t	21 €/t	2 643 k€	119 288 t	22 €/t	2 154 k€	89 897 t	24 €/t	-19%	-25%	Belgique 87%
Solde	3 033 k€	455 688 t		3 636 k€	439 925 t		3 338 k€	620 456 t		-8%	41%	
Graine												
Exportations	24 099 k€	485 489 t	50 €/t	24 968 k€	518 415 t	48 €/t	21 811 k€	418 013 t	52 €/t	-12.6%	-19.4%	Belgique 43% Allemagne 35%
Importations	9 395 k€	103 425 t	91 €/t	9 198 k€	74 908 t	123 €/t	9 797 k€	71 563 t	137 €/t	6.5%	-4.5%	Belgique 53% Norvège 25%
Solde	14 704 k€	382 064 t		15 770 k€	443 507 t		12 014 k€	346 450 t		-23.8%	-21.9%	
Dolomie crue												
Exportations	2 487 k€	21 836 t	114 €/t	1 204 k€	13 501 t	89 €/t	651 k€	13 909 t	47 €/t	-45.9%	3.0%	Côte d'Ivoire 85%
Importations	5 822 k€	178 457 t	33 €/t	5 675 k€	165 976 t	34 €/t	5 261 k€	150 522 t	35 €/t	-7.3%	-9.3%	Belgique 48% Allemagne 28%
Solde	-3 335 k€	-156 621 t		-4 471 k€	-152 475 t		-4 610 k€	-136 613 t		3.1%	-10.4%	
Dolomie calcinée ou frittée												
Exportations	391 k€	6 501 t	60 €/t	219 k€	3 818 t	57 €/t	126 k€	696 t	181 €/t	-42.5%	-81.8%	Allemagne 51% Belgique 37%
Importations	21 565 k€	173 615 t	124 €/t	21 194 k€	161 948 t	131 €/t	21 539 k€	161 182 t	134 €/t	1.6%	-0.5%	Belgique 78% Italie 16%
Solde	-21 174 k€	-167 114 t		-20 975 k€	-158 130 t		-21 413 k€	-160 486 t		2.1%	1.5%	
Granulés, éclats et poudres de marbre												
Exportations	N.A.	N.A.		2 795 k€	42 716 t	65 €/t	2 341 k€	37 273 t	63 €/t	-16.2%	-12.7%	Espagne 30% Allemagne 21%
Importations	N.A.	N.A.		4 469 k€	61 785 t	72 €/t	5 408 k€	68 737 t	79 €/t	21.0%	11.3%	Retour France 40% Italie 31%
Solde				-1 674 k€	-19 069 t		-3 067 k€	-31 464 t		83.2%	65.0%	

Tableau 9 : Chiffres du commerce extérieur 2014-2016 des principaux produits carbonatés disponibles concernés par l'étude

Les observations et analyses pouvant être faites sur la base de ces chiffres sont les suivantes :

Castines, pierres à chaux ou à ciment

En 2016, la balance commerciale de la France est excédentaire de 620,5 kt pour 3,3 M€, ce qui représente une baisse de 8 % en valeur mais une hausse de 41 % en masse par rapport à 2015. Le Luxembourg et l'Allemagne représentent à eux deux 99 % des exportations.

Craie

En 2016, la balance commerciale de la France est excédentaire de 346,5 kt pour 12 M€, ce qui représente une baisse de 24 % en valeur et 22 % en masse par rapport à 2015. La Belgique et l'Allemagne représentent à eux deux 78 % des exportations. On peut estimer que la consommation française apparente de craie est de l'ordre de 1 Mt (hors craie phosphatée) en considérant une production en carrière estimée à 1 521 kt en 2015 (avant transformation).

Dolomie crue

En 2016, la balance commerciale de la France est déficitaire de 136,6 kt pour 4,6 M€. Les quantités importées sont en effet bien supérieures à celles exportées, provenant essentiellement de Belgique (48 %) et d'Allemagne (28 %). Les exportations (près de 14 kt) sont à 85 % à destination de Côte d'Ivoire (contre 37 % en 2015 vers ce pays pour 5 kt), suivie par le Cameroun et la Suisse. À noter que le prix unitaire à l'exportation est deux fois moins élevé qu'en 2015, pouvant être expliqué par une différence en termes d'accords commerciaux ou de qualité des matériaux.

Dolomie calcinée ou frittée

En 2016, la balance commerciale de la France est déficitaire de 160,5 kt pour 21,4 M€. Malgré des écarts très importants entre les quantités importées et exportées (seulement 696 t exportées en 2016, soit une diminution de 82 % par rapport à 2015), 2016 est la seule année où le prix unitaire est plus élevé à l'exportation qu'à l'importation. L'Allemagne et la Belgique représentent à nouveau 88 % de ces exports, tout en étant également un partenaire important pour l'importation (Belgique 78 %). Une des explications possibles de ce phénomène serait la présence d'entreprises spécialisées dans ces produits (Omya, Lhoist) et éventuellement des transferts de matériaux intra-entreprises/filiales.

Granulés, éclats et poudres de marbre

En 2016, la balance commerciale de la France apparaît déficitaire de 31,5 kt pour 3 M€. Toutefois, ce chiffre est difficilement interprétable car 40 % des importations sont sous la dénomination « Retour France » ce qui indique une anomalie de livraison. La destination privilégiée pour les exportations est l'Espagne (14 kt, soit 31 % du total) s'expliquant notamment par l'importante implantation de carrières de marbres dans les Pyrénées (Cf. 6.1).

6.3. ÉVOLUTION DES PRIX

En l'absence de place de marché, les prix des carbonates sont négociés directement entre acheteur et vendeur. Certaines sources spécialisées répertorient les moyennes hautes et basses de ces contrats pour évaluer les prix des carbonates sur le marché international.

Pour le Carbonate de Calcium uniquement, sous forme PCC ou GCC, la source *Industrial Minerals* (www.indmin.com) rend disponible sur abonnement certains prix des qualités de Carbonate de Calcium suivantes (exprimées en livres sterling par tonne ou dollar par short ton (s.t), unité américaine équivalente à 1 s.t = 907,18474 kg) :

- calcium carbonate, PCC, uncoated, ex works UK, £/t
- calcium carbonate, PCC, coated, ex works UK, £/t
- calcium carbonate, PCC, Fine, surface treated (0,4-1,0 microns), FOB USA, \$/s.t
- calcium carbonate, GCC, coated, fine grade, ex-works UK, £/t
- calcium carbonate, GCC, coated, chalk, ex-works UK, £/t
- calcium carbonate, GCC, 50-22 µm, FOB USA, \$/s.t
- calcium carbonate, GCC, 22-10 µm, FOB USA, \$/s.t
- calcium carbonate, GCC, 3 µm (untreated), FOB USA, \$/s.t
- calcium carbonate, GCC, 0,7-1,1 µm (untreated), FOB USA, \$/s.t
- calcium carbonate, GCC, stearate coated 0,7-1,1 µm, FOB USA, \$/s.t

Sur la période 2013-2017, les prix du Carbonate de Calcium toutes catégories confondues ont augmenté de 10 % à 20 %, illustrant une demande soutenue pour ces produits de haute qualité utilisés comme charges minérales dans des applications diverses (industries pharmaceutiques, industrie du papier, etc.).

Il existe des écarts très importants entre les produits les moins spécialisés (aucun traitement de surface, taille des particules 50 µm) à des prix de l'ordre de 20-25 US\$/t, et les produits les plus spécialisés (revêtements de stéarates, taille des particules 0,7 µm) à des prix de l'ordre de 500 US\$/t. Le stéarate de calcium est un lubrifiant qui permet pour l'industrie du papier par exemple, d'obtenir une surface glacée qui empêche le dépôt de poussière et les cassures résultant du pliage des fibres de papier.

Le Carbonate de Calcium Précipité (PCC) d'origine synthétique reste inférieur en prix au Carbonate de Calcium GCC. La plus haute qualité de PCC (surface des particules traitée, pour une taille de 0,4-1,0 µm) atteignant 400 US\$/t contre 500 US\$/t pour la plus haute qualité de GCC (0,7-1,1 µm avec revêtement de stéarate).

7. Recyclage et développement durable

Au niveau des carrières, l'ensemble des matériaux exploités sont généralement valorisés afin d'optimiser l'extraction et minimiser les pertes. Au cours du temps, une carrière génère toujours des produits de natures différentes en fonction des variations de qualité du gisement. Ainsi, lorsque la qualité des matériaux carbonatés n'est pas suffisante pour la transformation en produits à haute valeur ajoutée, d'autres usages permettent leur valorisation (granulats pour BTP, enrochements, ou encore amendements).

Au niveau des objets en fin de vie contenant des carbonates, plusieurs filières existent :

Le recyclage du verre est la filière la plus efficace de récupération de matières issues de carbonates, sous forme de calcin. Ce verre brisé provenant des déchets de fabrication et de la collecte sélective des déchets (conteneurs de recyclage), contient essentiellement des oxydes de silicium, de sodium et de calcium, issus du mélange initial de fabrication du verre. Il est ajouté lors de la fabrication de nouveaux verres, dans des proportions pouvant aller jusqu'à 95 %, permettant des économies d'énergie et de matières premières (Marteau *et al.*, 2016).

Le recyclage des peintures est un secteur en développement, bien qu'il ne s'applique à ce jour qu'aux « fonds de pots » inutilisés, sans concerner nombre d'usages dispersifs des peintures (papiers peints, carrosserie, etc.). L'un des précurseurs dans ce domaine est l'entreprise Ursa Paint aux Pays-Bas, ayant été le premier en 2014 à lancer une gamme de peintures contenant des peintures recyclées (EvertKing). L'entreprise estimait alors que 3 500 t de peintures pourraient être recyclées chaque année aux Pays-Bas. En France, certaines entreprises proposent aujourd'hui la valorisation de déchets de peinture, comme Chimirec (www.chimirec.fr) ou le réseau Socoda (<http://www.socoda.fr/recyclage>). Le processus consiste à séparer les différents constituants de la peinture grâce à divers traitements physico-chimiques afin de les réutiliser dans la fabrication de nouvelles peintures. Ce procédé s'applique à tout déchet à base de peinture acrylique, polyuréthane ou synthétique. Les boues de peinture peuvent également être transformées en une peinture plastique anti-gravillonnaire. S'ils ne peuvent être recyclés, les déchets de peinture sont souvent soit stockés comme déchets dangereux après stabilisation (notamment si les produits sont liquides ou pâteux), soit incinérés (potentiellement en cimenterie).

Le recyclage des papiers permet quant à lui une récupération importante des fibres de cellulose mais les charges en carbonates sont perdues dans le processus de recyclage. Ainsi, la filière de recyclage du papier doit disposer de carbonates complémentaires pour obtenir les papiers recyclés. Il reste un champ de développement pour optimiser ce recyclage.

La plupart des autres usages décrits dans ce mémento sont en grande partie dispersifs et les procédés de recyclage quasi inexistantes ou complexes à mettre en place (industries pharmaceutique, cosmétique, alimentaire, amendement, etc.).

Développement durable et procédés innovants

Nouveaux marchés pour les stériles de production de CaCO₃

Aux États-Unis, dans une optique de réemploi des stériles de production de carbonates de calcium de l'usine de Sylacauga (Alabama), Imerys a su mettre au point avec succès un produit pour le marché des revêtements de sols résistants à base de résine. Cette innovation a reçu la certification américaine LEED (Leadership in Energy and Environmental Design). De nouvelles opportunités de développement sur ce segment de marché sont à l'étude (dalles de

sols, moquettes, revêtements de murs, etc.) et pourraient se développer plus largement chez d'autres acteurs.

Traitement des sols à la chaux pour le recouvrement de terrain

Des procédés à base de chaux font l'objet de recherche visant à substituer le macadam ou l'asphalte dans le recouvrement de chaussée, ou la construction de petits ouvrages hydrauliques en terre. Le traitement des sols à la chaux permet d'améliorer la maniabilité de matériaux limono-argileux et de leur conférer des propriétés mécaniques après compactage. Les avantages de cette technique sont déjà connus dans les terrassements et mis à profit pour la construction des remblais routiers, autoroutiers, ferroviaires, de plates-formes industrielles, etc. Ce procédé évite l'usage du macadam comme assise de roulement ou comme recouvrement de terrain, ce qui limite l'émission de CO₂. Si les recherches progressent dans ce domaine, d'autres travaux sont encore nécessaires pour mieux caractériser les propriétés des sols traités et optimiser l'obtention de sols indurés et résistants à plus grande échelle.

8. Conclusions et perspectives

Les roches carbonatées en France présentent une grande variété de composition et d'aspect associée à des gisements d'une grande diversité en termes de situation géographique, d'âge et de contexte géologique. Les calcaires, craies, marnes et dans une moindre mesure les marbres sont des roches très répandues. Les dolomies plus ou moins pures sont présentes dans bon nombre de formations carbonatées. La magnésite (ou giobertite) est, elle, beaucoup plus rare. Ces roches carbonatées affleurent ou sub-affleurent dans les grands bassins sédimentaires français (Bassin parisien, Bassin d'Aquitaine, Bassin du Sud-Est) et dans les zones orogéniques récentes (Alpes, Pyrénées, Jura). Elles sont en revanche quasi inexistantes dans les massifs anciens (Massif central, Massif armoricain, Corse, Vosges, Maures).

Les gisements à potentiel économique sont répartis sur l'ensemble du territoire national, avec plusieurs bassins de production spécialisés. Ils concernent essentiellement les calcaires, les dolomies, les craies, les marnes, et les marbres.

L'extraction de matériaux carbonatés pour usages en industrie (hors ciment) et agro-alimentaire s'est élevée à 24 Mt en 2015, se répartissant de la manière suivante : 20 000 kt de calcaire (plus de 80 % de la production totale), 1 900 kt de dolomie, 1 500 kt de craie, 465 kt de marbre, 156 kt de marne.

Ces matériaux sont ensuite destinés pour 26 % à la fabrication de chaux, 18 % à celle de charges minérales, 9 % à des usages agro-alimentaires et 4 % environ à des usages pour amendements agricoles. Le reste de la production se répartit dans divers usages en industrie. Ceux-ci comprennent, parmi les principaux, la sidérurgie, la verrerie, la chimie, les céramiques et réfractaires, ainsi que les usages moins élaborés destinés à la construction et le BTP.

Parmi ces usages, il existe une grande diversité de produits, dont certains très élaborés, avec des prix de vente de l'ordre de 300-400 €/t et destinés à des usages spécialisés comme la pharmacie ou la cosmétique. D'autres, moins élaborés, ont des prix de vente de 10 à 20 €/t et des usages plus diversifiés dans de nombreux secteurs de l'industrie.

La production de carbonates calciques et magnésiens en France est répartie entre un grand nombre d'entreprises de tailles et spécialités diverses. Les groupes internationaux ont une implantation solide, souvent confortée par le rachat régulier d'entités plus petites, et des marchés diversifiés notamment dans la chimie de spécialité et les charges minérales haut de gamme. Leur position devrait continuer à se renforcer à moyen-terme.

Les entreprises de taille inférieure constituent un ensemble de producteurs au périmètre d'action davantage national voire régional et consacrées à un nombre plus restreint d'usages industriels ou agro-alimentaires alimentant la demande du marché local.

La situation de la France en termes de commerce extérieur est contrastée, avec des excédents commerciaux sur certains produits carbonatés comme les castines ou la craie, et des situations de déficit sur d'autres, comme les dolomies crues, calcinées ou frittées. Les quantités échangées sont néanmoins faibles au regard des chiffres de production nationale. Les flux commerciaux restent essentiellement limités aux pays européens limitrophes (Allemagne, Belgique, Espagne).

Les produits issus de carbonates sont diversement recyclés selon leurs usages. Certaines filières de recyclage des matières issues de carbonates existent ou se mettent en place, en particulier dans l'industrie verrière et celle des peintures. Toutefois, un certain nombre d'autres usages dispersifs par nature n'autorisent pas à ce jour de procédés de récupération économiques.

À moyen et long-terme, l'activité extractive et industrielle liée aux carbonates devrait continuer à se développer pour répondre aux besoins incompressibles dans de nombreux secteurs comme la construction, l'agro-alimentaire ou la chimie. Si les ressources géologiques sont abondantes, les réserves exploitables sont plus limitées en comparaison, du fait des nombreuses contraintes réglementaires, environnementales et d'occupation des sols. L'anticipation du renouvellement des autorisations d'exploitation actuelles apparaît donc importante dans une démarche de stratégie de long-terme. En effet, sur la base des autorisations actuelles, seule la moitié des carrières actives seraient encore en production en 2030.

9. Références

- Bouquet C. (1968). - Les magnésites de Saint-Jean-Pied-de-Port (Basses-Pyrénées). Rapport BRGM 68-OPR-019-RMM.
- Cavalier K. (2007). - Carbonates de calcium additif multifonctionnel. Techniques de l'ingénieur AM 3 222. 10 p.
- 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, 136 p.
- Delfau M., Duhamel M. (1983). - Ressources minières françaises, tome 14. Les gisements de sillimanite, d'andalousite, de disthène, de magnésite, de graphite, de feldspaths. Rapport BRGM RR-41430-FR, 66 p.
- Gres-Roque E., (2016). - Chaux hydrauliques, Éditions T.I., réf. c924, Techniques de l'ingénieur et matériaux de construction, 14 p.
- Guillaume L., Fabre J., Ricour J. (1949). - Rapport sur le gisement de giobertite de Biguglia (Corse). Rapport BRGG A158.
- Herrier G., Pelletier M., Puiatti D. (2010). - Chaux aérienne Contexte, fabrication, domaines applicatifs, Editions T.I., réf. c923, Techniques de l'ingénieur et matériaux de construction, 18 p.
- Herrier G., Puiatti D., Bonelli S., Fry J.J., Nerincx N. (2015). - Le traitement des sols à la chaux : une technique innovante pour la construction des ouvrages hydrauliques en terre. Vingt-cinquième congrès des Grands Barrages, Juin 2015, Stavanger, Norvège. Compte-rendu., pp.554-576.
- Lathuilière B., Carpentier C., André G., Dagallier G., Durand M., Hanzo M., Huault V., Harmand D., Hibsich C., Le Roux J., Malartre F., Martin-Garin B., Nori L., (2003). - Production carbonatée dans le Jurassique de Lorraine. Livret guide excursion Groupe français d'études du Jurassique, Nancy, 142 p.
- Marteau P., Chassagnac D., Hom L., Jallon S., Lefebvre G., (2016). - Mémento Silice industrielle. Rapport BRGM RP-65485-FR, 92 p.
- Martinet G., Souchu P. (2009). - La chaux : Définitions et histoire, Éditions T.I., réf. c922, Techniques de l'ingénieur et matériaux de construction, 15 p.
- Olivier N., Carpentier C., Martin-Garin B., Lathuilière B., Gaillard C., Ferry S., Hantzpergue P. et Geister J., (2004). - Coral-microbialite reefs in pure carbonate versus mixed carbonate-siliciclastic depositional environments: the example of the Pagny-sur-Meuse section (Upper Jurassic, northeastern France). *Facies* 50, 229-255.
- Pasquet J.-F., (1996). - Mémento roches et minéraux industriels. Carbonates blancs pour charges. Rapport BRGM R38742, 53 p.
- Prouet J.-P., Guiraudie C., Rosique A. (1962). - Le gîte de magnésite de Montner (Pyrénées-Orientales). Travaux de recherches, rapport définitif. Rapport BRGM A196.
- Quemeneur J., (1974). - Les gisements de magnésite du Pays Basque. Thèse doctorale de l'Université de Paris 6.

Sites internet des sociétés ou organisations citées dans ce rapport

Carrières Iribarren www.carrieres-iribarren.fr

Chimirec : www.chimirec.fr

Groupe Carrière du Boulonnais : www.groupecb.fr

Groupe Daniel www.groupe-daniel.fr

Imerys : www.imerys.com

Le Kiosque de Bercy : <http://lekiosque.finances.gouv.fr>

Novacarb : www.novacarb.fr

Omya : www.omya.com

O.M.G (Onyx et Marbres Granulés) : www.omg-sa.com/fr/

Provençale SA : www.provencale.com

Samin : www.samin.fr

Société chimique de France : www.societechimiquedefrance.fr

Socoda : www.socoda.fr/recyclage

Solvay : www.solvay.com

Verallia : www.verallia.com



Centre scientifique et technique
Direction des Géoressources
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr