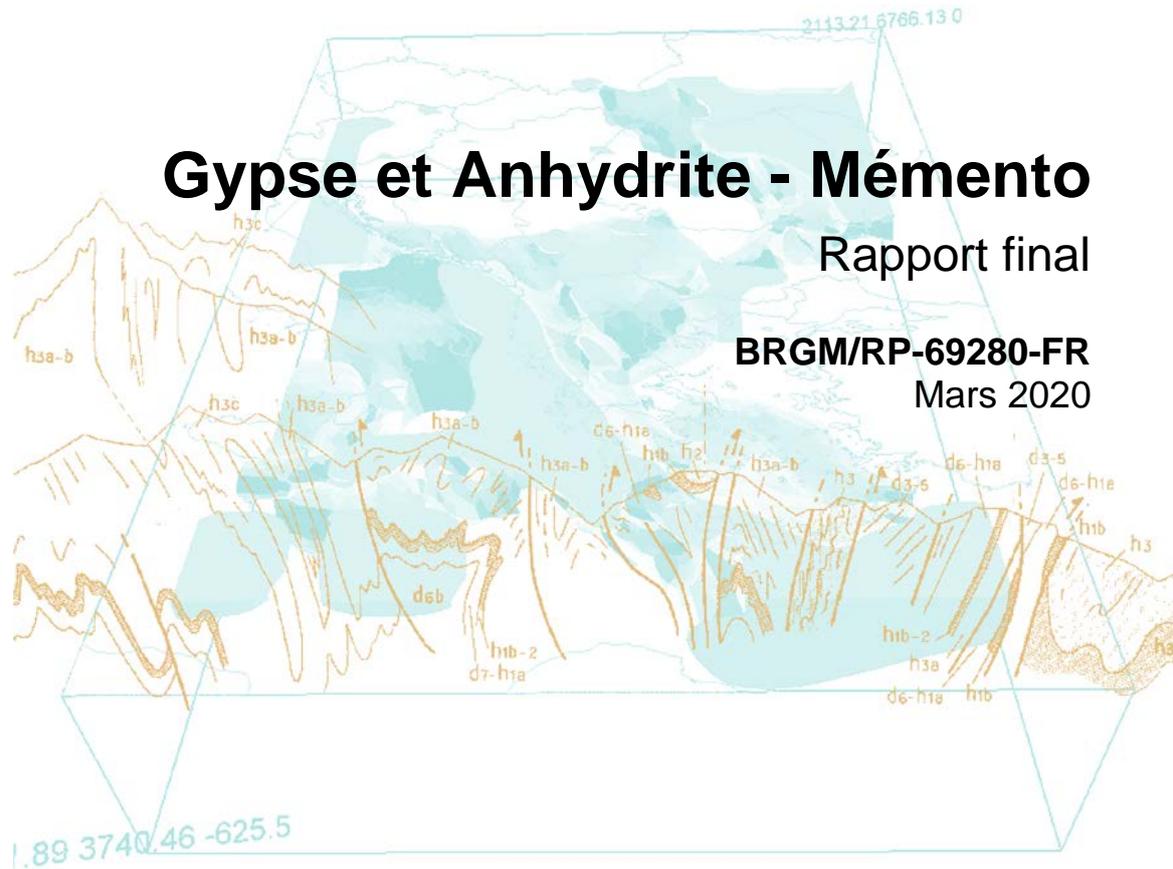


Document
public



**Document
public**

Gypse et Anhydrite - Mémento

Rapport final

BRGM/RP-69280-FR

Mars 2020

Étude réalisée dans le cadre des projets
d'Appui aux Politiques Publiques du BRGM 2019

Charles N., Colin S., Gutierrez T., Lefebvre G.

avec la collaboration de Schaub G.

Vérificateur :

Nom : Isabelle DUHAMEL-ACHIN

Date : 17/03/2020

Signature :

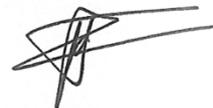


Approbateur :

Nom : Didier LAHONDERE

Date : 06/04/2020

Signature :



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



Mots-clés : Gypse, Anhydrite, Sulfate de calcium, Plâtre, Liants, Ciment, Charge minérale, Chimie, Réserves, Ressources, Gisement, Production, Utilisations, Marchés, Approvisionnement, Prospective, France.

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

Charles N., Colin S., Gutierrez T., Lefebvre G. (2020) avec la collaboration de G. Schaub. Mémento Gypse et anhydrite. Rapport final. Rapport BRGM/RP-69280-FR, 86 p. 39 fig., 10 tabl.

Contexte de l'étude

Ce mémento a été réalisé dans le cadre de la Convention n° 2102743970 relative aux ressources minérales, au littoral et aux milieux marins et à l'inventaire national du patrimoine géologique, signée le 4 septembre 2019 entre la Direction de l'Eau et de la Biodiversité (DEB) du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (MTES) et le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), le service géologique national.

Ce document ainsi que les mémentos précédemment réalisés pour d'autres substances et filières industrielles sont diffusés en libre accès sur les portails Minéralinfo (www.mineralinfo.fr/page/roches-mineraux-industriels-0) et InfoTerre (www.infoterre.brgm.fr).

Le présent mémento est un panorama de l'activité extractive du gypse et de l'anhydrite à l'échelle nationale. Il présente un état des lieux des filières industrielles utilisant le gypse et l'anhydrite sous toutes leurs formes. Cette étude est réactualisée par rapport aux données présentées dans le mémento sur ces mêmes substances publiées en 1993 (rapport BRGM n°R37722).

Synthèse

Le gypse, ou « *pierre à plâtre* », sulfate de calcium hydraté de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, et l'anhydrite, la forme anhydre de formule CaSO_4 , sont des minéraux fréquents dans les formations sédimentaires. Les accumulations économiques peuvent atteindre des épaisseurs importantes et se retrouvent dans des couches stratiformes ou dans des masses déformées par la tectonique dans les zones alpines. Ces minéraux ont été exploités depuis l'Antiquité pour la construction, l'art ou la décoration, et sont actuellement également utilisés dans l'industrie chimique, l'agroalimentaire et l'agriculture, bien que le secteur du bâtiment et la cimenterie restent les plus consommateurs.

Productions, ressources et réserves

L'exploitation française du gypse et de l'anhydrite est répartie sur l'ensemble du territoire métropolitain, avec plusieurs bassins de production spécialisés. Les gisements sont présents dans les grands bassins sédimentaires, avec un bassin de production important en région parisienne, dans le sud-ouest de la France et dans les Charentes. Des carrières sont également présentes dans les terrains sédimentaires plissés des Alpes.

En 2018, 18 carrières exploitent le gypse et l'anhydrite en France, dont 8 en région parisienne, représentant près de 70% de la production nationale. La production totale autorisée de gypse et d'anhydrite est actuellement de 8 425 kt. La production réelle reste cependant moindre, avec 4 075 kt extraites en 2018.

La majorité des carrières sont des exploitations de gypse (13 sites soit 74%), seulement, deux d'entre-elles sont des exploitations d'anhydrite et 3 produisent les deux substances. Les carrières sont exploitées à 70% à ciel ouvert et 30% en souterrain.

Les ressources géologiques en gypse et en anhydrite ne sont pas quantifiées, mais elles sont importantes car les gisements tabulaires s'étendent sur de grandes surfaces avec des épaisseurs de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres. Néanmoins, les réserves sont limitées car elles sont corrélées à des zones soumises à de fortes contraintes environnementales et à une occupation des sols importante (compétition urbaine notamment pour les gisements franciliens).

Acteurs industriels, marchés et filières

En 2018, 10 entreprises se répartissent la charge des 18 sites d'extraction de gypse et d'anhydrite. Cependant, comme dans d'autres pays, la part majoritaire est contrôlée par les géants mondiaux du secteur (Saint-Gobain, Knauf, Etex), tandis que certaines structures indépendantes de moindre ampleur (sociétés familiales ou d'envergure régionale) ont une emprise plus réduite ou la gestion d'un unique site, comme la carrière de Champblanc, en Charente, exploitée par le Groupe Garandau depuis 1869.

Placoplâtre, filiale de Saint-Gobain, est la principale société d'extraction de gypse en France métropolitaine avec près d'un tiers de la production française en 2018 (1,5 Mt) répartie sur 7 exploitations, dont 5 sites en Île-de-France. L'autre filiale de Saint-Gobain, Anhydrite Minérale France, exploite l'anhydrite à Faulquemont (57), avec une capacité de production de 370 kt/an.

La société Siniat est une filiale du groupe belge Etex exploitant 5 carrières de gypse et d'anhydrite, avec une production annuelle de l'ordre de 1 300 kt.

Enfin, le groupe Knauf comprend deux filiales actives en France : d'une part, Knauf Plâtres & Cie, exploitant la carrière de Saint-Souplets (77) avec une capacité de production de 400 kt/an, soit 10% de la production annuelle française ; et d'autre part, Anhydrite Lorraine exploitant en souterrain la carrière d'anhydrite de Koenigsmacker (57), avec une capacité de production de 500 kt/an, pour une extraction déclarée de 350 kt en 2018.

Si le gypse et l'anhydrite sont extraits depuis plus de deux millénaires pour leurs usages dans les secteurs du bâtiment, de l'art et de l'agriculture, le principal domaine d'utilisation reste aujourd'hui de loin celui du BTP (bâtiment et travaux publics). La fabrication de plâtre domine le marché français avec environ 80% des tonnages extraits consommés. L'utilisation dans l'industrie du ciment occupe 15% de la consommation totale. Enfin, les 5% restants se répartissent selon le degré de pureté, dans l'agriculture, en chimie, ou en additif comme charges minérales.

Entre 2017 et 2018, les chiffres des douanes pour le commerce extérieur de la France font état d'un déficit apparent de 15 kt sur les produits de gypse et d'anhydrite naturels. Comme pour de nombreuses substances de carrières, les principaux échanges commerciaux français de gypse et d'anhydrite naturels sont réalisés avec des pays européens. Les principaux partenaires en termes d'exportations en 2018 sont la Belgique (71%), les Pays-Bas (25%) et l'Allemagne (4%) pour un total de près de 300 kt, pour une valeur légèrement supérieure d'importations (312 kt) dont l'origine principale est l'Espagne (45%), suivie par l'Allemagne (25%), la Thaïlande (6,4%) et les Pays-Bas (5,2%).

Toutefois, il est à noter que les volumes totaux d'échanges sont très faibles au regard de la production nationale (4 000 kt produites contre 300 kt échangées, soit moins de 1%), ce qui indique que 99% de l'extraction française sont destinés au marché intérieur. La majorité est transformée sur place et dédiée à la production de produits à base de plâtre dans les usines de première transformation.

Le gypse « cru », avant traitement, est vendu sur le marché international aux alentours de 8 \$US/t (7,4 €/t). Après un premier traitement (calcination), la valeur marchande monte aux alentours de 30 \$US/t (27,6 €/t). La valeur ajoutée des produits transformés augmente ensuite rapidement, incitant les opérateurs à intégrer verticalement les activités d'extraction de la matière première (gypse et anhydrite) à celles de la fabrication du plâtre, voire de produits façonnés comme les plaques de plâtre.

La valeur du plâtre brut à l'export atteint 160 €/t, tandis que les plaques, panneaux ou carreaux de plâtre transformés pour le bâtiment valent entre 200 et 300 €/t. Le gypse pur micronisé pour charge peut valoir en fonction de la qualité entre 200 et 300 €/t. Enfin, les valeurs s'envolent pour les produits de plus haute technicité, échangés et produits en plus faibles volumes, comme par exemple les plâtres utilisés dans l'art (1 000 €/t à 2 000 €/t) et d'autant plus pour les produits très spécifiques utilisés dans le domaine de la santé, atteignant 4 500 €/t en moyenne, notamment en dentisterie.

À moyen terme, les perspectives d'évolution de la consommation de gypse et d'anhydrite demeurent majoritairement orientées vers la production de plâtre à destination du BTP. Des modélisations récentes estiment qu'en 2015 en France, la construction de logements neufs et le tertiaire consomment 1 500 kt de plâtre par an. À l'horizon 2035, les quantités cumulées de plâtre pour la construction de logements neufs et la rénovation énergétique des bâtiments seraient ainsi de l'ordre de 28,5 Mt, malgré un ralentissement prévu de la construction de logements neufs à l'horizon 2050 par la Stratégie Nationale Bas Carbone¹.

¹ Voir à ce sujet les études prospectives publiées par l'ADEME en décembre 2019 : <https://www.ademe.fr/prospectives-2035-2050-consommation-materiaux-construction-neuve-renovation-energetique-bbc>

Sommaire

1. Introduction	13
1.1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE.....	13
1.2. SOURCE DES DONNÉES.....	13
2. Définitions.....	15
2.1. SUBSTANCES : MINÉRAUX ET ROCHES DU GYPSE ET DE L'ANHYDRITE	15
2.1.1. Définition des minéraux de sulfate de calcium	15
2.1.2. Gypse et anhydrite exploités depuis l'Antiquité	15
2.1.3. Minéralogie et propriétés physico-chimiques du gypse et de l'anhydrite ..	16
2.2. RESSOURCES / RÉSERVES.....	22
2.3. PRODUITS ET FILIÈRES	22
2.3.1. Produits	22
2.3.2. Filières	23
3. Géologie du gypse et de l'anhydrite	24
3.1. LA FORMATION DU GYPSE ET DE L'ANHYDRITE	24
3.1.1. Gypse et anhydrite naturels	24
3.1.2. Gypse et anhydrite de synthèse.....	28
3.2. GISEMENTS DE GYPSE ET D'ANHYDRITE DANS LE MONDE ET EN FRANCE	29
3.2.1. Les gisements mondiaux de gypse et d'anhydrite	29
3.2.3. Les gisements français de gypse et d'anhydrite	32
3.3. TECHNIQUES D'EXPLORATION.....	34
4. L'activité extractive du gypse et de l'anhydrite en France	36
4.1. LOCALISATION DES CARRIÈRES ACTIVES.....	36
4.2. STATISTIQUES DES CARRIÈRES	39
4.3. RESSOURCES ET RÉSERVES PLAFONNÉES	39
4.4. LES GISEMENTS DE GYPSE ET D'ANHYDRITE EN FRANCE.....	40
4.4.1. Gisements de gypse du Bassin de Paris.....	40
4.4.2. Gisement de gypse de Cherves-Richemont (Charente)	44
4.4.3. Gisement de gypse et d'anhydrite de Mazan (Vaucluse)	47
4.4.4. Gisements d'anhydrite de Lorraine	50

4.5. GISEMENT DE GYPSE EN ZONE SPECIALE DE CARRIERE	52
4.6. CRITÈRES D'EXPLOITABILITÉ, MODES D'EXTRACTION ET PRINCIPES DE TRAITEMENT	53
4.6.1. Les critères d'exploitabilité : généralités	53
4.6.2. Modes d'extraction	55
4.6.3. Traitement	58
5. Filières industrielles du gypse et de l'anhydrite	61
5.1. DOMAINES D'UTILISATION DANS L'INDUSTRIE	62
5.1.1. Fabrication du plâtre	62
5.1.2. Industries cimentières	65
5.1.3. Industries chimiques	65
5.1.4. Liants et produits à base d'anhydrite	66
5.1.5. Charge minérale et fillers	67
5.1.6. Agriculture engrais	67
5.1.7. Industrie alimentaire	68
5.1.8. Objets de décoration	68
5.1.9. Autres applications	69
6. Marchés et prospectives	70
6.1. APERÇU DU MARCHÉ MONDIAL DU GYPSE ET DE L'ANHYDRITE	70
6.2. MARCHÉ INTÉRIEUR : REVUE DES PRINCIPALES SOCIÉTÉS ET LEUR POSITIONNEMENT SUR LE MARCHÉ FRANÇAIS	73
6.2.1. Producteurs de gypse et d'anhydrite en France	73
6.2.2. Les usines de gypse/anhydrite en France	74
6.3. COMMERCE EXTÉRIEUR DE LA FRANCE	74
6.4. ÉVOLUTION DES PRIX	75
7. Recyclage du gypse et développement durable	77
8. Conclusions et perspectives	79
9. Références	81

Liste des figures

Figure 1 : Maille élémentaire du système cristallin monoclinique pour le gypse.	16
Figure 2 : Gypse sous la forme d'albâtre utilisé pour de multiples objets de décoration.	17
Figure 3 : Gypse sous forme de sélénite.....	17
Figure 4 : Gypse fibreux (« satin spar » en anglais).	18
Figure 5 : Gypse sous forme de gypsite.....	18
Figure 6 : Gypse en « pied d'alouette », gisement de Cormeilles-en-Parisis (Cliché : BRGM)..	19
Figure 7 : Gypse en « fer de lance » (Cliché : BRGM).....	19
Figure 8 : Maille élémentaire du système cristallin orthorhombique pour l'anhydrite.	20
Figure 9 : Principales filières des produits obtenus à partir de gypse et d'anhydrite.....	23
Figure 10 : Formation d'une séquence évaporitique par évaporation subaquatique dans le cas d'un bassin fermé.	25
Figure 11 : Les différents domaines et contextes de formation des évaporites.	26
Figure 12 : Comparaison entre anciens gisements et gisements récents à actuels. Modifié d'après Warren (2010).....	30
Figure 13 : Schéma synthétique des lieux de production des « déshydratites » et des évaporites en contexte extensif (Gaucher et al., 2018).....	31
Figure 14 : Carte géologique simplifiée de la France avec la localisation des gisements potentiels (exploités ou non) de gypse et d'anhydrite (Source : BRGM).....	32
Figure 15: Carte paléogéographique du Trias supérieur en Europe du nord-ouest. La mer épicontinentale qui prend place à cette période favorise d'importants dépôts d'évaporites (modifiée d'après Warren, 2006).....	33
Figure 16 : Exemple d'exploration du gypse dans le lac Amadeus (Australie), grâce à l'analyse des images satellitaires multi-spectrales ASTER (Mernagh, 2013).	35
Figure 17 : Carte des carrières actives de gypse et d'anhydrite en France, 2019 (Source : BDCM-BRGM).	37
Figure 18 : Nombre de carrières de gypse et d'anhydrite par région (BDCM 2019).	38
Figure 19 : Type d'exploitation pour le gypse et l'anhydrite en France (BDCM, 2019).	38
Figure 20 : Tonnage maximal autorisé à l'extraction de gypse et d'anhydrite (exprimé en kt) pour les carrières prévisionnellement actives entre 2019 et 2030 (BDCM, 2019).....	39
Figure 21 : Carte montrant la répartition des couches gypseuses du Bartonien (« Ludien ») et la localisation des carrières de gypse en activité. Source : BRGM et d'après Toulemont (1998).....	40
Figure 22 : Coupe géologique de la butte Montmartre montrant les principaux niveaux de gypse du « Ludien » exploités en région parisienne (Source : d'après Atlas du Paris souterrain, 2016).....	41
Figure 23 : Carrières de gypse à Villeparisis et Le Pin des sociétés Placoplâtre et Siniat. (a) Gypse saccharoïde de la première masse dans la carrière à ciel ouvert de Bois le Comte exploitée par Placoplâtre. (b) Gypse pied d'alouette de la deuxième masse. (c) Carrière à ciel ouvert exploitant ici la première masse (Placoplâtre). (d) Carrière souterraine exploitée par Siniat par la méthode des chambres et piliers. (e) Entrée de la carrière souterraine de La Plaine de Courgain exploitée par Siniat. Clichés : BRGM avec l'aimable autorisation de Placoplâtre et Siniat.	42

Figure 24 : Carrières à ciel ouvert et souterraines à l'est de la butte Montmartre. Dessin de Louis-Désiré Thiénon (1832).	43
Figure 25 : Épaisseurs des bancs sédimentaires constituant le « Ludien » en fonction des carrières de gypse. Source : revue Géologues 174 (2012).	43
Figure 26 : Carte géologique avec la localisation de la carrière de gypse de Champblanc près de Cherves-Richemont (Charente). Source : BRGM.	44
Figure 27 : (a) Carrière de gypse de Champblanc près de Cherves-Richemont (Charente) – (Cliché : Groupe Garandea). (b) Gypse fibreux et saccharoïde exploité dans la carrière de Champblanc (Cliché : N. Charles).	45
Figure 28 : Log stratigraphique de la carrière de Champblanc. Source : BRGM.	46
Figure 29 : Carrière de gypse et d'anhydrite de Mazan (84). Cliché : JYB Devot.	47
Figure 30 : Coupe géologique du bassin de Mormoiron et localisation de la carrière de Mazan. D'après G. Truc (1978).	47
Figure 31 : Couches de gypse saccharoïde exploitées dans la carrière de Mazan (84). Cliché : Société géologique de l'Ardèche.	48
Figure 32 : Carte géologique des environs de la carrière de Mazan. Les dépôts de gypse exploités sont datés de la transition Éocène-Oligocène. Source : BRGM.	49
Figure 33 : Log stratigraphique de la Lorraine et localisation des carrières d'anhydrite en exploitation. Source : http://www4.ac-nancy-metz.fr/base-geol/index.php	50
Figure 34 : Carrière souterraine de Kœnigsmacker (57). Front d'exploitation d'anhydrite dans le Trias supérieur (Keuper) et vue sur les chambres et piliers. Clichés : https://viamirabelle.tv	51
Figure 35 : Carrière à ciel ouvert de Cormeilles-en-Parisis (Cliché : BRGM).	56
Figure 36 : Phasage de l'exploitation souterraine de gypse de Cormeilles-en-Parisis (Source : Mines & Carrières n°229, octobre 2015).	57
Figure 37 : Schéma de traitement du gypse de l'usine de Mériel (ancien site Lafarge, appartient à Siniat). (1) Extraction et prétraitement, (2) Calibrage, (3a) et (3b) Cuisson, (4) Broyage, (5) Mélange d'adjuvants, (6) Contrôle qualité, (7) Conditionnement et expédition. Source : Lafarge https://www.lafarge.dz/4_3_1-ManufacturingProcess	58
Figure 38 : Fabrication de plaques de plâtre dans l'usine de Carpentras (ancien site Lafarge, propriété du groupe Siniat). Cliché : BRGM, 2003.	60
Figure 39 : Production mondiale de gypse et d'anhydrite de 1994 à 2018 (Données USGS 2018).	70

Liste des tableaux

Tableau 1 : Propriétés physico-chimiques de quelques minéraux évaporitiques (Sharpe et Cork, 2006).	21
Tableau 2 : Principaux minéraux évaporitiques (d'après Jébrak et Marcoux, 2008).	27
Tableau 3 : Principales occurrences de gypse et d'anhydrite dans le monde classées par continent en fonction de leur âge géologique. La liste n'est pas exhaustive. NA : non applicable.	29
Tableau 4 : Synthèse des carrières actives en France. Source : BDCM-BRGM (2019).	38
Tableau 5 : Zones spéciales de carrières en France (Source : Minéralinfo).	52
Tableau 6 : Synthèse des spécificités de qualité en fonction des applications du gypse et de l'anhydrite.	54
Tableau 7 : Avantages comparatifs du gypse et de l'anhydrite dans leurs principales filières d'usage.	61
Tableau 8 : Différentes phases du système $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ et leurs caractéristiques physico-chimiques.	63
Tableau 9 : Chiffres du commerce extérieur français en 2017 et 2018. Source : Kiosque de Bercy.	75
Tableau 10 : Valeurs moyennes des produits à base de plâtre sur la base des données du commerce extérieur français en 2018. Source : Kiosque de Bercy.	76

1. Introduction

La réactualisation du mémento sur le gypse et l'anhydrite a été menée dans le cadre de la Convention DEB-BRGM 2019 n°2102743970, entre la Direction de l'Eau et de la Biodiversité du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (MTES) et le Bureau de Recherches Géologiques et Minières, service géologique national français.

1.1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Cette étude a été réalisée par la Direction des Géoressources du BRGM, afin de réactualiser les données synthétisées dans le précédent mémento (rapport BRGM-R37722) publié en 1993. Ce mémento permet de faire un état des carrières en activité, des utilisations et des marchés en France à la fin de l'année 2018 (données 2018 compilées et analysées en 2019).

1.2. SOURCE DES DONNÉES

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

- documentation technique et scientifique du BRGM, dont 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 (BDCarMa), qui est alimentée et remise à jour annuellement selon les nouvelles informations recueillies ;
- les statistiques douanières du commerce extérieur concernant le gypse et l'anhydrite 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 le gypse et l'anhydrite), sur les sites des syndicats professionnels, ainsi que ceux d'organismes scientifiques.

Cependant, malgré l'utilisation de l'ensemble des sources d'informations 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 ET ROCHES DU GYPSE ET DE L'ANHYDRITE

2.1.1. Définition des minéraux de sulfate de calcium

Un minéral est un solide naturel homogène caractérisé par une structure atomique ordonnée et une composition chimique définie. Le gypse et l'anhydrite sont des minéraux qui sont fréquemment associés dans la nature et principalement composés de sulfate de calcium.

- **Gypse**

Le gypse est un minéral de sulfate de calcium hydraté de formule chimique $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et composé de 32,6% CaO, 46,5% SO_3 et 20,9% H_2O .

- **Anhydrite**

L'anhydrite est un minéral de sulfate de calcium non hydraté ou anhydre (CaSO_4 , composé de 41,2% CaO et 58,8% SO_3). Des phénomènes de déshydratation liés à la subsidence d'un bassin sédimentaire et à la charge lithostatique (c'est-à-dire dû à l'enfoncement progressif des dépôts sédimentaires les plus anciens sous le poids de la colonne sédimentaire plus récente qui s'accumule au-dessus ; phénomène de déshydratation possible sous une épaisseur d'environ 600 m) peuvent amener à la formation naturelle d'anhydrite à partir de gypse. Lors de surrection (remontée de la pile sédimentaire lors d'un orogène ou de la tectonique par exemple) ou de phénomènes d'érosion des formations sus-jacentes, à l'inverse une (ré-)hydratation peut se produire et conduire à la formation de gypse à partir d'anhydrite.

2.1.2. Gypse et anhydrite exploités depuis l'Antiquité

Le gypse du grec « *gypsos* » ou du latin « *gypsum* » a été utilisé dans la composition de mortier depuis 9 000 ans avant J.-C. Du plâtre a été trouvé sur des fresques souterraines datées de l'époque néolithique à Çatal Höyük en Turquie et des ragréages de sol en gypse découverts en Israël et façonnés il y a environ 7 000 ans avant J.-C.

Au temps des pharaons, les égyptiens utilisaient le gypse également comme mortier pour la construction de la pyramide de Khéops (3 000 ans avant J.-C.). Au Moyen-âge et à la Renaissance, les décors et les œuvres d'art en plâtre se sont développés en Europe. Les archéologues attestent aussi que la calcination du gypse était pratiquée dès la Grèce Antique. Les Mérovingiens ont également utilisé le gypse sous forme de plâtre pour la confection de leurs sarcophages.

La production industrielle du plâtre a connu un essor important à partir du XIX^e siècle et un boom après la Seconde Guerre mondiale avec l'avènement et la démocratisation des panneaux isolants en plâtre. Les deux principales utilisations du gypse et de l'anhydrite dans le monde sont le plâtre (en enduit ou façonné en panneaux isolants, plaques et carreaux) et l'élaboration de ciment de type Portland. Le gypse est aussi utilisé depuis la moitié du XVIII^e siècle pour l'agriculture dans l'amendement des sols.

En France, le gypse et l'anhydrite sont actuellement exploités et utilisés dans de nombreux domaines industriels (ex. le cru, après broyage pour l'élaboration du ciment ou comme charge minérale, ou après cuisson sous forme de plâtre).

2.1.3. Minéralogie et propriétés physico-chimiques du gypse et de l'anhydrite

Comme énoncé précédemment, le gypse et l'anhydrite sont des minéraux constitués de sulfate de calcium, hydraté pour le gypse et anhydre pour l'anhydrite. Ce sont des minéraux majoritairement sédimentaires, plus précisément d'origine évaporitique, qui se déposent en milieu lagunaire sursaturé. Néanmoins, le gypse peut parfois être d'origine hydrothermale ou issu de l'oxydation de sulfures en sulfates dans les gisements métallifères altérés.

- **Gypse**

Le gypse cristallise dans le système monoclinique (Figure 1) dans sa forme stable. C'est un minéral tendre (dureté de 2 sur l'échelle de Mohs pour une densité comprise en 2,31 et 2,33) qui se raye à l'ongle. Le gypse pur est incolore et peut être teinté de jaune, de rouge et de marron en fonction des impuretés présentes dans le réseau cristallin ou en inclusions. Le gypse est relativement soluble dans l'eau froide (environ 0,2 g/100 g H₂O), mais facilement soluble et sensible à l'érosion dans des conditions de forte humidité ou de fortes précipitations.

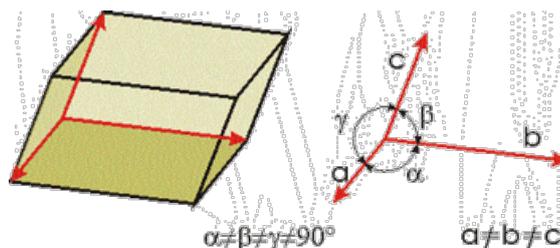


Figure 1 : Maille élémentaire du système cristallin monoclinique pour le gypse.

Le gypse a diverses appellations selon son état de cristallisation qui dépend de sa genèse et des impuretés qu'il contient :

1 - L'albâtre est une variété de gypse primaire, compact, finement cristallisé et translucide (Figure 2). L'albâtre est utilisé par les artistes pour la sculpture depuis des milliers d'années (statues, vases, bougeoirs, etc.) ou pour la confection de vitrages dans les monuments anciens. De nombreuses couleurs d'albâtre existent, dépendant du type d'impureté et de leur concentration.



Figure 2 : Gypse sous la forme d'albâtre utilisé pour de multiples objets de décoration.

2 - La sélénite (du grec *Selene* = Lune) désigne un gypse aux cristaux automorphes, larges et transparents (Figure 3). La sélénite occupe souvent des cavités et se retrouve aussi le long de zones de faille. La sélénite peut se présenter sous la forme de masses de cristaux à texture poëcilitique (*poikilitic* en anglais), communément appelées « *rose des sables* » et formées dans un sable non induré. Il est intéressant de noter que les plus grands cristaux de sélénite au monde ont été découverts au Mexique dans la mine à Pb-Ag de Naica, où les cristaux mesurent jusqu'à 9 x 18 m. Ce minéral peut être utilisé en bijouterie.



Figure 3 : Gypse sous forme de sélénite.

3 - Le gypse saccharoïde (*gypsum rock* en anglais et dérivé du grec *saccharos* = sucre) est la variété de gypse la plus commune et se présente sous la forme d'agrégats de cristaux intercalés ou mélangés avec de l'argile, du silt, du calcaire et de la dolomie. Le gypse saccharoïde peut se présenter sous une forme massive, litée, laminée ou nodulaire.

4 - Le gypse fibreux (*satin spar* en anglais) se retrouve en remplissage de zones fracturées ou le long des plans de stratification (Figure 4). L'orientation et l'inclinaison des cristaux fibreux est un marqueur cinématique de la déformation subie par la roche. Il est important de noter que le gypse fibreux ne doit pas être confondu avec des minéraux asbestiformes et donc ne sont pas amiantifères. La formation de ces cristaux fibreux peut être liée à une déformation d'origine tectonique ou bien induite par la transformation d'anhydrite en gypse. En effet, l'hydratation de

l'anhydrite provoque une augmentation volumétrique de l'ordre de 26% et peut induire une contrainte de 2 à 69 MPa ;



Figure 4 : Gypse fibreux (« satin spar » en anglais).

5 - La gypsite est une variété de gypse pulvérulent « terreux », qui se forme sous climat aride dans des lacs d'eau salée peu profonds, en bordure de littoral ou dans des marais salants (Figure 5). La gypsite est souvent contaminée par des sables éoliens ou des silts et argiles amenés lors d'épisodes de remontée du niveau marin ou d'évènements climatiques ;



Figure 5 : Gypse sous forme de gypsite.

6 - Le gypse en « pied d'alouette » est formé par l'enchevêtrement de cristaux maclés désordonnés qui s'assemblent en masse cristalline (Figure 6) ;



Figure 6 : Gypse en « pied d'alouette », gisement de Cormeilles-en-Parisis (Cliché : BRGM).

7 - Le gypse en « fer de lance » est une macle de deux cristaux plats à symétrie bilatérale (Figure 7).



Figure 7 : Gypse en « fer de lance » (Cliché : BRGM).

- **Anhydrite**

L'anhydrite est un minéral plus dur et plus dense que le gypse (dureté de 3,5 sur l'échelle de Mohs pour une densité d'environ 2,9). L'anhydrite cristallise dans le système orthorhombique (Figure 8). Elle se présente selon trois textures principales : (1) nodulaire (nodules blanchâtres et microcristallins irréguliers de quelques millimètres à plusieurs centimètres et se développant dans le sédiment hôte), (2) mosaïque (résulte de la coalescence de nodules très irréguliers, sub-concentriques à polygonaux, millimétriques à centimétriques et plus ou moins soudés également dans un sédiment hôte) ou (3) entérolithique (présente des contournements complexes liés à l'évaporation capillaire se produisant au sein de sédiments, dans les domaines de *sebkha*). L'anhydrite pure est incolore mais sa couleur peut varier jusqu'au gris foncé.

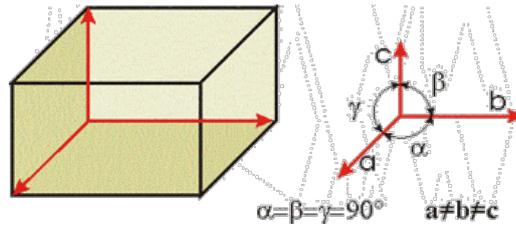


Figure 8 : Maille élémentaire du système cristallin orthorhombique pour l'anhydrite.

Le gypse et l'anhydrite peuvent subir plusieurs épisodes de déshydratation et d'hydratation en lien avec des épisodes de subsidence, de surrection et en fonction de la disponibilité hydrique. Le gypse commence à se décomposer en espèces métastables comme le sulfate de calcium semi-hydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) à partir de 70°C et une pression égale à 1 atm. Une température plus élevée amène à la déshydratation totale du gypse pour former de l'anhydrite (CaSO_4), cette dernière étant utilisée comme filler et absorbeur d'humidité.

Le chauffage du gypse (présent dans les panneaux isolants des cloisons) permet la libération de vapeur d'eau qui en cas d'incendie limite la propagation du feu. La solubilité du gypse est en outre 150 fois plus importante que celle du calcaire. Cette caractéristique physico-chimique permet d'obtenir une source de calcium et de soufre dans le domaine de l'agriculture. En effet, la capacité d'échanges ioniques du calcium et du sodium permet de limiter l'alcalinité des sols.

Le tableau ci-dessous résume les propriétés physico-chimiques du gypse et de l'anhydrite en comparaison avec d'autres minéraux évaporitiques.

Propriété	Gypse	Anhydrite	Halite	Potasse
Densité (g/cm ³)	2,24	2,97	2,2	2,05
Densité à sec (mg/cm ³)	2,19	2,82	2,09	1,98
Porosité (millidarcy)	4,6	2,9	4,8	5,1
Résistance à la compression (MPa)	27,5	97,5	11,7	25,8
Point de rupture (MPa)	2,1	3,7	0,3	0,6
Module de Young (GPa)	24,8	63,9	3,8	7,9
Perméabilité (10 ⁻⁹ m/sec)	6,2	0,3	-	-

Tableau 1 : Propriétés physico-chimiques de quelques minéraux évaporitiques (Sharpe et Cork, 2006).

Le gypse et l'anhydrite sont souvent mélangés à des impuretés liées aux processus sédimentaires primaires (évaporation et précipitation de saumures) ou à des processus secondaires (altération, dissolution). Les impuretés le plus souvent retrouvées dans les gisements de gypse et d'anhydrite sont les carbonates, les argiles et les sels de sodium (halite) et de potassium (potasse).

La présence d'impuretés de carbonates peut avoir pour effet d'alourdir les produits finis (ex. panneaux de plâtre). Après les carbonates, les argiles sont les impuretés les plus communes dans les gisements de gypse et d'anhydrite et peuvent avoir des effets délétères sur les panneaux de plâtre, en particulier la smectite et ses propriétés gonflantes. À titre d'information, l'anhydrite peut parfois être considérée comme une impureté dans les gisements de gypse et non comme un co-produit valorisable, notamment pour la confection de ciment. Les sels de sodium (halite NaCl, mirabilite Na₂SO₄•10H₂O), de magnésium (epsomite MgSO₄•7H₂O) et de potassium (sylvite KCl) sont souvent présents dans les gisements de gypse et d'anhydrite. La présence de ces sels dans les produits finis peut amener à une augmentation volumétrique de ces derniers pouvant se traduire, par exemple, par des cloques dans les panneaux de plâtre. En outre, certaines impuretés comme des oxydes de fer peuvent être observées dans les gisements de gypse et d'anhydrite avec des couleurs jaunâtre et rougeâtre. Des couleurs vertes peuvent être induites par la présence de cuivre et la couleur violette par des oxydes de manganèse. Enfin, de la célestite (SrSO₄) peut parfois être identifiée dans les gisements de gypse et d'anhydrite ou encore des nodules siliceux.

Les propriétés du gypse sont diverses :

- Ininflammable et incombustible, matériau utilisé pour sa résistance au feu ;
- Capacité d'absorption de l'humidité et rôle de régulateur hygrométrique : utilisé comme dessiccateur ou dans l'élaboration du plâtre dont la porosité du matériau permet de capter l'humidité ambiante et de la restituer lorsque l'air est plus sec ;
- Capacité d'isolation thermique et insonorisation : en raison de son faible coefficient de conductivité thermique, les solutions mixtes dans le domaine de la construction, associant le plâtre à un autre matériau isolant (comme de la laine minérale ou le polystyrène), permettent de répondre aux plus hautes exigences thermiques : RT 2012, BBC, PassivHaus, etc. ;

- Innocuité : le gypse ne contenant pas de substances dangereuses, il est chimiquement stable, non corrosif, non-toxique et souvent privilégié comme additif minéral dans les produits de l'agroalimentaire, les industries céramique, pharmaceutique, cosmétique, les plâtres et prothèses médicales ou dentaires, et en agriculture ;
- Le gypse est recyclable (déchets de plâtre et de construction).

2.2. RESSOURCES / RÉSERVES

D'après les standards internationaux de classification (CRIRSCO et ses déclinaisons nationales telles que le code JORC (Australie) ou la norme NI 43-101 (Canada)), les réserves sont la partie économiquement exploitable des ressources. Les réserves calculées varient dans le temps en fonction de l'avancée des travaux d'exploration minérale permettant l'identification de nouveaux volumes de la substance recherchée, ainsi qu'en fonction des paramètres technico-économiques d'un projet d'exploitation (cours de la substance minérale, coûts d'exploitation, avancées techniques et technologiques permettent l'extraction ou la récupération de teneurs auparavant inatteignables, coûts des procédés de traitement, de l'énergie, du transport, etc.).

Ressources géologiques en roches et matériaux : 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'exploration (tranchées, rainurages, etc.), etc.

Réserves de roches et matériaux : les réserves représentent la part techniquement et économiquement exploitable des ressources concernées. En effet, l'ensemble des ressources n'est pas exploitable à 100%. Les réserves correspondent aux volumes extractibles des ressources, pour lesquelles le prix récupéré par la vente du minerai ou du sous-produit final concentré excèdera l'ensemble des frais d'exploitation nécessaires. Les réserves prennent en compte les coûts d'extraction, de traitement utilisé, le taux de récupération de la substance, la proportion de stérile, etc. En fonction du degré de connaissances du gisement et de l'avancée du projet, on parle de réserves probables puis prouvées (dans l'ordre croissant des connaissances accumulées).

2.3. PRODUITS ET FILIÈRES

2.3.1. Produits

Le gypse et l'anhydrite sont des minéraux qui constituent majoritairement des roches sédimentaires nommées évaporites. Ces roches sédimentaires sont généralement proches de la surface. Ces gisements sont donc la plupart du temps exploités à ciel ouvert ou en souterrain mais généralement à de faible profondeur, par pelles hydrauliques, chargement en camions (type tombereaux) ou transporté par convoyeurs à bande. L'utilisation de raboteuses et de pelles hydrauliques permet une exploitation aisée un tri précis des différentes qualités de gypse. Après extraction, les matériaux extraits subissent plusieurs étapes de transformation (sélection et séparation en fonction de la qualité/des impuretés, broyage et calcination) aboutissant à des produits commercialisables.

Deux principaux types de produits sont disponibles :

- les matériaux de gypse brut (ou cru), n'ayant subi que la classification (tri qualitatif) puis concassés et/ou broyés pouvant servir d'adjuvant aux ciments, de charge minérale ou d'amendement dans l'agriculture ;

- les matériaux calcinés (de 120°C à 450°C) puis broyés servent à la production de plâtre (plaques de plâtre, moules, enduits) ou à l'industrie chimique.

2.3.2. Filières

Du point de vue économique, le concept de filière fait référence à une succession d'opérations participant, d'amont en aval, à l'élaboration 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.

La Figure 9 synthétise les différentes filières d'usages possibles des produits de gypse et d'anhydrite en fonction de leur traitement. Les propriétés naturelles du gypse et de l'anhydrite, telles que l'inertie, l'inflammabilité, ou l'isolation thermique, font des produits à base de gypse et d'anhydrite d'excellents supports dans la construction, dans les industries chimiques et dans l'agriculture.

<i>Principales filières industrielles des produits de gypse et d'anhydrite</i>			
<i>Construction</i>	<i>Chimie</i>	<i>Charges minérales</i>	<i>Autres secteurs</i>
<p><i>Plâtre</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Plaques de plâtre • Enduits • Céramiques (moules) • Tuiles et briques (moules) • Décoration • Bande médicale <p><i>Adjuvant pour ciment</i></p> <p><i>Liant hydraulique</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Couche de roulement • Chape 	<p><i>Sulfure de calcium</i></p> <p><i>Acide sulfurique</i></p> <p><i>Sulfate d'ammonium</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Plastique, • Peinture, • Papier, • Colle, • Verrerie, • ... 	<p><i>Alimentation (floculant)</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Alimentation animale • Purification de l'eau (bière) • Clarification (vin) <p><i>Agriculture</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Amendement <p><i>Pharmacie</i></p>

Figure 9 : Principales filières des produits obtenus à partir de gypse et d'anhydrite.

3. Géologie du gypse et de l'anhydrite

3.1. LA FORMATION DU GYPSE ET DE L'ANHYDRITE

3.1.1. Gypse et anhydrite naturels

Le gypse et l'anhydrite sont des minéraux qui constituent majoritairement des roches sédimentaires nommées évaporites. Les évaporites se forment par l'évaporation de l'eau de mer ou de saumures issues de la dissolution de roches préexistantes liée à de l'altération chimique. Le type et la quantité de minéraux précipités dépendent de plusieurs paramètres : la nature des éléments chimiques contenus dans l'eau, la concentration de ces éléments dissous, les conditions climatiques (climat plutôt chaud et aride), la profondeur et l'extension du bassin sédimentaire (peu profond mais étendu). Il est aussi possible d'observer la formation d'évaporites dans des milieux littoraux tempérés et très venté (ex. marais salants de l'île de Guérande, de l'île de Ré ou encore des Salins du Midi).

Gypse et anhydrite issus des évaporites marines et continentales

Une évaporite est une roche sédimentaire d'origine chimique formée par la précipitation des éléments dissous dans une solution aqueuse sursaturée (saumure). Lorsque l'eau s'évapore, elle se concentre en éléments dissous, des ions qui à forte concentration vont s'associer entre eux et précipiter sous la forme de sels. Les matériaux déposés en couches successives constituent une séquence évaporitique. Les solutions mères peuvent être d'origine marine, continentale ou mixte.

Une séquence évaporitique se développe dans un bassin sédimentaire où l'évaporation est supérieure aux apports en eau (Figure 10 et Figure 11). Elle peut prendre place dans deux grands domaines :

- en domaine **continental** (les évaporites continentales sont formées par l'évaporation d'eaux continentales qui peuvent être d'origine météorique, issues de la zone de battement des nappes phréatiques ou même plus rarement d'origine hydrothermale) ;
- en domaine **marin** (les évaporites marines se forment par précipitation subaquatique (lagunes, rifts continentaux, bassins intracratoniques) ou subaérienne (bassins isolés par des récifs, sebkhas côtières, mangroves, marais salants peu profonds) à partir de l'évaporation d'eau de mer. En domaine marin, deux types d'évaporites se distinguent : les évaporites de plateforme (interstratifiées au sein des séries marines argilo-sableuses ou carbonatées) et les évaporites de bassin (accumulations massives liées à des successions d'évaporites marines ayant rempli de grands bassins sédimentaires tectoniquement et hydrographiquement isolés).

Et selon deux grands modes de précipitation (Figure 11) :

- Précipitation évaporitique **subaquatique** (bassin fermé, bassin endoréique (lacs intramontagneux), lagune margino-littorale) ;
- Précipitation évaporitique **subaérienne** (sebkha, marais salants).

Une séquence évaporitique est rarement complète et se caractérise par le dépôt successif de différents sels en fonction de la densité de la saumure et des conditions réunies amenant à

l'évaporation d'une colonne d'eau. Par exemple, pour l'eau de mer qui contient en moyenne 35 g/l d'éléments dissous, 78% sont constitués par du chlorure de sodium, 18% par des sels de magnésium et de potassium, 0,4% de carbonate de calcium et 3,6% de sulfate de calcium (gypse et anhydrite). Autrement dit, pour 1 800 m d'eau de mer d'une salinité normale, son évaporation totale produira une épaisseur de 12 m d'halite pour seulement 0,50 m de gypse.

Dans le cas d'une **précipitation subaquatique**, une séquence évaporitique commence à se former lorsque l'eau s'évapore suffisamment pour atteindre une certaine concentration-limite (saturation), où les sels minéraux ne sont plus solubles et précipitent les uns après les autres. L'ordre dans lequel les sels précipitent constitue une séquence évaporitique comme suit (Figure 10) : carbonate de calcium (calcite) et carbonate de magnésium (dolomie) > **sulfate de calcium (gypse + anhydrite)** > chlorure de sodium (halite) > sulfate de magnésium > sels de potassium et de brome (ex. sylvite). La calcite précipite lorsqu'environ 50% de la masse d'eau initiale s'est évaporée. Pour le gypse, la précipitation advient lorsque 65 à 80% de la masse d'eau initiale s'est évaporée. La halite précipite après environ à 90% d'évaporation, et la potasse aux environs de 95% d'évaporation. La séquence évaporitique se forme par le dépôt successif de sels minéraux et ce de façon plus ou moins concentrique dans le cas d'un bassin sédimentaire fermé (Figure 10).

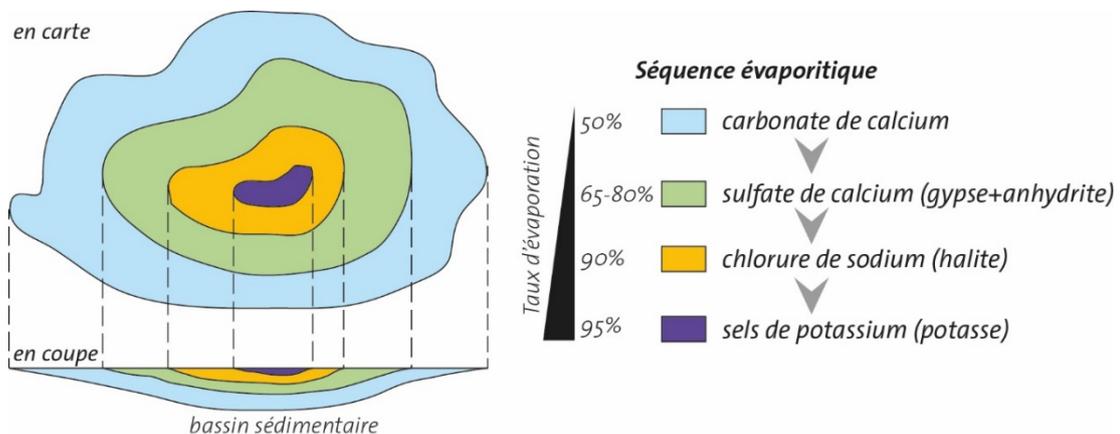


Figure 10 : Formation d'une séquence évaporitique par évaporation subaquatique dans le cas d'un bassin fermé.

Dans le cas d'une **précipitation subaérienne**, le gypse et l'anhydrite se forment par la précipitation de sels de saumures au sein de sédiments (sables et boues silico-carbonatées d'origine marine, éolienne ou fluviale) déposés dans les plaines côtières en bordure de lacs ou de mers intérieures. Cette précipitation de sels se fait à partir des eaux interstitielles lors de leur remontée à la surface. L'objet géologique caractéristique est la « *sebkha* ». Ce terme d'origine arabe désigne une dépression à fond plat généralement inondable et située proche d'un lac ou d'une mer. Ainsi, de nombreux lacs temporaires (*playas*, *chotts*) sous climat aride, se retrouvent partiellement à sec avec un marais salant résiduel au centre et entourés par des *sebkhas* continentales composées de sédiments sableux et/ou boueux au sein desquels s'intercalent de fines couches d'évaporites. C'est dans ce type de contexte aride à semi-aride, lorsque l'évaporation des eaux interstitielles l'emporte sur la pluviométrie, que se forment les roses des sables ou les ciments évaporitiques indurant les sols ; peuvent ainsi se former les caliches et les calcrètes qui sont des roches sédimentaires composées d'un ciment carbonatées indurant des sables, limons ou graviers et qui contiennent occasionnellement du gypse et de la silice (silcrètes). Le gypse et l'anhydrite se présentent la plupart du temps sous forme nodulaire ou lenticulaire dans ce type de contexte associé à des apports terrigènes plus ou moins importants différenciant les *sebkhas* « carbonatées », des *sebkhas* « argileuses ».

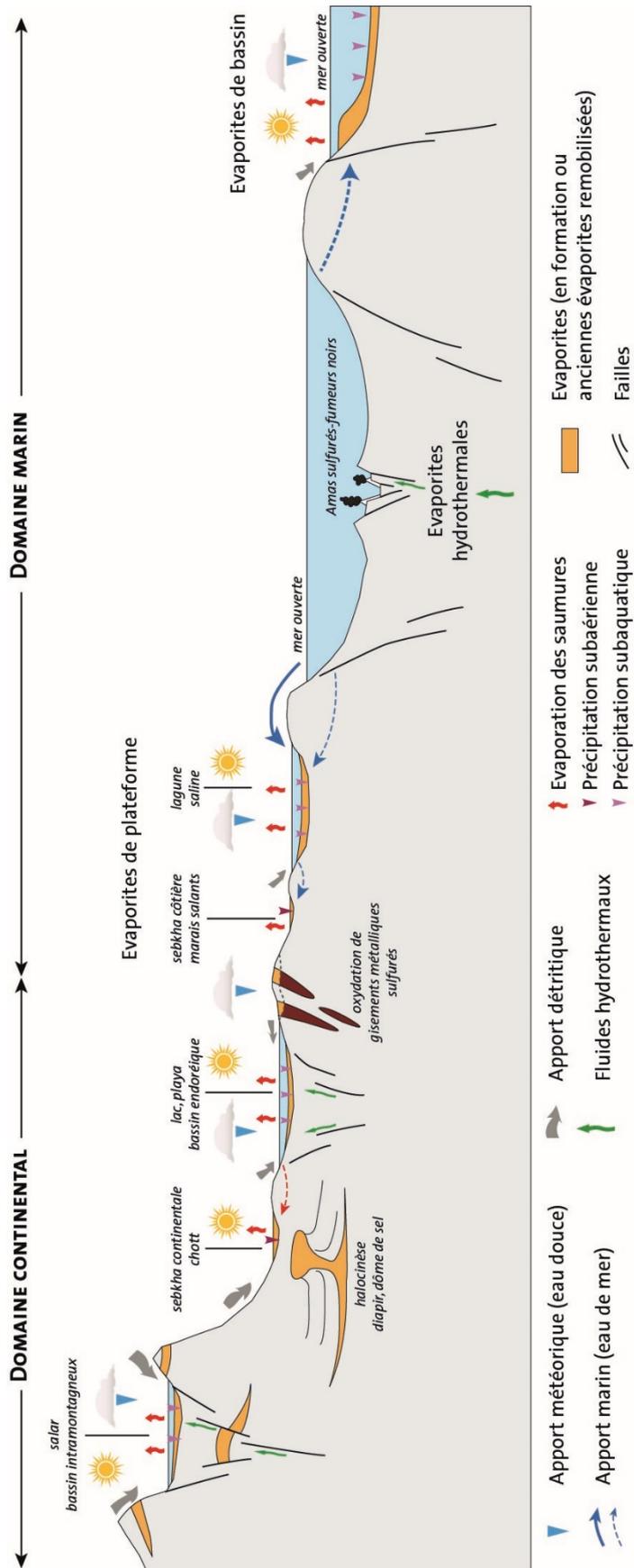


Figure 11 : Les différents domaines et contextes de formation des évaporites.

Gypse et anhydrite d'origine hydrothermale ou issus de l'oxydation

Néanmoins, il faut noter que le gypse et l'anhydrite peuvent parfois être d'origine hydrothermale. La différence fondamentale entre le gypse et l'anhydrite d'origine marine et le gypse et l'anhydrite d'origine hydrothermale est bien l'origine des saumures ; l'eau de mer pour les premiers et des fluides hydrothermaux en lien avec une activité volcanique pour les seconds. Ceci se traduit par une chimie bien différente et donc une minéralogie différente et plus variée. Ainsi des minéraux caractéristiques se forment comme des sulfates, des carbonates et des silicates de sodium (ex. le trona $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), des borates de sodium, de calcium ou magnésium, des nitrates, des phosphates, des iodates, des sulfures (ex. pyrite, marcasite) et même des fluides riches en lithium, en magnésium et en tungstène (Tableau 2). Ainsi, le gypse et l'anhydrite peuvent se former proche de fumeurs noirs (amas sulfurés volcanogéniques) à proximité des dorsales médio-océaniques sur les fonds marins ou encore dans des régions volcaniques émergées à terre.

Enfin, le gypse et l'anhydrite peuvent aussi se former lors de l'oxydation de sulfures présents dans certains gisements métallifères.

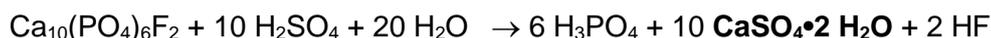
Minéraux majeurs	Minéraux accessoires
<i>Evaporites marines</i>	
halite NaCl	célestite SrSO_4
sylvite KCl	polyhalite $\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	kieserite $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
soufre S	kainite $\text{KMgSO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
anhydrite CaSO_4	strontianite SrCO_3
carnallite $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	dolomite $(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3$
calcite CaCO_3	ankérite $\text{CaFe}(\text{CO}_3)_2$
	hauérite MnS_2
	pyrite FeS_2
	marcasite FeS_2
<i>Evaporites hydrothermales</i>	
nitre KNO_3	halite NaCl
natratine NaNO_3	sylvite KCl
borax $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	glaubérite $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$
colemanite $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	nahcolite NaHCO_3
kernite $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_6(\text{OH})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	burkéite $\text{Na}_6(\text{SO}_4)_2\text{CO}_3$
trona $\text{Na}_3\text{CO}_3(\text{HCO}_3) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	kanksite $\text{KNa}_{22}(\text{SO}_4)_9(\text{CO}_3)_2\text{Cl}$
gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	epsomite $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
anhydrite CaSO_4	mirabilite $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
natron $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	thénardite Na_2SO_4
ulexite $\text{NaCaB}_5\text{O}_6(\text{OH})_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	marcasite FeS_2
boracite $\text{Mg}_3\text{B}_7\text{O}_{13}\text{Cl}$	carbonates

Tableau 2 : Principaux minéraux évaporitiques (d'après Jébrak et Marcoux, 2008).

3.1.2. Gypse et anhydrite de synthèse

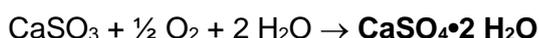
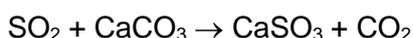
Outre le gypse et l'anhydrite naturels, il existe du gypse et de l'anhydrite synthétiques obtenus en sous-produits de traitements chimiques. On distingue le phosphogypse, le désulfogypse (gypse FGD pour *Flue Gas Desulfurization*), le citrogypse, le borogypse, le titanogypse et la fluoranhydrite.

Le **phosphogypse** est obtenu lors de la fabrication d'acide phosphorique dans l'industrie des engrais selon la réaction suivante :

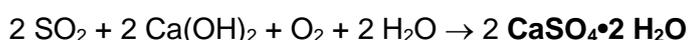


Ce sont quelques 185 Mt/an de phosphogypse produites à travers le monde. Dans les années 1980, la production totale française était d'environ 6 Mt, dont 0,9 Mt dans chacune des unités de Grand Quevilly, Grand Couronne et du Havre, en Seine-Maritime. Cependant, l'utilisation de phosphogypse présente plusieurs inconvénients : pour la fabrication du plâtre eu égard à l'extrême finesse du gypse obtenu qui rend difficile son utilisation dans le cas de plâtres à enduire, il émane également parfois de la radioactivité liée à la présence de traces d'uranium dans le minerai phosphaté d'origine et une émission de radon, ce qui entraîne l'impossibilité de l'utiliser dans le secteur de la construction et du bâtiment.

Le **désulfogypse** est produit lors de la désulfuration des gaz de combustion du charbon et du fioul des centrales thermiques, procédé réalisé pour des raisons environnementales. Bien que la France soit peu concernée (les centrales thermiques à flammes ne représentant que la troisième source de production d'électricité derrière les énergies renouvelables et le nucléaire), le désulfogypse est largement produit aux États-Unis, au Japon, en Grande-Bretagne et en Allemagne où les centrales thermiques sont beaucoup plus nombreuses. Le désulfogypse est formé suite à un procédé qui vise à absorber le dioxyde de soufre et les oxydes d'azote présents dans les gaz de combustion, par une suspension dans l'eau de carbonate de calcium. Les réactions globales sont les suivantes :



La fixation par une suspension aqueuse d'hydroxyde de calcium est aussi utilisée, selon la réaction chimique globale suivante :



Le désulfogypse est la principale source de substitution du gypse. En 2017, la production aux États-Unis était estimée à 32,7 Mt pour une utilisation de 22,8 Mt (dont 69% sont utilisés dans l'industrie plâtrière, 10% dans le ciment et 5% en agriculture). La France ne produit qu'une faible quantité de désulfogypse dans quatre centrales thermiques au charbon : Cordemais en Loire-Atlantique, Emile-Huchet en Moselle, le Havre en Seine-Maritime et Provence dans les Bouches-du-Rhône. Deux des centrales, le Havre et Cordemais, sont opérées par EDF et les deux autres par GazelEnergie (appartenant au groupe tchèque EPH après le rachat d'Uniper France en 2019). Ces centrales devraient cesser progressivement leur activité d'ici 2022 suite à un projet de loi sur l'énergie visant à réduire la production de gaz à effet de serre et lutter contre le changement climatique. En 2017, la centrale thermique de Cordemais en Loire-Atlantique a produit 14,2 kt de désulfogypse ; quant à la centrale du Havre, elle recycle, en 2019, 100% des déchets issus de la combustion, dont le gypse valorisé par les entreprises de la région sous forme de ciment et de plâtre.

3.2. GISEMENTS DE GYPSE ET D'ANHYDRITE DANS LE MONDE ET EN FRANCE

Le gypse et l'anhydrite sont des minéraux qui peuvent se former dans différents contextes géologiques à travers le monde. Ainsi, chaque gisement a ses spécificités. Cependant, le mode de genèse le plus fréquemment admis est une précipitation directe par évaporation avec la formation d'évaporites.

3.2.1. Les gisements mondiaux de gypse et d'anhydrite

Les gisements de gypse et d'anhydrite dans le monde sont nombreux (Tableau 3) et se répartissent dans des formations gypseuses s'étalant du Protérozoïque (Oman, bassin Amadeus en Australie) au Quaternaire, l'Anthropocène actuel (mer Morte, lac d'Assal, mer Rouge, golfe Persique). Les principaux gisements de gypse et d'anhydrite dans le monde sont âgés du Cambrien (Pakistan, Russie), du Silurien (ex. Canada, États-Unis), du Dévonien (ex. États-Unis), du Permien (ex. Allemagne et Pologne, Russie, États-Unis), du Trias (ex. France), du Jurassique (ex. Mexique), de l'Éocène (ex. France) et du Néogène (ex. Espagne).

Age	Europe	Amérique	Asie	Afrique	Océanie
Holocène	NA	USA (Californie), Chili, Argentine, Bolivie, Pérou	Chine, Iran, Arabie Saoudite, Israël, Jordanie	Ethiopie, Erythrée, Tunisie, Lybie, Djibouti	Australie
Pléistocène	NA	NA	NA	NA	Australie (Nouvelle Galles du Sud, Queensland, Australie du Sud, Australie Occidentale)
Pliocène	Grèce	NA	Iran	NA	NA
Miocène	Bulgarie, Pologne, Roumanie, Italie, Rép. Tchèque, Slovaquie, France	USA (Nevada, Californie)	Arabie Saoudite, Turquie, Iran, Indonésie, Arménie	Egypte, Soudan	NA
Oligocène	Espagne, France	NA	Arménie	NA	NA
Eocène	Roumanie, France, Italie	NA	Inde	NA	NA
Paléocène	NA	NA	NA	NA	NA
Crétacé	NA	USA (Texas, Arkansas), Brésil, Venezuela	Laos, Thaïlande	Gabon, Angola	NA
Jurassique	Angleterre, France	USA (Iowa, Nouveau Mexique, Colorado, Utah, Wyoming, Montana), Canada	Ciscaucasie (Russie)	Maroc, Tanzanie	NA
Trias	France, Allemagne, Angleterre, Autriche, Espagne	Amazonie	Turquie	Algérie, Maroc	NA
Permien	Angleterre, Autriche, Lituanie, Pologne, Hongrie, Allemagne, Ukraine, Biélorussie	USA (Texas, Nouveau-Mexique, Oklahoma, Kansas, Colorado, Wyoming, Nevada, Arizona)	Russie	NA	NA
Carbonifère	NA	Canada (Nouvelle-Ecosse), USA (Michigan, Indiana, Virginie)	Thaïlande	NA	NA
Dévonien	Lituanie, Lettonie, Biélorussie, Ukraine	USA (Iowa, Montana, Wyoming), Canada	NA	NA	NA
Silurien	NA	USA (New York, Ohio), Canada (Ontario)	NA	NA	Australie
Ordovicien	NA	Canada (Colombie-Britannique)	NA	NA	NA
Cambrien	NA	NA	Russie (Sibérie orientale), Pakistan, Iran	NA	NA
Protérozoïque	NA	NA	Oman	NA	Australie

Tableau 3 : Principales occurrences de gypse et d'anhydrite dans le monde classées par continent en fonction de leur âge géologique. La liste n'est pas exhaustive. NA : non applicable.

Malgré des statistiques mondiales très variables selon les sources, les principaux pays producteurs de gypse et d'anhydrite dans le monde sont les suivants : Chine, Iran, États-Unis, Australie, Turquie, Espagne, Thaïlande, Mexique, Japon, Russie et France.

Si les principaux gisements de gypse et d'anhydrite aujourd'hui exploités à travers le monde sont fossiles, des gisements évaporitiques sont en cours de formation notamment au sein de lacs salés (ex. salars andins, lac Mac Leod en Australie, lac Assal à Djibouti) et de vastes *sebkhas* (ex. Mer Rouge, Golfe Persique), en domaine continental. Force est de constater que l'ampleur et le volume des évaporites des gisements anciens sont bien plus importants que les gisements récents à actuels (Figure 12).

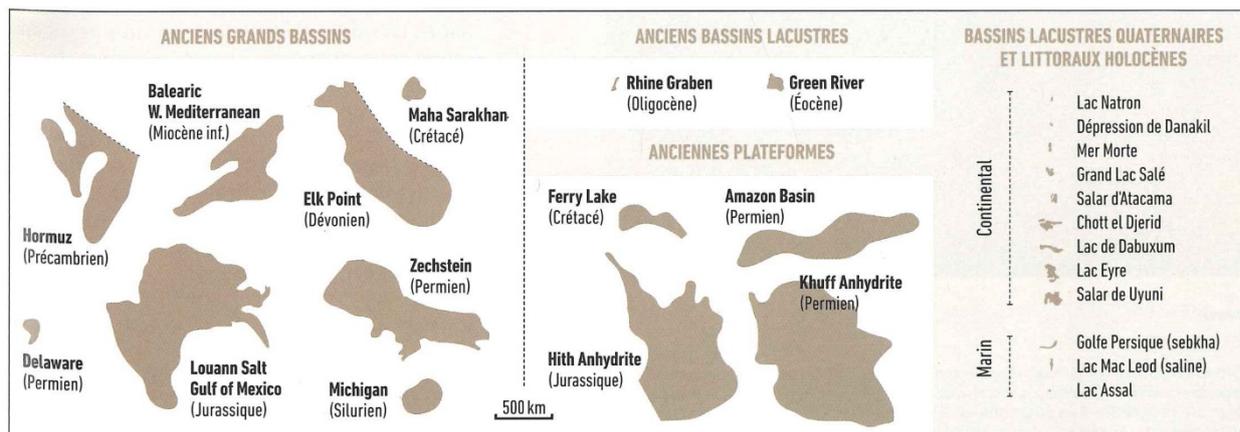


Figure 12 : Comparaison entre anciens gisements et gisements récents à actuels. Modifié d'après Warren (2010).

Les principaux gisements fossiles d'évaporites sont pour la plupart des dépôts de halite et/ou d'anhydrite d'origine marine pouvant être associés à d'importants dépôts de sel de potasse. Les anciens dépôts d'évaporites ont nécessité des conditions climatiques, eustatiques ou tectoniques particulières qui ont été réunies à plusieurs reprises au cours des temps géologiques. Or, ces dépôts fossiles n'ont pas grand-chose à voir avec les gisements récents à actuels, en termes d'échelle, d'épaisseur, de tectonique et d'hydrologie. La comparaison des bassins salifères démontre que les systèmes évaporitiques lacustres du Quaternaire et actuels ne permettent pas d'expliquer, par simple analogie, l'échelle des gisements géants salins fossiles.

Il apparaît que les formations salines anciennes sont principalement formées en domaine marin alors que les formations salines récentes à actuelles sont majoritairement formées en domaine continental. Cette différence majeure entre gisements anciens et actuels réside dans l'évolution géologique de la planète, notamment l'interaction entre les différentes plaques tectoniques au cours du temps. Les conditions nécessaires pour que d'importants volumes d'évaporites puissent s'accumuler dans un bassin sédimentaire apparaissent en bordure d'une ou plusieurs plaques tectoniques à l'occasion de l'ouverture d'un rift continental ou lors d'une fermeture océanique (ex. dépôts évaporitiques lors de la crise Miocène en Méditerranée).

Néanmoins, depuis quelques années, certains scientifiques avancent une autre hypothèse pour expliquer la genèse de gisements géants d'évaporites, notamment en eaux profondes, grâce au modèle des « déshydratites » (Gaucher *et al.*, 2018 ; Figure 13). Une déshydratite est une roche salifère issue de la précipitation d'une saumure lors de la consommation d'eau pure par une réaction minérale. Ainsi, des scientifiques avancent le fait qu'il soit possible de précipiter des sels en eau profonde à partir de fluides supercritiques en zone de rifting (Hovland *et al.*, 2006) ou lors de la serpentinisation en zone d'exhumation de partie du manteau terrestre (Scribano *et al.*,

3.2.3. Les gisements français de gypse et d'anhydrite

Le contexte géologique de la France induit une forte représentation du gypse à l'échelle du territoire (Figure 14). La « pierre à plâtre » a depuis longtemps été exploitée en France, dès l'Antiquité, puis de façon industrielle à partir du XIX^e siècle grâce à l'exploitation des grands gisements de la région parisienne.

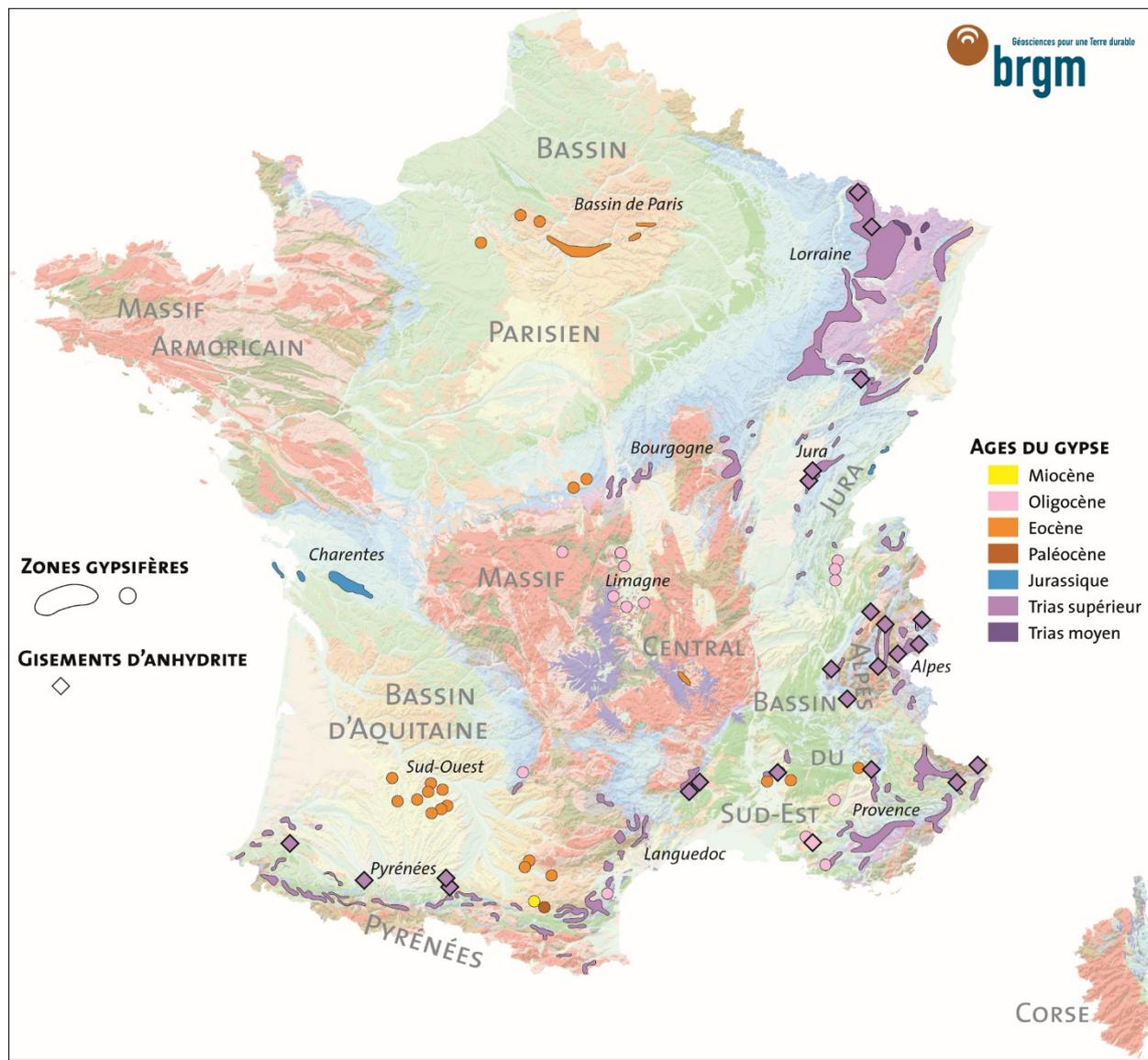


Figure 14 : Carte géologique simplifiée de la France avec la localisation des gisements potentiels (exploités ou non) de gypse et d'anhydrite (Source : BRGM).

Les gisements de gypse et d'anhydrite en France métropolitaine se répartissent du Trias moyen au Miocène (Figure 14). Les principales formations géologiques porteuses de gypse et d'anhydrite sont les niveaux du Trias supérieur (ou Keuper, environ -220 millions d'années), témoins d'une ancienne mer épicontinentale commune à la France, à l'Allemagne, à la Pologne, aux Pays-Bas, aux Pays Baltes (Estonie, Lituanie, Lettonie), et à la Grande-Bretagne (Figure 15).

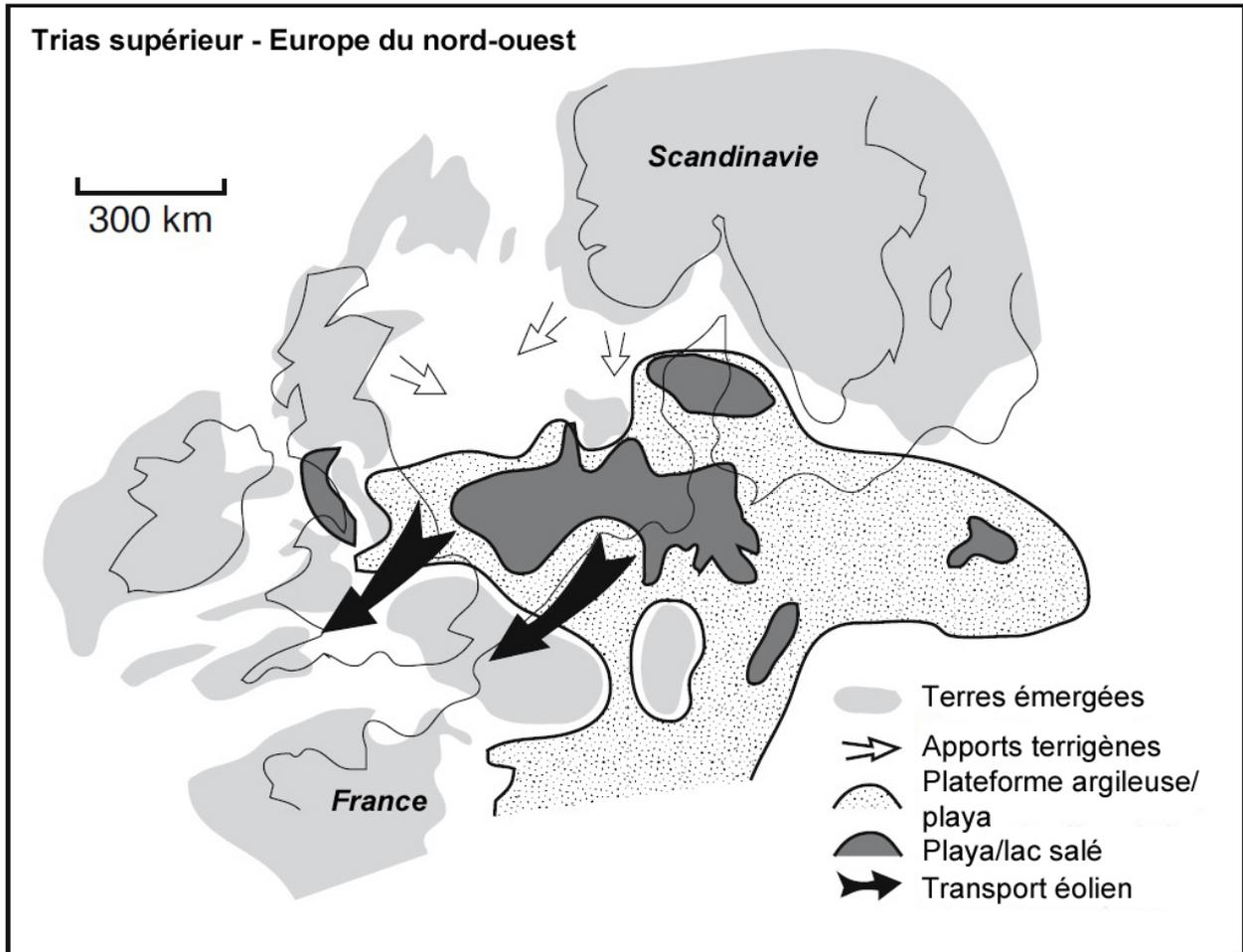


Figure 15: Carte paléogéographique du Trias supérieur en Europe du nord-ouest. La mer épicontinentale qui prend place à cette période favorise d'importants dépôts d'évaporites (modifiée d'après Warren, 2006).

Les terrains du **Trias** supérieur qui renferment du gypse et de l'anhydrite se retrouvent en France dans les régions de la Lorraine, du Jura, de l'Alsace, des Alpes du Nord et du Sud, de la Provence, du Languedoc ainsi que tout le long des Pyrénées. Il est à noter que les principaux gisements d'anhydrite se situent dans ces niveaux du Trias supérieur, le gypse étant très souvent un produit d'altération de l'anhydrite présente dans ces couches sédimentaires. Les formations du Trias contenant du gypse dans les zones montagneuses sont souvent des zones de décollement (chevauchements) et sont donc localisées principalement au niveau d'accidents tectoniques majeurs avec d'importantes déformations (ex. plis, failles). Les formations géologiques de Lorraine du gypse ont une couverture surfacique importante. Cette grande surface de gypse et anhydrite n'est pas forcément exploitant sur son intégralité car leur qualité peut varier fortement.

Les terrains du **Jurassique** supérieur présents en Charente et en Charente-Maritime, alignés NO-SE, sont actuellement exploités pour le gypse qu'ils renferment dans les environs de Cognac. Quelques indices de gypse dans les terrains du Jurassique sont aussi à mentionner dans le Jura, dans les environs de Morteau et Pontarlier.

Les terrains du **Paléocène** renferment du gypse aux alentours de Rouvenac et Esperaza dans le département de l'Aude.

Les terrains âgés de l'**Éocène** renferment les célèbres gisements de gypse d'Île-de-France, notamment les marnes gypsifères datées du Ludien (ou Priabonien, dernier étage de l'Éocène, 38-34 millions d'années), mais aussi certains niveaux du Lutétien. Les terrains de l'Éocène renferment aussi du gypse au cœur du Bassin aquitain (environs de Montréal et Lectoure) et au sud du Massif central (Mas-Saintes-Puelles, Villefranche-de-Lauraguais). Dans la vallée du Rhône (environs de Carpentras comme à Mazan, Saint-Geniez près de Sisteron) et dans les Bouches-du-Rhône (Saint-Pierre-les-Martigues), le gypse est daté à la transition Éocène-Oligocène.

Concernant les terrains de l'**Oligocène**, ils renferment du gypse en Provence (Manosque, Aiguilles, Aix-en-Provence), dans le fossé de Limagne, dans l'Aude (Portel-des-Corbières à côté de Sigean) et dans les Alpes du Nord (Besingy, Seyssel, Frangy).

D'autres gisements dans l'est et le sud de la France sont peu connus en raison de leur localisation (profondeur importante ou isolement géographique en régions montagneuses). D'autres gisements moins bien datés existent aussi en Bourgogne, en Alsace, en Haute-Saône ou dans le Var.

3.3. TECHNIQUES D'EXPLORATION

Pour mener à bien l'exploration de gisements de gypse et d'anhydrite, plusieurs méthodes directes et indirectes sont possibles et certains paramètres majeurs doivent être pris en compte : stratigraphie, topographie, végétation, hydrologie, etc. En outre, il faut noter que le gypse est utilisé depuis des millénaires par l'Homme, et de ce fait, la répartition des principaux gisements est déjà bien connue à travers le monde.

Bien entendu la première étape d'exploration d'une région pour son potentiel en gypse et en anhydrite est la conduite d'une étude bibliographique à partir : de synthèses déjà existantes (services géologiques par exemple), de travaux scientifiques de recherche (articles, thèses, masters, etc.), de documents publiés sur des permis par des compagnies privées ou publiques, de cartes géologiques pour identifier les niveaux stratigraphiques intéressants, de données géophysiques disponibles, de sondages existants, etc.

L'étude de la stratigraphie de la région à investiguer est primordiale. En effet, le gypse et l'anhydrite sont fréquemment associés aux roches sédimentaires comme les argiles et la dolomie. L'absence de fossiles macroscopiques dans les dépôts de gypse et d'anhydrite est aussi caractéristique étant donné la forte salinité du milieu de dépôt. D'autre part, eu égard à leurs propriétés physico-chimiques, le gypse et l'anhydrite sont rarement associés aux roches métamorphiques et plutoniques, excepté lorsqu'ils se forment à partir de fluides hydrothermaux.

La topographie (géomorphologie) joue aussi un rôle important dans la détermination de la présence d'un gisement de gypse et d'anhydrite. En effet, la forte solubilité du gypse et de l'anhydrite est à l'origine de zones fortement déprimées ou de reliefs déchiquetés dans les régions humides. La topographie sera aussi guidée (ex. réseau hydrographique) par la présence de gypse en subsurface, qui dépendra du degré d'hydratation d'anhydrite en profondeur, en fonction du battement de la nappe phréatique et de l'épaisseur de mort-terrain en surface. Dans les zones arides à semi-arides, le gypse est plus résistant à l'érosion que les roches encaissantes comme les marnes ou les argiles et marquera donc un relief plus ou moins fort.

La végétation peut aussi être utilisée de façon indirecte pour déceler la présence de gypse et d'anhydrite. En effet, les affleurements de gypse sont peu propices au développement de la végétation, notamment en milieu aride à semi-aride. Cependant, dans le cas du développement

de karsts dans les régions humides au sein des formations gypseuses, des poches d'argiles peuvent se former et favoriser le développement localisé de végétation. En surface, une croûte orange peut se développer sur le gypse. Cette croûte qualifiée de « cryptogamique » consiste en association de la gypsite avec des lichens, des champignons ou des mousses lorsque le taux d'humidité est suffisant. Ainsi, lorsque le gypse et l'anhydrite sont intercalés dans d'autres roches, le contraste de végétation peut aider à mieux localiser les niveaux intéressants.

L'étude de l'hydrologie, notamment par l'étude de cartes hydrographiques, peut permettre d'apporter des indices pour localiser des couches de gypse et d'anhydrite. Le gypse est souvent associé à des réseaux karstiques. En outre, une étude de la géochimie des eaux d'une région peut permettre de pister le gypse et l'anhydrite grâce à la présence de teneurs anormalement élevées en Na, K, Li, Br et Cl par rapport au fond régional.

La géophysique est aussi un outil précieux pour l'exploration de gisements de gypse et d'anhydrite. La gravimétrie ou la sismique peuvent permettre de préciser la géométrie des couches salifères. La télédétection (Figure 16) peut aussi être utilisée pour la prospection de gisements de gypse et d'anhydrite, grâce notamment aux images satellitaires multi-spectrales ASTER (Mernagh, 2013).

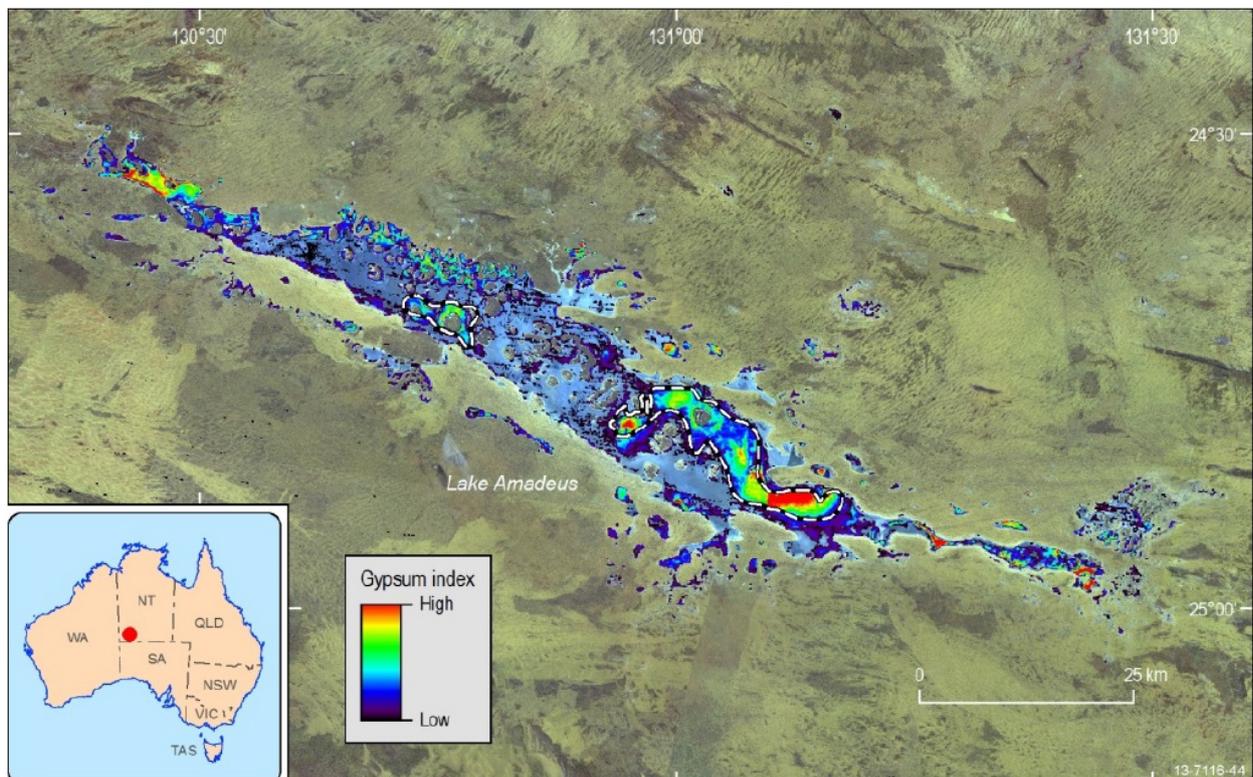


Figure 16 : Exemple d'exploration du gypse dans le lac Amadeus (Australie), grâce à l'analyse des images satellitaires multi-spectrales ASTER (Mernagh, 2013).

4. L'activité extractive du gypse et de l'anhydrite en France

4.1. LOCALISATION DES CARRIÈRES ACTIVES

En 2019, la France compte 18 carrières de gypse et d'anhydrite en activité (Figure 17 et Tableau 4).

Ces carrières de gypse et d'anhydrite se répartissent selon quelques grands bassins de production :

- Les carrières du **Bassin parisien** représentent à elles-seules **68% de la production nationale** : carrière de Saulorette et du Bois des Sables sur la commune de Saint-Souplets (77), carrière de La Plaine de Courgain sur la commune de Le Pin (77) ; carrière du Bois de Bernouille sur la commune de Coubron (93), carrière de Bouffémont sur la commune du même nom (95), carrière de Cormeilles-en-Parisis sur la commune du même nom (95), carrière de la butte de Montmorency sur la commune de Baillet-en-France (95), et la carrière de Bois le Comte sur la commune de Villeparisis (77) ;
- Les carrières de la **Provence** représentent environ **13% de la production nationale** : carrière de Melleton sur la commune de Mazan (84), carrière de Le Raou-Saint-Georges sur la commune de Lantosque (06) ;
- Les carrières des **Alpes** représentent environ **5% de la production nationale** : carrière de Lazer sur la commune du même nom (05), carrière de la SOGYMA sur la commune de Saint-Jean-de-Maurienne (73) ;
- Les carrières du **Sud-Ouest** et du **Languedoc** représentent environ **10% de la production nationale** : carrière de Pouillon sur la commune du même nom (40), carrière de Bielle sur la commune de Carresse-Cassaber (64), carrière de Tarrabeu sur la commune de Lesquerde (66).
- La carrière **charentaise** de Champblanc sur la commune de Cherves-Richemont (16) qui représente environ **4% de la production nationale** ;
- Les carrières d'anhydrite de **Lorraine** sont : la carrière du Bois de Kœnigsmacker sur la commune du même nom (57) et la carrière de Faulquemont sur la commune du même nom (57).

Les carrières actives qui extraient du gypse et de l'anhydrite sont majoritaires dans la région parisienne avec 8 carrières (Figure 18).

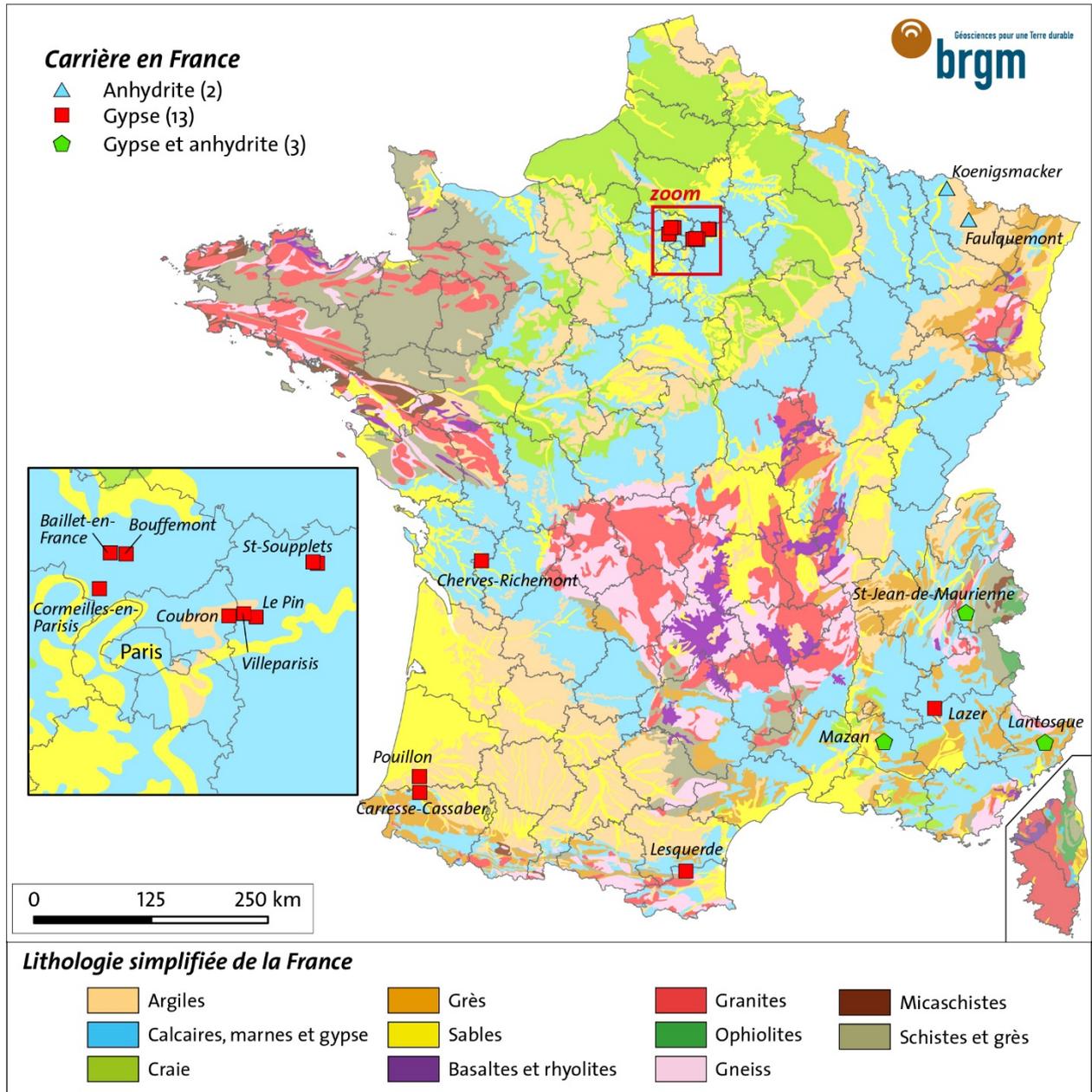


Figure 17 : Carte des carrières actives de gypse et d'anhydrite en France, 2019 (Source : BDCM-BRGM).

Région	Carrière	Exploitant	Type d'exploitation	Substance	Age géologique
Auvergne-Rhône-Alpes	Saint-Jean-de-Maurienne (73)	Société Gypse de Maurienne	Ciel ouvert	Gypse, anhydrite	Trias
Grand-Est	Faulquemont (57)	Anhydrite Minéral France	Souterrain	Anhydrite	Trias moyen (Muschelkalk)
	Koenigsacker (57)	L'ANHYDRITE LORRAINE	Souterrain	Anhydrite	Trias Supérieur (Keuper)
Ile-de-France	Saint-Souplets (77) - Saulorette	Knauf	Ciel ouvert	Gypse	Bartonien ("Ludien")
	Saint-Souplets (77) - Bois des Sables	Knauf	Ciel ouvert	Gypse	Bartonien ("Ludien")
	Le Pin (77)	Siniat	Ciel ouvert et souterrain	Gypse	Bartonien ("Ludien")
	Villeparisis (77)	Placoplatre	Ciel ouvert	Gypse	Bartonien ("Ludien")
	Coubron (93)	Placoplatre	Souterrain	Gypse	Bartonien ("Ludien")
	Bouffémont (95)	Siniat	Souterrain	Gypse	Bartonien ("Ludien")
	Cormeille-en-Parisis (95)	Placoplatre	Ciel ouvert	Gypse	Bartonien ("Ludien")
Languedoc-Roussillon	Baillet-en-France (95)	Placoplatre	Souterrain	Gypse	Bartonien ("Ludien")
	Lesquerde (66)	Bournet Serge et fille	Souterrain	Gypse	Trias Supérieur (Keuper)
Nouvelle-Aquitaine	Pouillon (40)	Placoplatre	Ciel ouvert	Gypse	Trias Supérieur (Keuper)
	Caresse-Cassaber (64)	Siniat	Ciel ouvert	Gypse	Trias Supérieur (Keuper)
	Cherves-Richemont (16)	Garandeau	Ciel ouvert	Gypse	Tithonien-Berriasien
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Mazian (84)	Siniat	Ciel ouvert et anciennement souterrain	Gypse, anhydrite	Eocène-Oligocène
	Lantosque (06)	Siniat	Ciel ouvert	Gypse, anhydrite	Trias
	Lazer (05)	Placoplatre	Ciel ouvert	Gypse	Trias

Tableau 4 : Synthèse des carrières actives en France. Source : BDCM-BRGM (2019).

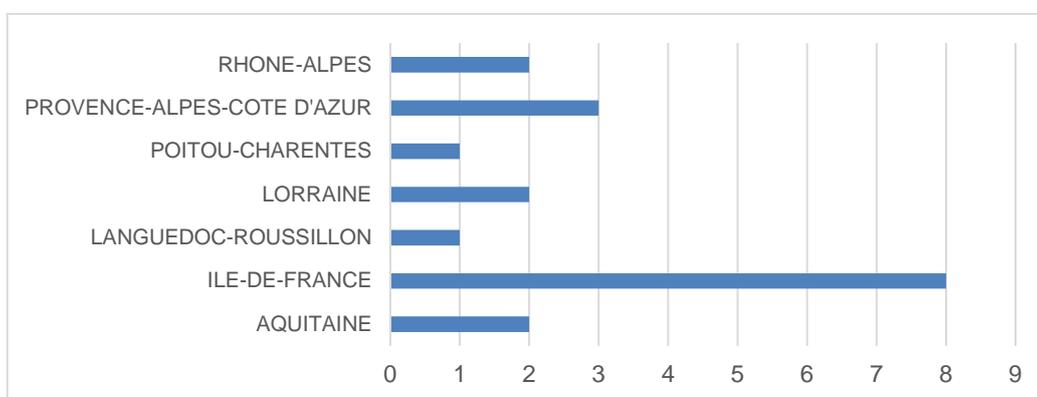


Figure 18 : Nombre de carrières de gypse et d'anhydrite par région (BDCM 2019).

Les exploitations en France peuvent exploiter du gypse, de l'anhydrite ou bien les deux substances.

Les carrières de gypse et d'anhydrite peuvent être exploitées à ciel ouvert, en souterrain ou en exploitation mixte (Figure 19).

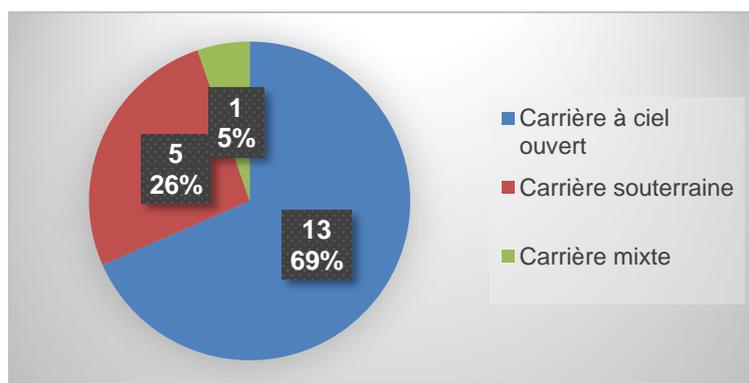


Figure 19 : Type d'exploitation pour le gypse et l'anhydrite en France (BDCM, 2019).

4.2. STATISTIQUES DES CARRIÈRES

En 2019, 18 carrières exploitent le gypse et l'anhydrite en France. Au total, 18 carrières actives sont autorisées en 2018, 1 carrière est en fermeture en 2019 et 1 autre le sera en 2024. C'est ainsi que 16 carrières auront leur activité autorisée jusqu'en 2030. Seules deux carrières doivent fermer entre 2019 et 2030 (dont une en 2019), permettant d'assurer une certaine pérennité de l'exploitation et de l'approvisionnement en gypse et en anhydrite pour la France à moyen terme.

Toutefois, bien que les réserves soient conséquentes (Placoplâtre avance plus de 300 Mt de réserves sur l'ensemble du territoire métropolitain), le gypse a été classé en décembre 2013 « *ressource d'importance nationale et d'intérêt européen* » par le Schéma directeur de la région Île-de-France, montrant l'intérêt économique et l'attention particulière portée à la durabilité de cette exploitation sur le territoire national.

Aujourd'hui, la production française maximale autorisée de gypse et d'anhydrite naturels en carrière est de 8 425 kt/an, avec des productions autorisées par site allant de 35 kt à 1 300 kt (Figure 20). À partir des données fournies par les exploitants (déclaration en ligne via GEREP), le tonnage de gypse et d'anhydrite produit en France est de 4 075 kt en 2018. D'ici à 2030, sans renouvellement d'autorisation ou d'entrée en production de nouvelles carrières, le nombre de carrières resterait stable à 16, et la production maximale autorisée serait réduite d'environ 400 kt à 7 950 kt (Figure 20). L'impact d'une telle baisse sur le marché français apparaîtrait donc limité, au regard d'une production réelle totale de l'ordre de 4 075 kt en 2018.

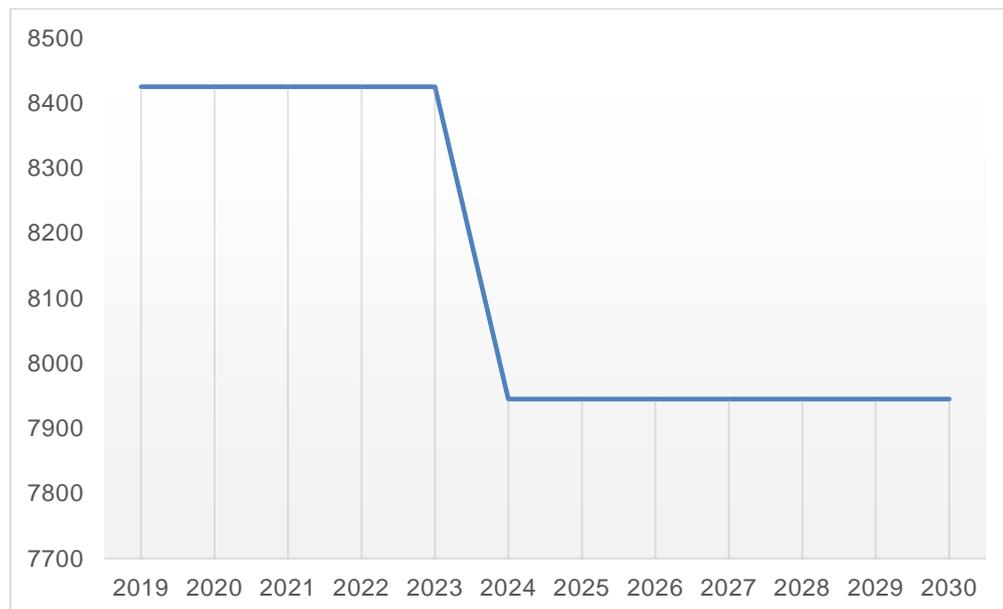


Figure 20 : Tonnage maximal autorisé à l'extraction de gypse et d'anhydrite (exprimé en kt) pour les carrières prévisionnellement actives entre 2019 et 2030 (BDCM, 2019).

4.3. RESSOURCES ET RÉSERVES PLAFONNÉES

Les ressources connues en France sont importantes avec de très grandes extensions des niveaux géologiques contenant du gypse et de l'anhydrite. Afin de pérenniser cette activité extractive dont dépendent beaucoup d'industries en France, les futurs schémas des carrières pourraient permettre de préserver les mises en valeur de cette ressource en identifiant des gisements d'intérêt régional ou national.

4.4. LES GISEMENTS DE GYPSE ET D'ANHYDRITE EN FRANCE

La géologie de certains gisements français de gypse et/ou d'anhydrite est décrite dans la partie suivante. Il s'agit d'un aperçu synthétique et non d'une description détaillée et exhaustive de chacun des gisements.

4.4.1. Gisements de gypse du Bassin de Paris

Le Bassin de Paris comptabilise à lui-seul 69% du volume de gypse extrait par an en France. Le gypse est daté du Bartonien au sens large (Éocène supérieur, environ 40 millions d'années) et s'est déposé dans un domaine lagunaire. L'âge plus précis du gypse qui est exploité est le « Ludien » (terme stratigraphique aujourd'hui obsolète) qui correspond à la partie supérieure du Bartonien, aux alentours de 37 millions d'années (Figure 21). Lié aux différentes allées et venues de la mer à cette époque, le gypse ne s'est pas déposé en une seule couche. Ainsi, le gypse du « Ludien » se répartit selon 3 couches principales (ou « masses ») séparées les unes des autres par des couches argilo-marneuses (Figure 22). L'épaisseur totale de ces trois masses peut parfois dépasser les 30 mètres. Il a été estimé que le taux de sédimentation du gypse a été d'environ 1 cm tous les 1 500 ans.

Il faut mentionner qu'une quatrième masse de gypse âgée du « Marinésien » (Bartonien moyen) est présente sous les trois autres couches principales âgées du « Ludien » (Bartonien supérieur). Enfin, les trois couches minéralisées principales du « Ludien » sont surmontées par des marnes dites supra-gypseuses qui marquent les derniers niveaux du Bartonien (Figure 22).

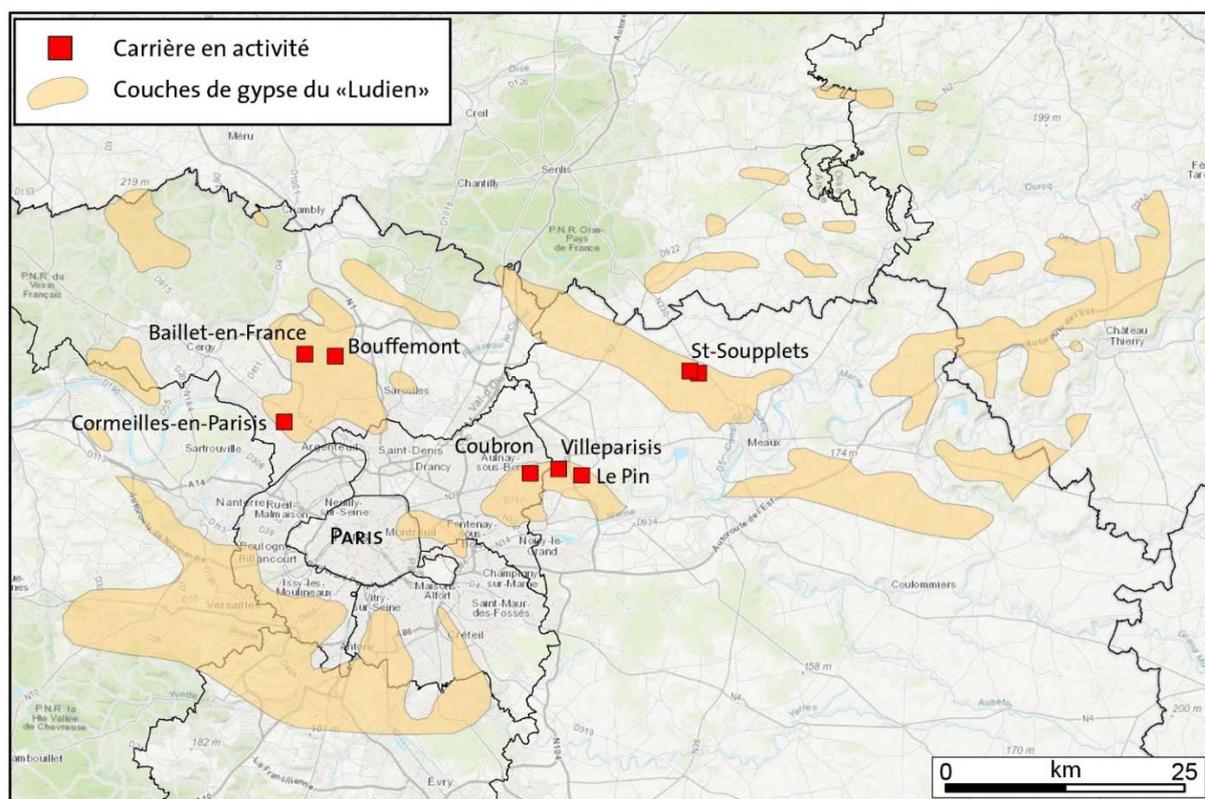


Figure 21 : Carte montrant la répartition des couches gypseuses du Bartonien (« Ludien ») et la localisation des carrières de gypse en activité. Source : BRGM et d'après Toulemont (1998).

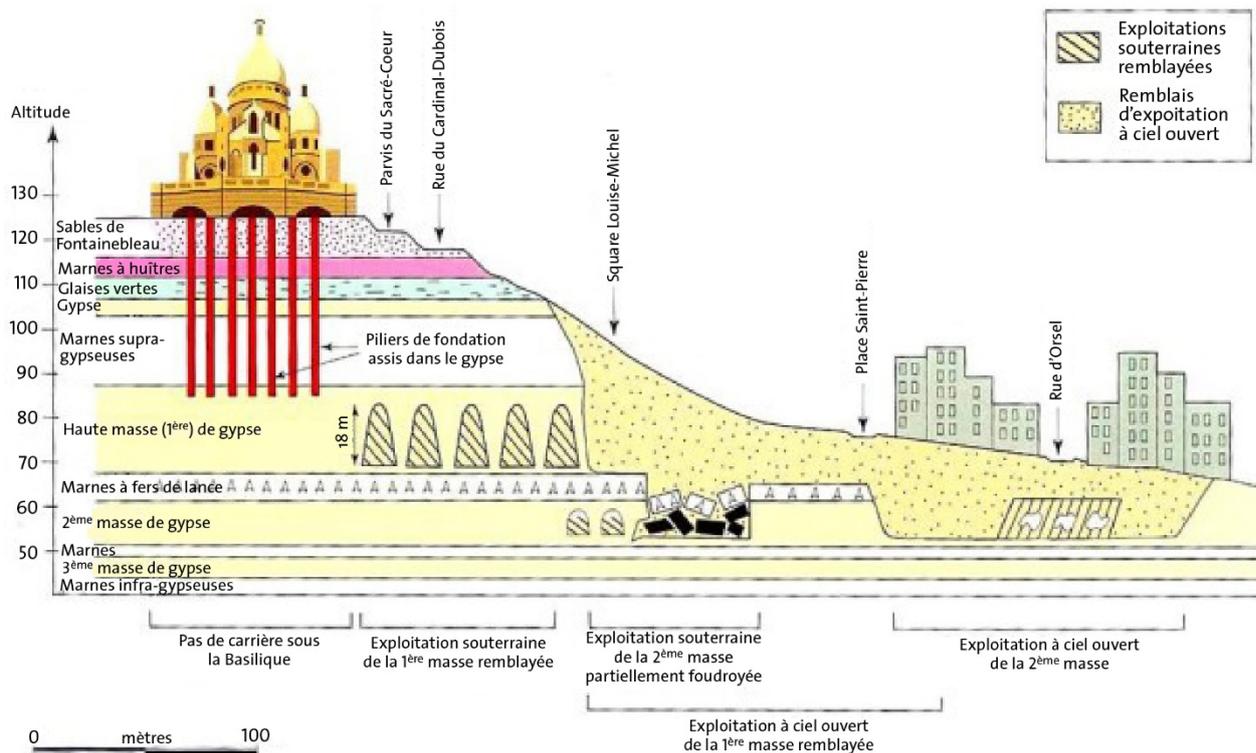


Figure 22 : Coupe géologique de la butte Montmartre montrant les principaux niveaux de gypse du « Ludien » exploités en région parisienne (Source : d'après Atlas du Paris souterrain, 2016).

Les marnes supra-gypseuses, datées du Bartonien supérieur (« Ludien » supérieur) regroupent les marnes blanches de Pantin et les marnes bleues d'Argenteuil. Ces marnes renferment quelques niveaux fins de gypse, l'un des niveaux étant connu sous le terme « gypse de Marabet ».

La **première masse** ou « haute-masse » de gypse est datée du Bartonien supérieur (« Ludien » moyen et inférieur). Il s'agit d'une vingtaine de mètres de bancs bien stratifiés de gypse saccharoïde, blond roussâtre, avec des niveaux peu épais de marnes feuilletées. Trois grandes carrières exploitent encore la haute-masse (Figure 23) : la carrière de La Plaine de Courgain sur la commune de Le Pin (77), la carrière du Bois de Bernouille sur la commune de Coubron (93) et la carrière de Bois le Comte sur la commune de Villeparisis (77).

La **deuxième masse** ou « moyenne masse » de gypse est plus réduite que la première (3 m à Clichy, 7 m à Livry-Gargan, 10 m à Vaujours, 8 m à Annet). La deuxième masse est constituée de bancs de gypse saccharoïde séparés par plusieurs lits de gypse en pied d'alouette réguliers et quelques lits marneux.

La **troisième masse** ou « basse masse » est plus marneuse que les deux précédentes et plus irrégulière en épaisseur (1 à 6 m). Elle n'est reconnue que par sondages ou en galeries souterraines. De nombreux cristaux de gypse en pied d'alouette se développent dans la masse de gypse saccharoïde. À Thorigny, le gypse autrefois exploité, se présente sous un aspect blanc laiteux, translucide et fibreux.

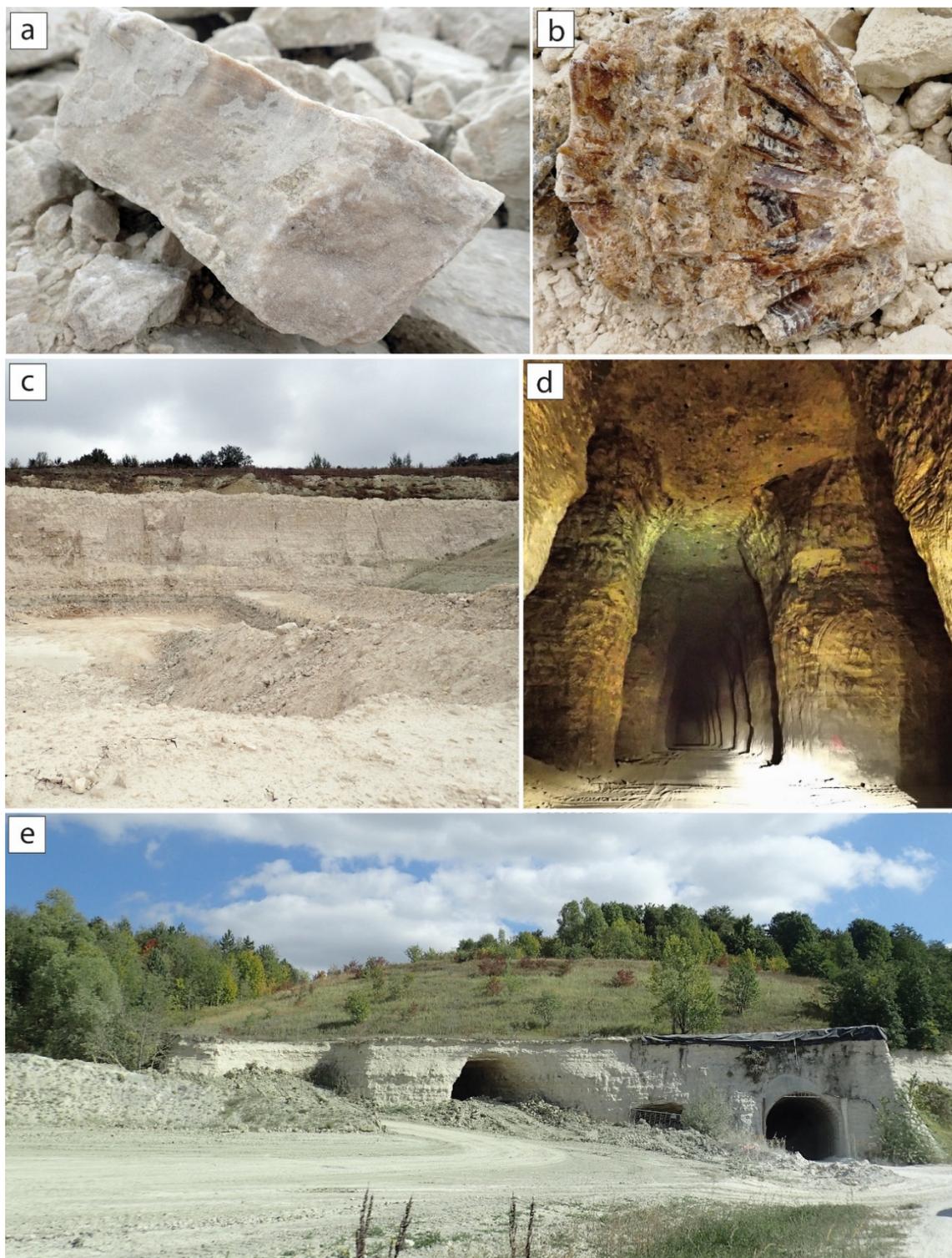


Figure 23 : Carrières de gypse à Villeparisis et Le Pin des sociétés Placoplâtre et Siniat. (a) Gypse saccharoïde de la première masse dans la carrière à ciel ouvert de Bois le Comte exploitée par Placoplâtre. (b) Gypse pied d'alouette de la deuxième masse. (c) Carrière à ciel ouvert exploitant ici la première masse (Placoplâtre). (d) Carrière souterraine exploitée par Siniat par la méthode des chambres et piliers. (e) Entrée de la carrière souterraine de La Plaine de Courgain exploitée par Siniat. Clichés : BRGM avec l'aimable autorisation de Placoplâtre et Siniat.

Les couches de gypse exploitées sont surmontées par des terrains principalement sableux datés du Rupélien (ou « Stampien » qui est un terme obsolète). Peu après leur dépôt, les couches de gypse du Bartonien occupaient une vaste surface en forme de croissant allant de la rivière de l'Epte à l'ouest (au-delà de la Seine-et-Marne) en passant par le nord de Paris. Peu après le dépôt des Sables de Fontainebleau au Rupélien, une émergence prend place conduisant à l'érosion des terrains émergés amenant à la formation de buttes témoins. Ainsi, les principales exploitations de gypse historiques et actuelles se sont centrées sur ces buttes résiduelles comme celles de Montmartre (Figure 24), des Buttes-Chaumont, de Cormeilles-en-Parisis, de Montmorency ou d'Aulnay. Cependant, l'urbanisation galopante de la mégapole parisienne a peu à peu rendu inaccessible bon nombre de ressources en gypse. Bon nombre de carrières ont d'ailleurs été exploitées dans Paris intramuros et causent aujourd'hui des risques d'effondrement liés à la présence de fontis un peu partout en région parisienne.



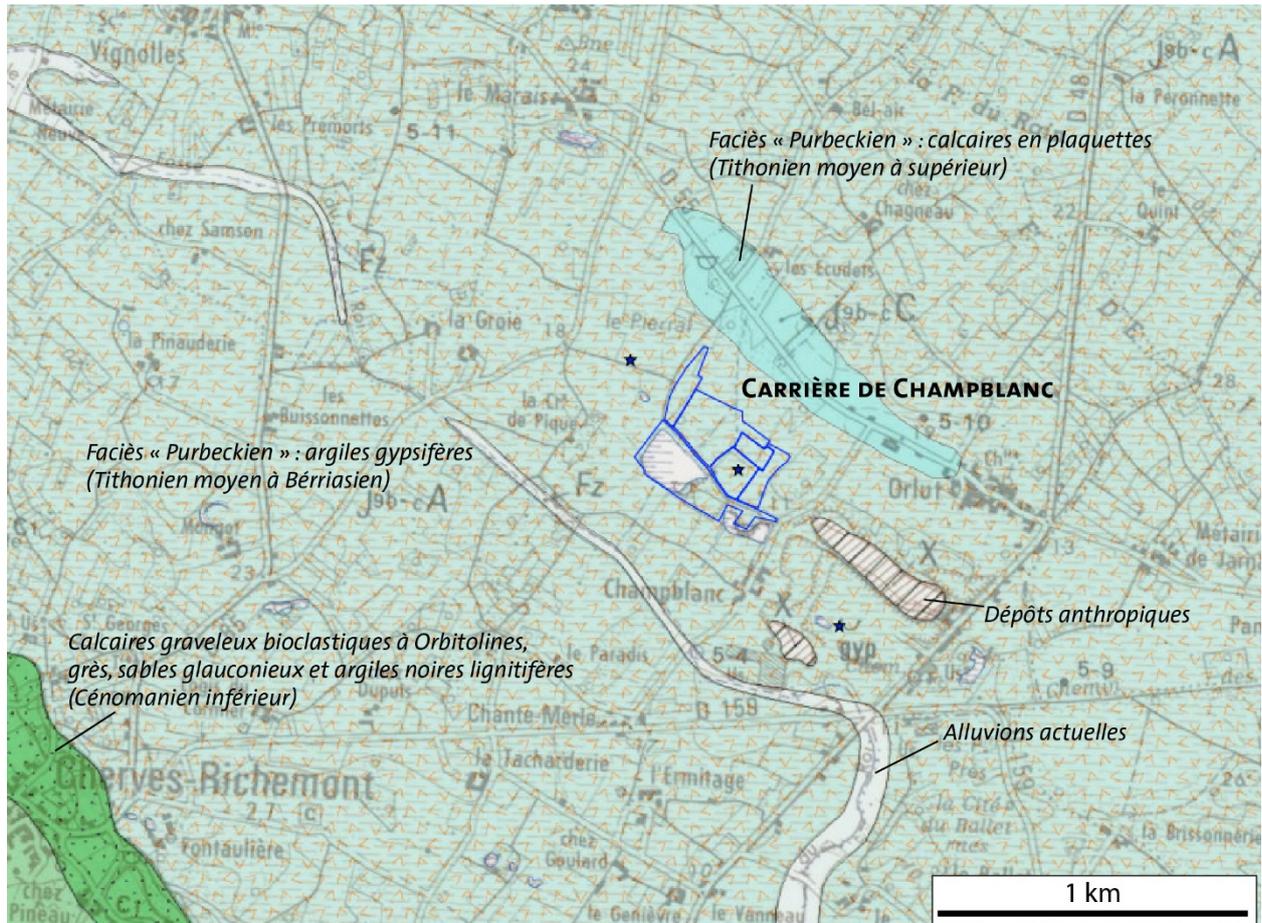
Figure 24 : Carrières à ciel ouvert et souterraines à l'est de la butte Montmartre. Dessin de Louis-Désiré Thiénon (1832).

Formation	Montmorency (m)	Cormeilles-en-Parisis (m)	Clichy/Bois-Coubron (m)	Le Pin (m)	Saint-Soupplets (m)	Sous-étage
Calcaires, sables et argiles sus-jacents	71	38-60	9-11	9,5	?	
Marnes blanches de Pantin	15	6	6	5,4	Présentes	Ludien supérieur : Marnes supragypseuses.
Marnes bleues d'Argenteuil		10	10	12,2	Présentes	
1 ^{ère} masse du gypse	6-12	16	21	16,8	0-12	Ludien moyen : masses et marnes du gypse
Marnes d'entre deux masses	3	5	5	3,2	4-5	
2 ^{ème} masse du gypse	6	5	7	5,4	0-8	
Intercalaire et gypse		2	2	2	2	
Marnes à lucines	2	2,5	3	2	4	Ludien inférieur : marnes infragypseuses. Marinésien
3 ^{ème} masse du gypse	2	2	3	3		
Marnes à pholadomyes	?	1,6	?	2,2		
4 ^{ème} masse du gypse	?	1	?	0,8		

Figure 25 : Épaisseurs des bancs sédimentaires constituant le « Ludien » en fonction des carrières de gypse. Source : revue *Géologues* 174 (2012).

4.4.2. Gisement de gypse de Cherves-Richemont (Charente)

Le gisement de gypse de Cherves-Richemont, situé en Charente, est exploité dans la carrière de Champblanc. Le gypse est âgé du Jurassique supérieur au Crétacé inférieur (Tithonien-Berriasien) soit environ 145 millions d'années (Figure 26). Le gypse s'est déposé dans un environnement lagunaire au cours du retrait de la mer entre la fin du Jurassique et le début du Crétacé. Cette transition est qualifiée par les géologues de faciès « Purbeckien » (de la presqu'île de Purbeck dans le Dorset, en Angleterre). Elle se caractérise en Charente par des argiles gypsifères et carbonatées formées à cette période géologique et que l'on peut suivre selon une direction NO-SE de la région de Cognac à l'île d'Oléron en Charente-Maritime.



La carrière de Champblanc (Figure 27) est située dans une large plaine alluviale, plate et humide, nommée localement *Pays-Bas*, et liée à l'érosion des terrains argilo-marneux qui sont organisés selon une structure monoclinale à pendage faible (1-2°) vers le sud-ouest. Le gisement est limité par des failles décalant les terrains de 20 à 30 mètres. Le front de taille haut d'environ 25 mètres est constitué de haut en bas par (Figure 28) : de la terre végétale, un niveau marneux, un premier niveau de gypse d'environ 3 mètres d'épaisseur, puis une alternance de marnes, de calcaires et de gypse. Les quatre bancs qui sont exploités dans la carrière représente environ 6 mètres d'épaisseur. Il s'agit principalement de gypse saccharoïde avec quelques intercalations de niveaux de gypse fibreux. La carrière de Champblanc est exploitée par le Groupe Garandeau depuis 1869.

Selon un article paru dans Mines & Carrières n°206 en 2013, l'exploitation se passe de la façon suivante :

« La découverte et l'extraction de gypse sont réalisées avec le même échelon. Un bouteur D10, une chargeuse 988 et deux tombereaux 775 travaillent en deux postes. Le tir à l'explosif a été abandonné en 2009. L'abattage est réalisé avec un brise-roches hydraulique de 6 t monté sur un châssis de Liebherr 974 SME. La découverte, l'extraction et le remblaiement sont coordonnés. Le remblai est systématiquement compacté avec un compacteur à pied-de-mouton, la terre végétale est remise en place et les terrains mis en culture de céréales. »

Le gypse une fois extrait subit un prétraitement avec différentes étapes de concassage, de criblage et de broyage. Le gypse est ici exploité pour la fabrication de plaques de plâtre (60%), de ciment (25%) et pour un usage agricole (15%). Une usine Placoplâtre est présente sur le site depuis 1972 avec une capacité de production de 33 Mm² de plaques de plâtre, de doublage ou de cloisons alvéolaires.



Figure 27 : (a) Carrière de gypse de Champblanc près de Cherves-Richemont (Charente) – (Cliché : Groupe Garandea). (b) Gypse fibreux et saccharoïde exploité dans la carrière de Champblanc (Cliché : N. Charles).

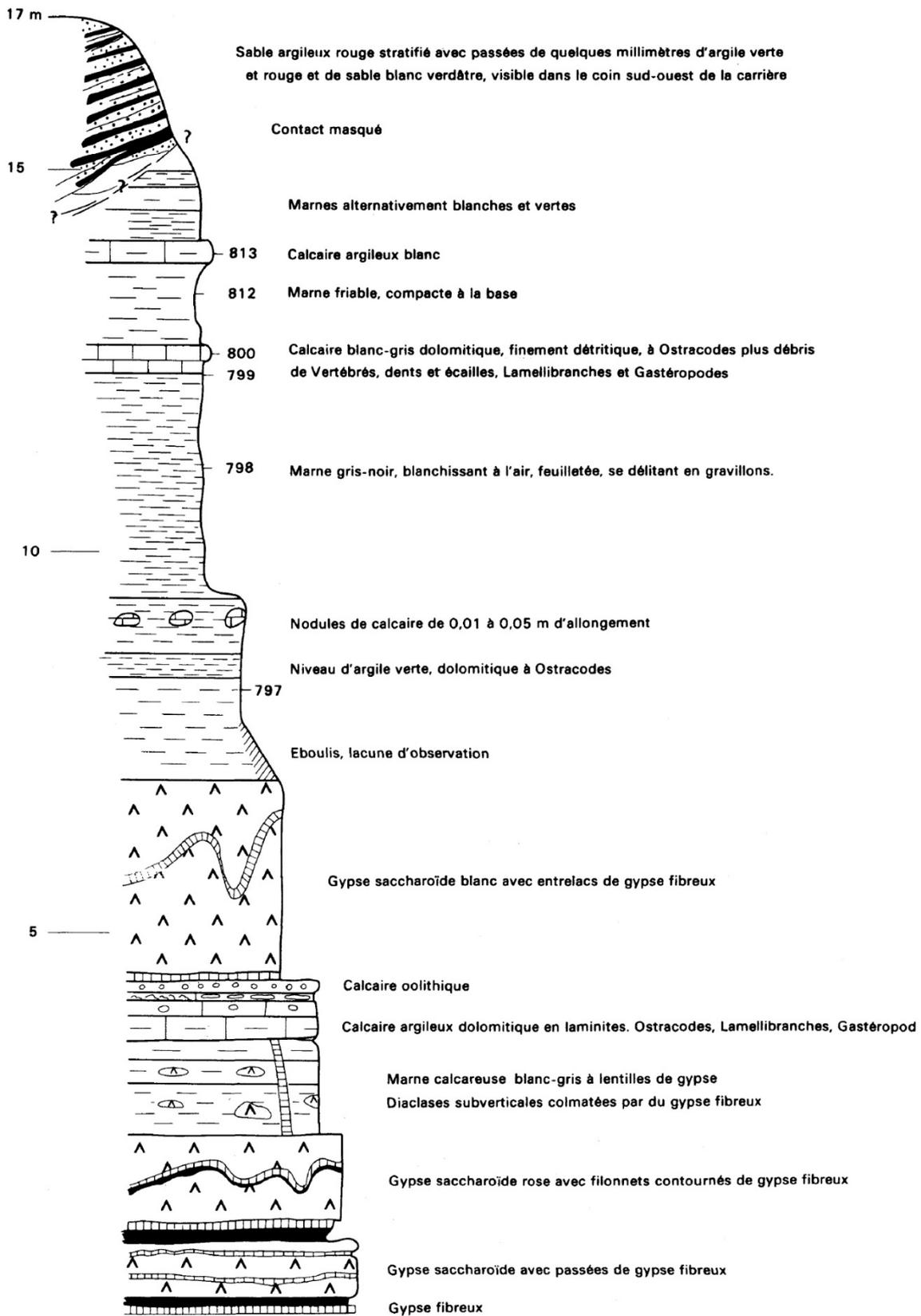


Figure 28 : Log stratigraphique de la carrière de Champblanc. Source : BRGM.

4.4.3. Gisement de gypse et d'anhydrite de Mazan (Vaucluse)

La carrière de Melleton se situe sur la commune de Mazan dans le Vaucluse, où sont exploités des dépôts de gypse datés de la fin de l'Éocène-début de l'Oligocène (Priabonien aux environs de 35 millions d'années (également appelé « Ludien », terme stratigraphique obsolète) et Rupélien (aussi appelé « Sannoisien », terme obsolète) et appartenant au bassin sédimentaire de Mormoiron (Figure 29 et Figure 32). Les dépôts d'évaporites dans ce bassin peuvent atteindre 200 mètres d'épaisseur (Figure 30 et Figure 31). Exploitée à ciel ouvert depuis 1967 par la société SINIAT sur près de 150 hectares, c'est la plus grande carrière de gypse en Europe. Avant 1967, elle était exploitée en souterrain.



Figure 29 : Carrière de gypse et d'anhydrite de Mazan (84). Cliché : JYB Devot.

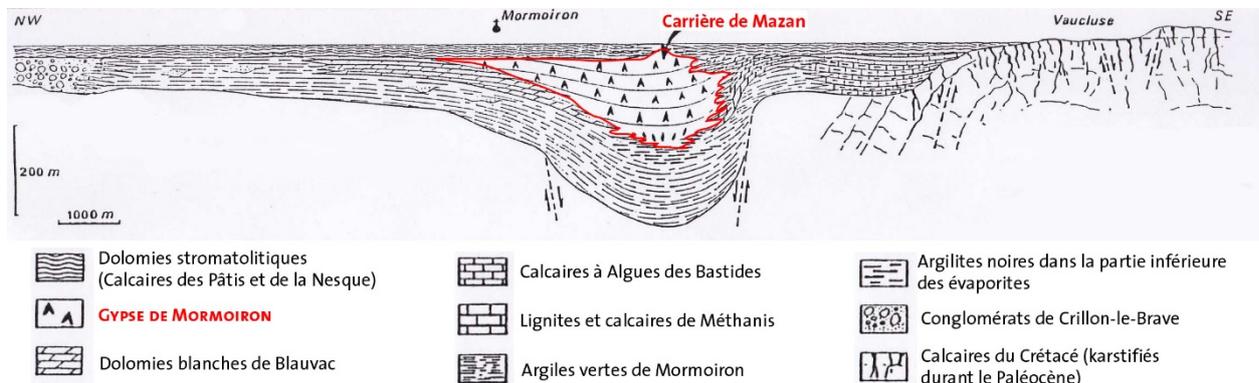


Figure 30 : Coupe géologique du bassin de Mormoiron et localisation de la carrière de Mazan. D'après G. Truc (1978).



Figure 31 : Couches de gypse saccharoïde exploitées dans la carrière de Mazan (84). Cliché : Société géologique de l'Ardèche.

Les dépôts de gypse exploités dans la carrière de Mazan sont intercalés au sein de la formation des « *Marnes et dolomies blanches à sépiolite de Blauvac* ». De Crillon-le-Brave à Blauvac affleure une bande de sédiments chimiques représentés par des bancs massifs de dolomicrite blanche à sépiolite entrecoupés de lits d'argiles vertes à smectite magnésienne dominante. Au sein de la formation à dolomie s'insèrent des masses lenticulaires de gypse. La succession des bancs massifs de gypse recristallisé (0,50 à 2,50 m) et des joints argileux verts à smectite et argiles fibreuses varie entre 30 et 50 m d'épaisseur et peut atteindre 200 m à l'aplomb du bassin (Figure 30), tandis qu'au nord, vers Crillon-le-Brave, et au sud, vers Notre-Dame-des-Anges, le gypse s'amincit progressivement, jusqu'à disparaître complètement au sein de la masse dolomitique.

La découverte fait environ 70 m et s'effectue par étapes successives au cours de l'exploitation. L'abattage est réalisé par gradins de 15 m. Le gypse est ensuite concassé, broyé, criblé et classé à la granulométrie d'entrée dans l'usine de plâtre. Pour un usage en cimenterie, une granulométrie de 30 mm est suffisante. Les déblais sont gérés dans le cadre d'un plan de réaménagement progressif et continu de la carrière.

Les réserves du gisement sont très importantes (plusieurs centaines de millions de tonnes) et les couches contiennent entre 75 et 98% de gypse. Une usine de plaques de plâtre exploitée par SINIAT est située à Carpentras, à environ 10 km de la carrière. La carrière de Mazan produit à elle-seule entre 10 et 15% du gypse extrait chaque année en France.

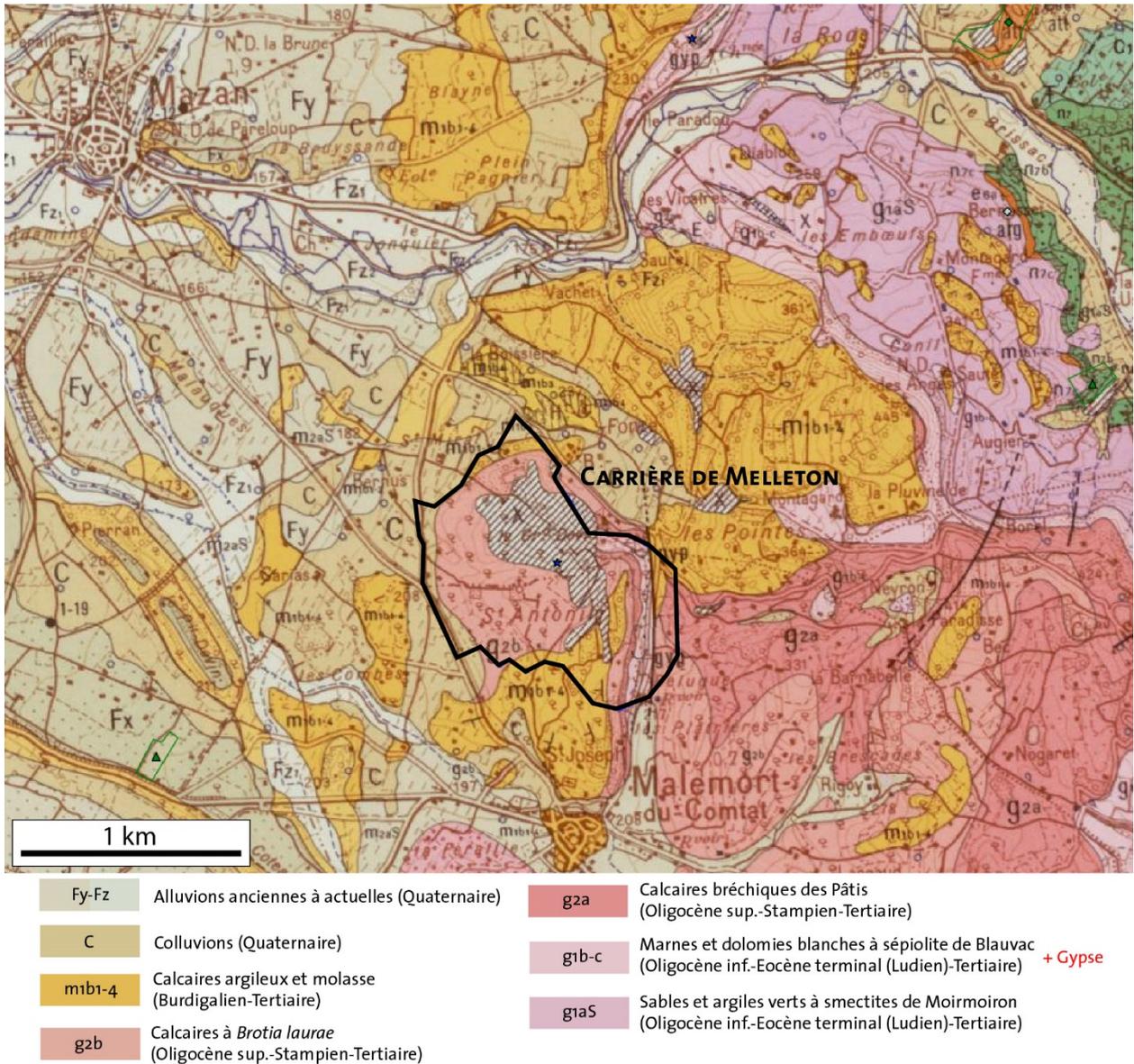


Figure 32 : Carte géologique des environs de la carrière de Mazan. Les dépôts de gypse exploités sont datés de la transition Éocène-Oligocène. Source : BRGM.

4.4.4. Gisements d'anhydrite de Lorraine

Les deux gisements d'anhydrite exploités en souterrain en Lorraine sont les carrières de Faulquemont et de Kœnigsmacker dans le département de la Moselle (Figure 33 et Figure 34).

Dans la carrière souterraine de Faulquemont est exploité le niveau dit des « Couches grises » appartenant au Trias moyen (Muschelkalk, 245-235 millions d'années). Il s'agit d'une alternance monotone d'argiles dolomitiques gris foncé à gris clair, schisteuses, parfois finement micacées, et de plaquettes de dolomies compactes, à pâte fine, parfois oolithiques, de couleurs claires. Ces couches présentent une grande abondance d'anhydrite, tantôt massive, tantôt diffuse et donnant un aspect marbré à la roche. Le gypse secondaire est fréquent.

La carrière souterraine de Kœnigsmacker exploite l'anhydrite présente dans les couches du Trias supérieur (Keuper, 230-220 millions d'années). Selon le site de l'exploitant L'Anhydrite Lorraine (group Knauff), l'exploitation en souterrain se fait ainsi : « L'exploitation souterraine de la carrière s'effectue selon la méthode éprouvée des chambres et des piliers abandonnés. Après l'abattage par foration et tir à l'explosif, les chargeurs-transporteurs véhiculent et déversent la pierre extraite dans l'un des concasseurs primaires. Une succession de convoyeurs à bande l'achemine ensuite jusqu'à une installation de concassage secondaire située en surface. Cette opération permet un triage et un stockage dans les silos selon quatre niveaux de granulométrie : 0/50 mm, 0/4 mm et 4/50 mm et enfin une qualité d'anhydrite micronisée obtenue par un traitement supplémentaire dans la station de micronisation. Le site dispose d'une installation portuaire permanente sur la Moselle où les péniches peuvent charger l'anhydrite pour la livrer dans toute l'Europe ». Le réseau de galeries comptabilise 350 km linéaires à près de 120 m de profondeur.

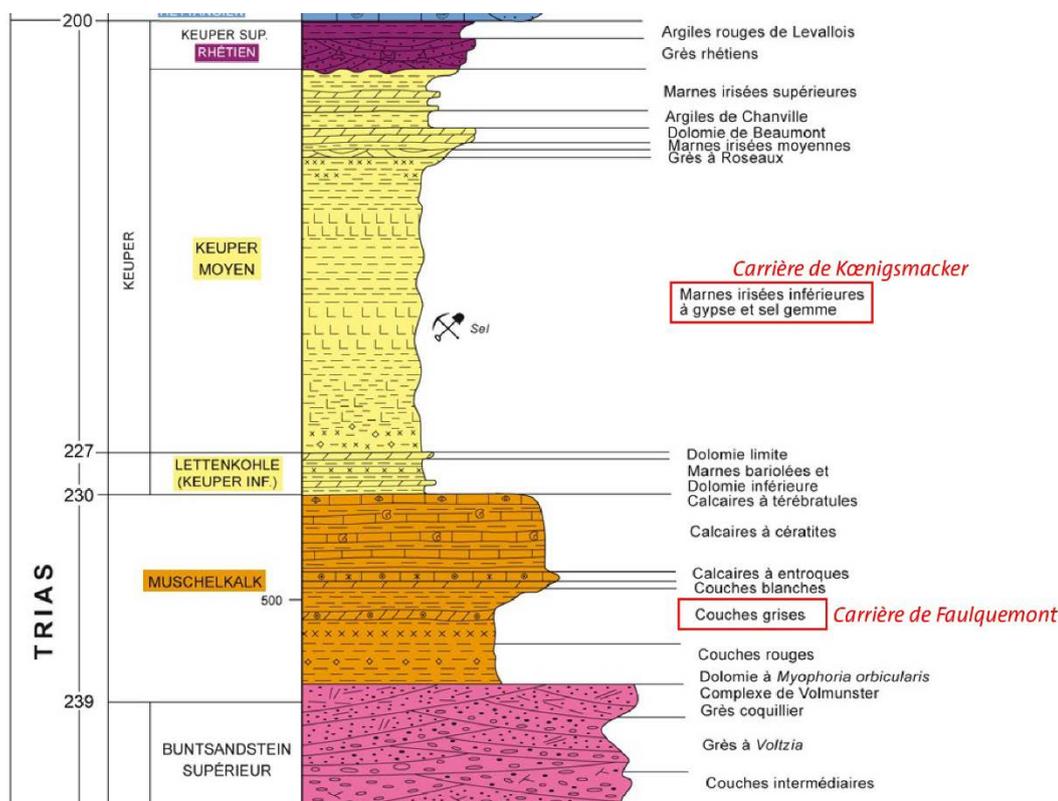


Figure 33 : Log stratigraphique de la Lorraine et localisation des carrières d'anhydrite en exploitation.

Source : <http://www4.ac-nancy-metz.fr/base-geol/index.php>

La couche exploitée à Kœnigsmacker, âgée du Trias supérieur est composée de marnes dolomitiques grises, surmontant des marnes et argiles bariolées avec de l'anhydrite, des argiles avec du sel et des marnes dolomitiques riches en anhydrite.



Figure 34 : Carrière souterraine de Kœnigsmacker (57). Front d'exploitation d'anhydrite dans le Trias supérieur (Keuper) et vue sur les chambres et piliers. Clichés : <https://viamirabelle.tv>.

4.5. GISEMENT DE GYPSE EN ZONE SPECIALE DE CARRIERE

Une zone spéciale de carrière (ZSC) est instituée en application de l'article L.321-1 du Code minier pour faciliter la recherche et l'exploitation de certaines substances de carrières d'intérêt économique national ou régional insuffisamment accessibles (Tableau 5).

N° d'ordre	Désignation	Définition du périmètre	DRIRE et Départements concernés	Superficie	Substances concernées	Durée	Acte institutif
10	Zone de Milly	Clochers de Londinières, Songeons, Milly, Coudray-Saint-Germer, Neuf-Marché, Argueil, Les Grandes Ventes	Haute-Normandie Picardie *** Seine-Maritime Oise	94 280 ha	Argile réfractaire	15 ans + illimitée (1)	D. 22.04.1960 (J.O. 29.04.1960)
11	Zone de Moisson	Communes de Follainville, Dannemont, Freneuse, Guernes, Méricourt, Moisson, Mousseaux-sur-Seine, Saint-Martin-la-Garenne	Ile de France *** Yvelines	3 572 ha	Sables et graviers d'alluvions	15 ans + illimitée (1)	D. 19.07.1962 (J.O. 24.07.1962)
12	Zone de Cormeilles-en-Parisis 1 - création	Communes d'Argenteuil, Cormeilles-en-Parisis, Sannois	Ile de France *** Val d'Oise	129 ha	Gypse et marnes	15 ans + illimitée (1)	D. 14.09.1963 (J.O. 19.09.1963)
	2 - extension	Commune d'Argenteuil, Cormeilles-en-Parisis, Franconville-la-Garenne et Sannois	Val d'Oise	33,4 ha	Gypse et marnes	illimitée	D. 10.12.1990 (J.O. 20.12.1990)
13	Zone de Nemours	Région de Nemours	Ile de France *** Seine-et-Marne	69 km ²	Sables et grès industriels	15 ans + illimitée (1)	D. 10.05.1966 (J.O. 14.05.1966)

Tableau 5 : Zones spéciales de carrières en France (Source : Minéralinfo).

Ainsi, il existe deux zones spéciales de carrières dédiées au gypse, instaurées respectivement en 1963 et 1990. Ces deux zones spéciales de carrières se situent dans le département du Val d'Oise, dans le plus gros bassin de production actuelle de gypse en France. Ces gisements sont donc confirmés et peuvent représenter un potentiel pour de nouvelles extensions si les contraintes environnementales permettent l'exploitation dans ces secteurs.

Ces zones spéciales favorisent l'identification et la préservation de gisements majeurs d'intérêt pour alimenter l'industrie française dépendante d'un approvisionnement régulier et continue en gypse.

Les gisements de qualité et caractérisés par des ressources importantes devront être identifiés comme gisement d'intérêt national dans le cadre de l'élaboration des Schémas Régionaux des Carrières (SRC), notion qui est complémentaire de la zone spéciale de carrière.

4.6. CRITÈRES D'EXPLOITABILITÉ, MODES D'EXTRACTION ET PRINCIPES DE TRAITEMENT

4.6.1. Les critères d'exploitabilité : généralités

a) Critères généraux

Les critères généraux d'exploitabilité d'un gisement de gypse et d'anhydrite dépendent des prix et de la demande, des réserves en place, de l'accessibilité et de divers enjeux environnementaux autour du gisement.

Le gypse et l'anhydrite étant parfois très déformés, la géométrie, l'hétérogénéité de la qualité, la présence et la répartition d'anhydrite ou d'autres évaporites associées au gypse et la présence de stériles (argiles, marnes, ophites, carbonates, lignite, etc.) dans le gisement conditionnent l'exploitabilité du gisement.

b) Critères spécifiques

Les critères spécifiques d'exploitabilité sont liés à la composition chimique du minerai ou à la présence d'impuretés dans le gisement. Le détail des spécificités varie beaucoup suivant le produit final et de ses usages. Le Tableau 6 présente les contraintes de qualité en fonction des applications.

Applications	Matériaux source	Granularité	Pureté minérale	Chimie	Prescription particulière
Plâtre	Gypse	0/8 mm (entrée de procédé)	85%	SO ₃ >40%	Blancheur élevée
Plâtre pour enduits				MgO <2%	
Plâtre pour céramique (moule)			90%	K ₂ O <0,1% Na ₂ O <0,1%	Qualité constante
Adjuvant ciment (retardateur de prise, entre 2 et 6%, jusqu'à 18% en masse pour els ciments spéciaux)	Gypse	8/50 mm (avec moins de 20% <8 mm)	75%	SO ₃ produit final: <5% (ciment laitier) <4% (ciment)	
	Anhydrite		60%		
Chimie	Gypse	1,4/100 µm	90%		Blancheur élevée
Charge minérale (plastique, peinture, carton, pharmacie, insecticide)	Gypse et anhydrite				
Alimentation animale	Gypse		96,75%	As <3 ppm Se <30 ppm F <30 ppm Fe <100 ppm Pb <10 ppm Autres métaux lourds <10 ppm	
Agro-alimentaire (floculant)					
Pharmacie					
Verrerie	Gypse et anhydrite	0/2 mm (avec moins de 3% de particules >2 mm)	Bonne		
Agriculture (amendement, engrais)	Gypse	0/2 mm	50%		
Environnement (absorbant)	Gypse				
Albâtre	Gypse				
Adjuvants pour bitume	Anhydrite				
Aduvants pour boues de forage	Gypse				

Tableau 6 : Synthèse des spécificités de qualité en fonction des applications du gypse et de l'anhydrite.

4.6.2. Modes d'extraction

a) Conditionnement du mode d'extraction

Le gypse est une roche tendre, toutefois l'extraction n'en est pas pour autant simplifiée. Plusieurs paramètres influencent le mode d'extraction :

- La géométrie des couches, parfois peu épaisses ainsi que la géométrie du gisement ou des niveaux stériles intercalés ou constituant la découverte. La sélectivité sur le gisement peut s'avérer importante car les niveaux de gypse et/ou d'anhydrite peuvent alterner avec des niveaux d'argiles, de marnes, de carbonates ou d'autres évaporites à séparer ;
- Les enjeux environnementaux, du fait que les gisements soient souvent associés à de fortes contraintes environnementales liées à la proximité de zones urbaines, comme en région parisienne. Ainsi, afin de limiter les impacts en termes de vibrations, de bruit lié aux tirs à l'explosif ou au transport des camions, ou encore à la compétition en terme d'occupation du sol, des modes d'exploitation spécifiques se sont développés en France.

b) Méthodes d'extraction

Exploitation par excavateur à godets : il s'agit d'un engin lourd d'excavation évacuant les matériaux par wagonnets. L'excavateur à godets n'est utilisable que sur terrains tendres. Ainsi, des interbanks durs épais forment un obstacle à cette méthode d'exploitation. Utilisée historiquement à Cormeilles-en-Parisis, cette méthode pour les gisements français n'est plus utilisée depuis de nombreuses années.

Exploitation à l'explosif avec marinage mécanique : chargeur, pelle électrique, pelle hydraulique ou pelle à câble, presque tous les types de pelles ont été observés pour le marinage. Pour les stériles tendres (ex. marnes), l'usage de l'explosif n'est pas nécessaire. Toutefois, malgré sa faible dureté, des explosifs sont utilisés pour les masses de gypse à raison de 100 g/t de gypse. L'inconvénient pour ce type d'exploitation sont les vibrations liées au tir. L'exploitation à l'explosif est souvent la plus rentable en terme de coût d'exploitation car elle permet de traiter des volumes plus importants et un premier concassage par l'explosion (économisant l'énergie électrique d'un concasseur). Lorsque cette méthode est possible, elle est donc privilégiée. Compte tenu de la proximité d'habitations, notamment en région parisienne, de la faible épaisseur des couches de gypse et d'intercalations stratiformes de stériles, la méthode par explosifs, très classique en carrière à ciel ouvert, n'est pas toujours utilisée au profit des méthodes citées ci-après.

Exploitation au scrapeur : un scrapeur autonome ou poussé par un buteur (= bulldozer), permet de récupérer des couches de plusieurs décimètres de roche tendre. Le scrapeur possède un compartiment permettant de stocker le matériel arraché, de le transporter sur de courtes distances vers une zone de déversement.

Exploitation au buteur ou par ripage : une autre méthode consiste à arracher le gypse au moyen d'un buteur. Une dent de déroctage montée sur buteur ou une pelle hydraulique a été testée par Lafarge Plâtre puis SAMC, dans les années 1980. Il permet l'arrachement d'une couche de plusieurs décimètres sans explosif. L'expérience a montré qu'il est plus rentable d'utiliser un engin surdimensionné d'une grande capacité d'arrachement (type Caterpillar D11 de 110 t).

Exploitation au mineur continue de type raboteuse : il s'agit de raboteuses de chaussée utilisées et adaptées en carrière. L'engin travaille sur un plan horizontal, sur toute la largeur de l'engin en même temps. Il permet l'enlèvement d'une fine couche de terrain.

Exploitation au mineur continu à attaque ponctuelle : ce système présente une fraise à picots montée sur un bras articulé de pelle hydraulique ou d'un engin spécifique. L'engin travaille sur un plan vertical, le bras articulé permet de monter et descendre et d'évoluer latéralement sur la surface d'attaque de la fraise qui reste limitée au diamètre de l'outil. Cette méthode d'exploitation permet de travailler en souterrain et aussi de réaliser une extraction sélective à l'échelle du front de taille (pour éviter une poche d'argile ou une couche riche en oxydes par exemple).

c) Modes d'extraction

Exploitation en carrière à ciel ouvert : mode le plus répandu de manière générale (Figure 35), il présente plusieurs avantages :

- Un coût d'exploitation plus faible qu'en souterrain ;
- Un taux de récupération beaucoup plus élevé qu'en souterrain ;
- L'utilisation de toutes les méthodes d'extraction.

Toutefois, certains inconvénients peuvent amener à considérer une autre mode d'exploitation :

- Le taux de découverte pour les exploitations à ciel ouvert est un facteur limitant, même si un ratio important de 1 pour 4 voire 1 pour 5 est observé pour le gypse ;
- Ce mode expose les riverains à des nuisances ;
- L'usage du terrain est perdu au profit de la carrière ;
- Les conditions météorologiques conditionnent l'exploitation.



Figure 35 : Carrière à ciel ouvert de Cormeilles-en-Parisis (Cliché : BRGM).

Exploitation en carrière souterraine : ce mode d'exploitation est courant pour l'exploitation du gypse en France, il permet :

- L'exploitation de gisements avec un fort recouvrement de stériles ;
- De limiter les nuisances environnementales (notamment en région parisienne) ;
- De conserver l'usage des terrains en surface ;
- D'extraire sans contrainte météorologique.

Il n'est utilisé qu'en dernier recours, si une exploitation à ciel ouvert n'est pas ou n'est plus possible. Pour être exploitable en souterrain, une couche doit présenter une bonne régularité d'épaisseur pour les gisements stratiformes ou présenter une forte épaisseur pour les gisements déformés.

En France, seule la méthode d'exploitation principale en chambres et piliers est observée. La taille des galeries est très variable en fonction de la morphologie du gisement. Les hauteurs peuvent varier de 4 à 12 m suivant les exploitations. En région parisienne, les galeries font une largeur de 8 m pour une hauteur de 12 m, les piliers font 10 m de côté. L'exploitation se situe à une profondeur de 30 à 80 m sous la surface naturelle. L'extraction est réalisée en deux phases (Figure 36) :

- **Le traçage** : les galeries de largeur nominale sont creusées mais plus basse (7 m), à cette étape la forme de la galerie en ogive est réalisée, ainsi que le soutènement ;
- **Le levage** : la galerie est approfondie de 5 m, en gradin, pour atteindre 12 m de hauteur.

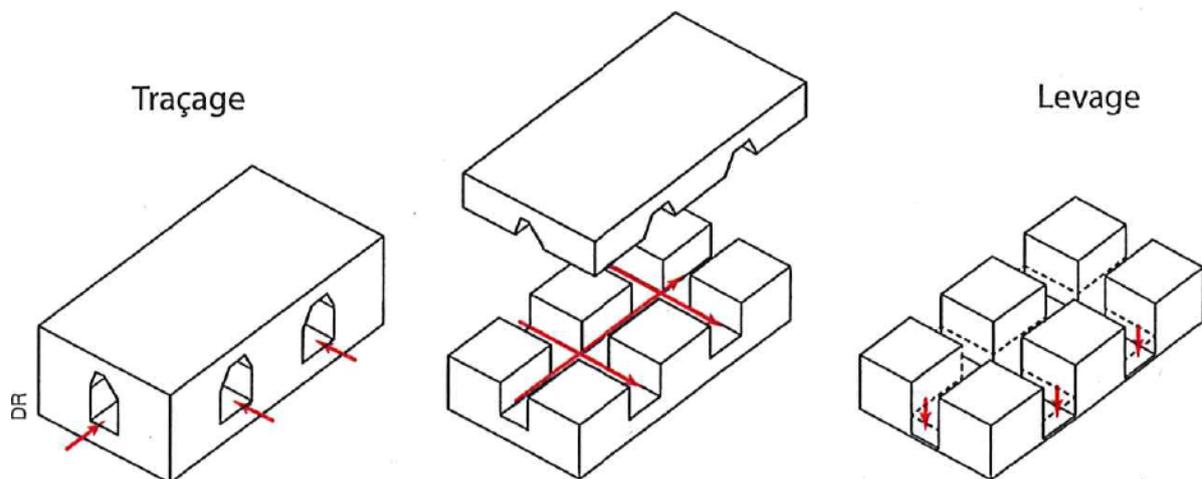


Figure 36 : Phasage de l'exploitation souterraine de gypse de Corneilles-en-Parisis (Source : Mines & Carrières n°229, octobre 2015).

La carrière souterraine est remblayée par tranche, soit avec des stériles, des déchets d'exploitation ou déchets inertes.

Une variante permet de foudroyer en fin d'exploitation les piliers permettant ainsi d'augmenter le taux de récupération à 60-65%. Cette opération peut nécessiter une maîtrise foncière des terrains en surface, car lorsque la carrière se situe à faible profondeur, les terrains en surface peuvent se tasser et/ou s'effondrer.

Les contraintes de ce mode d'exploitation sont :

- Un surcoût d'exploitation (4 à 5 fois supérieur) :
 - Volume plus faible extrait par poste ;
 - Système de minage différent nécessitant plus d'explosifs par tonne de gypse (minage horizontal, profondeur plus faible et avec une densité de trous plus forte qu'en surface, réalisation d'un bouchon de tir, chargement à l'aide d'une nacelle) ;
 - Plus d'opérations notamment en terme de sécurité (purge, boulonnage ou soutènement, aérage) ;
 - Souvent plus de temps de transport pour acheminer le minerai à l'usine de traitement.
- Un taux de récupération faible (30-40% du gisement est exploitée en région parisienne) ;
- Des méthodes d'extraction limitées à l'exploitation par explosif, avec un mineur et une attaque ponctuelle.

4.6.3. Traitement

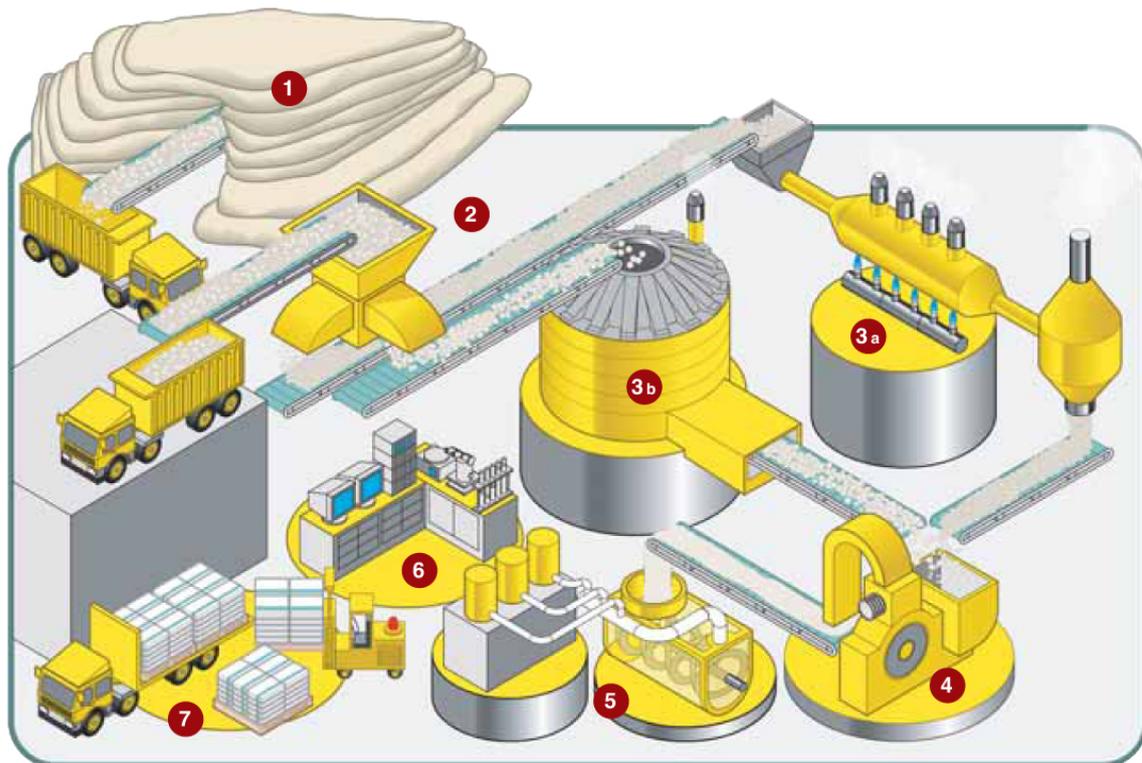


Figure 37 : Schéma de traitement du gypse de l'usine de Mériel (ancien site Lafarge, appartient à Siniat). (1) Extraction et prétraitement, (2) Calibrage, (3a) et (3b) Cuisson, (4) Broyage, (5) Mélange d'adjuvants, (6) Contrôle qualité, (7) Conditionnement et expédition. Source : Lafarge https://www.lafarge.dz/4_3_1-ManufacturingProcess.

a) Transport et prétraitement

Le transport s'opère par dumpers, camions ou bandes transporteuses, jusqu'à l'installation de prétraitement. La granulométrie d'entrée en prétraitement dépend du mode d'extraction. À l'explosif, elle est de 0 à 800 mm.

Le prétraitement, souvent opéré en carrière, consiste en un concassage pour obtenir un matériau d'entrée d'usine avec un diamètre moyen de l'ordre de 25 à 40 mm (variable selon les usines et les procédés).

Le matériau est entreposé sur une aire d'homogénéisation, dans un hangar abrité.

b) Calibrage au moyen d'un crible

Le matériau est criblé (Figure 37), puis si besoin, séché en utilisant les retours de gaz chauds des fours. Suivant le procédé, le matériau peut subir un concassage secondaire préalable.

c) Cuisson

Le criblage permet de calibrer la granulométrie du matériau et peut conduire à des procédés de cuisson différents pour des chaînes de produits distincts (Figure 37). Ainsi :

- Pour un plâtre β (plâtre standard), un matériau d'entrée fin est utilisé. La poudre est cuite par voie sèche dans un four rotatif ou statique, horizontal ou vertical, à une température de 120 à 450°C et un débit de l'ordre de 5 t/h. La cuisson se fait de manière indirecte par une virole soumise à une flamme au fioul ;
- Pour un plâtre α , un matériau d'entrée grossier est utilisé. La cuisson s'opère par voie humide dans un four autoclave sous une pression de vapeur d'eau de 10 bars et une température de 100°C. Le plâtre α est un plâtre spécial, microcristallin, pour moulage, demandant moins d'eau au gâchage et présentant un meilleur comportement mécanique (résistance mécanique à la compression jusqu'à 30 MPa).

La température de cuisson est variable suivant le produit recherché, le comportement à la cuisson du gypse est fonction de la température :

- À partir de 60°C, du plâtre semi-hydrate apparaît (il perd 1,5 molécule d'eau) ;
- Entre 120 et 160°C, on obtient un plâtre semi-hydrate α ou β suivant le procédé de cuisson. Pour rappel le semi-hydrate β est le constituant principal du plâtre courant, le semi-hydrate α est le constituant principal des plâtres spéciaux ;
- Vers 200°C, l'anhydrite III est obtenue : anhydrite soluble instable qui se réhydrate rapidement en héli-hydrate β ;
- Entre 220 et 450°C, l'anhydrite II est obtenue : anhydrite stable (ou anhydrite surcuite) qui se réhydrate lentement au contact de l'eau. Elle entre dans la composition du plâtre sous forme d'adjuvants ;
- Au-delà de 450°C, l'anhydrite I est obtenue, qui se réhydrate très difficilement.

d) Broyage et micronisation

Le broyage ou micronisation (Figure 37) s'effectue par voie sèche, pouvant nécessiter un séchage en entrée de broyeur.

Le broyage permet une réduction à 200 μm , la taille standard pour le plâtre. Pour certaines applications (ex. charges minérales), le broyage se poursuit pour une granulométrie plus fine (125, 20, 10, 5 ou parfois 1 μm). Pour les broyages très fins, des technologies spécifiques sont nécessaires pour compenser les forces électrostatiques, le broyage s'opère par voie humide.

e) Formulation et stockage

Différents types de produits (plâtre α , plâtre β , anhydrite III, anhydrite II) sont mélangés (Figure 37), ainsi que d'autres adjuvants comme des retardateurs, des colorants, de l'amidon, etc.

Les différents produits finis sont stockés en silo.

f) Conditionnement, expédition ou production de produits élaborés

Le plâtre est conditionné en vrac, en *big-bag*, ou en sac (Figure 37). Dans de nombreuses usines, des unités de production complémentaires sont ajoutées en bout de chaîne comme par exemple une unité de fabrication de carreaux de plâtre, de plaques de plâtre (Figure 38), etc.



Figure 38 : Fabrication de plaques de plâtre dans l'usine de Carpentras (ancien site Lafarge, propriété du groupe Siniat). Cliché : BRGM, 2003.

5. Filières industrielles du gypse et de l'anhydrite

Le gypse et l'anhydrite sont extraits et consommés depuis plus de deux millénaires pour leurs caractéristiques utiles dans le bâtiment, l'art et l'agriculture. Aujourd'hui, leur principal secteur d'utilisation est de loin celui du bâtiment et des travaux publics, soit sous la forme de plâtre ou en tant que retardateur de prise dans le ciment. La fabrication de plâtre domine le marché français avec environ 80% du tonnage global, pour seulement 50% à travers le monde ou aux États-Unis (d'après USGS). Toujours en France, le second marché est dans l'industrie du ciment avec 15% de la consommation. Enfin, selon le degré de pureté, ces substances sont aussi utilisées dans l'agriculture, en chimie, ou pour les charges minérales, ce qui représente 5% des usages.

Application industrielle		Usages et propriétés	
Gypse brut	Agriculture	Source de calcium	
		Source de soufre	
		Neutraliser le pH des sols	
		Forte solubilité (150 fois plus qu'un calcaire)	
	Ciment	Elément tampon dans les sols acides	
		Prévient la formation de croûte latéritique	
		Source de SO ₃ (5% de la masse totale pour un ciment Portland)	
		Retarde la prise	
	Chimie	Augmente la résistance	
		Production de sulfure de calcium et de soufre	
		Production d'acide sulfurique	
	Charges minérales	Production de sulfate d'ammonium	
		Plastique	
		Peintures, colles, pâtes à modeler	
		Tissus, papiers	
		Verre, cristal	
Insecticides			
Pharmacie			
Terra Alba (pureté >97%)		Brasserie	
	Boulangerie		
	Confiserie		
Plâtre	Semi-hydrate (Cuisson 120-160°C)	Constituant principal de tous les plâtres	
	Anhydrite III (Cuisson 200°C)	Constituant du plâtre	
	Anhydrite II (Cuisson 220-450°C)	Constituant de nombreux plâtres, comme ceux pour enduits	
	Anhydrite I (Cuisson >450°C)	Constituant du plâtre	

Tableau 7 : Avantages comparatifs du gypse et de l'anhydrite dans leurs principales filières d'usage.

5.1. DOMAINES D'UTILISATION DANS L'INDUSTRIE

5.1.1. Fabrication du plâtre

Le plâtre est un matériau très répandu et utilisé dans la construction, l'art ou la décoration, mais aussi de plus en plus dans les travaux de rénovation. En effet, dans le contexte de la transition énergétique et d'économie d'énergie, ses qualités d'isolant thermique couplées à la simplicité d'installation en font un choix privilégié, d'autant plus que celui-ci est ignifuge et un bon isolant phonique.

Le plâtre est un mélange en proportions variables de semi-hydrates, d'anhydrite soluble et d'anhydrite insoluble. Après broyage, ce mélange additionné d'eau fait prise pour redonner un produit ayant la composition du gypse et dont la cristallisation en aiguilles enchevêtrées permet d'obtenir des propriétés particulières sur le plan de la résistance mécanique, de l'acoustique ou de l'isolation thermique.

Les fabricants peuvent créer différents types de produits en fonction du mode de cuisson, du broyage en y ajoutant des additifs variés modifiant le temps de prise, la viscosité. Ainsi, une grande variété d'usages est possible. Le plâtre peut être mélangé en tant que suspension liquide pour la coulée ou la pulvérisation, travaillé à l'état plastique pour une chape ou un gabarit, pressé entre les matrices sous forme de poudre semi-humide, ou enfin sculpté ou usiné sous forme de solide.

Les différents types de plâtre existant sur le marché :

- Enduits traditionnels pour le bâtiment, certains de haute dureté ;
- Enduits allégés spéciaux (par ajout de perlite expansée) ;
- Plâtres de surfacage, de ragréage de sol, obtenus à haute température, plâtre à briqueter ;
- Plâtres d'éléments préfabriqués, panneaux, carreaux de cloisons et de plafond, d'isolation ou de décoration, carreaux porteurs ;
- Liants de montage ou de finition ;
- Plâtre à mouler pour staff ;
- Plâtre à mouler pour les arts ou pour l'industrie (porcelaine, plastique, sanitaires) ;
- Plâtres médicaux pour chirurgie ou dentisterie (il existe des gammes de formulation de plâtres dentaires conformes à la norme ISO 6873).

La réalisation de plâtre est issue d'un enchaînement de processus d'apparence simple mais rendus complexes par la présence d'impuretés dans la matière première (gypse ou anhydrite). Ces impuretés peuvent impacter le produit issu de leur cuisson. Les produits de cuisson sont ensuite broyés et mélangés, avec différentes proportions selon le type de plâtre voulu, puis le mélange est réhydraté simplement avec de l'eau (§4.5.3)

Le plâtre est un produit de déshydratation du gypse

La fabrication du plâtre repose sur un principe relativement simple : l'élimination totale ou partielle de l'eau de constitution du gypse. Cependant, dans la pratique, cette opération a des implications complexes mettant en jeu des phénomènes de cristallisation difficiles à maîtriser. Soumis à la chaleur, le gypse conduit à une série de produits partiellement hydratés ou anhydres. Le comportement à la cuisson du gypse est en effet fonction de la température, comme décrit en §4.6.3

Ainsi, différentes cuissons à différentes températures sont utilisées selon le type de produit recherché. Cette cuisson permet de créer des produits anhydres ou partiellement hydratés, qui seront la base des plâtres.

Le Tableau 8 résume les caractéristiques des différentes phases de déshydratation du gypse. Les différents produits de la déshydratation du gypse ayant une application industrielle dans la fabrication des plâtres sont : le semi-hydrate α , le semi-hydrate β et l'anhydrite II (anhydrite insoluble ou surcuite). En outre, l'anhydrite III (ou soluble) peut être présente en quantités variables.

Le semi-hydrate α est compact et cristallin. Sa solubilité dans l'eau est inférieure à celle du composé β . Il donne avec l'eau des mélanges fluides. Le semi-hydrate β est floconneux et présente des fissures écailleuses. Sa solubilité dans l'eau est supérieure à celle du composé α . Il donne avec l'eau des mélanges plus épais. Il demande donc une plus forte quantité d'eau de gâchage et il a un temps de prise plus long.

Phase	CaSO ₄ . 2 H ₂ O	CaSO ₄ . 1/2 H ₂ O		CaSO ₄		
		Forme α	Forme β	Forme III	Forme II	Forme I
Appellation	Gypse	Semi-hydrate α	Semi-hydrate β	Anhydrite III ou anhydrite soluble	Anhydrite II ou anhydrite insoluble	Anhydrite I
Système cristallin	monoclinique	rhomboédrique		hexagonal	orthorhombique	cubique à faces centrées
Teneur en eau (% en masse)	20,92	6,20	6,20	0	0	0
Masse volumique (kg/m ³)	2,31 . 10 ³	2,76 . 10 ³	2,63 . 10 ³	2,58 . 10 ³	2,93 . 10 ³ à 2,97 . 10 ³	2,93 . 10 ³ à 3,0 . 10 ³
Masse molaire (g/mol)	172,20	145,15	145,15	136,10	136,10	136,10
Volume molaire (cm ³ /mol)	74,50	52,40	55,20	52,80	45,8 à 46,4	

Tableau 8 : Différentes phases du système CaSO₄•H₂O et leurs caractéristiques physico-chimiques.

La naissance de la plaque de plâtre (source Placoplâtre)

Désormais la principale filière d'utilisation (en volume) du plâtre à l'échelle industrielle, la plaque de plâtre a été inventée, ou plutôt mise au point, en 1890 à New-York (États-Unis). Les maisons sont majoritairement en bois avec une étanchéité à l'air assurée par un carton bitumé, qui comme le bois, brûle facilement. Pour assurer leur aménagement et leur protection contre l'incendie, Augustin Sackett, ingénieur dans une compagnie pétrolière, développe une première solution : une armature en bois recouverte de plaques constituées de bandes de papier collés entre elles par des couches de goudron. Mais cet assemblage ne résiste pas au feu et, en 1890, lui vient l'idée de couler du « plâtre de Paris », importé de France et réputé ininflammable, entre deux feuilles de cartons bulles. L'inventeur de la plaque de plâtre cartonnée recevra, le 22 mai 1894, le brevet délivré sous le n°520-123.

La plaque de plâtre (« *plasterboard* » en anglais) est alors fabriquée selon un procédé original : le carton se déroule d'une bobine, vient tremper dans un bac de plâtre et fait ensuite sa prise sur

une grande roue. Le succès est immédiat et dès 1904, Augustin Sackett ouvre quatre usines. US Gypsum, un grand industriel du plâtre va ensuite développer le produit. En assurant la protection incendie des baraquements construits par l'armée américaine, la Première Guerre mondiale le consacre définitivement. La société anglaise British Plasterboard (BPB) achète le brevet en 1917, suivi par Placoplâtre en 1946.

Les plaques de plâtre aujourd'hui :

Aujourd'hui, le processus de fabrication de panneaux de gypse commence par la calcination du gypse pour former le plâtre ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), qui est mélangé avec de l'eau et des additifs et mis en suspension sur une feuille de papier en mouvement qui passe ensuite à travers un rouleau et est recouvert par du papier de part et d'autre du gypse formant ainsi un sandwich. En se durcissant, la suspension forme un réseau de cristaux de gypse en forme d'aiguilles qui donne à l'ensemble son intégrité physique. Le panneau est coupé et séché pour éliminer l'excès d'eau. Les additifs incluent des agrégats légers comme la perlite et/ou le renfort en fibre de verre/polymère. Par exemple, les panneaux de fibre de gypse peuvent comprendre plus de 60% de gypse, 20% de papier recyclé (cellulose), 10% ou plus de perlite expansée et 5% de polymère acrylique d'acétate de vinyle (panneau de gypse résistant aux chocs).

Les gammes de plaques de plâtre se sont largement étoffées depuis une trentaine d'années. Les industriels du plâtre ont développé différents types de produits :

- Dalle de plafond acoustique ;
- Plaque hydrofuge spéciale salle d'eau ;
- Plaque à bord aminci pour faciliter les finitions ;
- Plaque de plâtre épaisse (2,5 cm : BA25) ;
- Dalle de plaque de plâtre pare-feu ;
- Panneau résistant au choc ;
- Solution de plâtre allégé ;
- Solution de plâtre projeté pour la protection incendie ;
- L'amincissement des plaques de plâtre pour réduire la quantité de matière pour les mêmes caractéristiques ;
- Panneau pouvant faire office de haut-parleur. Placoplâtre lance Activ'Tone, premier haut-parleur invisible, utilisant la plaque de plâtre comme diffuseur de son sans l'encombrement des fils et des enceintes ;
- Panneau de doublage pour une protection anti-effraction renforcée ;
- Profilés de grandes dimensions permettant de réaliser des ouvrages de grandes tailles autoportant (ex : salles de cinéma).

Plâtre en solution

Le plâtre en solution peut également être utilisé entre les panneaux muraux pour remplir les joints. Il s'agit alors de produits mélangés secs à base de semi-hydrate de gypse, de charges minérales et d'additifs de prise. Les principaux additifs sont des éthers de cellulose pour assurer la rétention d'eau et des éthers d'amidon utilisés comme épaississants et retardateurs de prise.

Lorsque de l'eau est ajoutée au plâtre, il se réhydrate en commençant par les cristaux de dihydrate, solution saturée nucléant autour des particules de plâtre, suivi par la croissance des particules en forme d'aiguilles (recristallisation). C'est une structure physique, contrairement au ciment qui n'est qu'un produit chimique. Certains modificateurs peuvent être ajoutés au plâtre

pour accélérer ou retarder le processus de solidification. Une fois cette structure solide formée, le matériau peut être étalé, coulé ou moulé avant le séchage.

5.1.2. Industries cimentières

Le principal constituant entrant dans la fabrication des ciments est le clinker, obtenu par cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile broyé finement, dans des fours industriels à des températures élevées (1 450°C). Au clinker sont ajoutés des sulfates de calcium qui ont une action retardatrice sur la prise du ciment et qui augmentent sa résistance. La teneur minimale dans le clinker est de 2%. L'hydratation du ciment peut être définie comme un double processus : dissolution du ciment anhydre et précipitation des hydrates. En l'absence de gypse, la dissolution des aluminates de calcium est immédiate et il en va de même de la précipitation des aluminates de calcium hydratés. Ceux-ci, enrobant les grains de silicate de calcium, empêchent alors leur dissolution. C'est le phénomène dit de la prise flash. Pour l'éviter, on ajoute du gypse qui joue le rôle de régulateur de prise, retardant la formation d'aluminate de calcium hydraté en donnant d'abord du trisulfoaluminate de calcium hydraté (étringite) selon la réaction suivante :



L'étringite, dite primaire, ne provoque pas de gonflement car elle cristallise avant le durcissement du béton, dans les espaces libres du matériau. Ces cristaux d'étringite ont même un caractère bénéfique, puisqu'ils contribuent à la cohésion de la pâte de ciment : leur formation diminue sa porosité et contribue à l'augmentation de sa résistance mécanique.

Le ciment Portland actuel est donc constitué de clinker finement broyé, contenant entre 3 et 6% de gypse permettant de réguler la prise.

L'anhydrite peut également être employée comme le gypse pour réguler la prise des ciments, mais la quantité de sulfate de calcium doit être plus importante. L'anhydrite a cependant un avantage pour éviter les phénomènes de « fausse prise » de ciment, qui se produisent lorsque les broyages à chaud peuvent provoquer la transformation du gypse en semi-hydrate.

Certains ciments destinés à des ouvrages spéciaux, comme les ouvrages sous-marins ou les tunnels en grain gypseux, peuvent nécessiter jusqu'à 15 à 18% de sulfates de calcium. Ces ciments sur-sulfatés contiennent en moyenne 80% de laitier broyé, 5% de ciment Portland et 15% de sulfates de calcium. Ce mélange permet des réactions chimiques favorisant le durcissement en extérieur.

5.1.3. Industries chimiques

Les sulfates de calcium naturels et artificiels sont utilisés comme matière première pour la fabrication de nombreux produits chimiques à applications industrielles.

Sulfure de calcium et de soufre

Le sulfure de calcium CaS est obtenu par réduction des sulfates de calcium à haute température. L'attaque de CaS à l'acide chlorhydrique forme de l'hydrogène sulfuré H₂S, qui peut ensuite être transformé en soufre par oxydation à l'air ou par grillage.

Ce procédé permet de fabriquer des lubrifiants, des engrais, des agents de préservation alimentaire, des traitements pour le papier Kraft, des traitements pour le caoutchouc (vulcanisation), des préparations du sulfure d'hydrogène pur et des insecticides.

Acide sulfurique

L'anhydrite peut être employée pour obtenir de l'acide sulfurique H_2SO_4 . C'est le couplage de ce procédé à d'autres réactions chimiques pour l'obtention de produits spécifiques qui le rend rentable.

Sulfate d'ammonium

Le sulfate d'ammonium est habituellement préparé par neutralisation directe de l'ammoniac par l'acide sulfurique. Le gypse ou l'anhydrite peuvent servir de produits de substitution quand les matières sulfurées ne sont pas disponibles, selon la réaction :



5.1.4. Liants et produits à base d'anhydrite

Les produits à base de liants d'anhydrite sont d'une grande dureté pour l'emploi en mortier et ils résistent bien à la pression lithostatique. Un mélange d'anhydrite naturelle finement broyée additionné à 1% d'activateur a la propriété de faire prise à l'eau et de durcir lentement. Les activateurs les plus fréquents sont les sulfates de zinc, de potassium, de radium et de fer. Le procédé de synthèse d'un liant hydraulique à base de gypse consiste à chauffer le sulfate de calcium pour obtenir une grande proportion d'anhydrite III ou α puis à effectuer une trempe thermique pour refroidir brutalement la matière ainsi déshydratée. Ce procédé trouve une application préférentielle dans l'industrie du bâtiment dans l'obtention d'un liant hydraulique faisant office de ciment.

Chape anhydrite

Dans le domaine des chapes et des dalles, la dalle en béton et les chapes traditionnelles réalisées à base de mortier sont largement répandues dans le monde de la construction, mais un autre type de chape est disponible : la chape fluide, ou chape liquide. Celle-ci se compose d'eau, de sable, d'un adjuvant et de liant. Avec la chape fluide de ciment, la chape anhydrite est l'un des deux principaux types de chapes fluides. Le liant d'anhydrite est particulièrement efficace pour réaliser des chapes sur de grandes surfaces, sans avoir à réaliser de joints. La chape anhydrite est par exemple régulièrement préconisée par les constructeurs pour la mise en place d'un chauffage au sol. La chape anhydrite peut également servir d'isolant phonique et thermique. L'un des inconvénients de ce type de chape en revanche est le temps de séchage accru par rapport à la chape traditionnelle en béton.

Fluxants anhydres

Dans le domaine des bitumes de route, les produits fluxants ont pour fonction de ramollir le bitume pendant son stockage et sa mise en œuvre, puis par évaporation d'assurer une remontée en consistance du produit final. À l'heure actuelle, la majorité des fluxants utilisés sont issus de la chimie de la houille (origine carbochimique) ou de la distillation du pétrole (origine pétrochimique). Ils comportent de grandes quantités de composés organiques volatils qui s'évaporent dans l'atmosphère et génèrent de nombreux impacts environnementaux négatifs et des propriétés d'usage dangereuses et inconfortables (vapeurs désagréables et danger d'inflammabilité). Ainsi, une solution de fluxants anhydres est une solution alternative qui permet de réduire l'impact environnemental et plus sécuritaire. Le rôle des fluxants dans les enrobés stockables obtenus aussi bien à partir d'une émulsion que d'un liant anhydre, est principalement de garantir la maniabilité de ces produits pendant plusieurs mois. Ces enrobés sont utilisés pour des petites

réparations ou des interventions le plus souvent ponctuelles, qui n'exigent pas des niveaux de performances très élevés.

5.1.5. Charge minérale et fillers

Le caractère neutre et inerte du gypse, sa faible abrasivité, sa facilité à être finement broyé, ainsi que sa blancheur élevée, en font un bon produit de charges dans les secteurs suivants :

- Plastiques ;
- Peintures ;
- Coulis et mastic pour carreau ;
- Colles, adhésif ;
- Argiles à modeler ;
- Enduit de bois ;
- Papier, tissus ;
- Verrerie ;
- Insecticides en poudre ;
- Pharmacie.

En raison de son inertie et de son absence d'abrasivité, certains types de gypse broyés ou micronisés à une granulométrie moyenne de 1,4-12,0 μm sont suffisamment purs pour avoir une brillance de 97%, un indice de réfraction de 1,52-1,58 et une absorption d'huile de 26 $\text{cm}^3/100 \text{ g}$. Ils peuvent être utilisés en tant que tel comme charge ou diluant.

Les types de charges sont donc nombreuses en particulier avec des applications thermoplastiques, thermodurcissables et de revêtements. Le gypse utilisé comme charge améliore la résistance au feu, la résistance et la translucidité en même temps que la réduction des coûts de formulation.

L'anhydrite broyée peut également s'employer en charge, dans les peintures et les papiers, les cartons bitumés et les bitumes routiers.

5.1.6. Agriculture engrais

Le gypse, en raison de sa composition chimique de sulfate hydraté de calcium naturel ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), contient 22% de calcium et 18% de soufre, en moyenne. Ce sont deux éléments nutritifs essentiels aux plantes, que l'on qualifie de secondaires par rapport aux éléments majeurs, l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K). Ils sont tout aussi essentiels que ces derniers, mais s'y retrouvent en moins grandes quantités.

Le gypse est ainsi utilisé dans certains engrais comme source de calcium et de soufre, il contient une teneur intéressante pour des cultures spécifiques comme les arachides, la vigne, les légumineuses, les pommes de terre et le coton. De plus, de nombreux travaux de recherche ont également démontré qu'il pouvait produire plusieurs effets bénéfiques dans le sol, notamment améliorer la structure du sol en ameublissant les sols lourds et les argiles compactées, permettre d'augmenter la perméabilité et d'améliorer l'aération, le drainage et la pénétration et la rétention d'eau. Le gypse est préférable dans les sols arides « alcalins noirs » et peut être utilisé comme conditionneur de sol pour contrer l'alcalinité naturelle du sol in situ (par exemple dans les zones à forte teneur en sodium).

L'anhydrite (CaSO_4) se comporte dans le sol de façon similaire et peut parfois être utilisée, notamment dans la culture des pommes de terre.

5.1.7. Industrie alimentaire

Le gypse ultra-pur, appelé *Terra Alba*, est utilisé comme source de calcium, et comme liant et transformateur dans l'industrie alimentaire (farine et pains enrichis, céréales, levure chimique, levure alimentaire, conditionneurs pour pain, conserves de légumes, gelées et conserves sucrées artificiellement).

De bonnes qualités de gypse (haute pureté) peuvent être utilisées dans l'industrie pharmaceutique comme diluant servant d'extenseur inerte.

Dans la fabrication de la bière, le gypse est utilisé dans la purification des eaux de brasserie grâce à son pouvoir floculant. L'ion calcium favorise la bonne gélatinisation de l'amidon dans le moût de cuisson, ainsi que la dégradation des protéines et la conversion de l'amidon, ce qui augmente le rendement dans le moût principal. Le moût est amélioré, ainsi que la précipitation et la floculation des complexes protéiques indésirables, donnant un goût moins prononcé à la bière avec une stabilité de qualité et une conservation plus longue. Il est également utilisé pour réduire la teneur en tartre et contrôler la clarté des vins.

Le gypse est source de calcium : il aide à maintenir un équilibre nutritionnel complet en tant que complément alimentaire contribuant au bon développement des os et des dents. Le sulfate contenu dans le gypse aide à contrôler le processus de gélification des protéines animales. Il améliore les caractéristiques physiques des pellets et granulés, et joue le rôle de liant dans les mélanges de produits solides (seaux à lécher pour les bovins par exemple).

Pour l'alimentation, le gypse doit avoir des spécifications de grande pureté supérieur à 96,75% et doit être conforme aux directives et réglementations européennes EU 68/2013 relatives aux matières premières pour l'alimentation animale.

5.1.8. Objets de décoration

Un plâtre, dans le domaine des beaux-arts est une sculpture moulée en plâtre à finalité artistique. Il peut correspondre à l'œuvre finale ou servir de modèle de référence en sculpture, avant d'attaquer un modèle final en pierre ou en bois. C'est aussi un objet utilisé comme modèle en dessin pour l'apprentissage de la construction d'après modèle.

Staff et stuc

À l'intérieur des bâtiments, le travail du plâtre donne naissance au staff et au stuc. Le staff est une technique de plâtre moulé et armé de fibres végétales qui permet la réalisation rapide d'ornements architecturaux. Le stuc est un enduit décoratif à base de plâtre imitant la pierre ou le marbre.

Les applications possibles de staff, de stuc, de décoration et de pose s'étendent de la conception intérieure dans les travaux neufs, à la rénovation de bâtiments historiques, jusqu'au modelage et au coulage de pièces d'art. Les plâtres s'utilisent à la fois dans le staff traditionnel et le GRG (*Glass Reinforced Gypsum* : plâtre renforcé avec des fibres de verre).

Moulage et sculpture

Le plâtre reste le matériau incontournable dans le travail de la sculpture depuis l'Antiquité, permettant la réalisation de la technique dite du creux perdu, qui constitue par ailleurs l'une des méthodes traditionnelles de moulage. Le plâtre peut également être taillé directement ou utilisé dans des techniques mixtes, associant plusieurs matériaux.

Le plâtre est appliqué sur l'original pour créer un moule, c'est-à-dire une reproduction en négatif. Ce moule est ensuite retiré et l'on y coule du plâtre frais pour obtenir une copie positive en plâtre de l'original. Ces moules sont souvent complexes, constitués parfois de dizaines de pièces, de manière à reproduire les moindres parties rentrantes de l'original. Une autre solution plus récente est le recours à des moules souples en caoutchouc ou en silicone, maintenus par des formes en plâtre ou en polyester.

5.1.9. Autres applications

Le gypse calciné est utilisé pour la fabrication de moules industriels (sanitaires et poterie, coulée de métal), pansements d'empreinte et pansements (applications médicales), et comme agent de ciment pour les forages.

En tant que source de calcium et de soufre, le gypse remplace le sulfate de sodium dans la fabrication du verre (verre plat). Son ajout au mélange verrier lors de la fusion facilite les dégagements gazeux et permet d'éclaircir le verre fondu.

Il agit comme flocculant naturel pour éliminer les particules en suspension bloquant la lumière du soleil aux algues génératrices d'oxygène dans les étangs (aquaculture).

Le gypse ou l'anhydrite, est inerte et possède de bonnes capacités d'absorption comme support à insecticide.

Le plâtre semi-hydraté formulé peut être utilisé en moulage dans toutes les applications de coulage, notamment les moules de travail pour l'élaboration de céramiques et pour le coulage de barbotine. Un plâtre formulé de haute résistance permet la fabrication des moules pour le pressage des tuiles. Ce plâtre peut être utilisé pour ses caractéristiques de haute perméabilité du moule en fonction des caractéristiques de l'argile utilisée.

Pour les applications cosmétiques, des masques chauffants sont fabriqués à partir de plâtre.

Les différentes espèces minérales peuvent servir d'objet de décoration comme des lampes ou même comme bijoux pour la sélénite.

6. Marchés et perspectives

6.1. APERÇU DU MARCHÉ MONDIAL DU GYPSE ET DE L'ANHYDRITE

La production mondiale de gypse et d'anhydrite naturels serait de l'ordre de 160 Mt en 2018, en constante hausse depuis 2010 (Figure 39).

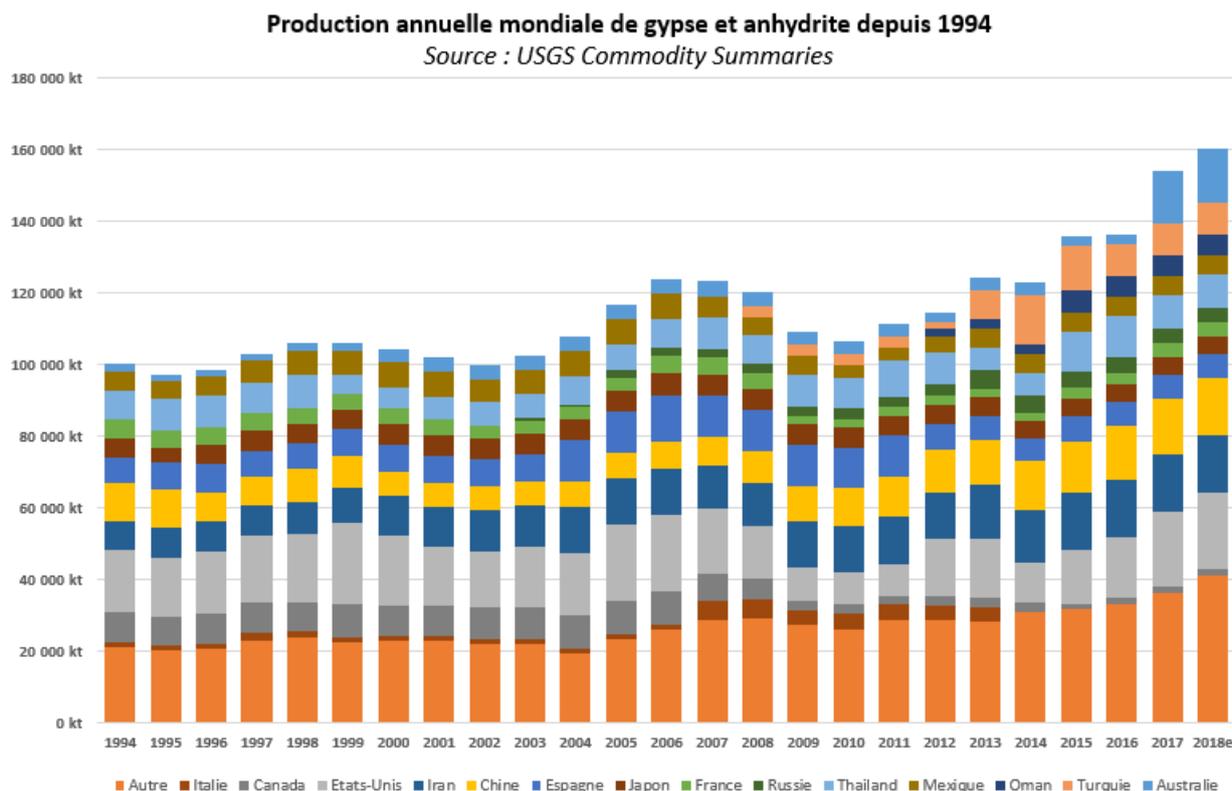


Figure 39 : Production mondiale de gypse et d'anhydrite de 1994 à 2018 (Données USGS 2018).

Toutefois, comme indiqué en §3.2.1, il existe une certaine variabilité concernant les statistiques mondiales de production de gypse et d'anhydrite. Ceci s'explique tout d'abord par la part importante de la production de produits de synthèse comme alternative au gypse et à l'anhydrite naturels, en particulier le phosphogypse, obtenu lors de la fabrication d'acide phosphorique dans l'industrie des engrais et le désulfogypse (gypse FGD), obtenu lors de la désulfuration des gaz de combustion des centrales thermiques à charbon.

Certaines confusions peuvent ainsi exister dans les données de production entre les produits d'origine naturelle ou ceux issus du recyclage de déchets et synthétiques, ceux-ci étant relativement proches et servant les mêmes usages, d'autant plus que les plus grosses multinationales productrices de gypse naturel (Etex, Knauf, Saint-Gobain, USG, BNBM) ont également une part importante d'activités dans la production de phosphogypse ou de gypse FGD. Les principales différences entre ces produits sont un coût de fabrication relativement inférieur pour les produits de synthèse (dépendant cependant des impuretés à éliminer), ainsi que l'extrême finesse et la potentielle présence de traces d'uranium dans le minerai phosphaté pour

le phosphogypse, pouvant pénaliser son utilisation dans le bâtiment ou l'agroalimentaire, notamment.

La production de gypse synthétique est supérieure à celle du gypse naturel à l'échelle mondiale, estimée à 185 Mt/an. Aux États-Unis, pourtant premier producteur mondial de gypse naturel, la consommation totale de gypse est dominée par le gypse synthétique, provenant à 85% de la désulfuration des gaz de combustion des centrales thermiques à charbon. Toutefois, le développement du gaz de schiste aux États-Unis a entraîné la substitution du charbon par le gaz naturel pour la production d'électricité, du moins en partie. Or le gaz naturel renferme moins de soufre que le charbon et conduit ainsi progressivement à une production moindre de désulfogypse. Il en est de même pour la Chine, où la production de phosphogypse était estimée à 50 Mt en 2016, contre 15 à 17 Mt de gypse naturel.

Les statistiques de l'USGS (*United States Geological Survey*) présentés en Figure 39 constituent les séries historiques les plus complètes de la production mondiale. Ces chiffres ne concernent théoriquement que les productions de gypse et d'anhydrite naturels. Or, entre 2013 et 2017, la même source annonçait une production mondiale de gypse de l'ordre de 245 Mt dont 130 Mt en Chine uniquement. Ces données ont été corrigées en 2018 pour exclure la part de gypse synthétique produite en Chine durant ces dernières années.

La production mondiale est dominée par les États-Unis, avec néanmoins un coup d'arrêt conséquent, visible entre 2009 et 2011, lié à l'impact de la crise des SubPrimes de 2008 sur le marché de l'immobilier et du bâtiment dans le pays. En 2018, la production de gypse et d'anhydrite naturels des États-Unis est estimée à 21 Mt, suivis par la Chine et l'Iran, avec 16 Mt extraites, juste devant l'Australie, à 15 Mt. Ces quatre pays produisent ainsi 43% des sulfates de calcium mondiaux. En Europe, l'Espagne est le principal producteur avec 7 Mt, devant la France (4,2 Mt selon l'USGS²) et l'Allemagne (3,1 Mt).

Si 82 pays exploitent des carrières de sulfate de calcium sur leur territoire, il faut distinguer dans chacun la présence d'immenses multinationales de l'industrie du bâtiment pour une part importante des volumes (Saint-Gobain, Knauf, Etex, BNBM), aux côtés de nombreuses petites ou moyennes entreprises (entreprises familiales ou d'envergure régionale).

À l'échelle mondiale, hormis le groupe chinois BNBM (*Beijing New Building Material*), désormais premier producteur mondial mais dont les principales activités se situent en Chine, le marché mondial du gypse et de l'anhydrite est dominé par 3 groupes multinationaux après plusieurs rachats et fusions, il s'agit de Knauf, Etex et Saint-Gobain. Au sein de ces groupes, une forte intégration verticale des activités est observée. Ainsi, les carrières sont très souvent associées aux usines de production de plâtre sous différentes formes et aux marchés de la construction, étapes à fortes valeurs ajoutées.

Le groupe Saint-Gobain possède cinq filières liées aux marchés du plâtre à travers le monde : British Gypsum, Certain Teed Corp., Gyproc, Placo et Rigips, actives dans 67 pays. Les marchés des pays émergents sont un axe fort de développement pour le groupe. Ainsi, en février 2018 a été inaugurée en Inde la 4^e usine de plâtre de Saint-Gobain Gyproc. Située à Jhagadia, dans l'état de Gujarat, c'est la plus grande usine de plaques de plâtre du pays, avec une capacité annuelle de production de 30 millions de m². Puis, le 18 novembre 2019, Saint-Gobain a célébré en Chine la pose de la première pierre de sa 4^e usine de plâtre à Yangzhou, dans la province du Jiangsu, avec une capacité de production annuelle de 600 000 t de produits de plâtre et un haut degré de modernité. La construction de cette nouvelle usine devrait être achevée début 2021.

² L'ordre de grandeur est bien celui de la production réelle en 2018, avec une légère surestimation.

Le groupe Knauf, d'origine allemande, est le premier producteur européen de plaques de plâtre. Il est également présent à travers le monde dans 86 pays, avec 220 sites de production et de traitement, 28 000 employés, et un chiffre d'affaire annuel de 9 G€. En 2011, le groupe a acquis les activités de Plâtres Lafarge en Australie. En outre, en juin 2018, Knauf a racheté la multinationale USG (US Gypsum Corp., www.usg.com) qui était déjà un acteur majeur du marché, lui-même propriétaire à 50% de la coentreprise USG Boral (Australie). Le marché du plâtre a été fortement impacté par cette importante fusion.

Enfin, le groupe Etex (www.etexgroup.com), d'origine belge, est présent dans 42 pays, avec 113 sites de production et de traitement, 14 500 employés et près de 3 G€ de chiffre d'affaire. Il a quant à lui racheté en 2011, la majorité des actifs de plâtre du groupe Lafarge en Amérique du Sud et en Europe, ce qui a donné lieu à la création d'une nouvelle entité : Siniat, présente en France.

À noter, pour compléter cet aperçu mondial et illustrer une certaine régionalisation des activités, que les activités Plâtre de Lafarge en Amérique du Nord ont également été vendues mi-2013 pour former Continental Building Products (www.continental-bp.com), puis racheté en intégralité par le groupe Saint-Gobain en novembre 2019. Enfin, en Algérie et au Maroc, Lafarge Holcim poursuit l'activité de Lafarge dans le gypse et le plâtre.

6.2. MARCHÉ INTÉRIEUR : REVUE DES PRINCIPALES SOCIÉTÉS ET LEUR POSITIONNEMENT SUR LE MARCHÉ FRANÇAIS

6.2.1. Producteurs de gypse et d'anhydrite en France

En 2018, les 18 sites d'extraction de gypse et d'anhydrite appartiennent à 10 entreprises. Cependant, comme dans d'autres pays, la part majoritaire est contrôlée par les géants mondiaux du secteur (Saint-Gobain, Knauf, Etex) et leurs filiales, tandis que d'autres exploitations sont des structures indépendantes ne possédant qu'un site unique. Cet ensemble produit en 2018 4 076 kt de substance pour 8 475 kt autorisées.

Saint Gobain (Placoplâtre & Anhydrite Minérale France)

Placoplâtre ou Placo® (www.placo.fr/Nous-connaitre/Presentation/Notre-activite) est une filiale de Saint-Gobain, géant mondial des matériaux de construction. C'est la société majeure d'extraction de gypse et d'anhydrite en France métropolitaine. Avec 7 exploitations en France métropolitaine et un tonnage moyen annuel de l'ordre de 1,5 Mt, Placoplâtre représente près d'un tiers de la production française en 2018. Ses carrières sont situées en très grande majorité en Île-de-France (5), les deux dernières se situant en Nouvelle-Aquitaine et en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. La domination est d'autant plus importante que le groupe opère également 13 sites de traitement et de production de plâtre sur le territoire national, desservant le marché européen. Placoplâtre emploie plus de 1 500 personnes en France répartis sur 17 sites, son chiffre d'affaire était de 530,4 M€ en 2018.

Siniat

La société Siniat (www.siniat.fr) est une filiale du groupe belge Etex depuis 2011. Elle a ainsi repris les activités de Plâtres Lafarge en France, exploitant 5 carrières de gypse et d'anhydrite, à savoir Montmorency (95), Villevaudé-Le Pin (77), Carresse (64), Lantosque (06) et Mazan (84), avec une production annuelle de l'ordre de 1,3 Mt en 2018. À cela s'ajoutent 14 sites de traitement et de production de plâtre ainsi qu'un laboratoire de recherche et de développement sur le territoire national. Son chiffre d'affaire est de 386,2 M€ en 2018 pour plus de 1 100 employés en France.

Knauf

Le groupe Knauf, d'origine allemande (www.knauf.com/en/), comprend 2 filiales actives en France. D'une part, Knauf Plâtres & Cie, exploitant la carrière de Saint-Soupplets (77) avec une production de 400 kt/an, soit 10% de la production française annuelle.

D'autre part, L'Anhydrite Lorraine (<http://www.anhydrite.net/fr/l-anhydrite-lorraine.html>), appartenant au groupe depuis 2008 et exploitant en souterrain la carrière d'anhydrite de Koenigsmacker (57) décrite en §4.4.4, avec une capacité de production de 500 kt/an, pour 350 kt extraites en 2018.

Autres exploitants

Le Tableau 4 complète le panorama des exploitants en 2018, tous de taille plus modeste et n'exploitant qu'un seul gisement sur le territoire métropolitain.

6.2.2. Les usines de gypse/anhydrite en France

Sur l'ensemble du territoire, il y a (source : base de donnée des usines de transformations minérales ; BRGM 2019), 17 unités de transformation qui transforment le gypse et l'anhydrite en plâtre et pour l'amendement ou la verrerie. Toutes ces usines appartiennent aux grands groupes exploitants la ressource minérale sur le territoire français.

De nouvelles unités de productions ont été récemment autorisées par arrêté préfectoraux :

- Dunkerque Multibulk Terminal (DMT) a été autorisé par arrêté préfectoral du 14 février 2018 à ouvrir une future usine de production de plaques de plâtre sur le port de Dunkerque. Il importerait du gypse (environ 300 000 tonnes) de la péninsule ibérique. Il pourrait ouvrir fin 2021 avec une capacité de production de 696 t/jour de plaques.
- BMG (Building Materials Group), filiale basée à Aix du groupe suisse Building Material Group Swiss AG, a présenté mercredi 13 juin 2019, son projet d'ouverture d'une unité à Fos-sur-Mer sur la zone portuaire. Le site de Fos-sur-Mer sera donc autorisé à produire 696 t/jour de plâtre (AP du 13 novembre 2018) pour produire 30 Mm²/an de plaques à partir de fin 2021. Le gypse sera importé par voie maritime depuis le bassin méditerranéen. Les produits finis sont destinés aux marchés français, italiens, espagnols et aux pays du Maghreb.

Ces investissements pour développer de nouvelles usines notamment à côté de zones portuaires risquent effectivement de causer des tensions sur le marché du gypse français avec plus de demande de matière première et aussi plus d'exportation de produits finis vers l'étranger.

6.3. COMMERCE EXTÉRIEUR DE LA FRANCE

Les données du commerce extérieur français sont publiées sur le site <http://lekiosque.finances.gouv.fr>.

Le gypse et l'anhydrite sont regroupés dans la même nomenclature NC8 25201000, ne comprenant à priori que les produits d'origine naturelle et pas ceux de synthèse (phosphogypse ou désulfogypse), non représentés dans les nomenclatures douanières. Pour les années 2017 à 2018, les échanges sont compilés dans le Tableau 9.

Gypse & Anhydrite (NC8: 25201000)	2017			2018			Evolution 2017-2018		Principaux partenaires en 2018 (% des tonnages)
	Valeur	Masse	val.unit.	Valeur	Masse	val.unit.	En valeur	En masse	
Exportations	10 137 k€	348 244 t	29 €/t	8 866 k€	296 454 t	30 €/t	-12,5%	-14,9%	Belgique 71,1%, Pays-Bas 24,5%, Allemagne 4,1%
Importations	18 073 k€	344 823 t	52 €/t	14 839 k€	311 762 t	48 €/t	-17,9%	-9,6%	Espagne 45,2%, Allemagne 24,7%, Retour France 12,8%
Solde	-7 936 k€	3 421 t		-5 973 k€	-15 308 t				

Tableau 9 : Chiffres du commerce extérieur français en 2017 et 2018. Source : Kiosque de Bercy.

Comme pour de nombreuses substances de carrières, les principaux échanges commerciaux français de gypse et d'anhydrite sont réalisés avec des pays européens. Les principaux partenaires en termes d'exportations en 2018 sont la Belgique (71%), les Pays-Bas (25%) et l'Allemagne (4%) pour un total de près de 300 kt, pour une valeur légèrement supérieure d'importations (312 kt) dont l'origine principale est l'Espagne (45%), suivie par l'Allemagne (25%), la Thaïlande (6,4%) et les Pays-Bas (5,2%).

Entre 2017 et 2018, si la France est passée d'une situation excédentaire en tonnages à un déficit apparent de 15 kt, la réduction globale des volumes d'échanges (-10% sur les imports et -15% sur les exports) a permis de réduire le solde déficitaire de la France de 2 M€.

Dans ces échanges, il apparaît toutefois évident qu'une partie concerne des opérations au sein d'une même entreprise, s'expliquant par la présence dans les pays frontaliers de filiales ou d'opérations des groupes Knauf, Etex et Saint-Gobain. Pour les importations, ceci est rendu lisible par l'intitulé « *Retour France* », faisant vraisemblablement référence à des matériaux traités en dehors du territoire national avant d'y être retournés au sein d'une même filiale, soit pour repartir en traitement ultérieur, soit pour y être commercialisés après un traitement à l'extérieur. Ainsi, le solde négatif en volumes de 2018, lorsque sont soustraits les « *Retours France* » (12,8% des tonnages soit 39 906 t), devient positif en masse (soit +24 598 t) mais reste négatif en valeur (-5 208 k€).

La prédominance de l'Espagne sur le marché de l'import n'a rien d'étonnant vu sa place de 7^e producteur mondial, permettant un complément d'approvisionnement ponctuel des usines françaises. En effet, les volumes totaux d'échanges sont très faibles au regard de la production nationale (4 000 kt produites contre 300 kt échangées, soit moins de 8%), ce qui indique que 92% de l'extraction française de sulfates de calcium sont destinés au marché intérieur. La majorité est transformée sur place et dédiée à la production de produits à base de plâtre dans les usines implantées à proximité des carrières. La logique économique d'une telle structuration de cette filière est décrite dans la section suivante.

6.4. ÉVOLUTION DES PRIX

En l'absence de place de marché, les prix du gypse et de l'anhydrite sont négociés directement entre producteurs et utilisateurs. Certaines sources, dont l'USGS, répertorient les moyennes hautes et basses de ces contrats pour évaluer l'évolution des prix à l'échelle mondiale. Les principales différences de prix entre les produits sont fonction de la pureté (et impuretés contenues en fonction de la qualité désirée) des produits, ainsi que du nombre d'étapes de traitement de ces derniers (calcination, etc.) qui influence la rentabilité du coût d'exploitation.

Pour un ordre d'idée :

- Le gypse « cru », avant traitement est vendu aux alentours de 8 \$US/t (7,4 €) ;

- Après un premier traitement (calcination), ces prix montent aux alentours de 30 \$US/t (27,7 €) ce qui se retrouve dans les données d'exportation française présentées précédemment (Tableau 9).

La valeur ajoutée des produits transformés augmente ensuite rapidement, incitant les opérateurs à intégrer verticalement les activités d'extraction de la matière première (gypse et anhydrite) à celles de la fabrication du plâtre, voire de produits façonnés en plâtre ou à plus haute valeur ajoutée (plaques, carreaux, enduits spéciaux, etc.). Le Tableau 10, issu de la compilation des chiffres du commerce extérieur français pour l'année 2018 illustre directement cette logique économique.

Code NC8	Dénomination	Flux	Valeur 2018 (€)	Masse 2018 (t)	€/t
25202000	Plâtres bruts (même colorés)	Export	41 822 k€	261 682 t	160 €/t
		Import	12 212 k€	89 456 t	137 €/t
68091100 & 68091900	Planche, plaques, panneaux, carreaux et similaires	Export	3 686 k€	19 370 t	190 €/t
		Import	23 996 k€	84 626 t	284 €/t
34070000	Compositions pour l'art dentaire à base de plâtre	Export	10 065 k€	2 189 t	4 598 €/t
		Import	37 556 k€	8 430 t	4 455 €/t
68099000	Ouvrages en plâtre ou en compositions à base de plâtre	Export	3 914 k€	1 662 t	2 355 €/t
		Import	3 500 k€	2 940 t	1 190 €/t

Tableau 10 : Valeurs moyennes des produits à base de plâtre sur la base des données du commerce extérieur français en 2018. Source : Kiosque de Bercy.

La valeur du plâtre brut à l'export atteint 160 €/t, tandis que les plaques, panneaux ou carreaux de plâtre transformés pour le bâtiment valent entre 200 et 300 €/t. Enfin, les valeurs s'envolent (de l'ordre de 10 fois supérieures à celles des plaques de plâtre) pour les produits de plus haute technicité, échangés et produits en plus faibles volumes, par exemple les plâtres utilisés dans l'art (1 000 €/t à 2 000 €/t) et d'autant plus pour les produits très spécifiques utilisés dans le domaine de la santé, atteignant 4 500 €/t en moyenne, notamment en dentisterie.

Le gypse de haute qualité micronisé, pour charge, est généralement vendu entre 100 à 200€/t selon la pureté, mais certains produits très fins et purs sont probablement beaucoup plus cher.

On comprend ainsi l'intérêt pour les opérateurs, quel que soit le pays de production, à intégrer verticalement les activités de transformation des sulfates de calcium (usine de traitement et de production de plaques de plâtre) à proximité des sites d'extraction, le capital d'entrée d'un tel investissement étant relativement peu élevé (au regard d'autres industries comme l'industrie métallurgique par exemple), et vite rentabilisé.

7. Recyclage du gypse et développement durable

Concernant les déchets de plâtre, depuis la mise en place en 2008 d'une démarche volontaire de recyclage des déchets de plâtre par le Syndicat des industries du plâtre, le tonnage de déchets effectivement collectés et réintroduits dans le circuit de fabrication est passé de 10 000 à 50 000 t.

On estime que le gisement total atteint les 350 000 à 400 000 t de déchets par an, la moitié issue des chantiers neufs et l'autre moitié des chantiers de déconstruction. Afin de respecter la directive européenne sur les déchets de chantier, qui fixe pour 2020 un objectif de recyclage de 70% pour l'ensemble des déchets de construction, la filière plâtre a souhaité appliquer ce même taux pour les déchets de plâtre.

Pour y parvenir, les usines de production françaises ont toutes mis en place des ateliers de recyclage, qui permettent la réception et le traitement des déchets. À l'heure actuelle, on peut réincorporer sans difficulté jusqu'à 12% de recyclât dans la fabrication de nouvelles plaques, cloisons ou doublage en plâtre. À moyen terme, il devrait être possible d'atteindre un taux de 25% de matière recyclée réincorporée dans le cycle de production. G2G (*Gypsum to Gypsum*), programme de recherche financé pour moitié par l'Union européenne, travaille sur ce sujet de l'amélioration du taux de réincorporation. En France, l'élimination des déchets de plâtre est réglementée par les dispositions de l'arrêté du 15 février 2016. Ainsi, les déchets de plâtre devraient être envoyés en installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND) dans des alvéoles dédiées afin de limiter leur réaction avec les matières organiques. Cela suppose néanmoins que la hiérarchie des modes de traitement des déchets a été respectée en amont. Aussi, pour être admis en ISDND, il faut que les déchets contiennent au moins 95% en masse de plâtre et qu'ils n'aient pas pu être valorisés. Une entreprise débourse entre 90 et 100 €/t pour les écouler dans ces installations. Si une filière de recyclage se veut efficace, il faudra dans les années à venir parvenir à ce qu'ils soient dès la source bien séparés des autres déchets. Les entreprises peuvent se faire aider par les industriels qui leur proposent des solutions (benne, broyeur, etc.) moins onéreuses que l'enfouissement en ISDND. L'autre condition réside dans la mise en place de moyens logistiques conséquents, afin d'optimiser la collecte des déchets de chantiers de déconstruction en réduisant les coûts d'acheminement jusqu'aux usines.

Le 27 avril 2016, le syndicat national des industries du plâtre (SNPI) et le ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer ont signé un engagement pour la croissance verte relatif au recyclage des déchets du plâtre. Cet engagement implique une augmentation du recyclage des produits du plâtre avec des objectifs quantifiés pour l'horizon 2020 et de communiquer la cartographie du réseau de collecteur de déchets du plâtre. Les entreprises Knauf, Placoplatre et Siniat ont pris respectivement ses engagements pour respecter ces objectifs en faveur de l'économie circulaire

Il existe des installations pour recycler les panneaux muraux usés des chantiers de construction en séparant les matériaux dans le gypse et le papier.

Trois entreprises recyclent les plaques de plâtre en séparant le papier et le polystyrène du plâtre :

- Nantet a mis au point un brevet permettant de valoriser les déchets de plâtre en mélange. La chaîne de traitement est mise en place sur le site de Francin (73) et traite de grandes quantités de plâtre en mélange afin d'obtenir du gypse, qui est ensuite recyclé chez Placoplâtre. Serdex a dédié son site de Saint-Priest aux filières de recyclage du plâtre.

- L'entreprise Ritleng basée dans la région Grand-Est (Revalorisations a été créé en 2012 dans le but d'amener une solution pérenne au traitement de tous les déchets de plâtre). Le cahier des charges Ritleng Revalorisations est le plus élargi d'Europe, il assure le recyclage de l'ensemble des déchets de plâtre utilisé dans la construction d'un bâtiment.
- L'entreprise Valoridec, fondée en 2001, trie et recycle les déchets des professionnels : entreprises du BTP, industries et collectivités territoriales. Cette entreprise s'est spécialisée dans le recyclage des déchets du bâtiment de la démolition et de la construction neuve. Son siège social se situe à Carcassonne (11). C'est à travers sa filiale RecyGypse que sont triés les plâtres et le papier des plaques de plâtre.

L'extraction de gypse et d'anhydrite est exempte des problèmes d'extraction généralement associés à l'exploitation minière, comme le drainage acide, la contamination des eaux de surface, etc. En effet, l'extraction du gypse se fait principalement par voie mécanique et n'induit pas de traitements chimiques conséquents.

8. Conclusions et perspectives

L'exploitation française du gypse et de l'anhydrite est répartie sur l'ensemble du territoire métropolitain, avec plusieurs bassins de production spécialisés. Les gisements sont présents dans les bassins sédimentaires avec un bassin de production important en région parisienne, dans le sud-ouest de la France et dans les Charentes. Des carrières sont également présentes dans les terrains sédimentaires plissés des Alpes.

En 2018, 18 carrières exploitent le gypse et l'anhydrite en France, dont 8 dans la région parisienne, représentant près de 70% de la production nationale. La production totale autorisée de gypse et d'anhydrite est de 8 425 kt. La production réelle est de 4 075 kt en 2018. Dix entreprises se partagent le marché. Cependant, la part majoritaire est contrôlée par les géants mondiaux du secteur (Saint-Gobain, Knauf, Etex), tandis que certaines structures indépendantes de moindre ampleur (sociétés familiales ou d'envergure régionale) ont une emprise plus réduite ou gère l'exploitation d'un site unique. Placoplâtre, filiale de Saint-Gobain, est la société majeure d'extraction de gypse en France métropolitaine avec près d'un tiers de la production française en 2018 (1,5 Mt) et 7 exploitations pour le gypse, dont 5 en Île-de-France.

Si le gypse et l'anhydrite sont extraits et consommés depuis plus de deux millénaires pour leurs caractéristiques utiles dans le bâtiment, l'art et l'agriculture, leur principal secteur d'utilisation est aujourd'hui de loin celui du bâtiment et des travaux publics. La fabrication de plâtre domine le marché français avec environ 80% des tonnages. Suit l'utilisation dans l'industrie du ciment qui occupe 15% de la consommation totale. Enfin, les 5% restants se répartissent selon le degré de pureté, dans l'agriculture, en chimie, ou dans les charges minérales.

Entre 2017 et 2018, selon les chiffres des douanes, le commerce extérieur de la France est passé d'une situation excédentaire en tonnages à un déficit apparent de 15 kt sur les produits de gypse et d'anhydrite naturels, la réduction globale des volumes (-10% sur les imports et -15% sur les exports) a permis de réduire le solde déficitaire de 8 M€ à 5 M€. Comme pour de nombreuses substances de carrières, les principaux échanges commerciaux français de gypse et d'anhydrite sont réalisés avec des pays européens. Les principaux partenaires en termes d'exportations en 2018 sont la Belgique (71%), les Pays-Bas (25%) et l'Allemagne (4%) pour un total de près de 300 kt, pour une valeur légèrement supérieure d'importations (312 kt) dont l'origine principale est l'Espagne (45%), suivie par l'Allemagne (25%), la Thaïlande (6,4%) et les Pays-Bas (5,2%).

Toutefois, il est à noter que les volumes totaux d'échanges sont très faibles au regard de la production nationale (4 000 kt produites contre 300 kt échangées, soit moins de 8%), ce qui indique que 92% de l'extraction française sont destinés au marché intérieur.

Le gypse « cru », avant traitement est vendu sur le marché international aux alentours de 7,4 €/t. Après un premier traitement (calcination), ces prix montent aux alentours de 27,6 €/t. La valeur ajoutée des produits transformés augmente ensuite rapidement, incitant les opérateurs à intégrer verticalement les activités d'extraction de la matière première (gypse et anhydrite) à celles de la fabrication de plâtre, voire de produits façonnés en plâtre (plaques notamment).

La croissance de ces activités devrait se poursuivre à un rythme soutenu étant donné les perspectives de la demande et les nombreux projets d'extension urbaine (Grand Paris, etc.). À moyen terme, les perspectives d'évolution de la consommation de gypse et d'anhydrite demeurent majoritairement orientées vers la production de plâtre à destination du BTP. Des modélisations récentes estiment qu'en 2015 en France, la construction de logements neufs et le

tertiaire consomment 1 500 kt de plâtre par an. À l'horizon 2035, les quantités cumulées de plâtre pour la construction de logements neufs et la rénovation énergétique des bâtiments seraient ainsi de l'ordre de 28,5 Mt, malgré un ralentissement prévu de la construction de logements neufs à l'horizon 2050 par la Stratégie Nationale Bas Carbone³.

Néanmoins, si les ressources apparaissent abondantes sur le territoire national, les contraintes environnementales et d'exploitation sur des zones de plus en plus sensibles et soumises à la compétition d'usage des sols (urbanisation notamment) seront le principal enjeu de l'industrie du plâtre à moyen et long terme.

³ Voir à ce sujet les études prospectives publiées par l'ADEME en décembre 2019 : <https://www.ademe.fr/prospectives-2035-2050-consommation-materiaux-construction-neuve-renovation-energetique-bbc>

9. Références

ANONYME, 2000. "Annual gypsum board shipments & industry capacity", Gypsum Association, Washington, DC, Gypsum Association, January, p. 1.

ADEME, 2019. Prospective de consommation de matériaux pour la construction des bâtiments neufs aux horizons 2035 et 2050 – Synthèse, 24 p. Disponible sur : <https://www.ademe.fr/prospectives-2035-2050-consommation-materiaux-construction-neuve-renovation-energetique-bbc>

BOUGEARD H., 1946. Les gisements de gypse en France. Rapport BRGG A94-1, 30 p.

BRGM, 2018. Le sel : « aux confins de la terre et de l'eau ». Géosciences 22, 80 p.

BRGM-SGF, 2001. Évaporites. Géochronique 80.

BRGM, 1998. Estimation de la consommation française de matériaux de carrière et produits dérivés. Synthèse des travaux réalisés en 1998. Rapport BRGM R-40400, 19 p., 2 ann.

BRGM, 2000. Panorama du marché français des matériaux de carrière et produits dérivées. Rapport BRGM R40907, 127 p., 1 ann.

BROWN, T., WRIGHTON, C., IDOINE, N., RAYCRAFT, E., SHAW, R., DEADY, E., RIPPINGALE, J., BIDE, T., 2017. World Mineral Production 2011-2015. Keyworth, Nottingham: British Geological Survey.

CHARMOILLE A., LECOMTE A., KREZIAK C., 2017. Dissolution naturelle du gypse dans le sous-sol. Analyse et gestion des aléas mouvements de terrain de type affaissement et effondrement. Rapport INERIS 17-164710-03375A, 34 p.

CLÉMENT A., THOMAS G., 2016. Atlas du Paris souterrain. Éditions Parigramme, 200 p. ISBN 9782373950076.

DALIGAND D., 2002. Produit de déshydrations du gypse : le plâtre, Techniques de l'ingénieurs, ref :C0910V3, 10 p.

DAUPLEY X., LAOUAFA F., BILLIOTTE J., QUINTARD M., 2015. La dissolution du gypse : quantifier les phénomènes. Mines & Carrières HS17, 229, 35-43.

DELFAU M., 1974. Étude documentaire sur les gisements de gypse français. Rapport BRGM 74-SGN-071-BSS, 38 p.

ELEMENTARIUM, 2019. Fiches Métaux. Disponible sur : www.lelementarium.fr/product/gypse/

FEDEM, FICHES MINÉRAUX. Disponible sur : <http://www.fedem.fr/Site/MATIERES/tableau.asp>.

GAUCHER E.C., CALASSOU S., VIRGONE A., CHABOUREAU A.-C., 2018. Du nouveau du côté des évaporites ? Géosciences 22, 16-18.

HARBEN P., 1995. The industrial Minerals Handbook, 2^e éd., 154-159.

HOVLAND M., KUZNETSOVA T., RUESLATTEN H., KVAMME B., JOHNSEN H.K., FLADMARK G.E., HEBACH A., 2006. Sub-surface precipitation of salts in supercritical seawater. *Basin Research* 18, 221-230.

HOVLAND M., RUESLATTEN H., JOHNSEN H.K., 2018. Large salt accumulations as a consequence of hydrothermal processes associated with “Wilson cycles”: A review part 1: Towards a new understanding. *Marine and Petroleum Geology*.

MARTEAU P., 1993. Mémento roches et minéraux industriels. Gypse et anhydrite. Rapport BRGM R37722 SGN-GEO-93, 34 p.

MERNAGH T.P. (ed.), 2013. A review of Australian salt lakes and assessment of their potential for strategic resources. Record 2013/39. Geoscience Australia: Canberra.

OLSON, D.W., 2001. “Gypsum”, *US Geological Survey Annual Review - 2000*, p. 10.

SCHREIBER B.C., LUGLI S., BABEL M., 2007. Evaporites through space and time. *Geological Society, Special Publication* 285, 470 p.

SCRIBANO V., CARBONE S., MANUELLA F.C., HOVLAND M., RUESLATTEN H., JOHNSEN H.K., 2017. Origin of salt giants in abyssal serpentinite systems. *International Journal of Earth Sciences* 106, 2595-2608.

SERRANO O., 2018. Les évaporites au cours des temps géologiques. *Géosciences* 22, 12-20.

SHARP R., CORK G., 2006. Gypsum and anhydrite. In: KOGEL J.E. et al. (Eds), *Industrial Minerals and Rocks*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc, Littleton, 519-540.

SGF, 2012. Les évaporites : de la genèse aux applications. *Géologues* 174, 116 p., ISSN 0016.7916.

TOULEMONT M., 1987. Les risques d’instabilité liés au karst gypseux lutétien de la région parisienne – Prévision en cartographie. *Bulletin de liaison P. et Ch.* 150-151, réf. 3192, 109-116.

WARREN J.K., 2010. Evaporites through time: Tectonic, climatic and eustatic controls in marine and non-marine deposits. *Earth-Science Reviews* 98, 217-268.

WARREN J.K., 2006. *Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons*. Springer, 1036 p. Disponible sur : <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity>.

WHITE D., 1998. “Gypsum supply - Building on firm foundations”, *Industrial Minerals* 364, 27-43.

Sites internet des sociétés ou organisations cités dans ce rapport

www.knauf.fr

www.placoplatre.fr

www.siniat.fr

www.lesindustriesduplatre.org dont l'article les « *Atouts du plâtre* »

<https://www.lesindustriesduplatre.org>

<https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity>

<https://www.siniat.fr/fr-fr>

<https://www.placo.fr>

<https://www.lelementarium.fr/product/gypse>

<https://www.eurogypsum.org/>

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



Géosciences pour une Terre durable

brgm

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