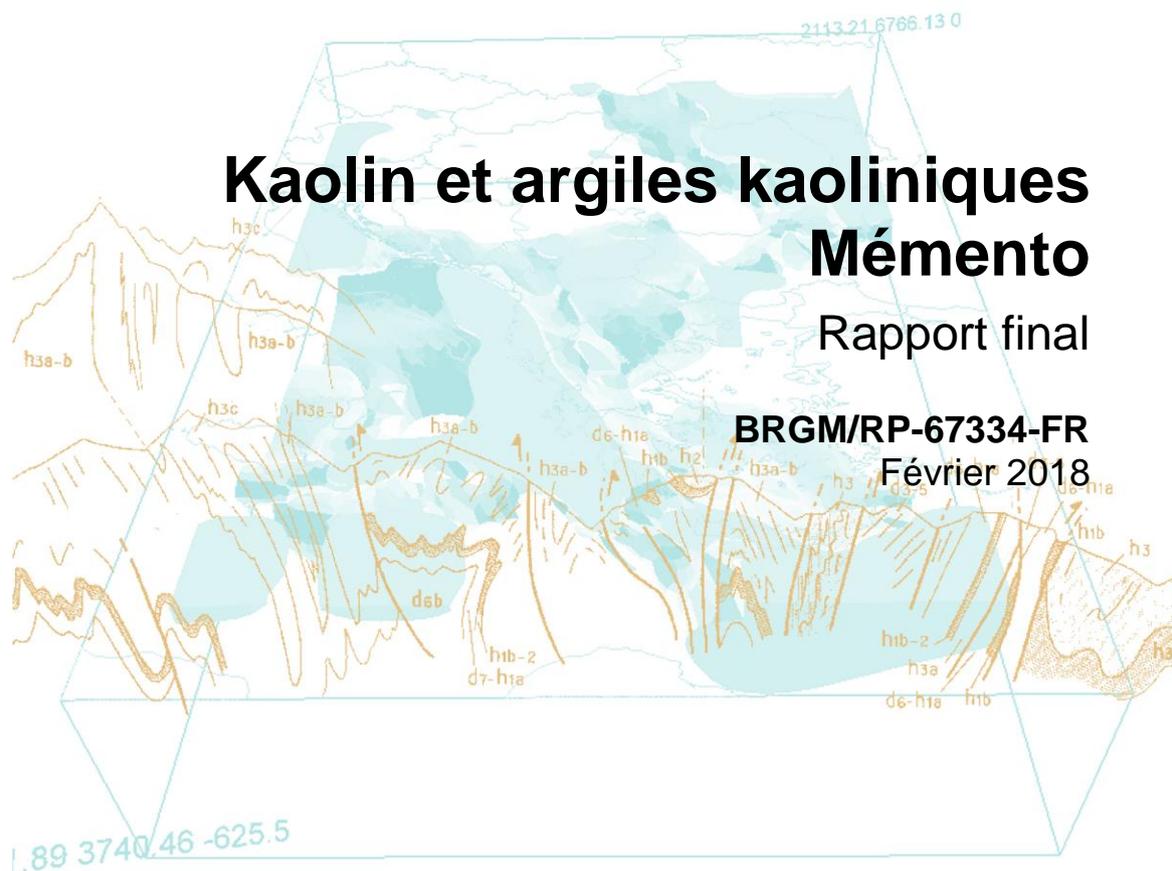


Document public



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document public

Kaolin et argiles kaoliniques

Mémento

Rapport final

BRGM/RP-67334-FR
Février 2018

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

Vérificateur :

Nom : Isabelle Duhamel-Achin

Date : 23/04/2018

Signature :

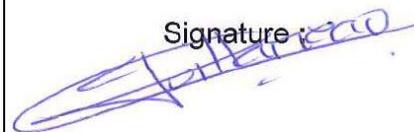


Approbateur :

Nom : Jean-Claude Guillaneau

Date : 23/04/2018

Signature :



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



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : Argile, Argile kaolinique, Kaolin, Céramique, Réfractaire, Réserves, Ressources, Gisements, Production, Utilisations, Marchés, Charge, Sidérurgie, Chimie, Approvisionnement, Prospective, France.

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

Charles N., Colin S., Gutierrez, T., Lefebvre G. (2018). Mémento Kaolin et argiles kaoliniques. Rapport final. Rapport BRGM/RP-67334-FR, 93 p. 44 fig., 4 tabl.

Synthèse

Le présent mémento est un panorama, sur le plan national, de l'activité extractive du kaolin et des argiles kaoliniques. Il présente un état des lieux des filières industrielles utilisant des argiles kaoliniques et du kaolin sous toutes leurs formes.

Productions, ressources et réserves

L'exploitation française de kaolin et argiles kaoliniques est répartie sur l'ensemble du territoire métropolitain, avec plusieurs bassins de production spécialisés. Les gisements primaires pour le kaolin (développés en place sur des roches granitiques) se retrouvent en particulier dans les régions de socle où les roches plutoniques d'âge Varisque affleurent (Massif central et Massif armoricain). Les gisements secondaires, pour les argiles kaoliniques (kaolin ayant subi une érosion, un transport puis un dépôt) sont quant à eux plutôt présents dans les bassins sédimentaires d'âges Mésozoïque et Cénozoïque (Bassin parisien, Bassin aquitain, fossé de Limagne, Bassin du Sud-Est).

En 2017, 41 carrières exploitent le kaolin et les argiles kaoliniques en France, dont près des trois-quarts sont dédiées à l'exploitation des argiles kaoliniques (30 sur 41). La production moyenne autorisée de kaolins est de 2 085 kt et celles d'argiles kaoliniques de 2 135 kt. La production réelle est cependant bien inférieure, avec de l'ordre de 400 à 450 kt d'argiles kaoliniques et kaolin mis sur le marché. La production de kaolin seul est estimée aux environs de 300 kt pour l'année 2017.

Les ressources géologiques en kaolin et argiles kaoliniques sont assez importantes sur le sol français. Néanmoins, les réserves exploitables sont plus limitées du fait des contraintes environnementales et de l'occupation des sols. Avec l'échéance de plusieurs autorisations d'ici 2030, il risque d'y avoir un problème d'accessibilité à la ressource d'autant plus si la demande poursuit sa croissance.

Acteurs industriels, marchés et filières

Le groupe français IMERYS est le plus important producteur mondial de kaolin. Sa filiale IMERYS CERAMICS France exploite 5 carrières de kaolin sur le sol national, quatre en Bretagne et une en Auvergne (Échassières). Sa production moyenne autorisée de kaolin est de 1 050 kt/an, soit près de la moitié du total. Pour les argiles kaoliniques, une autre filiale Imerys Refractories domine également le marché avec l'exploitation d'un ensemble de 24 carrières pour une production moyenne autorisée de 1 400 kt/an.

L'exploitation du kaolin est complétée par les acteurs SOKA, SIBELCO France et ARVEL. La SOKA (Société Kaolinère Armoricaire) est un important producteur en Bretagne, avec une production autorisée est de 490 kt/an. Ses activités ont néanmoins été rachetées en février 2017 par le groupe Carrières des Lacs et des investissements sont nécessaires pour remettre en état et optimiser l'outil de production.

SIBELCO France, spécialiste des sables industriels, a une activité plus modeste d'extraction de kaolin au niveau du bassin d'Hostun (Drôme), en co-produit des sables siliceux. De même, l'entreprise Argiles du Velay (ARVEL) montre une petite production de kaolin et d'argiles vertes en Haute-Loire. Les principaux débouchés des kaolins français sont l'industrie papetière, suivie par les céramiques et faïences, l'industrie verrière (fibre de verre), les charges (plastiques, peintures, caoutchoucs, adhésifs), les réfractaires et les additifs pour bétons.

L'exploitation d'argiles kaoliniques est quant à elle destinée en grande majorité à la fabrication de produits réfractaires, avec une estimation haute de la production totale française à 300 kt/an. Outre Imerys Refractories, ce marché compte quelques producteurs de taille plus modeste parmi lesquels Argeco Développement, Carrière Audion & Fils et Fontes Refractories.

Parmi les usages du kaolin et des argiles kaoliniques, il existe une variété de produits avec des prix s'échelonnant de 100 € à plus de 400 € la tonne. Les principaux écarts de prix du kaolin, en France comme à l'international concernant la qualité (blancheur, finesse, rhéologie, etc.) et la présentation des produits (par exemple : vrac, ensaché, ou « *slurry* »). Ainsi à titre d'exemple, le kaolin hydraté-lavé-séché pour peintures valait 100-125 €/t en 2014, tandis que les kaolins calcinés « *flashs* » les plus blancs valent jusqu'à 300-400 €/t. Il apparaît que l'évolution des prix entre janvier 2016 et janvier 2018 demeure très stable. En revanche, considérant les cinq dernières années, tous les prix ont augmenté, illustrant la forte croissance de la demande mondiale.

La France affiche une balance commerciale positive pour le kaolin et les argiles kaoliniques en considérant la période depuis l'année 2015. Ses principaux partenaires sont européens (Italie, Espagne, Danemark, Belgique, Royaume-Uni, Allemagne, Pays-Bas, République Tchèque) auxquels il faut ajouter le Maroc, les États-Unis et l'Ukraine. En 2017, l'activité de ce secteur affichait un excédent commercial de 10,05 M€ dont 9,24 M€ rien que pour les argiles kaoliniques.

Au niveau mondial, les chiffres les plus récents de consommation de kaolin sont estimés aux alentours de 25 Mt, répartis comme suit pour l'année 2014 :

43 % pour la fabrication de papier, 28 % pour les céramiques, 13 % pour les charges (plastiques, peintures, caoutchoucs, adhésifs), 5 % pour la fibre de verre, 4 % pour les réfractaires et 3 % pour les additifs pour bétons. Le reste de la production (5 %) se répartit selon divers usages en industrie (pharmacie, cosmétique, alimentation animale, etc.)

Les principales évolutions depuis cette date consistent en une diminution de la part des usages du kaolin pour l'industrie du papier du fait de la réduction de ce marché au profit du numérique, mais également de substitutions accrues du kaolin par des charges à base de carbonate de calcium (GCC et PCC), moins chères. À l'inverse, la part des usages comme additifs pour bétons sous forme de métakaolin connaît une forte hausse, notamment pour les bétons de haute performance dans le domaine de la construction.

Ce mémento réalisé par le BRGM fait partie d'un programme d'études rentrant dans le cadre de la Convention 2017 n° 2102186360, signée entre la Direction de l'Eau et de la Biodiversité (DGALN/DEB) du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (MTES) et le BRGM.

Tous les mémentos publiés à ce jour sont diffusés sur le site Minéralinfo (<http://www.mineralinfo.fr/page/roches-mineraux-industriels-0>) et sur le portail InfoTerre (www.infoterre.brgm.fr).

Sommaire

1 Introduction	9
1.1 CONTEXTE DE L'ÉTUDE.....	9
1.2 SOURCE DES DONNÉES.....	9
2 Définitions	11
2.1 SUBSTANCES : MINÉRAUX, ROCHES ET MATÉRIAUX ARGILEUX.....	11
2.1.1 Définition des argiles.....	11
2.1.2 Origines des argiles.....	15
2.1.3 Kaolin et argiles kaoliniques.....	17
2.2 RESSOURCES / RÉSERVES.....	18
2.3 PRODUITS ET FILIÈRES.....	19
2.3.1 Produits.....	19
2.3.2 Filières.....	21
3 Géologie du kaolin et des argiles kaoliniques	23
3.1 LA FORMATION DU KAOLIN ET DES ARGILES KAOLINIQUES.....	23
3.1.1 Le kaolin primaire.....	23
3.1.2 Le kaolin secondaire ou sédimentaire : les argiles kaoliniques.....	26
3.2 TYPOLOGIE DES GISEMENTS DE KAOLIN ET D'ARGILES KAOLINIQUES.....	26
3.2.1 Gisements primaires dans le monde.....	27
3.2.2 Gisements secondaires dans le monde.....	32
3.2.3 Les gisements français de kaolin et d'argiles kaoliniques.....	37
4 L'activité extractive du kaolin et des argiles kaoliniques en France	39
4.1 LOCALISATION DES CARRIÈRES ACTIVES.....	39
4.2 STATISTIQUES DES CARRIÈRES.....	40
4.3 RESSOURCES ET RÉSERVES PLAFONNÉES.....	42
4.4 QUELQUES EXEMPLES DE GISEMENTS DE KAOLIN ET D'ARGILES KAOLINIQUES EN FRANCE.....	44
4.4.1 Bassin de kaolin du Massif armoricain.....	44
4.4.2 Bassin des argiles kaoliniques des Charentes.....	47
4.4.3 Bassin des argiles kaoliniques de Provins.....	48
4.4.4 Bassin des argiles kaoliniques de Limagne.....	49
4.4.5 Bassin des argiles kaoliniques du Centre-Berry.....	50
4.4.6 Le kaolin du Massif central.....	52
4.4.7 Bassin du sud-est.....	53

4.4.8 Autres	55
4.5 CRITÈRES D'EXPLOITABILITÉ, MODES D'EXTRACTION ET PRINCIPES DE TRAITEMENT	59
4.5.1 Les critères d'exploitabilité : généralités.....	59
4.5.2 Les critères d'exploitabilité : détails par filières.....	59
4.5.3 Modes d'extraction.....	62
4.5.4 Prétraitement	63
4.5.5 Les principes de traitement.....	65
5 Filières industrielles du kaolin et des argiles kaoliniques.....	73
5.1 DOMAINES D'UTILISATION DANS L'INDUSTRIE	73
5.1.1 Charges minérales.....	73
5.1.2 Applications céramique et néocéramique.....	74
5.1.3 Matériaux réfractaires et isolants	76
5.1.4 Bétons et ciments	77
5.1.5 Applications en médecine et produits pharmaceutiques.....	77
5.1.6 Applications en cosmétique	77
5.1.7 Autres : alimentation animale, applications phytosanitaires, industrie gazière, etc.....	77
6 Marchés et prospectives	79
6.1 APERÇU DU MARCHÉ MONDIAL DU KAOLIN	79
6.2 MARCHÉ INTÉRIEUR : REVUE DES PRINCIPALES SOCIÉTÉS ET LEUR POSITIONNEMENT SUR LE MARCHÉ FRANÇAIS	79
6.2.1 Producteurs de kaolin en France	79
6.2.2 Producteurs d'argiles kaoliniques en France.....	81
6.3 COMMERCE EXTÉRIEUR DE LA FRANCE.....	82
6.4 ÉVOLUTION DES PRIX.....	83
7 Nouveau matériaux, coproduits et développement durable	85
7.1 LE MÉTAKAOLIN, ADDITIF-CLÉ DANS LES BÉTONS.....	85
7.2 LES COPRODUITS DES CARRIÈRES DE KAOLIN.....	86
8 Conclusions et perspectives	87
9 Références	89

Liste des figures

Figure 1 : Structure en feuillets des argiles observée au microscope électronique à balayage (Source : BRGM).....	12
Figure 2 : Structure cristallographique des minéraux argileux (Beauchamp, 2005).	14
Figure 3 : Principales phases de traitement pour passer des matériaux extraits à des produits commercialisables.....	20
Figure 4 : Principales filières des produits obtenus à partir de kaolin et d'argiles kaoliniques.	21
Figure 5 : L'évolution de l'altération météorique selon le climat (d'après Strakhov, 1967).	24
Figure 6 : Profil d'altération liés aux fluides météoriques, où la roche-mère va s'altérer pour donner la sapolite.....	24
Figure 7 : Carte des gisements primaires de kaolin sur granites et granodiorites du sud-ouest de l'Angleterre et principaux flux de matières en 2008 (Source : British Geological Survey).....	28
Figure 8 : Coupe géologique simplifiée du gisement de kaolin de Saint-Austell (Source : British Geological Survey).....	28
Figure 9 : Carrières de kaolin dans la région de Saint-Austell, Royaume-Uni (Source : www.historic-cornwall.org.uk).....	29
Figure 10 : Gisements de kaolin et d'argiles kaoliniques au Brésil où sont exploités notamment les champs pegmatitiques (Source : Wilson et al., 2006).	30
Figure 11 : Pegmatite kaolinisée des Monts d'Ambazac, Haute-Vienne (Source : BRGM).....	30
Figure 12 : Carrière de kaolin d'Échassières, Allier (Source : www.mineralienatlas.de © loismin).	31
Figure 13 : Gisement d'argiles kaoliniques de Hirschau-Schnaittenbach, Allemagne (Source : Amberger Kaolinwerke Eduard Kick GmbH & Co. KG).	33
Figure 14 : Carte de localisation des gisements de kaolin en Allemagne (Source : Dill <i>et al.</i> , 2016)...	33
Figure 15 : Carte de la "kaolin belt" aux Etats-Unis (Source : modifié d'après Harbon-Indus. Min.)...	35
Figure 16 : Les niveaux sédimentaires producteurs d'argiles kaoliniques aux États-Unis (Source : modifié d'après Harbon-Indus. Min.).....	35
Figure 17 : Carrière d'argiles kaoliniques à Sandersville en Géorgie, États-Unis (Source : sandersvillegeorgia.blogspot.com).	36
Figure 18 : Carte géologique simplifiée de la France avec la localisation des gisements potentiels (exploités ou non) de kaolin et d'argiles kaoliniques (Source : BRGM).....	38
Figure 19 : Carte des carrières actives de kaolin et d'argiles kaoliniques en France, 2017 (Source : BDCM-BRGM).	39
Figure 20 : Répartition des carrières autorisées de kaolin et d'argiles kaoliniques (Source : BDCM-BRGM).	40
Figure 21 : Répartition de la production de kaolin et d'argiles kaoliniques pour l'année 2017 (Source : BDCM-BRGM).	40
Figure 22 : Répartition des carrières de kaolin et d'argiles kaoliniques par bassin de production en 2017 (Source : BDCM-BRGM).....	41
Figure 23 : Nombre de carrières exploitant du kaolin et des argiles kaoliniques entre 2015 et 2030 (Source : BDCM-BRGM).....	42
Figure 24 : Productions autorisées (en kilotonnes) des carrières de kaolin et argiles kaoliniques entre 2017 et 2030, sur la base des autorisations actuelles (Source : BDCM-BRGM)....	43
Figure 25 : Production autorisées cumulées (en kilotonnes) des carrières de kaolin et argiles kaoliniques entre 2017 et 2030, sur la base des autorisations actuelles (Source : BDCM-BRGM).	43

Figure 26: Coupe géologique du gisement de Ploemeur (Source : d'après Imerys ; issu de Pouliquen, 2014).	45
Figure 27: Carrière de kaolin de Ploemeur, Morbihan (Source : BRGM).	45
Figure 28: Gisements de kaolin de Berrien et Loqueffret, Morbihan (Source : BRGM). Le complexe granitique de Huelgoat apparaît en couleur rouge.	46
Figure 29 : Carte géologique des carrières actives d'argiles kaoliniques du bassin des Charentes (Source : BRGM).	48
Figure 30 : Carte géologique des carrières actives d'argiles kaoliniques du bassin de Provins (Source : BRGM).	49
Figure 31 : Carte géologique des gisements de Lureuil et Tournon-Saint-Martin (Indre). Les argiles kaoliniques sont issues de l'altération des formations calcaires du Cénomaniens (en vert) et recouvertes par des formations sablo-argileuses du Tertiaire (en rose). Source : BRGM.	51
Figure 32 : Carte géologique du gisement de Gournay (carrière de Pongautron) dans l'Indre. La formation du Jurassique porteuse d'argiles kaoliniques est indiquée en bleu-violacé sur la carte (I _{4-j1}). Source : BRGM.	52
Figure 33: Carrière de kaolin de Beauvoir près d'Échassières, Allier (Source : BRGM).	53
Figure 34 : Carrière de sables kaoliniques près d'Hostun, Drôme (Source : Sibelco).	54
Figure 35 : Carte géologique des gisements de la région d'Hostun (Drôme). La formation géologique potentiellement porteuse en sables kaoliniques, d'âge Eocène est surlignée en rouge (Source : BRGM).	54
Figure 36 : Carte géologique du gisement de sables kaoliniques de Livry (Nièvre). La formation géologique porteuse est en orange avec des points rouges et noté t ₁₀ (Source : BRGM).	56
Figure 37 : Carte géologique du gisement à sables kaoliniques de Fumel (Lot-et-Garonne). La formation géologique porteuse est en orange et notée e ₅₋₆ (Source : BRGM).	57
Figure 38 : Coupe géologique dans l'ancienne carrière du Brétou où apparaissent les niveaux à argiles kaoliniques du Tertiaire exploités à Fumel (Source : BRGM).	58
Figure 39 : Exploitation de kaolin à Ploemeur. Ce site fournit du kaolin pour l'industrie papetière, la production de céramique et d'émail, de charges industrielles, et de composés pour fibres de verre (Source : BRGM).	60
Figure 40 : Pelle mécanique manipulant le kaolin en attente de traitement à Ploemeur (Source : BRGM).	62
Figure 41 : Usine de traitement à Ploemeur (Source : BRGM).	63
Figure 42 : Production de kaolin par voie humide (Source : d'après Imerys et Pouliquen, 2014).	64
Figure 43 : Hydrocyclones emboîtés à l'usine de traitement de la carrière d'Échassières (Source : BRGM).	65
Figure 44 : Kaolin extrudé et séché (Source : Imerys).	66

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les différents types d'argiles et leurs caractéristiques.	14
Tableau 2 : Les différents gisements de kaolin et d'argiles kaoliniques en France (Source : BRGM).	38
Tableau 3 : Divers exemples de calcination suivant les filières.	69
Tableau 4 : Spécifications pour les produits standards de qualité « couchage » pour l'industrie du papier (Source : Elzea Kogel J., 2002).	73

1 Introduction

La réactualisation du mémento sur le kaolin et les argiles kaoliniques a été menée dans le cadre de la Convention 2017 n° 2102186360, signée le 20 juillet 2017 entre la Direction de l'Eau et de la Biodiversité (DGALN/DEB) du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (MTES) et le BRGM-Service géologique national.

1.1 CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Cette étude a été réalisée par l'unité Ressources Minérales de la Direction des Géoressources du BRGM, afin de réactualiser le précédent mémento (rapport BRGM 88-SGN-676-GEO) réalisé en 1988. Ce mémento permet de faire un état des carrières en activité, des utilisations et des marchés en France à fin 2017.

A également contribué à l'étude F. Béquet (stagiaire de l'Institut polytechnique La Salle-Beauvais, projet Base de Données Carrières et Matériaux en 2016) pour l'inventaire des carrières et des sites d'extraction et de production de kaolin et d'argiles kaoliniques et pour certaines utilisations des produits de transformation.

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 (BDCM), qui est alimentée en continu selon les nouvelles informations recueillies ;
 - les statistiques douanières du commerce extérieur concernant le kaolin et les argiles kaoliniques 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 kaolin et les argiles kaoliniques), sur les sites des syndicats professionnels, ainsi que ceux d'organismes scientifiques.
- Cependant, malgré l'utilisation de l'ensemble des sources d'information disponibles, cette étude n'est pas en mesure de garantir l'exhaustivité ni l'exactitude absolue des données collectées.

2 Définitions

2.1 SUBSTANCES : MINÉRAUX, ROCHES ET MATÉRIAUX ARGILEUX

Souvent utilisé dans la vie courante, le terme « argile » n'est pas évident à définir car il reflète plusieurs aspects.

Ainsi, l'argile sur le plan scientifique peut être considérée selon plusieurs critères :

- minéralogique ;
- propriétés physico-chimiques (granulométrie, imperméabilité) ;
- origine (nature de la roche, mode de formation).

2.1.1 Définition des argiles

La structure cristalline des silicates résulte de l'affinité du silicium pour l'oxygène conduisant à une unité structurale de type ionique ayant la forme d'un tétraèdre centrée sur le silicium. Le groupe $[\text{SiO}_4]^{4-}$ porte quatre charges négatives. Cette entité ionique acquiert une neutralité électrique, soit par regroupement de plusieurs entités du même type, soit par association avec des ions positifs. La très grande stabilité des silicates résulte de cette entité structurale ionique $[\text{SiO}_4]^{4-}$ tétraédrique. Cet ion est un des plus solides connus mais ne peut pas subsister durablement seul à l'état ionique.

L'association de plusieurs unités tétraédriques $[\text{SiO}_4]^{4-}$ conduit à la formation de silicates filiformes, annulaires, plans ou tridimensionnels et sont traditionnellement classés selon différentes familles minéralogiques :

- **inosilicates** : tétraèdres associés en chaîne ou rubans (pyroxène, amphibole, etc.) ;
- **cyclosilicates** : structure composée d'anneaux isolés avec 3, 4 ou 6 tétraèdres (béryl, cordiérite, diopase, tourmaline, etc.) ;
- **sorosilicates** : deux tétraèdres sur un même sommet formant un groupe $[\text{Si}_2\text{O}_7]^{6-}$ (épidote, etc.) ;
- **néosilicates** : tétraèdres sans sommet en commun, ils sont liés à d'autres entités polyédriques. Les anions appartiennent aux tétraèdres (grenat, zircon, etc.) ;
- **tectosilicates** : tétraèdres ayant un sommet en commun (quartz, tridymite, cristobalite, feldspath, zéolite, etc.) ;
- **phyllosilicates** (du grec *phylon*, « feuille »): trois sommets sur quatre sont en commun : un feuillet bidimensionnel en général plan (kaolinite, smectite, talc, chlorite, mica, pyrophyllite et serpentine sont formés sur la base de cette enchaînement de plans de tétraèdres).

Les argiles sont des minéraux se présentant sous la forme de feuillets à l'échelle microscopique, d'où leur nom « phyllites » (Figure 1). Ils appartiennent donc, comme les micas au groupe des phyllosilicates. Chaque cristal est composé de quelques centaines de feuillets empilés, de taille nanométrique. C'est la structure du feuillet élémentaire qui caractérise l'espèce minérale. Chaque feuillet est composé de deux, trois ou quatre couches.

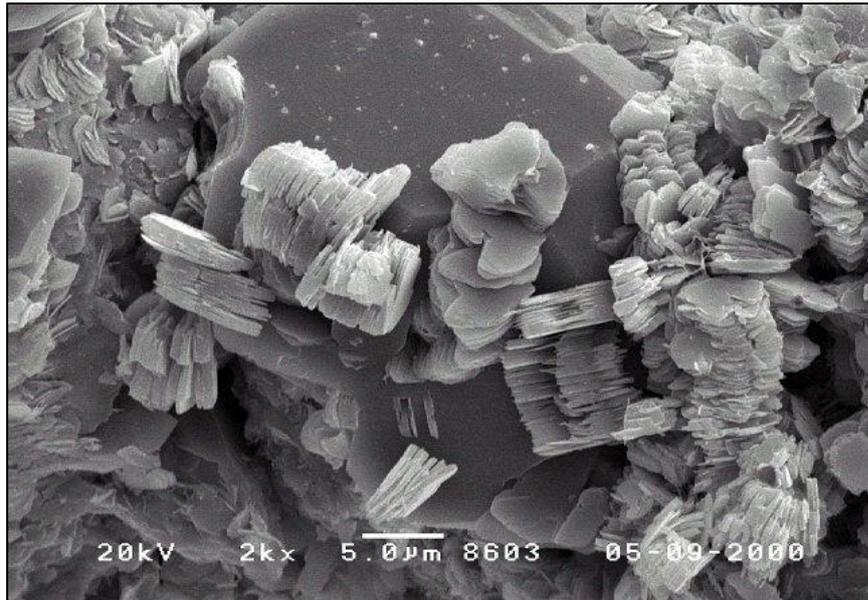


Figure 1 : Structure en feuillets des argiles observée au microscope électronique à balayage (source : BRGM).

Les argiles possèdent un réseau cristallin parfaitement organisé en feuillets. Les éléments oxygène, aluminium, magnésium, potassium sont présents à l'état ionique. Ces ions sont des sphères arrangées entre elles comme des pièces d'un jeu de construction et maintenus ensemble par des forces électrostatiques. Certains ions peuvent être substitués. Chaque type d'association représente un groupe de minéraux argileux. Sachant en outre que le silicium, l'aluminium et le fer sont parfois interchangeables, sans modifier la structure, plusieurs espèces minérales sont donc présentes. Six grands groupes de minéraux argileux sont distingués ainsi que plus d'une cinquantaine d'espèces.

En fonction des rayons ioniques, les substitutions les plus fréquentes pour les phyllosilicates sont :

- Si^{4+} par Al^{3+} en position tétraédrique, le rayon de Al^{3+} permet également l'occupation d'un site octaédrique ;
- Si^{4+} peut aussi être remplacé par Fe^{3+} et Ti^{4+} ;
- Mg^{2+} , Fe^{2+} et Mn^{2+} peuvent se substituer.

Le terme « argiles » ne reflète pas totalement la nature cristallographique très particulière de ces minéraux. Dans les conditions normales de température et de pression, les argiles contiennent de l'eau dans leur structure, entre les feuillets. C'est la raison pour laquelle les minéralogistes ont développé le terme de « phyllosilicates hydratés » représentant mieux la nature de ces minéraux (Rastureau, 2011).

On a pour habitude de nommer « argiles » des minéraux qui ont certaines capacités comme le gonflement, la sorption de l'eau, ou encore le passage à l'état de boue. En réalité, de nombreux gisements sont constitués par des mélanges de minéraux dont les argiles que les spécialistes nomment « minéraux argileux » pour les distinguer de la roche. C'est par exemple le cas pour la distinction entre le kaolin (roche) et la kaolinite (minéral). Les roches argileuses sont donc constituées par une prédominance en minéraux argileux mais souvent en association avec plusieurs types d'argiles et d'autres minéraux.

Les six premiers groupes sont constitués par des minéraux en feuillets (Figure 2 et Tableau 1) :

- les minéraux de la famille de la **kaolinite** : kaolinite, halloysite, dickite et nacrite sont des minéraux à deux couches. Une couche tétraédrique à cœur de silicium et une couche octaédrique à cœur d'aluminium. La formule chimique structurale est $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{H}_2\text{O})_2$. L'équidistance interfoliaire est de 7 Å (Koneshloo, 2007). La kaolinite est utilisée pour blanchir le papier et pour la fabrication de la porcelaine ;
- les **illites** (du nom de l'état américain de l'Illinois), sont des minéraux à trois couches constituées de trois couches d'octaèdres à cœur d'aluminium positionnées entre deux couches tétraédriques à cœur de silicium. La formule chimique structurale des illites est $\text{KAl}_2(\text{OH})_2(\text{AlSi}_3(\text{O.OH})_{10})$. L'espace interfoliaire est de 10 Å ;
- les **smectites** (du grec *mectos* « je nettoie »), ou la famille des **montmorillonites** (de Montmorillon, dans le département de la Vienne) sont structurées selon le même schéma que les illites, soit trois couches. La formule chimique des smectites est $\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{22}(\text{H}_2\text{O})_2(\text{H}_2\text{O})_n$. L'espace interfoliaire est de 14 à 17 Å. Dans ce groupe, les feuillets sont minces et peu reliés entre eux, d'où la possibilité d'association avec l'eau et la matière organique dans l'espace interfoliaire, d'où le terme d'argile gonflante. ;
- la **bentonite** est une argile colloïdale dont le nom vient de Fort Benton dans le Wyoming aux États-Unis. Connue aussi sous le terme de « terre à foulon », elle peut être considérée comme une smectite, essentiellement constituée de montmorillonite $(\text{Na,Ca})_{0.33}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_n$ (80%), ce qui explique sa capacité de rétention d'eau ;
- le groupe des **chlorites** (du grec *chloros* « vert-jaune pâle ou jaune clair », couleur du chlore à l'état gazeux). Ce sont les argiles vertes pour des emplois médicaux divers. Les feuillets sont étroitement reliés les uns aux autres par des groupements hydratés de magnésium, d'aluminium et de fer. L'espace interfoliaire atteint 14 Å ;
- les **vermiculites** tirent leur nom de leur aspect de petits vers, après chauffage (*vermiculus*, « petit vers » en latin). L'eau contenue entre leurs feuillets peut être éliminée par chauffage à plus de 300°C. L'espace interfoliaire se réduit alors de 14 à 10 Å. Ce sont les argiles utilisées dans le bâtiment comme isolants.

Espèce minérale	Formule chimique	Nombres de couches	Taille de l'espace interfoliaire	Type
Kaolinite	$\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{H}_2\text{O})_2$	Minéraux à 2 couches	7 Å	non gonflante
Illite	$\text{KAl}_2(\text{OH})_2(\text{AlSi}_3(\text{O},\text{OH})_{10})$	Minéraux à 3 couches	10 Å	non gonflante
Smectite ou montmorillonite	$\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{22}(\text{H}_2\text{O})_2(\text{H}_2\text{O})_n$	Minéraux à 3 couches	10 et 17,5 Å	gonflante
Bentonite	$(\text{Na},\text{Ca})_{0.33}(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_n$	Minéraux à 3 couches		gonflante
Chlorite	$(\text{Fe},\text{Mg},\text{Al})_6(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	Minéraux à 3 couches	14 Å	gonflante
Vermiculite	$(\text{Mg},\text{Ca})_{0.7}(\text{Mg},\text{Fe},\text{Al})_6(\text{Al},\text{Si})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_4.8\text{H}_2\text{O}$	Minéraux à 2 couches	14 à 10 Å	gonflante

Tableau 1 : Les différents types d'argiles et leurs caractéristiques.

La Figure 2 présente la structure cristallographique des différents minéraux argileux.

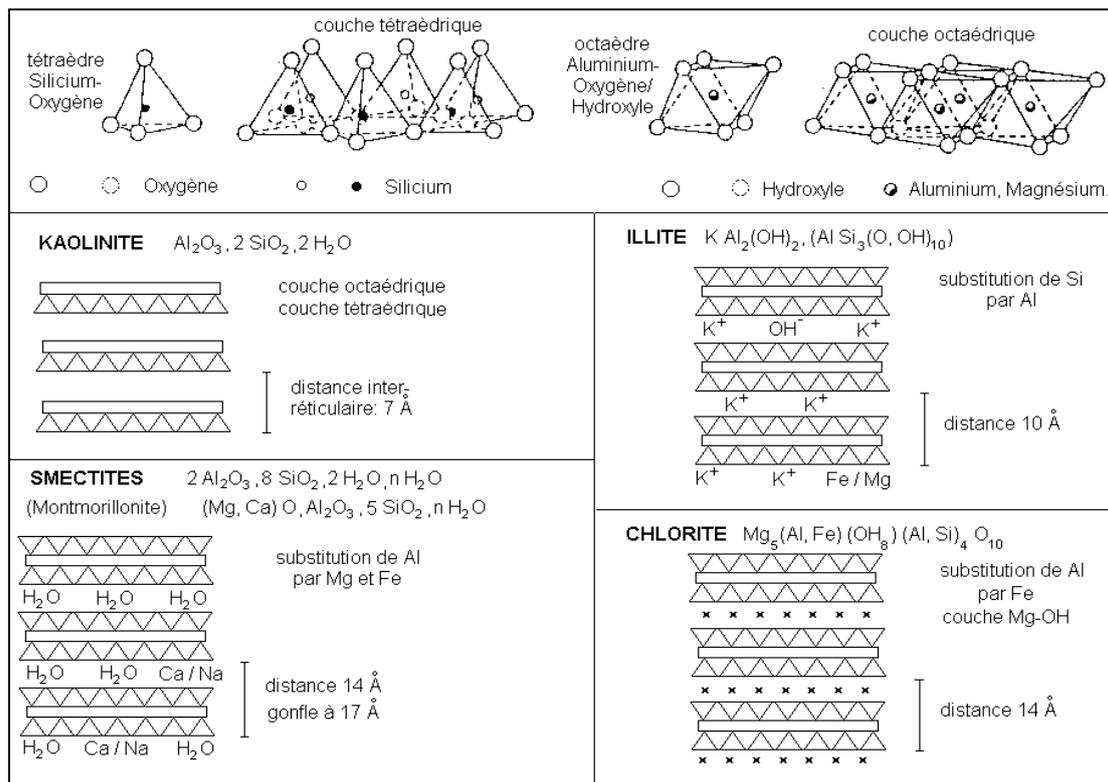


Figure 2 : Structure cristallographique des minéraux argileux (Beauchamp, 2005).

2.1.2 Origines des argiles

Les minéraux argileux ne se forment pas dans les roches magmatiques ou métamorphiques associées à la géodynamique interne du globe. Les minéraux argileux sont associés à la géodynamique externe du globe et notamment aux roches sédimentaires, mais également aux altérites issues de l'altération de n'importe quel type de roche, y compris magmatique et métamorphique. Les minéraux argileux se forment donc à la surface de la croûte terrestre.

Les argiles sont des minéraux d'altération et détritiques issus de la réaction suivante :

silicates parentaux (quartz, feldspath, pyroxène, amphiboles, etc.) + eau de percolation → silicates stables (quartz) ou incomplètement altérés (feldspath) + minéraux secondaires (minéraux argileux et hydroxydes de Fe et Al) + solutions enrichies en ions (Kornmann, 2005).

Suivant la roche-mère initiale (basique ou acide), les conditions climatiques (chaud et humide), et la topographie (cuvette ou sommet) qui commandent le drainage, différents types d'argiles vont se former (Kornmann, 2005).

Différences entre roches argileuses et minéraux

Les roches argileuses contiennent au minimum 50 % de minéraux silico-alumineux. Souvent, plusieurs minéraux viennent s'ajouter aux minéraux argileux dans la roche argileuse, sables (quartz) et silicates (feldspath, mica), carbonates, oxydes et hydroxydes, sels solubles, matériaux ferrifères et matière organique.

Les roches argileuses sont abondantes dans la croûte terrestre. Ce sont des roches sédimentaires continentales ou marines. Ces roches sont tendres, rayables à l'ongle, fragiles à l'état sec, formant une pâte plastique une fois hydratées et durcissant à la cuisson. Ces roches peuvent être disposées en couches épaisses ou alternées avec d'autres couches (ex : calcaire, marne, grès, etc.). Du fait de leur imperméabilité, elles jouent un grand rôle dans la circulation et l'accumulation de divers fluides (ex : eau, pétrole, gaz).

Ces minéraux se rencontrent rarement de façon isolée, mais dans des roches composées d'un mélange de minéraux typiques des argiles et d'autres minéraux ou matériaux associés (quartz, oxydes de fer, calcite, débris végétaux).

Trois origines des minéraux argileux sont classiquement définies :

1) L'héritage

Par ce terme, on désigne simplement les minéraux argileux présents dans une roche, et que l'altération libère intacts, sans modification, dans le sol ou les formations détritiques résultantes, ou des argiles formées à partir d'une autre roche et accumulées dans celle étudiée.

Libération

Roche-mère → argiles

Cependant, il est rare que les minéraux argileux n'aient réellement subi aucune modification, même limitée.

2) Les transformations

Des minéraux formés auparavant, ou apportés d'ailleurs, subissent des réarrangements de leur réseau cristallin. Ils évoluent ainsi vers un nouvel état d'équilibre, avec les conditions locales du milieu dans lequel ils sont inclus.

On distingue dans ces transformations : la dégradation, c'est-à-dire les processus allant dans le sens de l'altération, autrement dit de l'apparition d'une structure cristalline moins régulière, et d'une perte de matière. C'est un processus commun dans les sols.

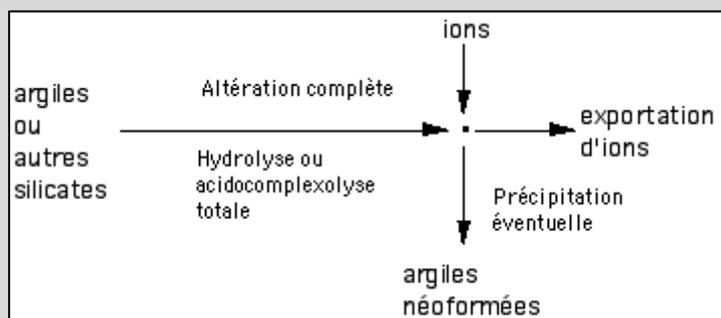
Le processus inverse est l'agradation, et se rencontre dans les systèmes sédimentaires, impliquant souvent des augmentations de température et de pression.

(Remarque : ne pas confondre l'agradation, ici définie, et l'aggradation (avec deux g), qui est un mode de croissance des systèmes sédimentaires au cours du temps, défini par la stratigraphie séquentielle, correspondant à un équilibre entre le volume des apports sédimentaires et l'espace disponible dans le bassin).

Dégradation →
Argiles ou autres silicates ↔ argiles
← Agradation

3) La néogenèse (ou authigenèse)

Ce processus correspond à une réorganisation complète de la structure cristalline. Elle intervient lorsqu'une argile est formée à partir de certains silicates, comme l'amphibole, le péridot, ou le feldspath.



2.1.3 Kaolin et argiles kaoliniques

En Chine, il y a 1 800 ans, ont été fabriquées les premières porcelaines à partir de matériaux altérés de granite d'une butte appelée « Kao Ling » (haute colline), près de Jingdezhen dans la province du Jiangxi. En anglais, le terme kaolin est souvent mentionné « *China clay* ».

L'usage du kaolin en Europe débute à partir du XVII^e siècle, d'abord pour la céramique, avant de s'étendre à l'industrie papetière (qui est le principal usage actuel), aux réfractaires, aux charges en peinture, aux plastiques, au caoutchouc, à la fibre de verre.

Le kaolin résulte essentiellement de l'altération de roches riches en feldspaths, principalement des roches acides (granite, granodiorite, pegmatite). Les produits de cette altération restent sur place : c'est le « kaolin résiduel », aussi appelé « kaolin primaire ». Dans le cas où les produits d'altération subissent un transport puis un dépôt, on parle de « kaolin sédimentaire » ou « kaolin secondaire ». Ces derniers représentent la majeure partie des réserves.

Dans le présent rapport, il sera fait mention de « kaolin » pour les gisements primaires (développés *in situ*) et d'« argiles kaoliniques » pour les gisements secondaires ayant subi un dépôt précédé d'une érosion et d'un transport.

Le kaolin et les argiles kaoliniques sont souvent cités dans la littérature comme des « argiles nobles », par opposition aux « argiles communes » regroupant les autres types d'argiles.

Minéralogie et pétrographie du kaolin et des argiles kaoliniques

La kaolinite, de formule $Al_4[Si_4O_{10}(OH)_8]$ ou $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ est le principal constituant du kaolin et des argiles kaoliniques. Ce minéral fait partie de la classe des phyllosilicates, ou silicates en feuillets, et cristallise dans le système triclinique. Le plus souvent, la kaolinite se présente sous la forme de plaquettes pseudo-hexagonales de la taille du micron, qui peuvent s'empiler sous la forme de livres ou de vermicules atteignant de 50 à 100 µm d'épaisseur.

Il existe deux formes polymorphes du système monolitique, la dickite et la nacrite (beaucoup plus rares et mieux cristallisées). L'hallowysite de formule chimique $Al_4[Si_4O_{10}(OH)_8] \cdot 4H_2O$ est la forme hydratée de la kaolinite et cristallise dans le système monoclinique, sous la forme de cristaux tubulaires microscopiques (1-5 µm).

La kaolinite possède une structure en feuillets particulière, sans ion alcalin, lessivés lors de la siallisation. La siallisation correspond à une lente transformation des minéraux contenus dans les roches riches en argile ; cette altération a lieu sous climats continental et tempéré. Le feuillet élémentaire de ce minéral, de type 1/1, est formé de deux couches :

- une couche tétraédrique (T) composé de silice au centre du tétraèdre et d'atomes d'oxygène aux sommets ;
- une couche octaédrique (O) composée d'alumine avec les atomes d'aluminium au centre, les ions OH à l'extérieur et les atomes d'oxygène mis en commun avec les tétraèdres et les octaèdres voisins.

La structure en feuillets peut avoir des défauts de structure et conduire à des substitutions d'éléments chimiques fréquentes.

La kaolinite est souvent associée à des minéraux secondaires et accessoires, présents en plus ou moins grande quantité selon la qualité originelle du matériau et le traitement industriel appliqué. Parmi ces minéraux secondaires et accessoires, on retrouve :

- le quartz, principal minéral accompagnateur de la kaolinite, issu de la roche-mère. Très résistant, le quartz demeure souvent résiduel après les processus d'altération ou de transport, et certains grains peuvent même se néoformer au cours du processus de siallisation. La proportion en quartz dans le produit final dépend donc largement de l'efficacité du traitement industriel ;
- les micas, autres minéraux majeurs accompagnateurs de la kaolinite. Bien que la biotite s'altère pour donner de la kaolinite et/ou de la vermiculite, goethite et anatase, d'autres micas comme la muscovite, la séricite ou la lépidolite sont beaucoup plus résistants ;
- les feldspaths, en relique dans les parties profondes du profil d'altération dans la zone de transition avec la roche-mère en milieu tropical. Cependant, en domaine tempéré, les feldspaths demeurent et forment par dépôt des arkoses ;
- les oxydes et hydroxydes de fer (goethite, magnétite), de titane (anatase, ilménite, rutile) et de manganèse (pyrolusite, psilomélane) sont toujours présents dans le kaolin et les argiles kaoliniques ;
- les oxydes ou silicates, réfractaires : zircon, tourmaline, monazite, spinelle, corindon, cassitérite, chromite, colombo-tantalite, etc. ;
- les argiles communes (illite, montmorillonite) dans certains cas ;
- la gibbsite, présente principalement en haut de profil d'altération.

Propriétés physico-chimiques du kaolin et des argiles kaoliniques

Le kaolin et les argiles kaoliniques sont des roches argileuses au sein desquelles la kaolinite est la phase minérale prédominante. D'autres minéraux peuvent s'y associer dans des proportions variables, influençant directement les propriétés de cette argile, tels que l'illite (fondant), la smectite (améliore la plasticité) ou les hydrates d'alumine (améliore le caractère réfractaire).

La kaolinite possède une densité de 2,6 pour une dureté d'environ 2,5 sur l'échelle de Mohs. Onctueuse au toucher et mat à l'éclat, la kaolinite absorbe facilement l'eau et devient plastique. La surface spécifique de la kaolinite demeure limitée (<20 m²/g), tout comme sa capacité d'échange ionique (3-6 méq./100 g), ce qui la rend relativement inerte chimiquement, étant seulement soluble à chaud dans de l'acide sulfurique. Ce minéral est en revanche un bon réfractaire et fond entre 1 750 et 1 800 °C. Avant sa fusion, différentes transformations interviennent avec la formation de métakaolin à partir de 580 °C, puis de spinelle (Si₃Al₄O₁₂) à partir de 980 °C, et enfin en mullite (Si₂Al₆O₁₃) et en cristobalite (SiO₂) au-delà de 1 100 °C.

2.2 RESSOURCES / RÉSERVES

En France, les gisements argileux sont de plusieurs natures en fonction des argiles exploitées :

- argiles kaoliniques et kaolin : exploités pour les industries céramiques, les charges, etc. ;
- argiles smectitiques : 195 carrières sur l'ensemble du territoire. Ces argiles du même groupe que les montmorillonites ont un usage différent en briques et tuiles ;
- argiles montmorillonitiques : 1 carrière exploitée dans la Vienne avec des usages en boue de forage, fonderie, absorbant et pharmacie ;
- argiles bentonitiques : 5 carrières exploitées sur le territoire.

En fait, il y a rarement des gisements avec une seule argile présente. Il s'agit souvent de gisements comportant plusieurs types d'argiles.

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'extraction, etc.

La production de kaolin française ne représente que 1,8 % du marché international (Chapitre 6) avec une production annuelle réelle de l'ordre de 400-450 kt mais avec une production annuelle autorisée de plus de 2 millions de tonnes. La différence importante entre la production annuelle autorisée et la production annuelle réelle n'a pu être expliquée à travers les informations recueillies dans cette étude. Les gisements français sont souvent soumis à des contraintes de différentes natures (environnementales, conflits d'usages, occupations agricoles ou urbaines, AEP, etc.) qui limitent souvent l'ouverture ou le renouvellement des exploitations.

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

2.3 PRODUITS ET FILIÈRES

2.3.1 Produits

Les kaolins et argiles kaoliniques étant des produits d'altération, ils sont généralement proches de la surface. Ils sont donc la plupart du temps exploités à ciel ouvert, par pelle hydraulique ou dumper ou convoyeur à bande. Contrairement à la technique du monitor (abattage hydraulique à haute pression) plus ancien et moins utilisé aujourd'hui, l'utilisation de la pelle hydraulique permet une meilleure tenue du gisement pour la récupération des sables. Après l'extraction, les matériaux kaoliniques subissent plusieurs transformations aboutissant à des produits commercialisables (Figure 3) sous forme de chamotte, de kaolins extrudés (en nouille, en poudre), de kaolins délamés ou de kaolins en galette.

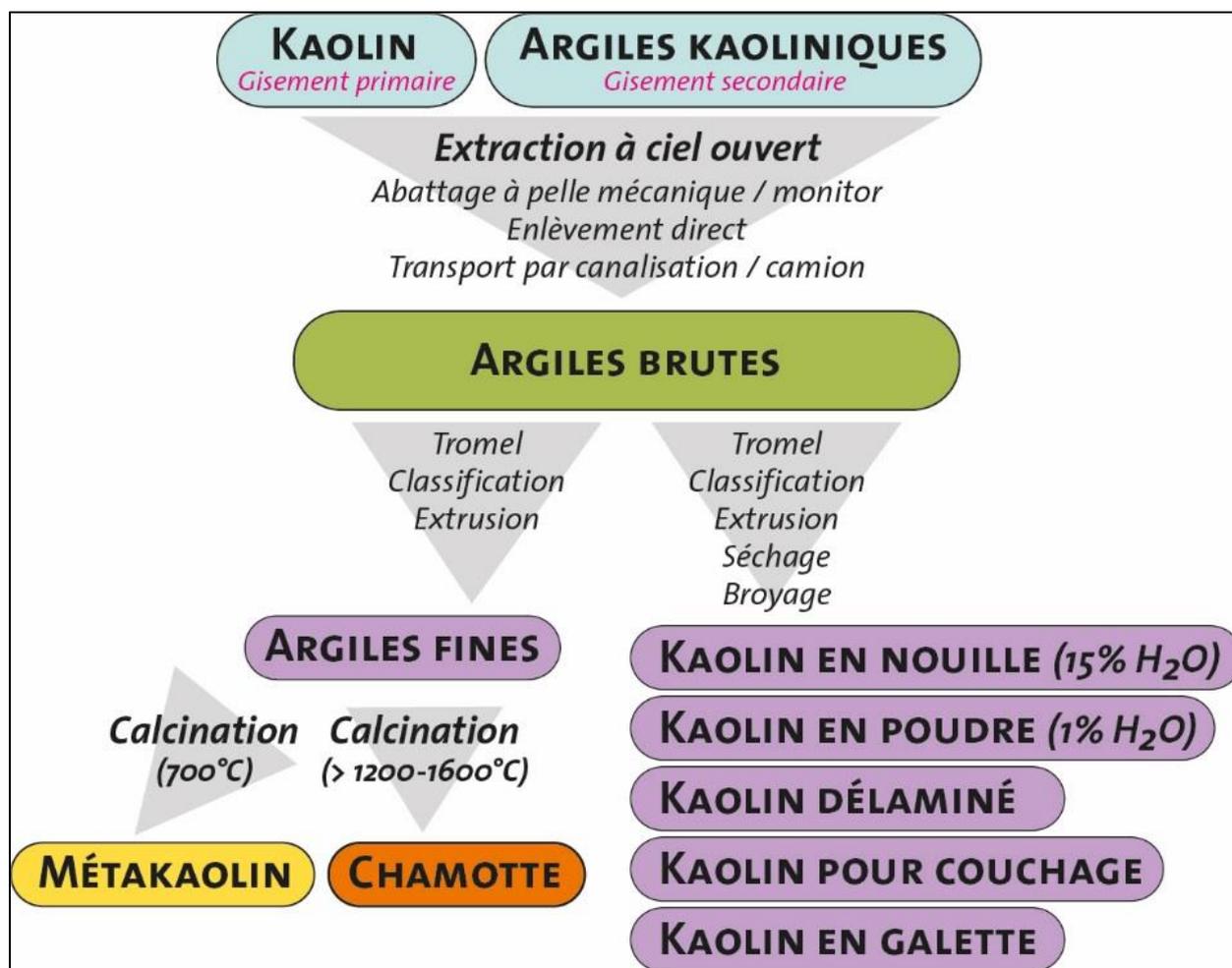


Figure 3 : Principales phases de traitement pour passer des matériaux extraits à des produits commercialisables.

Argiles brutes : argiles obtenues après l'extraction et le transport vers l'usine de transformation.

Chamotte : argile brute cuite à une température de 1 300-1 400 °C, broyée et tamisée.

Métakaolin : obtenu par calcination à 700 °C d'une argile fine.

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 la réalisation d'un produit fini ou d'un service. Chaque filière constitue une chaîne d'activités qui se complètent, liées entre elles par des opérations d'achats et de ventes et représentées par un certain nombre d'acteurs depuis l'extraction de matières premières et leur transformation, en amont, jusqu'à la distribution et aux services liés aux produits, en aval.

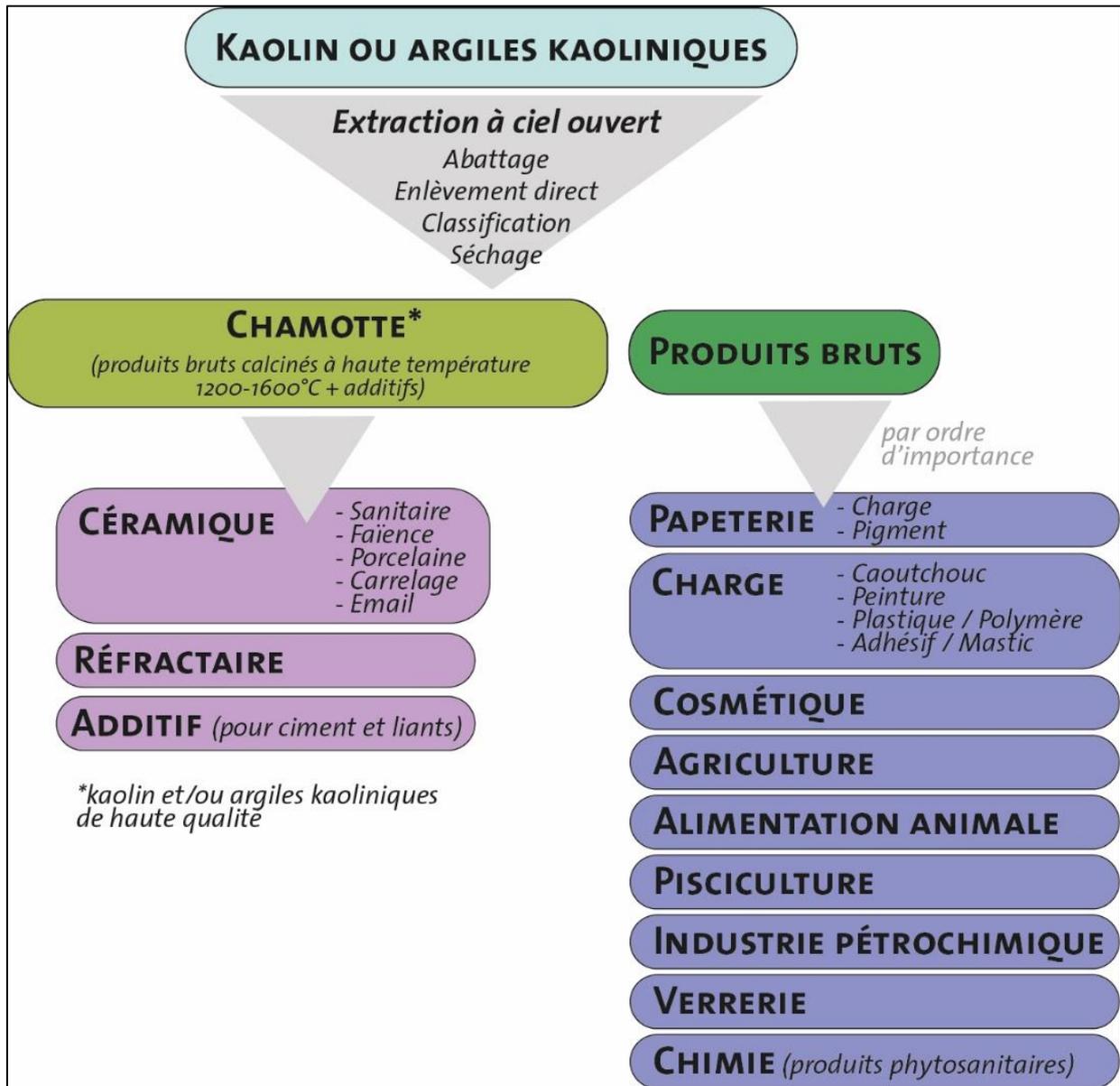


Figure 4 : Principales filières des produits obtenus à partir de kaolin et d'argiles kaoliniques.

La Figure 4 synthétise les différents usages possibles des produits kaoliniques en fonction de leur traitement.

3 Géologie du kaolin et des argiles kaoliniques

3.1 LA FORMATION DU KAOLIN ET DES ARGILES KAOLINIQUES

La kaolinite, de formule chimique $Al_4(OH)_8Si_4O_{10}$, comme tout minéral argileux se forme aux dépens des roches de la croûte terrestre, au cours de processus d'altération physico-chimique complexes (voir parties précédentes).

La kaolinite se forme généralement par l'hydrolyse des cristaux de feldspath et de certains minéraux silicatés ferromagnésiens comme la biotite. Lors de ce processus, il y a (1) une solubilisation des éléments alcalins et alcalino-terreux (K, Na, Ca), lixiviables, (2) la formation d'hydrates d'alumine $Al(OH)_3$ et de silice $Si(OH)_4$, ainsi que (3) la formation d'hydroxydes et oxydes de Fe et Ti insolubles. Les hydrates d'alumine et de silice réagissent pour former des argiles, cette réaction étant connue sous le nom de siallisation.

- cas de l'orthose : $4 KAlSi_3O_8 + 22 H_2O \rightarrow Al_4Si_4O_{10}(OH)_8 + 8 H_4SiO_4 + 4 (K^+OH^-)$
- cas de l'albite : $4 NaAlSi_3O_8 + 22 H_2O \rightarrow Al_4Si_4O_{10}(OH)_8 + 8 H_4SiO + 4 (Na^+OH^-)$

Il se trouve que dans certains cas, les plagioclases sodiques (albite) sont plus facilement altérés que les feldspaths potassiques, c'est le cas pour les gisements britanniques.

L'altération du feldspath qui conduit à la cristallisation de la kaolinite s'accompagne d'une perte d'environ 30 % de volume du produit initial. L'altération est issue de la circulation de fluides au sein de la croûte terrestre qui proviennent essentiellement de deux sources : les eaux météoriques (froides et de surface) et les fluides hydrothermaux (chauds >150 °C, profonds et à une pression élevée) chargés en agents volatils (F, Cl, CO_2 , SO_2).

Deux grands types de kaolin sont classiquement décrits dans la littérature :

- le **kaolin primaire** (issu de processus *in situ* liés à des fluides météoriques et/ou hydrothermaux) ;
- le **kaolin secondaire** (ou sédimentaire) suivant le modèle classique source, transport et dépôt. Dans le présent mémento, il s'agit des argiles kaoliniques.

3.1.1 Le kaolin primaire

Les gisements primaires sont les dépôts résiduels provenant de **l'altération en place**, de roches silico-alumineuses, essentiellement les roches quartzo-feldspathiques acides (ex : granites, leucogranites, granodiorites, rhyolites, dacites, trachytes, migmatites, gneiss). L'altération se fait par les fluides météoriques et/ou hydrothermaux. Les roches basiques, plus pauvres en silice et malgré tout riches en feldspaths conduisent le plus souvent à la formation de smectite ou de sépiolite-palygorskite. Quant aux roches sous-saturées en silice comme les roches ultrabasiques, hyperalcalines ou hyperalumineuses, elles ne donnent pas de kaolinite.

Il faut mentionner le cas particulier de l'altération des arkoses (roche sédimentaire) qui va suivre le même schéma que l'altération des granites riches en feldspath, la distinction entre kaolin primaire et secondaire devenant ici inappropriée.

Les fluides hydrothermaux de haute température (>150 °C), circulant à des pressions élevées et chargés en éléments volatils (F, Cl, CO_2 , SO_2) permettent l'altération des roches préexistantes mais ne permettent pas la formation de masses importantes de kaolin. La

kaolinite se retrouve fréquemment avec le quartz dans la gangue des filons et aux épontes de l'encaissant silicaté. La surpression de fluides hydrothermaux, en profondeur, à la périphérie de plutons granitiques peut permettre une fracturation intense qui par la suite favorisera la circulation des fluides météoriques au sein du profil d'altération, et donc la formation de kaolinite. C'est le cas des gisements du Massif armoricain (France) et des Cornouailles (Royaume-Uni) où les principaux gisements se situent en périphérie de massifs granitiques d'âge hercynien sous couverture de schistes et de quartzites. Il est donc admis que l'altération par des fluides hydrothermaux et l'altération par les eaux météoriques vont souvent de pair et se superposent dans la plupart des gisements primaires de kaolin.

L'altération météorique avec la circulation de fluides de surface (eau de pluie) est largement liée à plusieurs facteurs comme la géochimie, la fracturation et la texture de la roche-mère, la pluviométrie, la température, les saisons plus ou moins marquées, la topographie, le couvert végétal et l'activité biologique dans les sols. Selon tous ces facteurs, le profil d'altération qui se développe va varier et la nature des minéraux argileux formés aussi (Figure 5).

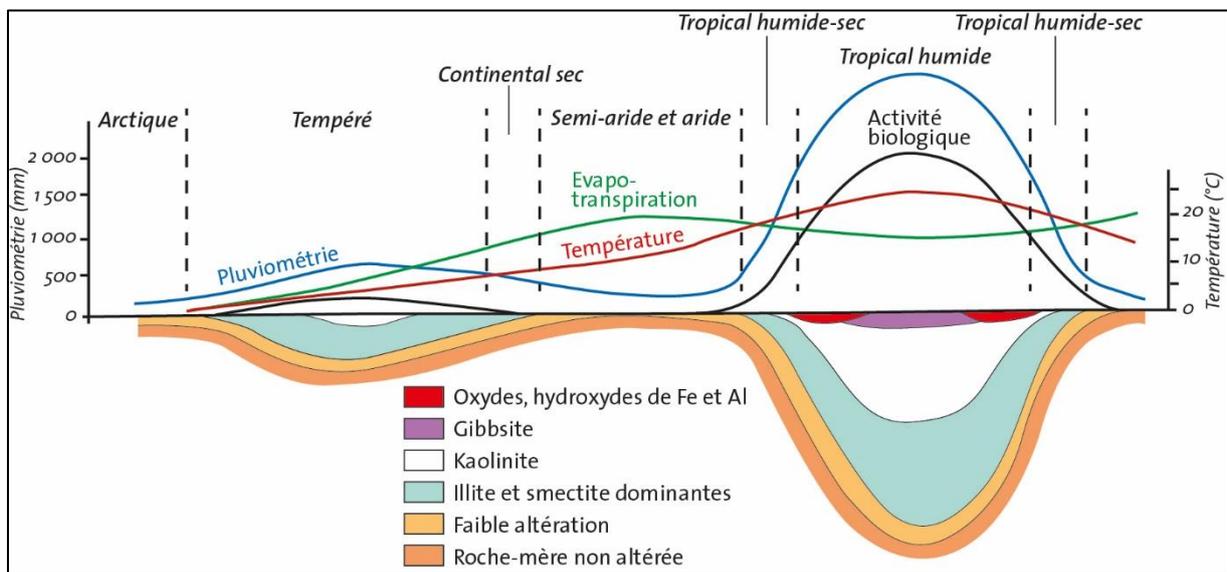


Figure 5 : L'évolution de l'altération météorique selon le climat (d'après Strakhov, 1967).

L'altération par des eaux météoriques permet le développement d'un profil d'altération à partir d'une roche-mère qui va progressivement s'altérer pour donner la saprolite qui avec le sol constitue le régolithe (Figure 6).

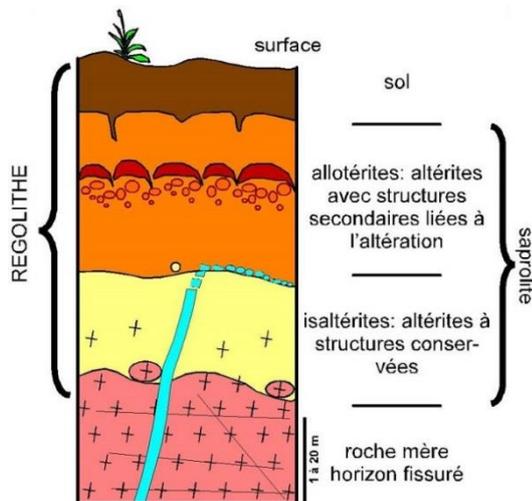


Figure 6 : Profil d'altération liés aux fluides météoriques, où la roche-mère va s'altérer pour donner la saprolite.

Si la température et la pluviométrie sont des éléments essentiels au processus d'altération, le degré de fracturation de la roche-mère est tout aussi capital puisqu'il conditionne la perméabilité et donc la capacité d'infiltration et de lessivage des fluides météoriques au sein de la roche-mère. Ainsi, une roche massive s'altérera beaucoup moins vite qu'une roche fracturée et poreuse. Des cendres et tufs volcaniques, tout comme les granites à gros grains subiront ainsi une kaolinisation plus rapide.

Selon le climat et la nature des sols, les eaux météoriques sont plus ou moins chaudes, de pH variable (5 à 8), chargées en CO₂ et autres agents actifs, en acides organiques liés à l'activité biologique dans les sols (acide oxalique, formique et acétique) et en microorganismes. Un climat désertique, sans précipitation, ne permettra pas d'altération chimique, et sous climat froid, l'altération demeure limitée. Les climats tempérés permettent une altération modérée avec l'hydrolyse des feldspaths et des biotites, mais le lessivage demeure incomplet et conduit seulement à la formation d'illite et de smectite au cours de la réaction dite de bisiallisation (Figure 5). Un climat plus chaud (>25 °C) et plus humide (>1 500 mm de précipitations) conduit à une altération plus intense, l'hydrolyse des feldspaths et des biotites devenant totale, amenant même à une solubilisation partielle du quartz. Le processus de kaolinisation peut alors débuter, il s'agit de la monosiallisation. Dans le cas d'une altération plus extrême, le taux d'alumine augmente et la silice dissoute n'est plus présente en quantité suffisante pour former la kaolinite, la gibbsite devient alors la nouvelle phase minérale créée. En revanche, la gibbsite est instable en présence de silice dissoute et se transforme alors en kaolinite voire en halloysite. Ce processus est appelé allitisation ou ferrallitisation si le fer est abondant.

La topographie joue aussi un rôle important dans la formation de la kaolinite. Ainsi, la kaolinite se formera plus facilement sur des pentes bien drainées, alors que des dépressions aux eaux stagnantes favoriseront la formation de smectite. Les ressauts de topographie liés à des mouvements tectoniques (surrection ou subsidence) peuvent aussi agir sur le profil d'altération, la kaolinite pouvant ainsi se transformer en gibbsite et inversement selon les oscillations de la nappe phréatique.

L'activité biologique demeure aussi un facteur-clé pour le développement d'un profil d'altération. En effet, les acides organiques, la teneur en CO₂ des eaux et l'activité microbienne agissent sur la solubilité des éléments chimiques. Le système racinaire agit aussi sur l'infiltration des eaux, à la dissolution de la silice et à la dégradation des cuirasses en haut des profils d'altération.

Le temps durant lequel les conditions citées ci-dessus sont réunies pour développer un profil d'altération est un autre paramètre essentiel. Plus une roche sera soumise longtemps à des conditions favorables, et plus le profil d'altération sera développé. Si une roche massive devra subir plusieurs millions d'années d'altération, seulement quelques milliers d'années à plusieurs centaines de milliers d'années seront suffisantes pour des roches poreuses et fracturées. En Europe occidentale, et donc en France, les principales périodes géologiques où des conditions favorables pour établir d'importants profils d'altération ont été réunies sont :

- du Crétacé supérieur au Paléocène (entre -100 et -60 millions d'années) ;
- de l'Éocène à l'Oligocène (entre -50 et -25 millions d'années).

Cette période longue a permis le développement de profils d'altération météorique de plusieurs dizaines de mètres, voire centaines de mètres (Cornouailles) sur des gisements parfois déjà affectés au préalable par une altération hydrothermale.

Les gisements primaires ou résiduels de kaolin présentent des teneurs en kaolin qui varient généralement de 15 à 50 %. La teneur et la composition du gisement dépendent de différents facteurs : nature de la roche-mère, degré et type d'altération, climat, etc.

3.1.2 Le kaolin secondaire ou sédimentaire : les argiles kaoliniques

Les gisements secondaires sont les dépôts sédimentaires provenant **de l'érosion, du transport et du dépôt** de la kaolinite issue de gisements primaires. Les gisements secondaires sont généralement plus riches en kaolinite (jusqu'à 85-95 %) que les gisements primaires, et représentent plus des deux tiers de la production mondiale et environ trois quarts des réserves mondiales.

Pour former des gisements secondaires, il faut (1) des minéraux argileux au départ issus de gisements primaires de kaolin, de latérites et de bauxites, d'argilites, de marnes ou de calcaire argileux, ou (2) d'une source de feldspaths et de minéraux en feuillets potentiellement kaolinisables (granitoïdes plus ou moins kaolinisés, roches métamorphiques quartzo-feldspathiques, gneiss, micaschistes, schistes à biotite, à séricite ou à chlorite, roches basiques, etc.).

Les zones à plus forte pluviométrie, notamment en intensité des précipitations (ex. orages et averses tropicales), sont aussi plus favorables car l'eau de pluie favorise l'érosion et le transport des particules minérales.

Les zones en relief sont les plus favorables puisqu'elles subissent plus facilement l'érosion. En outre, la géomorphologie (forme du relief) conditionne le débit des cours d'eau et donc la charge minérale transportable ainsi que les milieux de dépôts (ex : dépressions topographiques). Ainsi, les gisements secondaires se forment plus facilement dans des domaines fluviaux et lacustres, et exceptionnellement en domaine lagunaire. Le meilleur exemple se trouve aux États-Unis avec les gisements d'argiles kaoliniques de Caroline du Sud et de Géorgie au sein de larges plaines côtières. Les fossés d'effondrement sont favorables aux dépôts de sables et d'argiles, alors que les lacs, étangs et marécages favorisent le dépôt de fines lentilles argileuses (quelques mètres d'épaisseur) intercalées dans des sables et silts. Les zones à haute énergie (delta, entrée de lacs, dépressions) permettent la formation d'arkoses et de sables kaoliniques.

La nature de la roche sous-jacente importe peu sauf si cette dernière est de nature carbonatée car soluble et pouvant favoriser le développement de karsts qui deviennent un piège pour les produits enrichis en kaolinite (ex. gisements bulgares de la plaine de Ruse).

Tout comme pour les gisements primaires, la température est un facteur-clé qui agit sur la végétation et la pluviométrie, et donc sur l'érosion, le transport et le dépôt. La végétation de par son rôle de filtration et de rétention des minéraux alcalins et de la silice peut conduire à la formation d'argiles kaoliniques très fines et indurées, nommées « *flint clays* ».

3.2 TYPOLOGIE DES GISEMENTS DE KAOLIN ET D'ARGILES KAOLINIQUES

Les gisements de kaolin et d'argiles kaoliniques sont présents sur toute la surface du globe, sur tous les continents, et sous quasi toutes les latitudes. La compréhension de la paléogéographie (et notamment de la période Crétacé supérieur-Paléocène) est capitale pour mieux expliquer la répartition des grands gisements de kaolin et d'argiles kaoliniques à travers le monde.

Plusieurs centaines de gisements sont aujourd'hui exploités dans plusieurs dizaines de pays, dont les principaux producteurs sont : États-Unis, Inde, Chine, Allemagne, République Tchèque, Brésil, Iran, Royaume-Uni, Turquie, Corée du Sud, Ukraine, Espagne, France, Mexique, Bulgarie.

Le contexte géologique des gisements varie et certains types sont exposés ci-dessous. Il ne s'agit pas d'être exhaustif mais d'exposer les principaux types de gisements exploités à l'heure actuelle dans le monde.

3.2.1 Gisements primaires dans le monde

Les gisements primaires peuvent être classés par type de roche-mère et leur âge. Les gisements développés sur les granites et les granodiorites sont les plus nombreux et les plus importants en volumes. En revanche, en termes de pureté et de blancheur, les gisements développés sur des roches volcaniques (ex. cendres, trachyte), des pegmatites et des aplites, des migmatites quartzo-feldspathiques ou encore des granites albitiques à métaux rares (lithium, étain, tantale, niobium) sont les plus favorables.

- Gisements sur granites et granodiorites

Les gisements sur granites et granodiorites se situent dans les zones orogéniques où le profil d'altération n'a pas été complètement érodé. Ce type de gisement constitue le potentiel le plus important pour le kaolin primaire. La teneur en kaolin, qui dépend de l'intensité de l'altération et de la composition minéralogique de la roche-mère, peut varier entre 15 et 40 %, avec une moyenne d'environ 25 %.

L'exemple caractéristique de ce type de gisement se situe dans les Cornouailles, au sud-ouest de l'Angleterre, avec les massifs granitiques d'âge Varisque de Saint-Austell (parties centrale et occidentale), de Dartmoor (partie sud-ouest), et dans une moindre mesure de Bodmin Moor et Land's End (Figure 7). Exploitée depuis 1746, la région a produit environ 160 Mt de kaolin lavé. Le gisement de Saint-Austell est souvent cité comme modèle pour les gisements à l'aplomb de granites puisque l'on peut y observer les différents stades de sa formation avec les phénomènes tardi-magmatiques (filons d'aplite, greisenisation, tourmalinisation), la circulation de fluides hydrothermaux (filons de quartz) et l'altération météorique finale, le tout formant une morphologie « en entonnoir » (Figure 8). Le profil d'altération atteint entre 150 et 250 mètres de profondeur. Deux grands types de granites se sont mis en place au Permien : les granites à biotite (290 Ma) et les granites à micas et lithium-bore-fluor (270 Ma). La circulation de fluides résiduels tardi-magmatiques ont permis une tourmalinisation et une greisenisation qui ont favorisé la kaolinisation postérieure. La pureté (blancheur) et la cristallinité du kaolin dans la région sont exceptionnelles grâce à la remobilisation du fer qui s'est retrouvé « capté » dans les tourmalines formées lors des épisodes tardi-magmatiques.

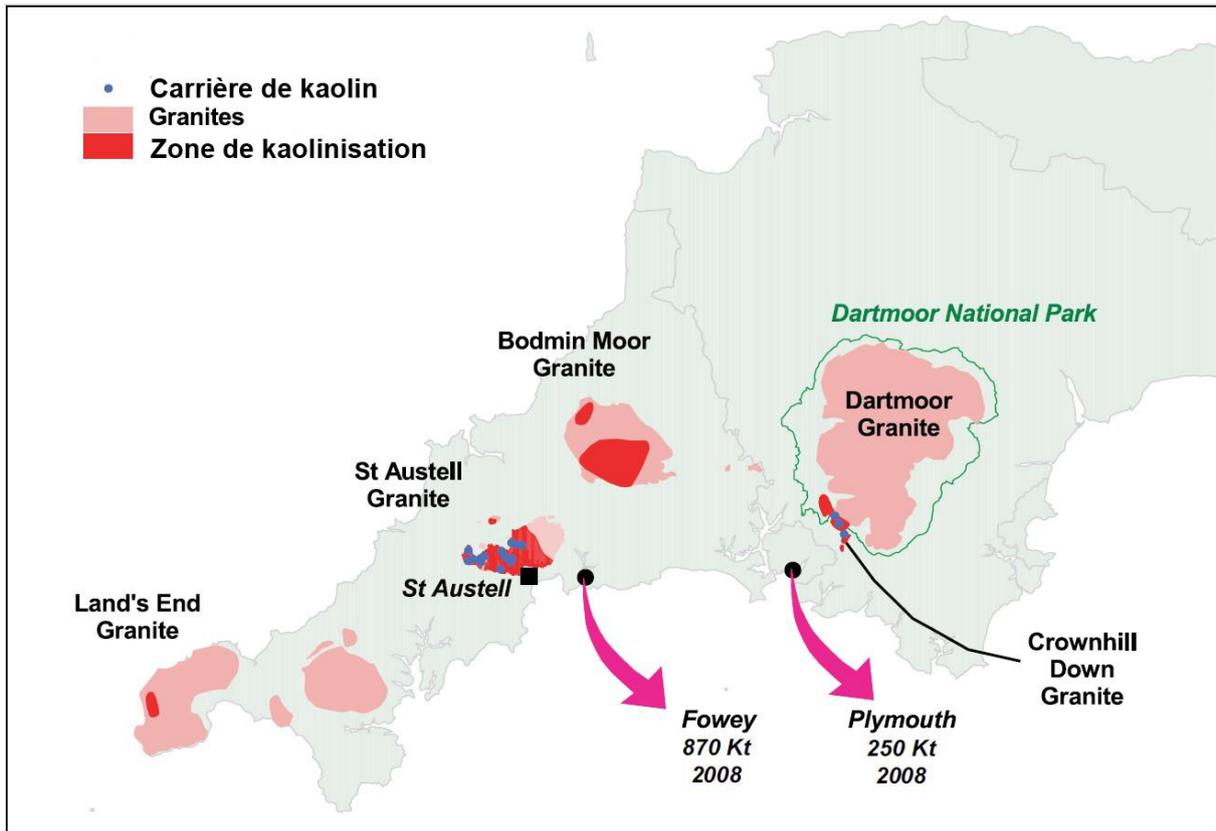


Figure 7 : Carte des gisements primaires de kaolin sur granites et granodiorites du sud-ouest de l'Angleterre et principaux flux de matières en 2008 (Source : British Geological Survey).

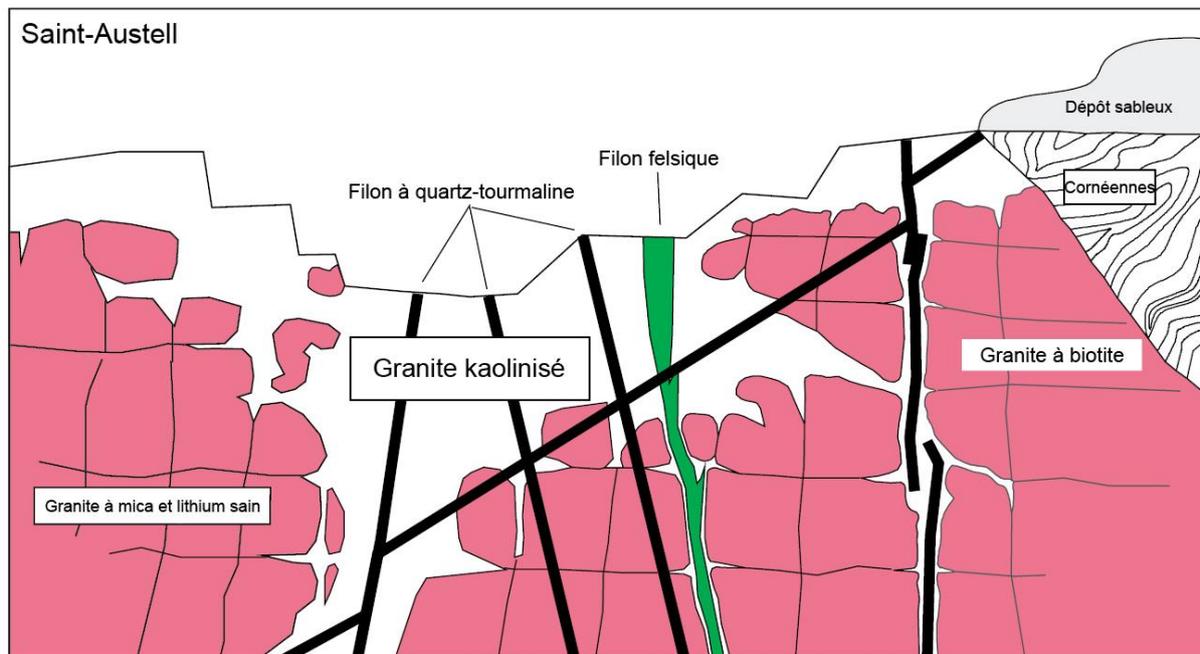


Figure 8 : Coupe géologique simplifiée du gisement de kaolin de Saint-Austell (Source : British Geological Survey).

Il faut mentionner d'autres gisements de ce type dans le monde, sur des granites d'âges variés :

- sur granites varisques : République Tchèque (région de Karlovy Vary), Portugal (Viana do Castelo, Sao-Vicente Pereira), France (Huelgoat, Berrien, Loqueffret), Russie (Zhuralivny Log, Kyshtym) ;
- sur granites cadomiens : Espagne (Vimianzo), France (Quessoy) ;
- sur granites mésozoïques : Chine (Zhanjiang-Lianjiang, Heyuan-Zijin, Jiangdezhen, Hengyang), Thaïlande (Ranong), Malaisie (Tapah), Indonésie (Billiton) ;
- sur granites précambriens : Ukraine, Brésil, Inde ;
- sur granite calédoniens : Suède (Billinge), États-Unis (Appalaches).



Figure 9 : Carrières de kaolin dans la région de Saint-Austell, Royaume-Uni
(Source : www.historic-cornwall.org.uk).

- Gisement sur pegmatites

Les gisements de kaolin développés sur les pegmatites riches en feldspath ont été parmi les premiers exploités, comme en France dans la région de Saint-Yrieix-la-Perche près de Limoges dès 1786. La présence de cristaux de grande taille de feldspath favorise des plages importantes de kaolinisation lors du/des processus d'altération. La nature des pegmatites est très variable mais en général elles sont pauvres en biotite, limitant ainsi la présence de fer et favorisant *in fine* une grande blancheur du kaolin. Cependant, ces gisements, très nombreux à travers le monde, ne représentent de façon générale que de petits volumes à exploiter, et les zones d'excavation sont par conséquent difficiles à mécaniser.

Les principales régions où le kaolin est à l'heure actuelle exploité sont la Chine et le Brésil. Les principales provinces chinoises concernées sont celles du Jiangxi (région d'origine du terme kaolin) et du Hunan. Au Brésil, il s'agit des régions du Nord-Est (Rio Grande et Paraiba)

et du Sud-Est (Minas Gerais et São Paulo), où d'immenses champs de pegmatites affleurent (Figure 10).

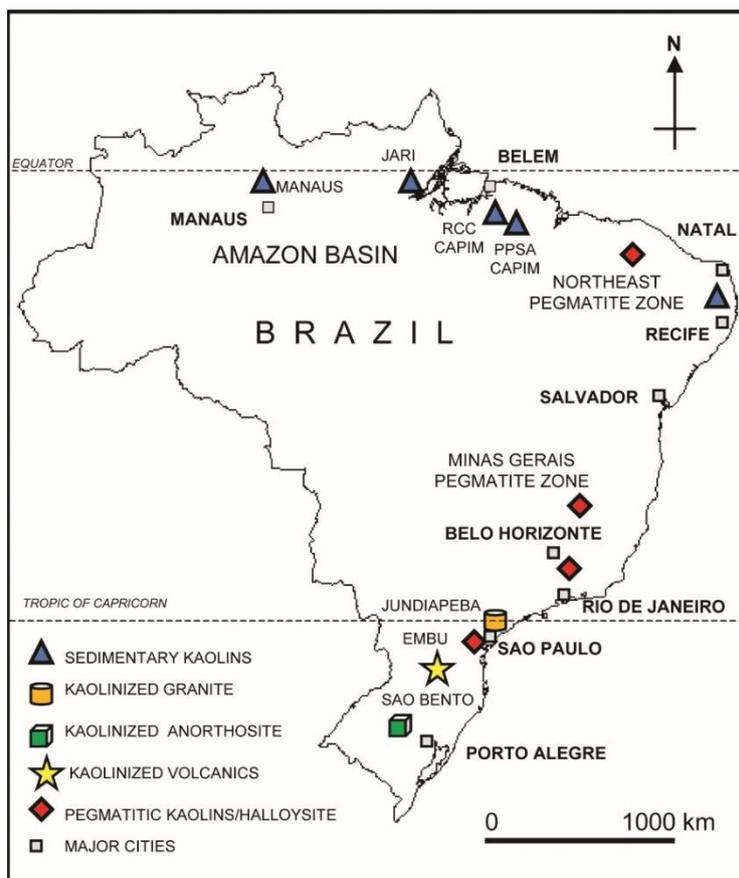


Figure 10 : Gisements de kaolin et d'argiles kaoliniques au Brésil où sont exploités notamment les champs pegmatitiques (Source : Wilson et al., 2006).



Figure 11 : Pegmatite kaolinisée des Monts d'Ambazac, Haute-Vienne (Source : BRGM).

- Gisement sur granites à albite et métaux rares

Les gisements de kaolin développés sur les granites à métaux rares sont peu courants étant donné la relative rareté de la roche-mère. Il s'agit de granites évolués caractérisés par une très faible teneur en fer et en titane pouvant donner du kaolin d'une blancheur exceptionnelle. Tout comme les gisements développés sur les granites et granodiorites, il n'est pas rare d'observer plusieurs phases d'altération notamment en relation avec des fluides hydrothermaux et des fluides météoriques.

Les principaux gisements de ce type dans le monde sont ceux d'Échassières (France), de Yichun et Longyan (Chine). La kaolinite est souvent associée à de l'halloysite, notamment à Longyan où le granite à albite-muscovite-zinnwaldite âgé de 150 Ma a été kaolinisé sur une épaisseur d'environ 50 m. À Echassières, il s'agit d'un granite à albite-lépidolite-topaze-métaux rares (Nb, Ta, Sn) âgé de 308 Ma, et kaolinisé en moyenne sur 60 m d'épaisseur mais pouvant atteindre jusqu'à 200 m le long de certaines fractures.



Figure 12 : Carrière de kaolin d'Échassières, Allier (Source : www.mineralienatlas.de © loismin).

- Gisement sur roches métamorphiques quartzo-feldspathiques

Ces gisements se forment sur des roches métamorphiques riches en feldspath comme les leptynites, certaines migmatites, des séricito-schistes ou encore certains orthogneiss (anciens granites déformés). Le kaolin extrait de ce type de gisements montre de grandes similitudes avec le kaolin issu des granites et granodiorites. Malgré tout, certaines roches métamorphiques peuvent avoir une proportion de feldspath beaucoup plus importante, dépassant parfois 50% contre 25 à 35% pour les roches granitiques, assurant un meilleur rendement pour le gisement exploité (ex. Ukraine).

Les exemples les plus caractéristiques de ce type de gisement se situent en Ukraine avec Vershynsky, Dibrovsky, Veliko Gadominetskoye, Turbovsk, Zezhelev, Belaia Balka, Belaiev.

- Gisement sur roches volcaniques kaolinisées

Ce dernier type de gisement de kaolin primaire se développe sur des roches volcaniques comme les rhyolites, les trachytes et les andésites. Souvent associées à des zones de failles et de filons, leur extension n'est pas très importante mais la blancheur du kaolin cru ou cuit demeure très élevée. Le kaolin se compose de kaolinite et d'halloysite pour l'essentiel, le fer étant remobilisé lors de circulation de fluides hydrothermaux.

Les principaux gisements de ce type sont présents en Turquie (ex. Hisarcik Kooperatifi, Sekeharmani, Yarengedigi, Kütahya Porselen, Halil Acar, Kulalan, Çitkaya, Çitkaya Eczacibasi). La roche-mère se compose de dacite et de tufs dacitiques âgés du Miocène. D'autres gisements sont à citer comme Guizhou, Suzhou et Chaouzhou (Chine), Matauri Bay (Nouvelle-Zélande), Djebel Debar (Algérie), Burela (Espagne), Monte Alegre (Brésil), Meissen (Allemagne), Beregovo (Ukraine).

3.2.2 Gisements secondaires dans le monde

Représentant plus des deux tiers de la production mondiale, les gisements secondaires d'argiles kaoliniques sont répartis sur toute la surface du globe, sur tous les continents, et sous quasi toutes les latitudes.

Les gisements secondaires peuvent être classés en fonction du contexte sédimentaire et de l'âge des formations géologiques. Les principaux gisements dans le monde sont souvent associés à un épisode important de latéritisation bauxitique, postérieur à la sédimentation de la formation géologique renfermant le gisement. Ainsi, les principales périodes de sédimentation s'étalent du Carbonifère (300 Ma) au Miocène (20 Ma), avec le développement de gisements secondaires, particulièrement lors d'évènements géodynamiques majeurs au cours du Permo-Trias, du Crétacé inférieur et du Paléocène.

Il ne s'agit pas ici d'être exhaustif mais d'exposer les principaux types de gisements exploités à l'heure actuelle dans le monde.

- Gisements secondaires dans les sédiments du Carbonifère et du Permien

C'est en République Tchèque que les gisements les plus représentatifs sont encaissés dans des sédiments âgés du Carbonifère et du Permien (Wilson et Jiranek, 1995 ; Starý *et al.*, 2017) dans les régions de Pilsen (gisements de Kasnejov, Horni Briza, Chlumcany), Podborany (Krasny Dvur) et Krusna Hory (Kadan).

La région de Pilsen est un bassin sédimentaire (créé dans un contexte de tectonique extensive de type graben) formé au cours de la fin de l'Orogène varisque selon une direction nord-sud. Les sédiments consistent en des arkoses, des sables arkosiques et des conglomérats kaolinisés datés du Westphalien D au Stéphanien. La kaolinisation est épaisse d'au moins 90 m à Kazjenov et entre 80 et 110 m à Horni Briza. Bien que la kaolinisation ait pris place au Carbonifère, des évidences d'une reprise d'altération au Paléogène est avancée dans la littérature. Cependant, la forte teneur en titane et la faible blancheur de ces argiles kaoliniques déprécient la qualité de ces minerais.

- Gisements secondaires dans les sédiments du Trias

En Allemagne, au nord-est de la Bavière, les gisements du district de Hirschau-Schnaittenbach sont constitués d'arkoses âgées du Trias inférieur, déposées dans un bassin orienté est-ouest (Figure 13 et Figure 14). Ces arkoses ont été plus ou moins kaolinisées en fonction des formations sédimentaires, parfois sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur.



Figure 13 : Gisement d'argiles kaoliniques de Hirschau-Schnaittenbach, Allemagne (Source : Amberger Kaolinwerke Eduard Kick GmbH & Co. KG).

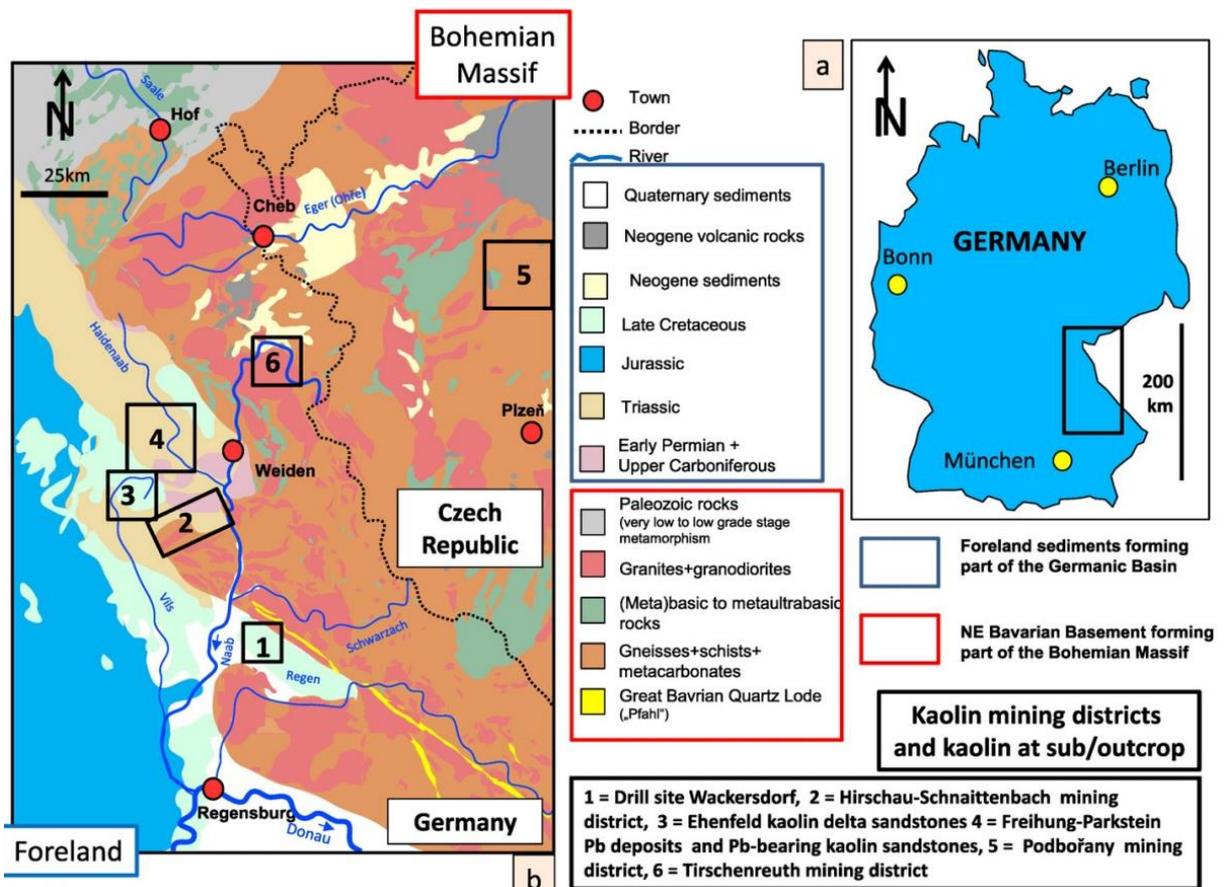


Figure 14 : Carte de localisation des gisements de kaolin en Allemagne (Source : Dill et al., 2016).

- Gisements secondaires dans les sédiments du Crétacé inférieur

Encaissés dans la formation sédimentaire Utrillas âgée du Crétacé inférieur (Aptien-Albien), des sables kaoliniques sont exploités dans les bassins de Teruel, Cuenca et de Valence, en Espagne. Ces sables kaoliniques sont associés à des niveaux de lignite, des arkoses et des argiles blanches et grises déposées dans un contexte sédimentaire lacustre à deltaïque. Le bassin du Haut Tage recèle des arkoses kaolinisées, plus grossières que les sables kaoliniques des bassins précédents et altérées de 30 à 50 m d'épaisseur.

Au Portugal, des gisements similaires et du même âge existent dans la région d'Aveiro et de Santarem.

- Gisements secondaires dans les sédiments du Crétacé supérieur et du Paléocène-Éocène moyen

Le meilleur exemple pour cette période géologique est celui des gisements du sud-est des États-Unis avec la « *kaolin belt* » (Figure 15). Cette ceinture de gisements de kaolin s'étend entre Aiken (Caroline du Sud) et Macon (Géorgie) dans des formations sédimentaires âgées du Crétacé supérieur (90-65 Ma) au Paléocène-Éocène moyen (65-40 Ma). Les gisements les plus importants se situent dans les comtés de Twiggs, Wilkinson, Washington, Jefferson et Sanderville (Figure 17). Les argiles kaoliniques sont parfois associées à de la bauxite. Elles se présentent sous la forme de lentilles épaisses de 2 à 15 m et peuvent s'étendre sur 1 à 2 km, intercalées dans séries sédimentaires épaisses composées de sables, de graviers et de conglomérats (Figure 16).

Plus précisément, les sédiments d'âge Crétacé supérieur se trouvent en discordance sur le socle cristallin altéré. Il s'agit de sables, de silts et d'argiles mal classés avec des plans de stratification peu marqués eu égard à l'environnement de dépôt deltaïque. Ces roches sont composées de feldspath, de muscovite, de biotite, d'argiles et de minéraux lourds ainsi que du quartz. Soumis à une forte altération tropicale durant le Crétacé, ces roches ont développé des profils d'altération comprenant des argiles kaoliniques, voire même par certains endroits de la bauxite. Ces formations sédimentaires épaisses se retrouvent principalement en Géorgie centrale. Les argiles kaoliniques de ces sédiments du Crétacé se révèlent d'excellente qualité, tendres et blanches et bien cristallisées avec de faibles teneurs en fer et en titane.

Les sédiments datés du Paléocène et de l'Éocène composent la formation Huber. Il s'agit d'argiles et de silts provenant de la remobilisation des formations du Crétacé suite à des variations eustatiques lors de l'ouverture de l'océan Atlantique. Ces sédiments mêlés aux débris bauxitiques du Crétacé se sont déposés dans des marécages, des tourbières et des lagunes, le tout recouvert à la fin de l'Éocène par la formation des Sables de Chinchfield et les Argiles de Twiggs. Les argiles kaoliniques de ces niveaux sédimentaires sont colorés passant du gris-rose, crème, rougeâtre, dépendant du degré d'oxydation. Ces argiles kaoliniques ont parfois la particularité de présenter des cassures en esquilles liées probablement à une silicification postérieure.

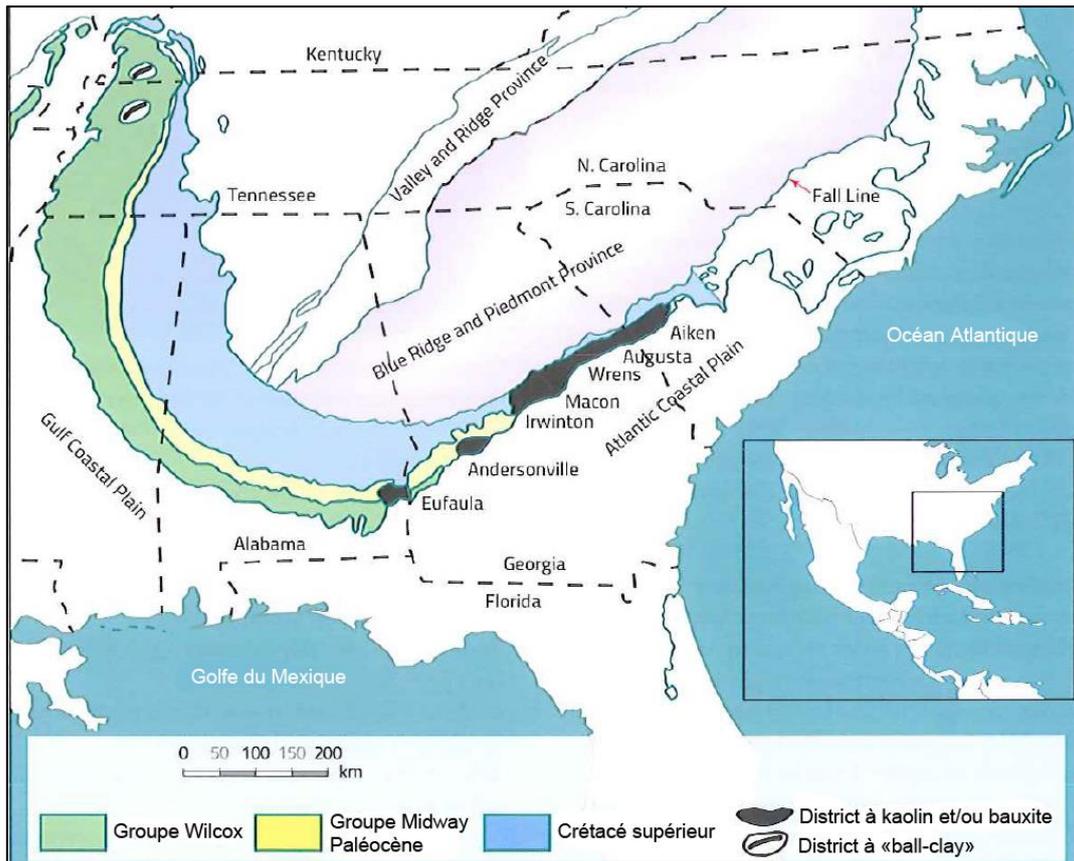


Figure 15 : Carte de la "kaolin belt" aux États-Unis (Source : modifié d'après Harbon-Indus. Min.).

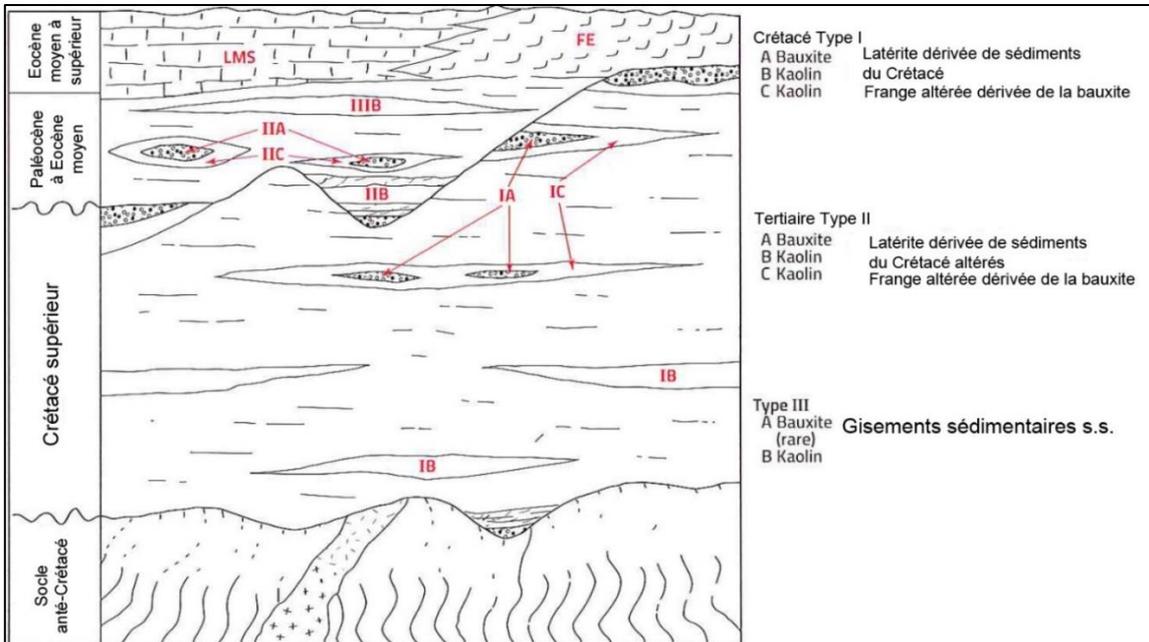


Figure 16 : Les niveaux sédimentaires producteurs d'argiles kaoliniques aux États-Unis (Source : modifié d'après Harbon-Indus. Min.).



Figure 17 : Carrière d'argiles kaoliniques à Sandersville en Géorgie, États-Unis
(Source : sandersvillegeorgia.blogspot.com).

Au-delà des États-Unis, les autres grands gisements d'argiles kaoliniques se situent au Brésil, notamment dans les régions de Rio Capim, Jari et Manaus, et constituent le principal potentiel mondial (Figure 10). Les gisements sont encaissés dans des formations sédimentaires généralement sableuses et argileuses formées au Mésozoïque et au Cénozoïque.

Au Rio Capim, c'est la formation Ipixuna avec des sédiments sablo-argileux âgés du Crétacé supérieur-Tertiaire inférieur qui renferme les argiles kaoliniques. Cette formation, épaisse de 15 à 20 m, a subi une importante altération durant l'Éocène conduisant à une kaolinisation et à une bauxitisation des sédiments suivies d'un phénomène de podzolisation sous un climat plus froid, remobilisant le fer et le titane. La formation d'Ipixuna est ensuite recouverte au Miocène par les formations alluvionnaires de Pirabas et Barreiras. Un nouvel épisode d'altération affecte l'ensemble sédimentaire du Pléistocène jusqu'à l'Actuel développant un profil bauxitique immature. Dans la région de Rio Capim, les carrières ont un recouvrement de 15 à 20 m de sables et argiles brun rouge de la formation Barreiras avant d'exploiter les argiles kaoliniques. Le principal niveau producteur est épais d'environ 6 à 7 m et se compose d'argiles kaoliniques tendres, blanches et homogènes, mais avec une forte teneur en titane ($>1\% \text{ TiO}_2$) et une faible teneur en fer ($0,65\% \text{ Fe}_2\text{O}_3$). À ce niveau de bonne qualité s'ajoutent différentes couches de sables et argiles kaoliniques exploitées en fonction de leur blancheur et de leur teneur en kaolinite.

Les gisements du Rio Jari montre un contexte géologique semblable à ceux du Rio Capim. Cette fois, c'est la formation Alter do Chão âgée du Crétacé supérieur qui encaissent les argiles kaoliniques formées lors d'un intense épisode de latéritisation et bauxitisation au cours du Tertiaire inférieur. Il s'agit de sables argileux fluvio-lacustres accumulés sur environ 60 m d'épaisseur. Les argiles kaoliniques se situent dans les niveaux inférieurs qui se composent d'une alternance de niveaux argileux, silteux et sableux sur environ 35 m d'épaisseur.

Dans le reste du monde, d'autres gisements sont à citer comme les sables kaoliniques du Néogène en Bulgarie, notamment associés à un remplissage de poches karstiques, comme ceux du bassin d'Hostun en France. En Chine, la région de Maoming, dans le sud du Guangdong, recèlent plusieurs gisements encaissés dans les arkoses et les sables datés du Crétacé supérieur mais surtout dans les formations âgées du Miocène-Pliocène. Le profil kaolinisé représente au moins 80 m d'épaisseur, avec de faibles teneurs en titane (0,15 % TiO_2) et en fer (0,6 % Fe_2O_3).

Les gisements français du bassin des Charentes ou du bassin de Provins appartiennent à cette catégorie de gisements secondaires d'argiles kaoliniques.

3.2.3 Les gisements français de kaolin et d'argiles kaoliniques

La France recèle différents gisements de kaolin et d'argiles kaoliniques liés à la diversité géologique de son sous-sol. La répartition sur le territoire métropolitain est assez homogène (Tableau 2 et Figure 18). À mentionner le gisement de Charvein en Guyane.

Gisement(s)	Formation(s) géologique(s)	Âge(s)	Bassin de production
Kaolin			
<i>Ploemeur (56), Saint-Gouéno (22), Nozay (44)</i>	Leucogranite varisque	Carbonifère / Éocène	Massif armoricain
<i>Quessoy (22)</i>	Granite cadomien	Néoprotérozoïque	Massif armoricain
<i>Berrien (29), Loqueffret (29)</i>	Granodiorite varisque	Carbonifère / Éocène	Massif armoricain
<i>Saint-Yrieix-la-Perche, La Jonchère, Coussac-Bonneval (87)</i>	Pegmatites et leucogranites varisques	Carbonifère / Éocène	Massif central - Limousin
<i>Beauvoir (03)</i>	Granite à albite, lépidolite et métaux rares	Carbonifère / Éocène	Massif central
<i>Abbaretz-La Martrie (44)</i>	Kaolin-illite sur les schistes d'Abbaretz	Ordovicien-Silurien / Éocène	Massif armoricain
<i>Teillay (35) ; Rougé, Croix-des-Landelles (44)</i>	Altérites à kaolin sur les Schistes d'Angers	Ordovicien / Éocène-Oligocène	Massif armoricain
<i>Charvein (973)</i>	Monzogranite méta-alumineux et pegmatites	Paléoprotérozoïque (Rhyacien)	Guyane
Argiles kaoliniques			
<i>Guizengeard (16) ; Chevanceaux, Le Fouilloux, Clérac, Saint-Pierre-du-Palais, La Clotte, Montlieu-la-Garde, Bédenac (17)</i>	Formations de Guizengeard, de Ramard et de Bernet. Sables feldspathiques à galets mous de kaolin, sables fins à lignite et argiles kaoliniques	Sparnacien-Cuisien	Charentes
<i>St-Loup-de-Naud, Le Midi de la Croix, Chalaudre-Noyer, Montbron (77) ; La Grange-Guillaume, Les Gloitres (10) ; Le Chatelet (51)</i>	Argiles kaoliniques	Yprésien inférieur	Provins
<i>Beaulon, Thiel-sur-Acolin, Saint-Pourçain-sur-Besbre, Diou (03)</i>	Sables et argiles du Bourbonnais (fluvio-lacustre à fluvio-palustre)	Plio-Quaternaire	Limagne
<i>Hostun (26)</i>	Sables kaoliniques déposés dans des cavités karstiques.	Éocène	Bassin du Sud-Est
<i>Tain-l'Hermitage (26)</i>	Sables kaoliniques de Douévas développés sur le granite varisque du Tournon.	Éocène-Oligocène ?	Bassin du Sud-Est

Lureuil, Tournon-Saint-Martin (36)	Argiles kaoliniques issues de l'altération de la craie du Crétacé	Paléocène-Éocène inférieur	Centre-Berry
Gournay (36)	Argiles du Toarcien-Aalénien	Toarcien-Aalénien	Centre-Berry
Nançay (18)	Sables et argiles de Sologne	Miocène moyen-Pliocène inférieur	Centre-Berry
Livry (58)	Grès, argiles et sables kaoliniques : arkoses de Decize.	Rhétien	Nièvre
Fumel (47)	Sables et argiles kaoliniques des formations de Cuzorn et du Brétou.	Yprésien-Lutétien	Fumel
Vaudreuille (31)	Argiles de St-Papoul et des Mousques-Hautes	Yprésien-Lutétien ?	Montagne Noire
Saint-Paulien (43)	Formation argileuse illitique à kaolinite	Éocène	Velay

Tableau 2 : Les différents gisements de kaolin et d'argiles kaoliniques en France (Source : BRGM).

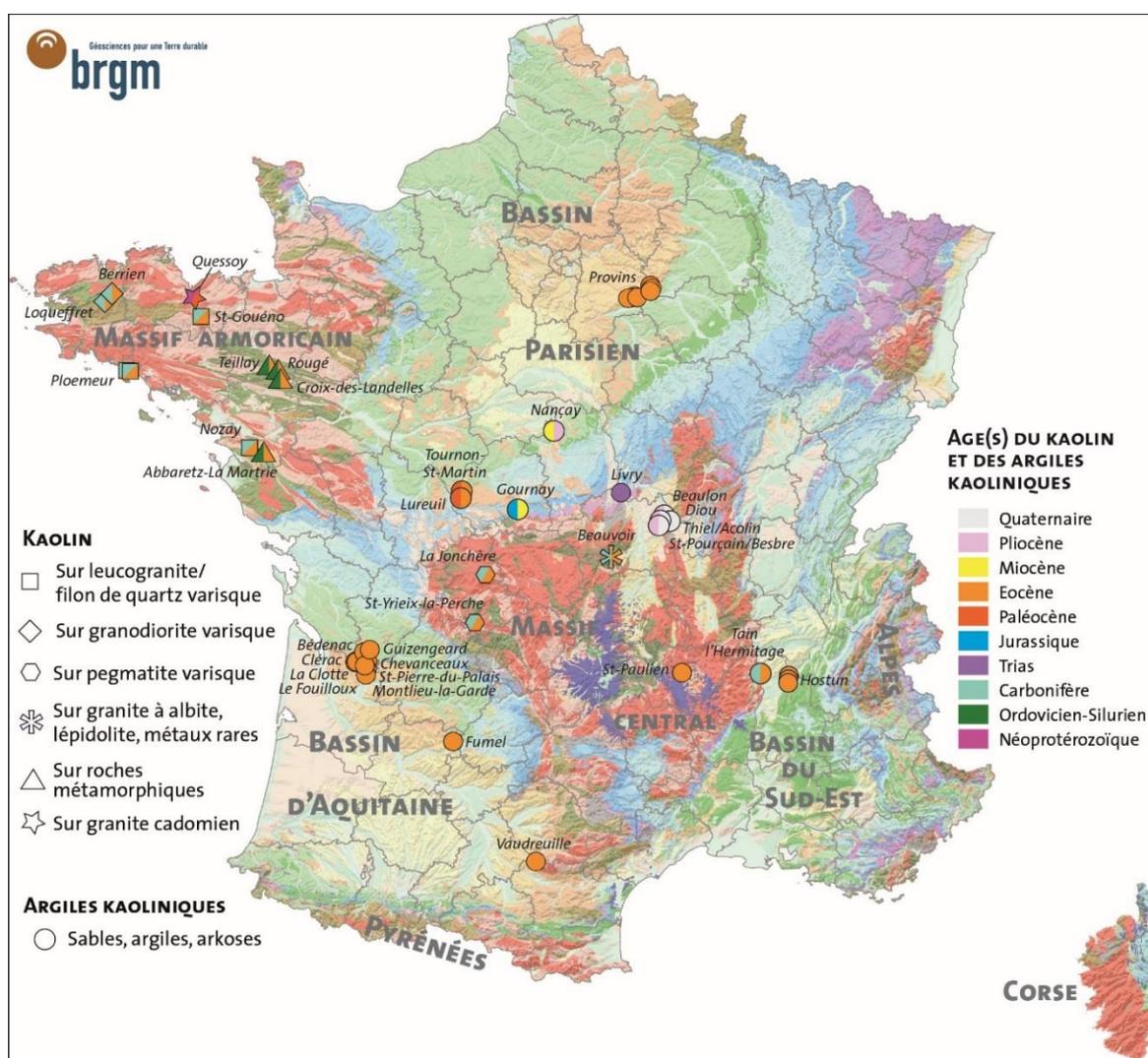


Figure 18 : Carte géologique simplifiée de la France avec la localisation des gisements potentiels (exploités ou non) de kaolin et d'argiles kaoliniques (Source : BRGM).

Une description plus détaillée de certains gisements français d'importance est faite dans la partie 4.4 de ce présent rapport.

4 L'activité extractive du kaolin et des argiles kaoliniques en France

4.1 LOCALISATION DES CARRIÈRES ACTIVES

Les carrières actives qui extraient du kaolin et des argiles kaoliniques sont réparties sur l'ensemble du territoire métropolitain comme le montre la carte de la Figure 19, illustrant également certaines régionalisations par nature des bassins de production.

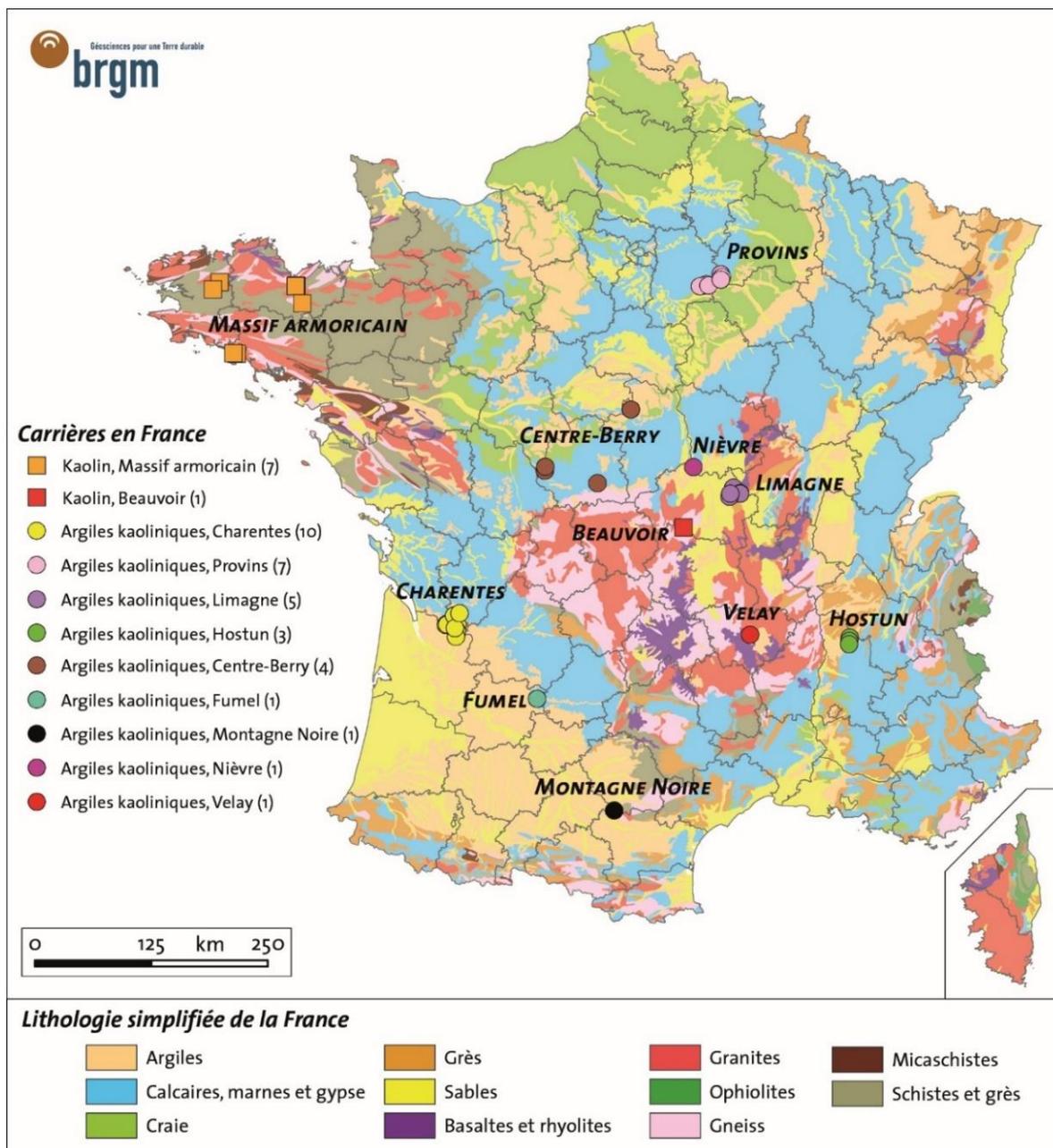


Figure 19 : Carte des carrières actives de kaolin et d'argiles kaoliniques en France, 2017 (Source : BDCM-BRGM).

4.2 STATISTIQUES DES CARRIÈRES

En 2017, 41 carrières exploitent le kaolin et les argiles kaoliniques en France. Près des trois-quarts des carrières exploitent des argiles kaoliniques (30) et un quart exploitent du kaolin (Figure 20).

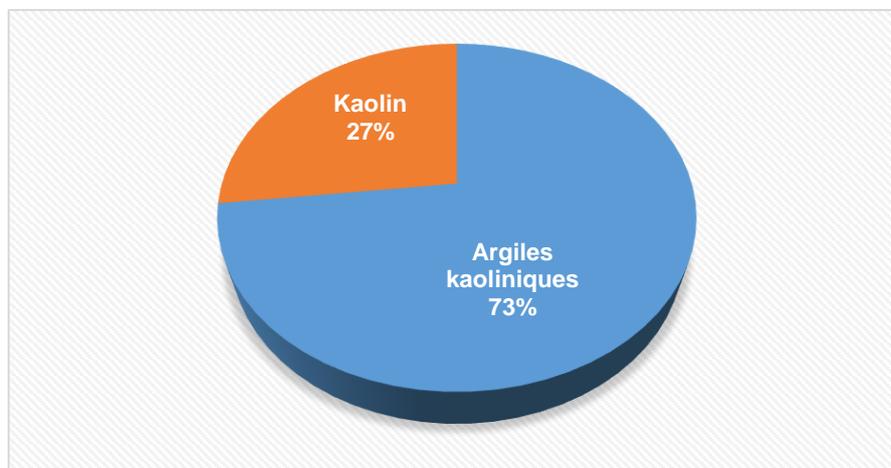


Figure 20 : Répartition des carrières autorisées de kaolin et d'argiles kaoliniques (Source : BDCM-BRGM).

L'ensemble des carrières montre une production moyenne autorisée de 4,22 Mt pour l'année 2016, avec 51 % dédiés aux argiles kaoliniques (2,135 Mt) et 49 % dédié au kaolin (2,085 Mt) (Figure 21). La production est ainsi similaire pour les deux substances exploitées mais avec moins de carrières pour le kaolin puisque les carrières de kaolin produisent des volumes beaucoup plus importants que celles exploitant des argiles kaoliniques.

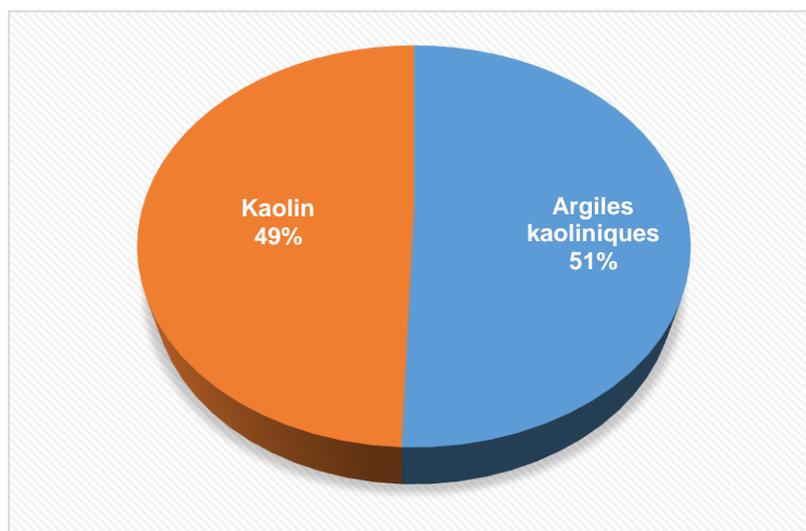


Figure 21 : Répartition de la production de kaolin et d'argiles kaoliniques pour l'année 2017 (Source : BDCM-BRGM).

Plusieurs bassins de production sont à prendre en considération dans l'exploitation du kaolin et des argiles kaoliniques (Figure 22) : Massif armoricain, Beauvoir et Hostun pour le kaolin ; Charentes, Provins, Limagne, Centre-Berry, Fumel, Montagne Noire, Nièvre et Velay pour les argiles kaoliniques.

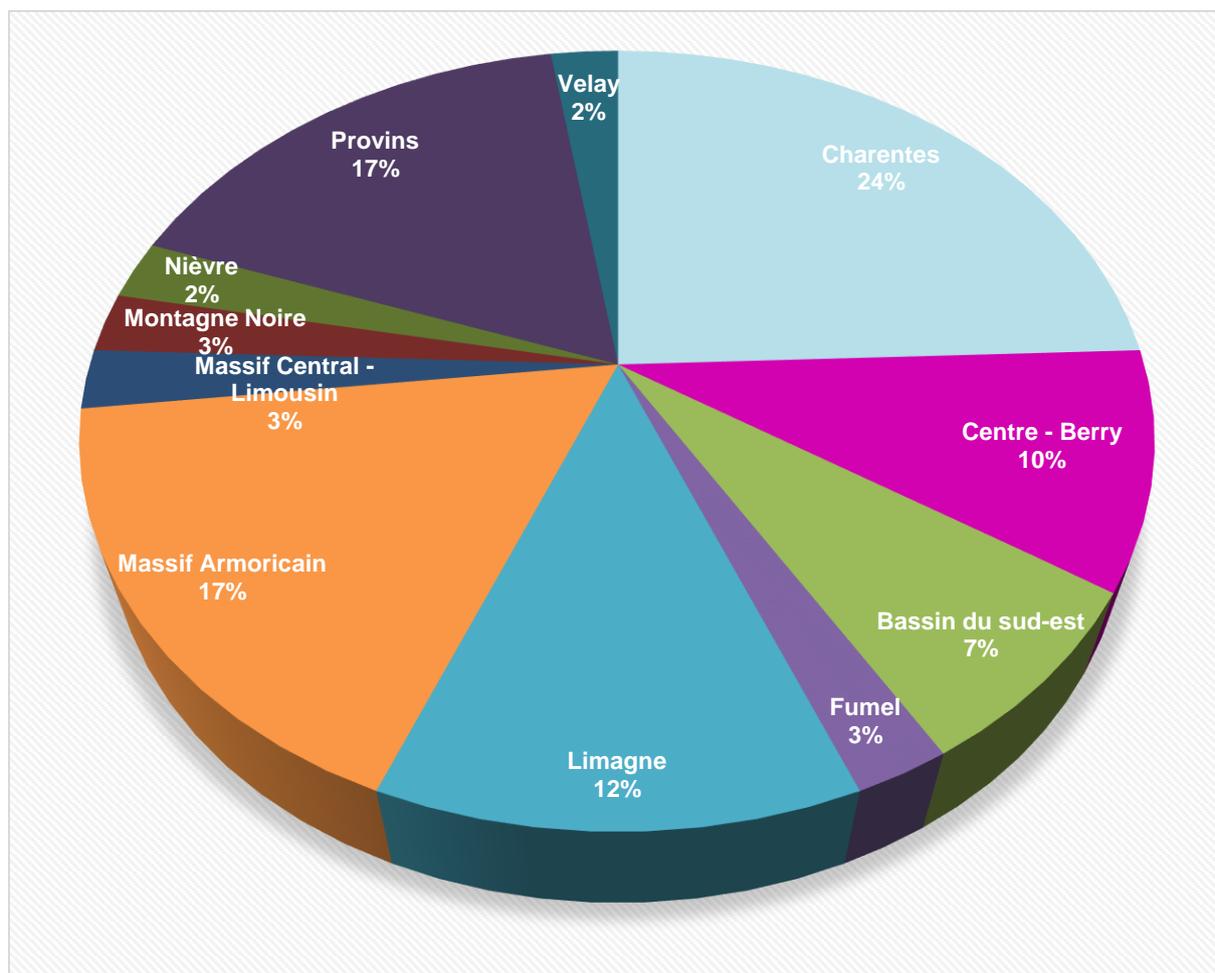


Figure 22 : Répartition des carrières de kaolin et d'argiles kaoliniques par bassin de production en 2017 (Source : BDCM-BRGM).

4.3 RESSOURCES ET RÉSERVES PLAFONNÉES

La diversité géologique de la France permet l'exploitation de kaolin et d'argiles kaoliniques sur l'ensemble du territoire métropolitain¹. Les chiffres concernant les réserves pour les 41 carrières en activité en 2017 n'ont pas été fournis par les industriels.

Sur la base des autorisations d'exploitation actuelles (sans tenir compte des renouvellements et des nouvelles ouvertures de carrières), il apparaît qu'à l'horizon 2030, seule 1 carrière exploitant du kaolin et 7 carrières exploitant des argiles kaoliniques pourraient être encore en activité (Figure 23).

Il est entendu qu'un exploitant implantant une usine de transformation minérale est à priori conscient du potentiel de renouvellement de ses gisements et soucieux de la pérennisation de ses approvisionnements dans le temps. Il est donc légitime de penser que bon nombre de ces carrières seront renouvelées. Néanmoins, au regard de ces chiffres, la question du renouvellement d'autorisations et d'ouvertures de nouvelles carrières de kaolin et d'argiles kaoliniques semble incontournable d'ici à l'horizon 2030, faute de quoi la production pourrait chuter aux environs de 500 kt en cumulé (Figure 24 et Figure 25).

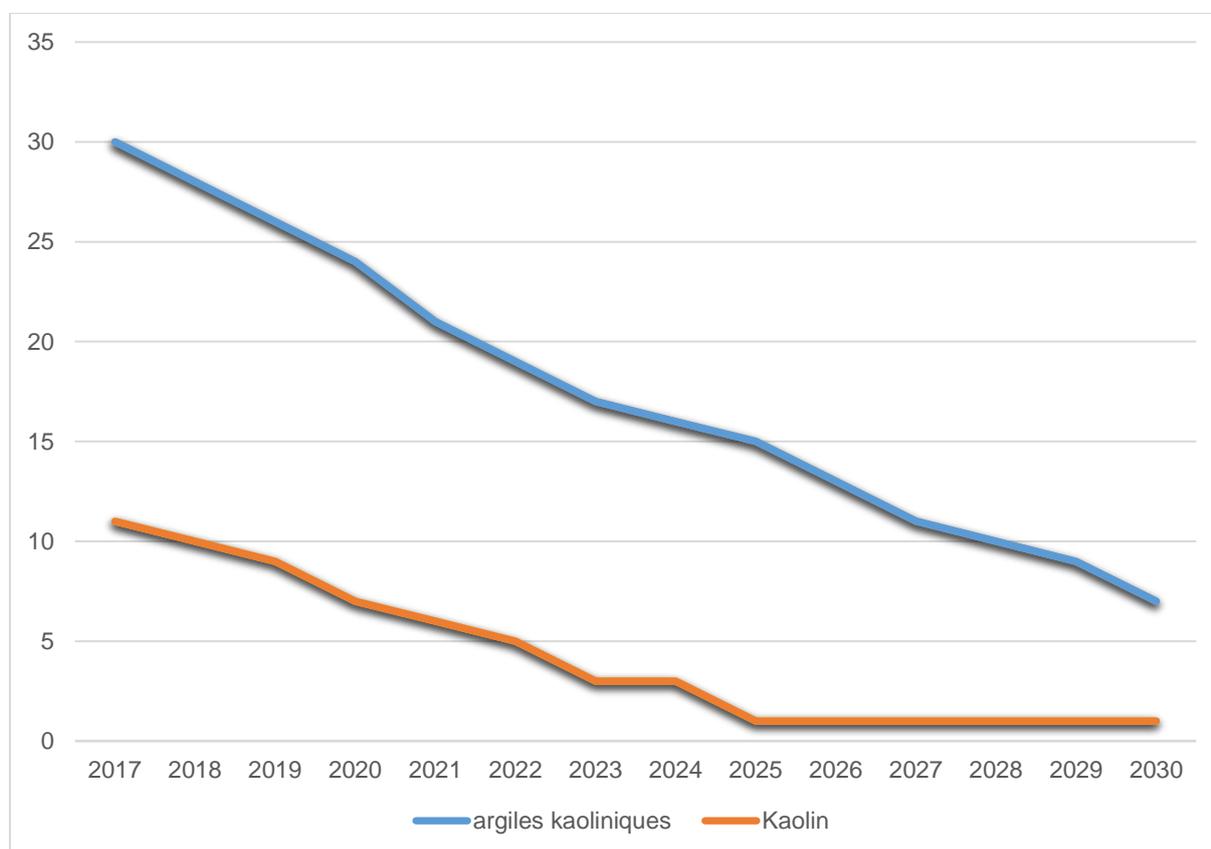


Figure 23 : Nombre de carrières exploitant du kaolin et des argiles kaoliniques entre 2015 et 2030 (Source : BDCM-BRGM).

Il reste en France des gisements non exploités à ce jour qui peuvent encore permettre d'accueillir des carrières de kaolin et d'argiles kaoliniques pour un usage industriel. Un degré d'anticipation suffisant est toutefois nécessaire, du fait des délais liés aux nombreuses

¹ Il n'y a pas de carrières exploitant de kaolin et d'argiles kaoliniques pour un usage industriel dans les DOM.

contraintes réglementaires et d'acceptation environnementale et sociétale. Les graphiques suivants (Figure 24 et Figure 25) montrent de façon indicative l'évolution des tonnages autorisés à l'horizon 2030 sans renouvellement d'autorisation.

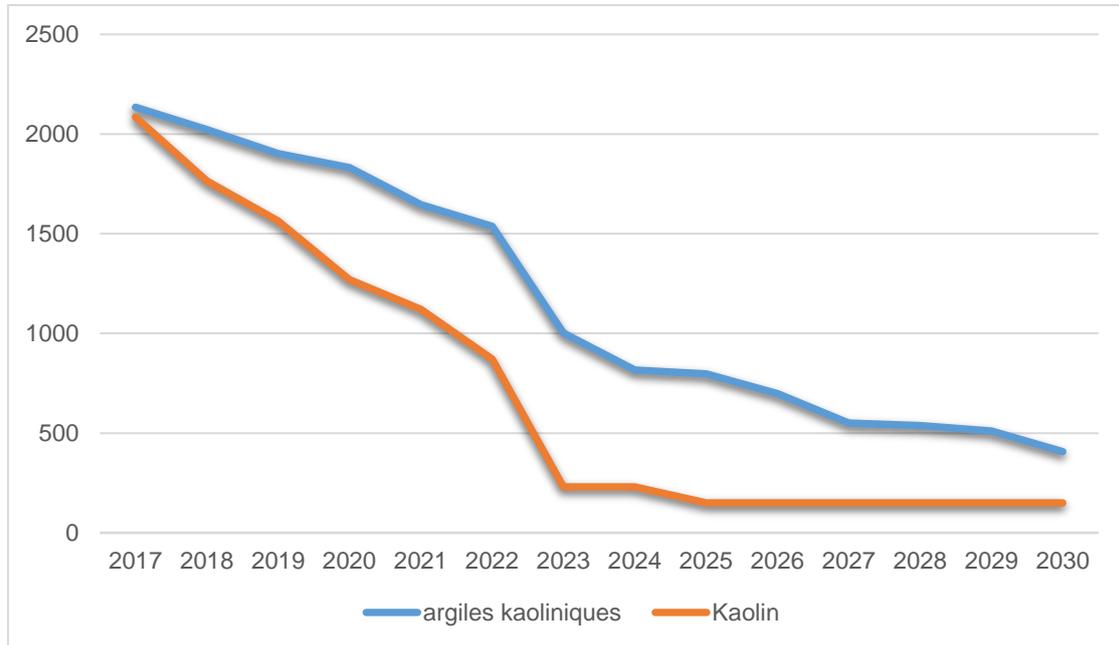


Figure 24 : Productions autorisées (en kilotonnes) des carrières de kaolin et argiles kaoliniques entre 2017 et 2030, sur la base des autorisations actuelles (Source : BDCM-BRGM).

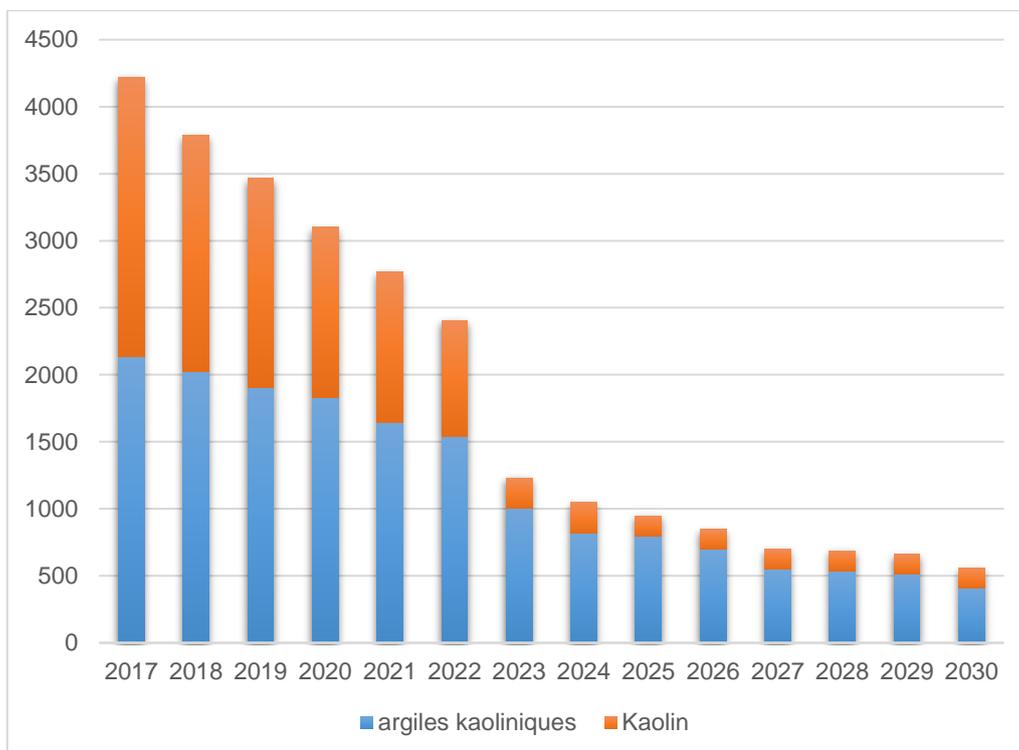


Figure 25 : Production autorisée cumulée (en kilotonnes) des carrières de kaolin et argiles kaoliniques entre 2017 et 2030, sur la base des autorisations actuelles (Source : BDCM-BRGM).

4.4 QUELQUES EXEMPLES DE GISEMENTS DE KAOLIN ET D'ARGILES KAOLINIQUES EN FRANCE

Lorsqu'au XIV^e ou XV^e siècle les premières porcelaines de Chine arrivent en France par les vaisseaux portugais, elles deviennent rapidement un symbole de prestige et de pouvoir. Après d'importantes recherches ordonnées par le roi Louis XV, le premier gisement de kaolin en France est découvert en Haute-Vienne vers 1760 au Clos de la Barre près de Saint-Yrieix-la-Perche et acheté en 1769 par la manufacture de Sèvres. L'exploitation débute à Marcognac en 1786 sous la direction de François Alluaud, ingénieur-géographe du roi.

La géologie de quelques importants gisements français de kaolin et d'argiles kaoliniques est décrite ci-dessous. Les principaux gisements sont présentés par bassin de production.

4.4.1 Bassin de kaolin du Massif armoricain

- **Gisement de Ploemeur**

Le plus important gisement de kaolin est celui de Ploemeur, près de Lorient dans le Morbihan. Le gisement est exploité depuis 1904 successivement par les Kaolins du Morbihan et les Kaolins d'Arvor, puis par le groupe Imerys via sa branche les Kaolins de Bretagne-unité de Ploemeur.

Le gisement de Ploemeur se décompose en deux zones :

- le gisement principal : Kergantic au nord et Lanvrian au sud ;
- le second gisement : Kerbrient, quartiers sud de Ploemeur.

Le gisement principal s'étend sur environ 2,5 km selon une direction nord-nord-est – sud-sud-ouest et suit un filon de quartz d'origine hydrothermale puissant de 5 à 15 m, avec un pendage très redressé (75-80°). Le gisement de Ploemeur est semblable aux gisements des Cornouailles avec une altération hydrothermale précoce et une altération météorique postérieure (au moins Éocène) superposées au leucogranite de Ploemeur daté d'environ 325 millions d'années. Il s'agit d'un granite à grain moyen-grossier, riche en muscovite, à biotite et associé à l'histoire tardive de la chaîne varisque et au cisaillement sud-armoricain. Le profil d'altération atteint 60 m en moyenne et jusqu'à 100 m de profondeur à l'aplomb du filon de quartz. La zone kaolinisée décrit ainsi une forme en V caractéristique (Figure 26). Des zones altérées annexes au gisement principal, parfois de grande qualité, ont été exploitées selon des axes parallèles orientés nord-nord-est – sud-sud-ouest (Lopeher, Kerourant, Le Guermeur) et nord-nord-ouest – sud-sud-est (Keryan, Le Penher). La kaolinite est grossière mais bien cristallisée. La muscovite est valorisée comme charge minérale broyée et le sable est vendu pour la construction.

Le second gisement de Kerbrient, situé à environ 3,5 km de Kergantic est exploité depuis 30 ans. Contrairement au gisement principal, les preuves d'une altération hydrothermale précoce sont moins visibles. Le profil d'altération est épais d'environ 30 à 40 m avec une nette évolution de haut en bas, passant des allotérites aux isaltérites. Kerbrient se situe en périphérie du massif granitique de Ploemeur, et se trouve parfois encaissé dans un faciès orienté à grains fins à muscovite dominante et biotite. En outre, la proximité avec les roches encaissantes, la série de Fort-Bloqué (paragneiss micacés leucocrates, micaschistes, métaquartzites, gneiss fins à épidote et amphibole) conduit à un enrichissement en titane (0,1 % TiO₂). La teneur en fer est assez élevée (0,9 % Fe₂O₃).

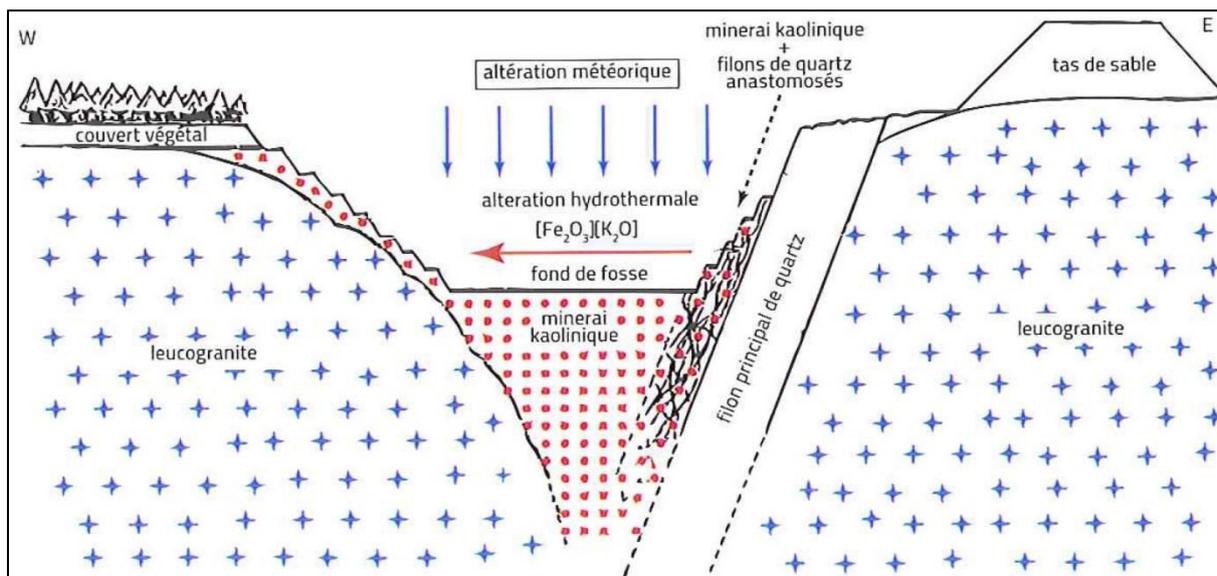


Figure 26 : Coupe géologique du gisement de Ploemeur
(Source : d'après Imerys ; issu de Pouliquen, 2014).



Figure 27 : Carrière de kaolin de Ploemeur, Morbihan (Source : BRGM).

- **Gisements de Berrien et Loqueffret**

À une centaine de kilomètres de Ploemeur, les gisements de Berrien et Loqueffret se situent dans la région de Huelgoat, séparés d'environ 18 km. Les deux gisements se situent en périphérie du complexe granitique varisque de Huelgoat âgé d'environ 335 millions d'années (Berrien au nord-est et Loqueffret au sud-ouest).

Le gisement de Berrien (Figure 28) est encaissé en partie dans le granite de la Feuillée, un monzogranite à gros grain et à deux micas (muscovite et biotite). L'autre partie du gisement se développe dans les grès armoricains d'âge Ordovicien (« Arénigien ») représentés par des quartzites blancs et massifs avec des niveaux locaux à rutile et zircon. Le monzogranite a subi une greisenisation et une séricitisation précoces, suivi d'un épisode hydrothermal ayant permis la formation d'une importante veine de quartz à pyrite, arsénopyrite, fluorine et tourmaline. Cette veine de quartz est orientée nord-nord-ouest – sud-sud-est. Épaisse de 5 à 10 m, longue de 750 m, elle contraint la zone kaolinisée. Le profil d'altération peut atteindre jusqu'à 60 m d'épaisseur. La teneur en fer est moyenne (0,65 à 0,85 % Fe_2O_3), tout comme la teneur en titane (0,3 % TiO_2).

Le gisement de Loqueffret se situe sur la bordure sud du complexe granitique de Huelgoat, proche du granite s.s. de Huelgoat qui est un monzogranite porphyroïde à biotite et cordiérite. La roche a subi une altération précoce ayant détruit la biotite, remplacée par de la tourmaline et du rutile. L'altération hydrothermale n'est pas visible sur le terrain. L'altération météorique plus tardive a formé un profil d'altération épais d'environ 20 à 30 m donnant un kaolin blanc riche en titane (0,35 % TiO_2) et pauvre en fer (0,6 à 0,7 % Fe_2O_3).

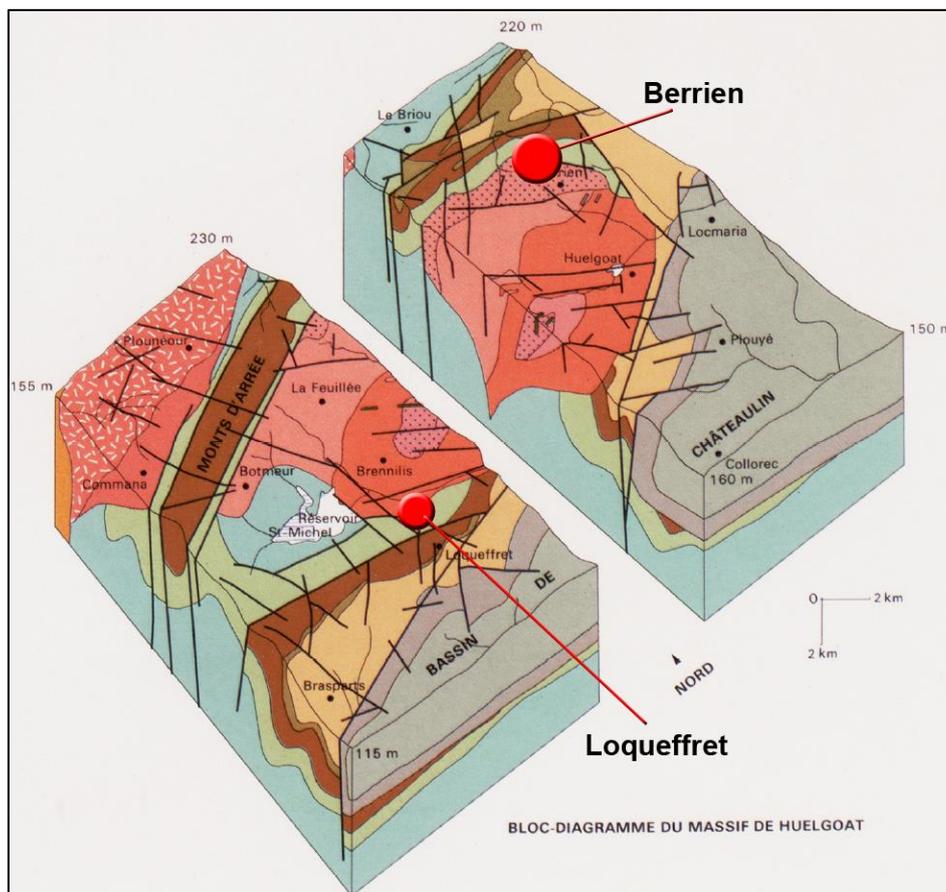


Figure 28 : Gisements de kaolin de Berrien et Loqueffret, Morbihan (Source : BRGM).
Le complexe granitique de Huelgoat apparaît en couleur rouge.

4.4.2 Bassin des argiles kaoliniques des Charentes

Le bassin des Charentes est actuellement exploité grâce à une dizaine de carrières réparties entre la Charente-Maritime principalement, la Gironde et la Dordogne (Figure 29). Les principales formations porteuses d'argiles kaoliniques sont :

- **formation du Ramard** (Éocène inférieur : Sparnacien). Les dépôts attribués à la partie inférieure du Sparnacien sont constitués de sables fins grisâtres plus ou moins argileux et d'argiles kaoliniques blanches à rares taches rougeâtres avec des accumulations ligniteuses pouvant atteindre une épaisseur de 3 à 4 m, à très gros nodules pyriteux. Des lentilles d'argiles kaoliniques liées à des dépressions du toit des calcaires d'âge Crétacé peuvent être observées dans les vallées du Lary et du Palais. Les exploitations de ces argiles constituent la bordure méridionale du bassin de Clérac- Montguyon. La découverte relativement faible, de l'ordre de quelques mètres, est le plus souvent constituée par les alluvions des terrasses fluviales ;
- **formation du Bernet** (Éocène inférieur : Sparnacien). Ces dépôts sont attribués au Sparnacien et constitués de sables fins micacés jaunâtres, d'aspect soufré, avec des graviers et de petits galets alignés suivant les stratifications obliques remaniant des lentilles d'argiles kaoliniques sous forme de galets mous. Ces dépôts affleurent de part et d'autre des vallées du Lary et du Palais. La composition minéralogique voisine de celle de la Formation du Ramard admet cependant environ 10% d'illite associée à la kaolinite ;
- **formation de Guizengeard inférieure** (Éocène inférieur : Cuisien). Cette formation est constituée par deux séquences majeures. Il s'agit de sables feldspathiques vert pâle, micacés, avec quelques graviers à la base, surmontés par des argiles silteuses, parfois sableuses, vert olive présentant des marbrures rougeâtres. Surmontant ces dépôts, des sables très feldspathiques verdâtres, localement à débris de bois fossilisés, puis des argiles à marmorisations rougeâtres et à terriers abondants au sommet. Ces dépôts évoluent d'une dizaine de mètres d'épaisseur, en bordure des formations du Crétacé, à 30 et 35 m dans le secteur compris entre Boscamnant et la Genétouze. Cet ensemble présente sur le plan minéralogique des différences importantes explicables en partie par la configuration du milieu de dépôt (bassin fermé). Cet ensemble fournit des argiles kaoliniques dans la région de Saint-Pierre-du-Palais et Saint-Martin-de-Coux. Le pourcentage de kaolinite varie de 70 à 90 % et même 100 % avec un reliquat d'illite et de smectite. Il s'agit, dans le secteur de Guizengeard, d'argiles hyper-alumineuses présentant des teneurs en alumine de 36 à 46 %.

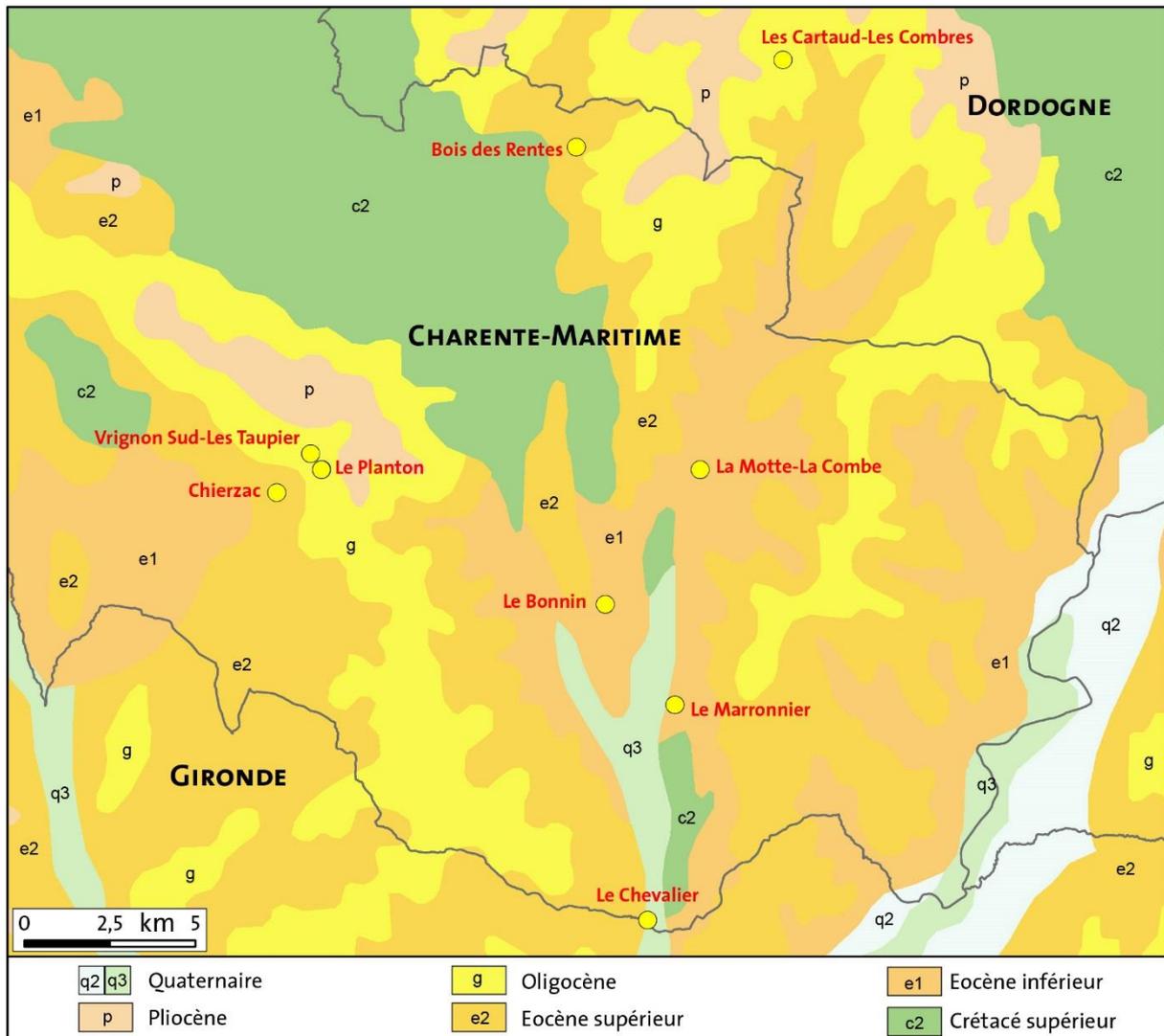


Figure 29 : Carte géologique des carrières actives d'argiles kaoliniques du bassin des Charentes (Source : BRGM).

4.4.3 Bassin des argiles kaoliniques de Provins

Les argiles kaoliniques du bassin de Provins sont aujourd'hui exploitées dans sept carrières (Figure 30). Les argiles kaoliniques sont encaissées dans la formation argilo-sableuse de l'Yprésien inférieur (Sparnacien). Les argiles peuvent atteindre de 10 à 15 m de puissance. Ce sont des argiles réfractaires, des argiles à faïence, des argiles extra-alumineuses. Elles sont blanches, grises ou bariolées suivant leur qualité. Vers la base, elles sont parfois pyriteuses. Aux Grands-Pieux, elles contiennent de petits cristaux de gypse les rendant impropres à l'exploitation. À leur base, des couches argileuses fortement chargées en matière organique et de couches de lignite, ou bien des sables plus grossiers ferrugineux sont presque toujours décrits.

À Saint-Edme (Soisy-Bouy), des troncs d'arbres et des restes de végétaux ont été dégagés de cette couche de base. À Villenaux, l'argile se délite facilement et porte de très belles empreintes de végétaux. Les sables forment des poches plus ou moins nombreuses dans ces argiles ou bien constituent la totalité de l'étage. Les passages latéraux se font très rapidement en quelques décimètres. Il s'agit de sables blancs, jaunes ou roux, fins, à litages obliques, plus ou moins argileux. Ces sables constituent une masse homogène avec quelques petits lits argileux et à la base, des niveaux ferruginisés et plus grossiers.

L'exploitation des argiles kaoliniques se fait à ciel ouvert mais dans le passé, elle se réalisait en souterrain, le plus souvent en galeries de plain-pied, en descenderies ou en puits. Les principaux centres se situent à Villenauxe, Montpothier, dans le Bois des Gros-Grès, à Soisy-Bouy, Chalautre-la-Petite, Longueville, Sainte-Colombe, Septvieille, Poigny, Provins, Saint-Brice, et Richebourg.

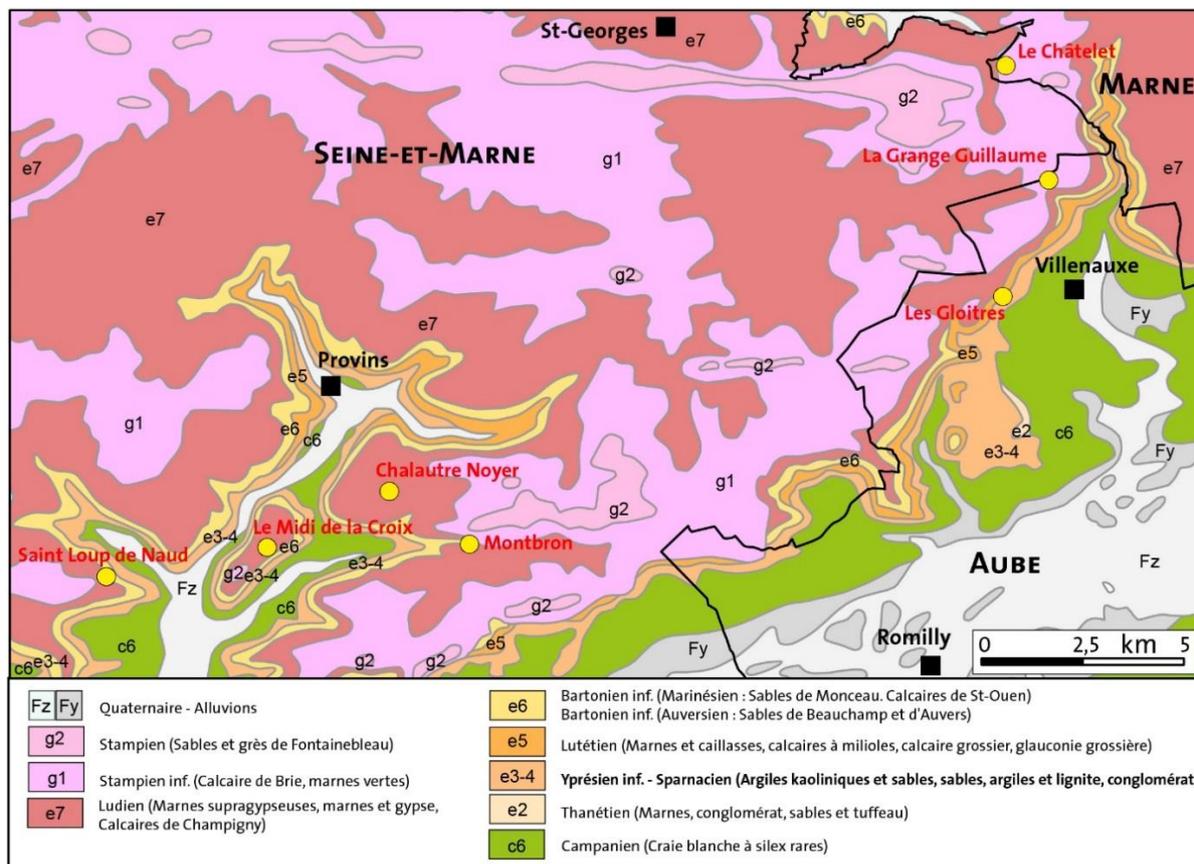


Figure 30 : Carte géologique des carrières actives d'argiles kaoliniques du bassin de Provins (Source : BRGM).

4.4.4 Bassin des argiles kaoliniques de Limagne

Les gisements d'argiles kaoliniques du bassin de Limagne se concentrent autour des communes de Beaulon, Diou, Thiel-sur-Acolin et Saint-Pourçain-sur-Besbre, dans l'Allier.

Les horizons d'argiles kaoliniques exploités à Diou (les Charbonnières) et à Beaulon (l'Hautmoucheron) pour la fabrication de produits céramiques, se situent dans la formation géologique des « Sables et Argiles du Bourbonnais » âgée du Plio-Quaternaire. Au sud de Molinet (la Tuilerie, le Moulin-Préault) les horizons argilo-silteux ont été exploités pour la fabrication de poteries et de tuiles sur 6 m environ.

La formation géologique des « Sables et Argiles du Bourbonnais » âgée du Plio-Quaternaire possède de nombreux niveaux dont un spécifique où sont exploitées des argiles kaoliniques. Il s'agit d'un niveau à argiles, silts et sables fins indifférenciés. Les matériaux fins qui constituent la fin de la première séquence sédimentaire peuvent être représentés, suivant le lieu, soit par une alternance pluri-séquentielle d'argiles, de silts ou de sables fins, soit par l'un de ces termes. En effet, les sables grossiers ou les sables à galets sont surmontés, dans la quasi-totalité de leur extension, par des sédiments à nette dominante argileuse. Leur puissance, variable d'un point à un autre, est d'environ 10 m. Les principales teintes affectant

ces dépôts sont généralement le gris, beige, verdâtre, jaunâtre, rose, mauve, bleuâtre, brun, kaki, brunâtre, ocre, roux.

Un banc d'argile blanche surmonté d'une argile grise, mauve ou noire, compacte, cireuse, à bois fossiles localement, nettement plus extensive, peut s'interstratifier à divers niveaux dans la masse des sédiments fins ou se substituer à ceux-ci. Lorsqu'il existe, il constitue un excellent repère stratigraphique. Son épaisseur varie de quelques centimètres à plusieurs mètres, déterminant un ombilic sédimentaire orienté sud-est – nord-ouest, sensiblement parallèle au cours de la Loire.

Les épaisseurs maximum relevées sont de l'ordre de 4 m pour les argiles kaoliniques réfractaires. Lorsque le cailloutis supérieur surmonte directement les argiles noires, le contact s'effectue par l'intermédiaire d'un horizon silteux ou argileux centimétrique, ocre vif, auquel se substitue parfois un horizon sableux, brun roux, ferruginisé, se débitant en plaquettes de 1 à 2 cm. Ces argiles indiquent un environnement fluvio-lacustre à fluvio-palustre.

4.4.5 Bassin des argiles kaoliniques du Centre-Berry

- ***Gisements de Lureuil et Tournon-Saint-Martin***

Les gisements de Lureuil et Tournon-Saint-Martin se situent dans le département de l'Indre près de Le Blanc (Figure 31). Ces argiles kaoliniques sont exploitées depuis plusieurs dizaines d'années dans la région de Tournon-Saint-Martin (la Blinerie, la Duranderie), Lureuil (Pazeraux, la Bordellerie) et Martizay (les Hautes-Maisons). Il s'agit d'argiles kaoliniques noires, massives, sans stratification apparente. Elles contiennent des nodules de pyrite, quelques rares fragments d'exogyres (fossiles d'huître) et localement des gypses diagénétiques limpides en baguettes radiaires de plusieurs centimètres de long. Il s'agit d'un faciès d'altération développé au toit des calcaires bioclastiques glauconieux et des marnes d'âge Cénomaniens. Ce profil d'altération est scellé par la surface de ravinement du Tertiaire de Brenne. Ces argiles kaoliniques montrent des variations d'épaisseur notables sous la couverture du Tertiaire. Elles peuvent être totalement absentes du contact avec le Cénomaniens ou se développer sur plus de 4 m d'épaisseur.

Ainsi, de 0,2 m à 4 m d'épaisseur, ces argiles kaoliniques sont extraites après avoir dégagé la formation du Tertiaire de Brenne qui les recouvre le plus souvent sur 15 à 20 m d'épaisseur. L'attrait pour ces argiles kaoliniques noires tient dans le fait qu'elles deviennent blanchâtres à la cuisson et intéressent ainsi les faïenciers. Une partie de la production est dirigée vers les faïenceries de l'est de la France, de l'Allemagne et de l'Italie pour la fabrication de carreaux et de mobilier sanitaire.

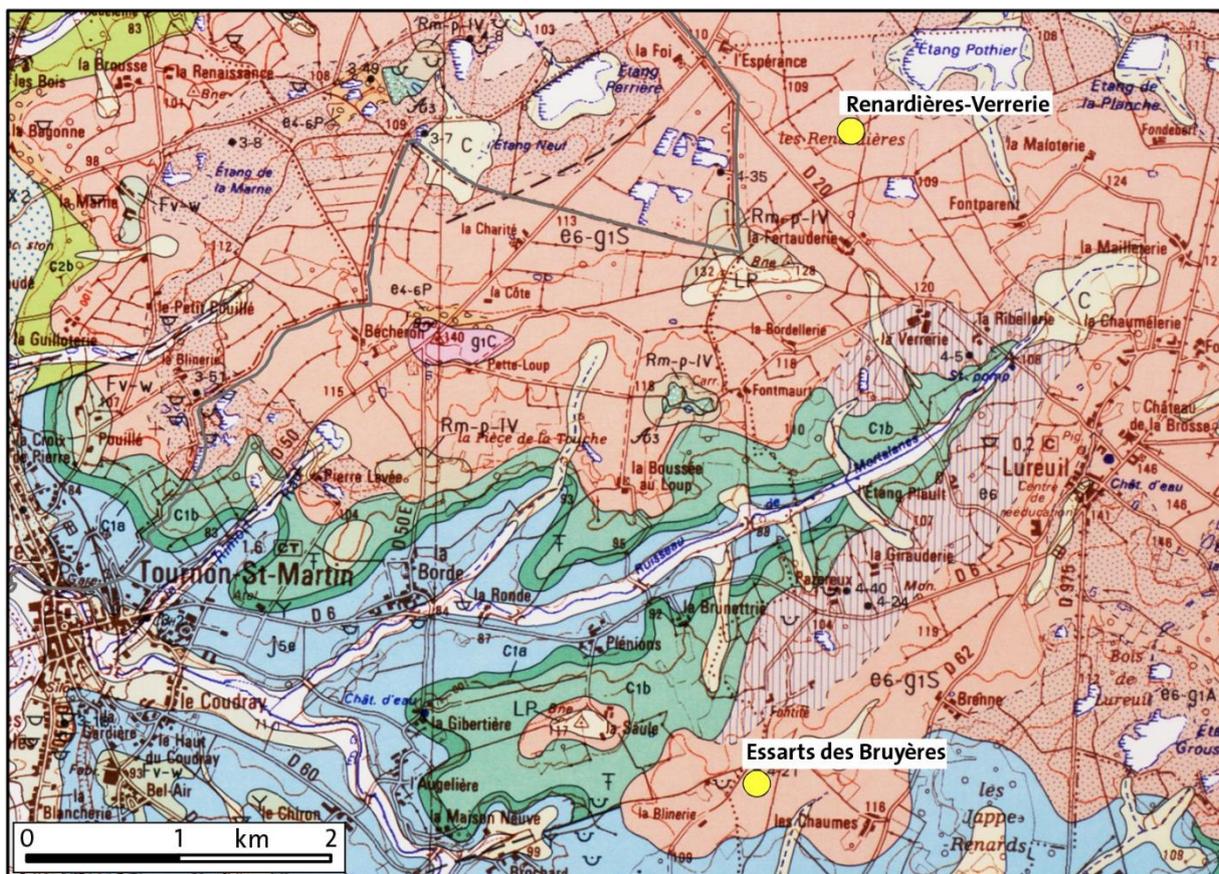


Figure 31 : Carte géologique des gisements de Lureuil et Tournon-Saint-Martin (Indre). Les argiles kaoliniques sont issues de l'altération des formations calcaires du Cénomaniens (en vert) et recouvertes par des formations sablo-argileuses du Tertiaire (en rose). Source : BRGM.

- **Gisement de Gournay**

Le gisement de Gournay se situe dans le département de l'Indre et les argiles kaoliniques sont exploitées dans la carrière de Pongautron (Figure 32).

Le niveau d'argiles kaoliniques exploité se situe au sommet des terrains datés du Toarcien-Aalénien inférieur (Jurassique). Il s'agit de marnes passant à des argiles au sommet pour une épaisseur totale de la formation d'environ 75 m. Cette puissante série marneuse et argileuse forment les pentes de la cuesta. Elle se suit depuis Chazelet, à l'ouest, par Celon, le Xenoux, Malicornay jusqu'aux abords de Neuvy-Saint-Sépulchre vers l'est. Ces marnes grises admettent quelques petits bancs de calcaires argileux gris.

La partie supérieure de la formation, peut-être à des niveaux stratigraphiques légèrement différents mais toujours sous les dépôts du Tertiaire (altération anté-Éocène supérieur ?), passe à des argiles qui ont été utilisées pour les tuileries (le Fay, Celon) et font maintenant l'objet d'une extraction intense à Pongautron (tuiles et céramiques). De petites plaquettes finement gréseuses et micacées de quelques millimètres à quelques centimètres d'épaisseur de couleur rouille y sont incluses.

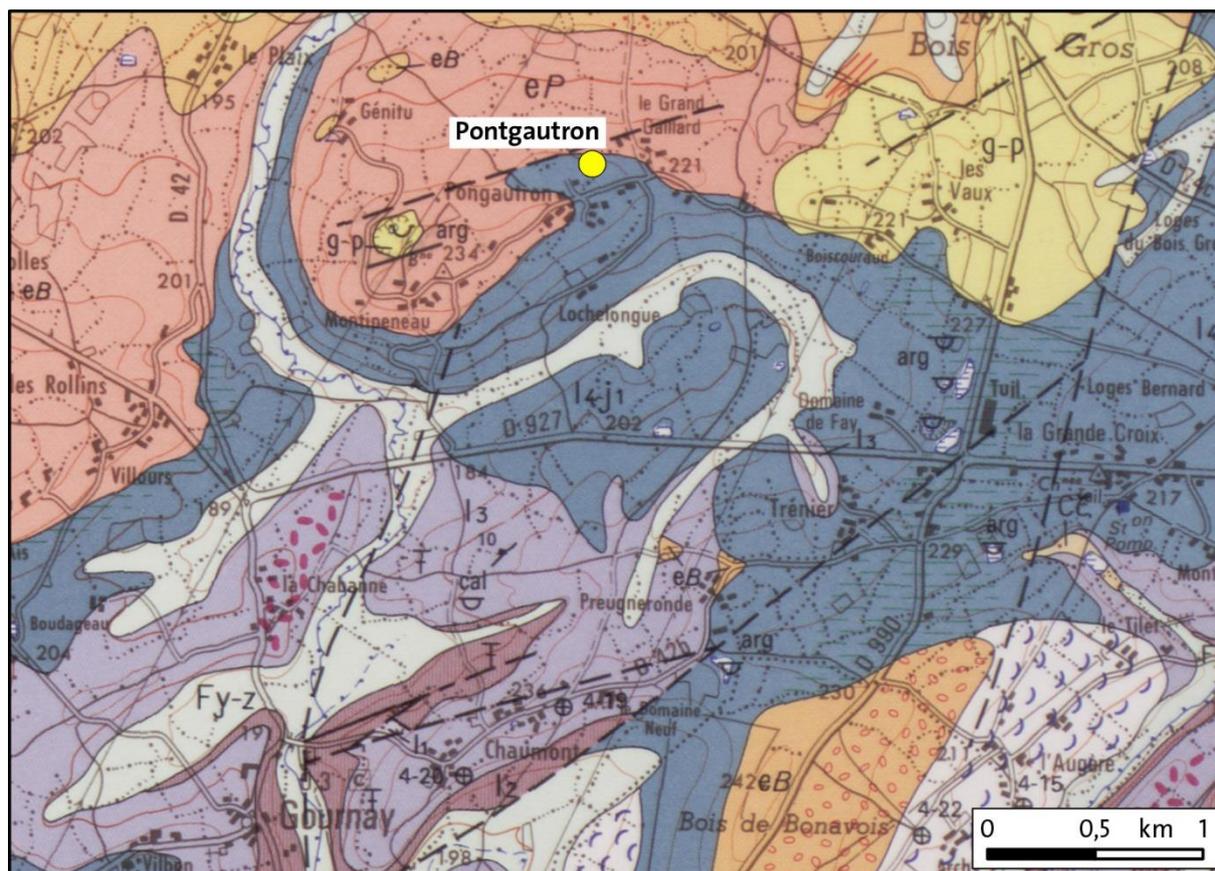


Figure 32 : Carte géologique du gisement de Gournay (carrière de Pongautron) dans l'Indre. La formation du Jurassique porteuse d'argiles kaoliniques est indiquée en bleu-violet sur la carte (I_4-j_1). Source : BRGM.

4.4.6 Le kaolin du Massif central

- **Gisement de Beauvoir**

Le gisement de Beauvoir se situe près de la commune d'Échassières dans l'Allier (Figure 33). Imerys exploite actuellement ce gisement, connu depuis le XIX^e siècle. Le kaolin est issu de l'altération d'un granite à albite, lépidolite, topaze et métaux rares âgé d'environ 308 millions d'années. Il s'agit d'un granite très leucocrate encaissé dans des micaschistes à deux micas, des micaschistes leucocrates et des chloritoschistes du groupe de La Sioule d'âge Protérozoïque probable. Le profil d'altération est épais, en moyenne 60 m et peut atteindre jusqu'à 200 m de profondeur le long de certaines fractures. Deux types d'altération ont pris place : (1) une altération hydrothermale précoce associée à des fluides chauds riches en fluor et en lithium ayant permis la formation de nombreuses veines et amas micacés de type greisen, et (2) une altération météorique postérieure. Le kaolin de Beauvoir est grossier, très blanc et bien cristallisé avec une faible teneur en fer (0,36 % Fe_2O_3) et une absence de titane. Proche de zones où ces enclaves de roches encaissantes sont présentes, la teneur en fer augmente (0,6 % Fe_2O_3). Au nord de la carrière le kaolin est rosé et plus riche en fer (1,1 % Fe_2O_3).



Figure 33 : Carrière de kaolin de Beauvoir près d'Échassières, Allier (Source : BRGM).

4.4.7 Bassin du sud-est

- **Gisements d'Hostun**

Les gisements de la région d'Hostun se situent à l'est de Romans-sur-Isère dans la Drôme. Il s'agit de sables kaoliniques d'âge Éocène affleurant sur le flanc ouest du chaînon de Saint-Nazaire-en-Royans entre la Baume-d'Hostun et Beauregard-Baret (Figure 34 et Figure 35). Les sables ravinent les calcaires gréseux du Sénonien (Crétacé supérieur), sont friables à pulvérulents et plastiques lorsque la proportion de kaolinite est importante. Les fines particules kaoliniques proviennent du Massif central et n'ont pas dépassé vers l'est le seuil constitué par le chaînon de Saint-Nazaire-en-Royans. Les sables kaoliniques sont exploités depuis le milieu du XIX^e siècle. Les réserves, considérables, sont évaluées à plusieurs centaines de millions de tonnes sur l'ensemble du massif.

Les sables kaoliniques exploités appartiennent à la formation d'âge Éocène des « Sables siliceux blancs et rouges ». Épaisse série de sables uniquement siliceux, homogènes, apparaissant surtout au contact des formations du Sénonien, plus rarement de celles de l'Urgonien (vers Saint-Nazaire). La formation sédimentaire débute par une centaine de mètres de sables blancs, kaoliniques seulement à l'ouest de la montagne de Musan (exploitations entre la Baume-d'Hostun et Beauregard-Baret, qui remplissent des poches karstiques des calcaires du Vercors, jusqu'aux niveaux de l'Hauterivien. Elle se termine par des sables rouges réfractaires (altération des sables blancs), très épais à Saint-Nazaire (100 m) qui sont exploités en carrières. Leur épaisseur décroît vers le sud et l'est, où ils apparaissent en affleurements réduits (Pont-en-Royans) et en poches isolées sur les reliefs calcaires.



Figure 34 : Carrière de sables kaoliniques près d'Hostun, Drôme (Source : Sibelco).

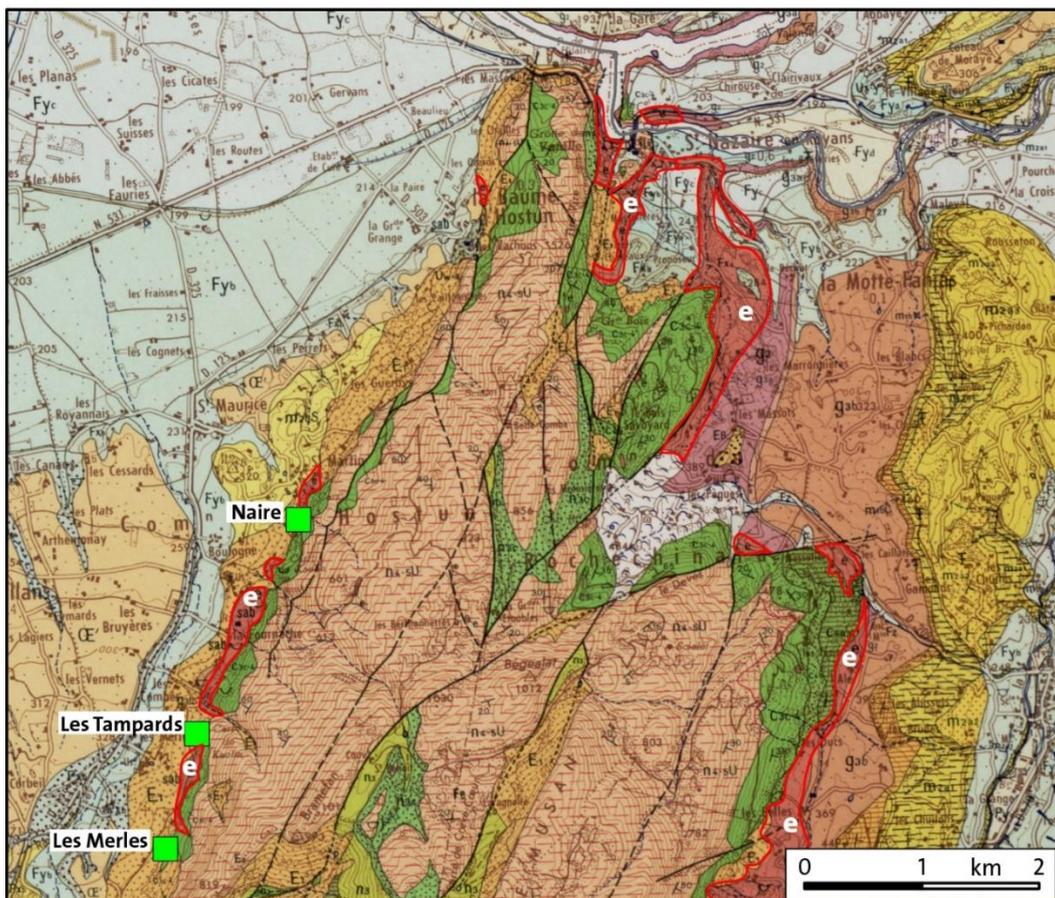


Figure 35 : Carte géologique des gisements de la région d'Hostun (Drôme). La formation géologique potentiellement porteuse en sables kaoliniques, d'âge Éocène est surlignée en rouge (Source : BRGM).

- **Gisement de Tain-l'Hermitage**

Le gisement de Tain-l'Hermitage, dans la Drôme, est composé de sables kaoliniques d'âge Éocène-Oligocène développés sur le granite varisque du Tournon (granite porphyroïde à biotite). Les sables kaoliniques constituent la formation des « Sables de Douévas ». Il s'agit d'une alternance de bancs sableux et graveleux, blancs ou jaunâtres, fins à grossiers, et de bancs caillouteux de puissance métrique, lités, à galets bien arrondis de taille variable (jusqu'à 0,10 m) composés de roches cristallines et cristallophylliennes altérées, blanchies, fragiles, auxquelles se mêlent des chailles blanches et des galets et graviers ovoïdes parfaitement arrondis de quartz hyalin éolisés, et localement des concrétions de calcédoine. La stratification, horizontale, est en bancs d'épaisseur variable. En l'absence de faune, cette formation a été rapportée à l'Éocène, mais tout ou partie pourrait aussi bien appartenir à l'Oligocène par analogie de faciès avec les dépôts oligocènes reconnus à proximité plus au nord. Localement, ces sables siliceux ont été irrégulièrement consolidés en grès siliceux de type quartzitique, extrêmement durs, que l'érosion dégage des sables meubles et qui se dressent alors en reliefs ruiniformes très spectaculaires comme au lieu-dit les Roches-qui-dansent (au nord de Douévas).

4.4.8 Autres

- **Gisement de Livry**

À la Barre, sur la commune de Livry (Nièvre), une carrière à ciel ouvert à deux couches de sables kaoliniques âgés du Rhétien (Trias supérieur) est exploitée depuis 1929 (Figure 36). Ces sables kaoliniques sont utilisés dans les industries de la céramique (porcelaine, faïence, carreaux et sanitaire). Ce même niveau a été exploité autrefois en carrière souterraine au Pont du Veurdre, et à ciel ouvert, sur la bordure ouest de la forêt de Chabet, au sud d'Azy-le-Vif.

Il s'agit d'une formation géologique constituée de grès, d'argiles et de sables kaoliniques. Cette formation montre une épaisseur de 12 m vers Azy-le-Vif, et 25 m dans les carrières de la Barre. La formation âgée du Rhétien (aucune preuve paléontologique à ce jour) débute dans ces carrières par 2,70 m de sables feldspathiques à matrice argileuse. Ces sables sont grossiers, les grains de quartz dépassant souvent le centimètre surtout vers la base. D'après l'exploitant, ce niveau est le plus riche en kaolinite. L'étude des argiles indique 16 % de ce minéral avec 25 % d'illite et 59 % de smectite. Les minéraux lourds associés sont représentés par de la muscovite, biotite, tourmaline, zircon, rutile, anatase, monazite. Au-dessus, 0,60 m d'argiles vertes, très compactes, séparent le premier niveau d'un second épais de 3 m, toujours constitué de sables grossiers, feldspathiques et argileux. Seuls ces deux niveaux sont exploités pour la kaolinite. Viennent ensuite 3,50 m de sables grossiers blanchâtres, feldspathiques, avec des intercalations d'argiles vertes compactes, parfois sableuses, micacées. Puis, sont observés 3 m d'argiles vertes et rouges (prédominantes) avec des passées sableuses, et 2 m de sables grossiers, grisâtres à blanchâtres, peu argileux. Succèdent à ces sables grossiers, 1 m d'argiles vertes alternant avec des niveaux sableux. Au-dessus 3 m de sables grossiers blanchâtres à ocres, avec des éléments argileux montrent des litages obliques. La série se termine par 4 m d'argiles vertes et rouges, les rouges étant nettement dominantes. Aux argiles rouges font suite des calcaires dolomitiques, jaunes, cagneulisés, attribués à l'Hettangien (Jurassique inférieur).

La formation qui renferme les sables kaoliniques est donc bien individualisée, car elle sépare les séries argileuses rouges du Trias de la série carbonatée du Jurassique inférieur. Au sud d'Azy-le-Vif, d'anciennes carrières aujourd'hui noyées ont autrefois exploité des sables kaoliniques. Les sables kaoliniques n'ont pas été rencontrés en rive gauche de l'Allier.

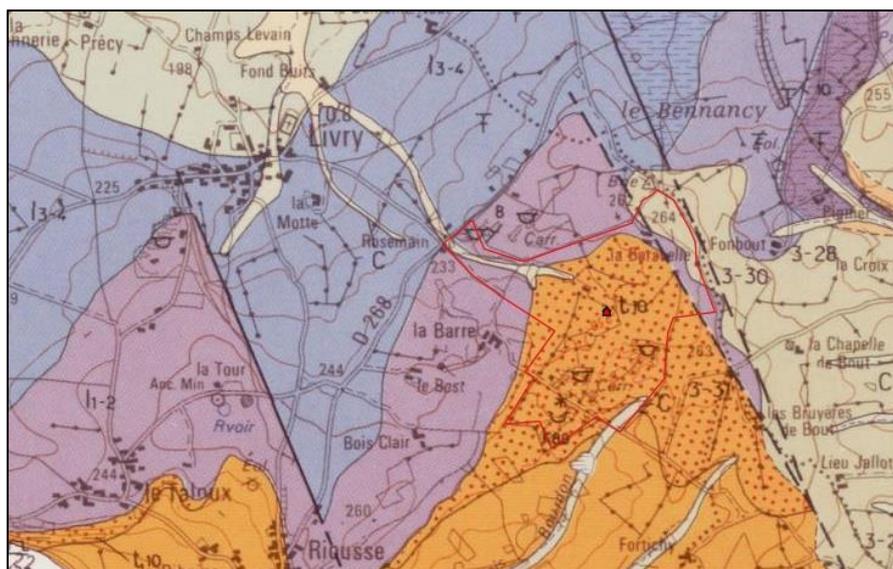


Figure 36 : Carte géologique du gisement de sables kaoliniques de Livry (Nièvre). La formation géologique porteuse est en orange avec des points rouges et noté t₁₀ (Source : BRGM).

- **Gisement de Fumel**

Le gisement de Fumel se situe dans le département du Lot-et-Garonne. La formation géologique exploitée correspond à la base du Tertiaire fluviatile (Yprésien et Lutétien) et se caractérise par des amas d'argiles kaoliniques plus ou moins réfractaires (Figure 37 et Figure 38). Les deux principales formations exploitées sont celles de Cuzorn (Yprésien) et du Brétou (Lutétien à Éocène supérieur).

La formation de Cuzorn consiste en des sables fins, des argiles blanches kaoliniques et des argiles à marmorisations (jusqu'à 30 m d'épaisseur). Cette formation est bien entendu observable dans la carrière active du Brétou à Fumel mais aussi dans les anciennes carrières de Gavaudun, des communes de Cuzorn, Blanquefort, Paulhiac ou Saint-Front.

Bien que très perturbés par les soutirages karstiques, ces dépôts se laissent subdiviser de façon synthétique en deux ensembles. À la base, existe une formation d'argiles kaoliniques compactes grises à rosées que l'on ne peut observer sur quelques mètres qu'au fond de la très grande carrière du Brétou à Fumel. D'après les archives des exploitants, elle pourrait y atteindre 30 m d'épaisseur. C'est cette formation avec des argiles noires qui constitue le fond de la carrière du Sauvage, profonde d'une vingtaine de mètres sous le niveau d'eau. Le deuxième ensemble, plus répandu, débute par des sables fins blancs à jaunâtres peu argileux visibles notamment dans la carrière de la Terre Rouge près de Gavaudun. Ils sont surmontés par une assise d'argiles kaoliniques crème indurées, à gros quartz et marmorisations ferrugineuses rougeâtres, que l'on retrouve dans toutes les anciennes exploitations (Bois d'Aillon, Al Calfour, Lasclapades au sud des Anjeaux, Saran, le Coulon, Capoulèze, Lasalède, etc.). Son épaisseur peut atteindre 10 m.

La formation du Brétou consiste en des sables grossiers versicolores à lentilles argileuses (jusqu'à 40 m d'épaisseur). Il s'agit de sables grossiers argileux vert pâle à jaunâtre, feldspathiques et micacés à petits graviers roulés. Les grains de quartz sont anguleux et brillants, attaqués chimiquement, très mal classés. Presque partout les circulations et précipitations d'oxyde de fer ont coloré ces sables de teintes très vives allant du gris foncé au jaune orangé et au rouge violacé. Les petites couches d'argiles plastiques silteuses qui y sont interstratifiées sont également versicolores, la kaolinite est toujours très largement dominante. Vers le haut de cette masse sableuse, des silicifications parfois très massives ont pris

naissance. Ces grès siliceux (grisons) parfois très durs peuvent atteindre 3 à 6 m d'épaisseur mais sont le plus souvent démantelés et forment des « chaos ».

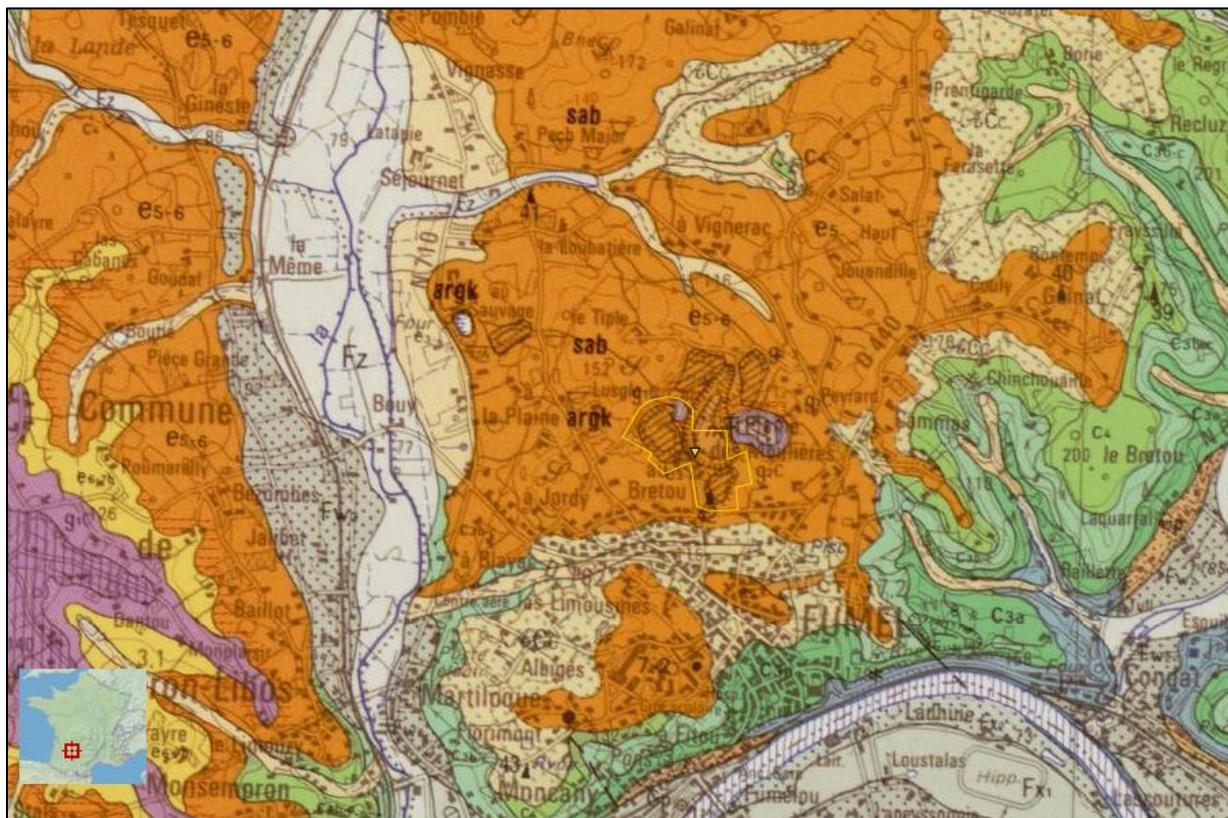


Figure 37 : Carte géologique du gisement à sables kaoliniques de Fumel (Lot-et-Garonne). La formation géologique porteuse est en orange et notée e₅₋₆ (Source : BRGM).

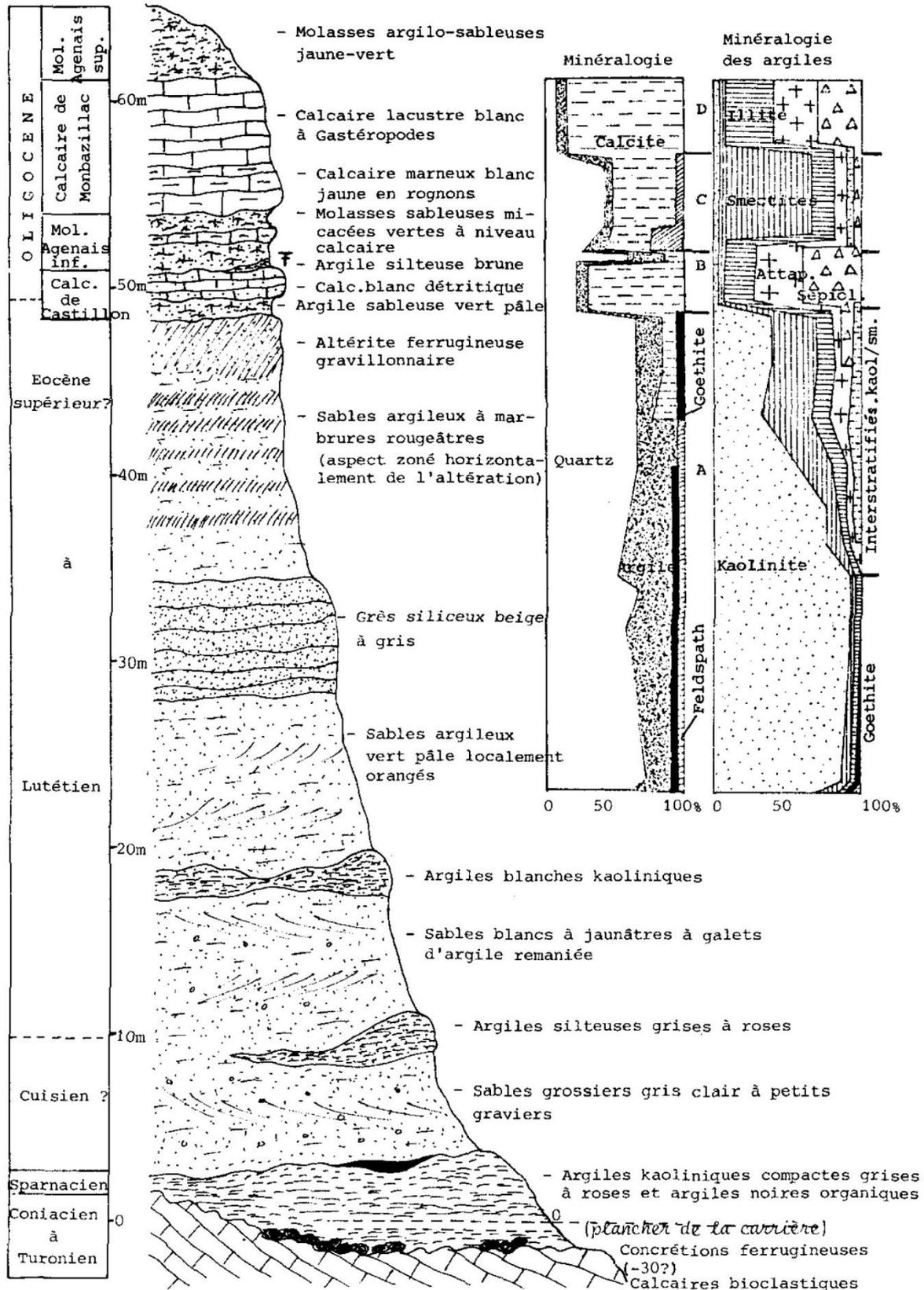


Figure 38 : Coupe géologique dans l'ancienne carrière du Brétou où apparaissent les niveaux à argiles kaoliniques du Tertiaire exploités à Fumel (Source : BRGM).

4.5 CRITÈRES D'EXPLOITABILITÉ, MODES D'EXTRACTION ET PRINCIPES DE TRAITEMENT

4.5.1 Les critères d'exploitabilité : généralités

Les critères d'exploitabilité des kaolins et des argiles kaoliniques **sont très variables suivant la qualité du gisement et les applications industrielles.**

Au niveau régional, des études de terrain (prélèvements superficiels puis sondages avec analyses) permettent de comprendre le contexte géologique régional et d'identifier les zones à forte susceptibilité de présence de gisements. Ils aboutissent à la sélection de sites à fort potentiel.

Au niveau du gisement, la phase d'étude consiste à réaliser une campagne de sondages et d'analyses des échantillons prélevés. Cette phase permet de définir :

- la/les qualité(s) minimale(s) pour l'utilisation recherchée ;
- la répartition spatiale du gisement ainsi que les réserves par qualité. Très souvent, la présence d'un volume minimal est requise pour garantir la rentabilité d'une exploitation ;
- la présence d'éventuels « pénalisants » : oxydes métalliques (FeO_2 , MnO_2 , etc.), métaux lourds associés à la minéralisation, silice détritique accompagnant les dépôts (gisements sédimentaires), matière organique ou éléments non kaolinisés résiduels (gisements primaires). Il convient donc de s'interroger sur différents points en fonction des gisements rencontrés : Quelle est leur distribution ? Ces éléments sont-ils séparables ? Sous quelle forme se présentent-ils ? Les éléments pénalisants d'un gisement peuvent être très nombreux et leur répartition peut varier fortement. Les conséquences diffèrent en fonction des applications ; ainsi la présence de fer sera défavorable pour les applications céramiques et sont en revanche un atout pour les applications réfractaires ;
- la géométrie du gisement et notamment l'épaisseur de découverte (mort terrain ou gisement altéré non exploitable). Le ratio de découverte est lié à la rareté des gisements et surtout au prix de vente du produit final. Il est admis pour les applications nobles de kaolin des ratios de découverte de 3/1 pour des épaisseurs de gisements de 3 à 12 m (Rapport BRGM-40377, 1998) ;
- un plan d'exploitation garantissant un coût lissé du traitement, de la découverte, du réaménagement du site (lorsque ce dernier est phasé), et un approvisionnement constant dans toutes les qualités sur la chaîne de traitement durant toute la durée de vie de la carrière.

4.5.2 Les critères d'exploitabilité : détails par filières

Filière « papier »

La filière papier (charge en masse et agent de couchage), est l'application principale du kaolin et des argiles kaoliniques (environ la moitié du marché). Les critères d'exploitabilité pour cette application requièrent un gisement avec les points suivants :

- bonne blancheur, un faible indice de jaune, et préférentiellement une légère teinte bleutée (certains gisements présentent un blanc légèrement bleuté, des azurants optiques peuvent aussi être incorporés dans le procédé de traitement) ;
- une granulométrie suffisante, car seule la fraction fine sera utilisée par voie humide, une partie du gisement pourra donc ne pas être utilisable pour les applications papier (valorisée d'en d'autres filières ou stériles d'exploitation) ;
- absence de quartz, d'halloysite et de smectite dans le gisement (Pouliquen, 2014).



Figure 39 : Exploitation de kaolin à Ploemeur. Ce site fournit du kaolin pour l'industrie papetière, la production de céramique et d'émail, de charges industrielles, et de composés pour fibres de verre (Source : BRGM).

Filière « céramique » (« Ball-clays »)

C'est la deuxième filière du kaolin et des argiles kaoliniques (un peu plus du quart du marché). Le gisement doit renfermer un matériau avec les points suivants :

- bon comportement rhéologique (coulabilité : viscosité, concentration en solide : densité, temps de prise) ;
- faible teneur en fer et titane requise pour la blancheur ;
- présence de micas entre 10-15 % du volume ;
- pas de smectite : néfaste au coulage et au retrait à la cuisson (Pouliquen, 2014) ;
- présence de quartz utile, car il empêche la déformation de la céramique pendant la cuisson (Rahimi et Matin, 1989) et au démoulage ;
- présence d'halloysite améliorant la plasticité pour les porcelaines.

Les qualités les plus faibles sont utilisées pour les carrelages (masse des carreaux) avec une granulométrie grossière de l'ordre de 45-60 μm .

Filière « Charge pour caoutchouc, peintures, plastiques, adhésifs et chimie »

Cette filière représente environ 15 % du marché du kaolin et des argiles kaoliniques. Les gisements doivent présenter les points suivants :

- bon fuseau granulométrique ;
- absence de quartz (pour les caoutchoucs, peintures et plastiques) ;
- blancheur suffisante (pour les plastiques et peintures).

Filière « réfractaire » (« Fire-clays »)

Cette filière représente quelques pourcents du marché du kaolin. Le gisement peut produire deux grands ensembles de matériaux en fonction de la teneur en Al_2O_3 :

- réfractaire silico-argileux $10 \% < Al_2O_3 > 30 \%$;
- réfractaire à haute teneur en alumine $30 \% < Al_2O_3 > 45 \%$ (4 catégories : I, II, III, IV).

Il faut un gisement avec les points suivants :

- faible teneur en fer et titane ;
- faible teneur en oxydes alcalins (K_2O , Na_2O , CaO , MgO) ;
- faible teneur en quartz (le quartz crée une variation volumique néfaste) ;
- perte au feu limitée ;
- présence de fer intéressante pour cette application car elle présente un effet positif en abaissant le point de fusion de 20 à 30 °C ;
- constance dans la teneur en impuretés influençant les diagrammes de phase comme les oxydes de fer et de titane, muscovite, feldspath.

Filière « fibre de verre et verrerie »

Cette filière représente quelques pourcents du marché du kaolin et des argiles kaoliniques. Le gisement doit présenter les points suivants :

- faible teneur en fluor et titane ;
- absence d'éléments trace (As, Hg, autres métaux lourds) ;
- absence de certains minéraux réfractaires (chromite, rutile, corindon, andalousite) ;
- fuseau granulométrique spécifique ($< 200 \mu m$) ;
- composition la plus constante possible (notamment en oxydes de fer qui influencent la viscosité et dont la teneur doit rester basse).

Filière « additifs pour bétons haute performance et liants routiers »

Cette filière représente quelques pourcents du marché du kaolin et des argiles kaoliniques. Les contraintes sur la qualité du gisement sont faibles. La présence de silice mélangée au matériau n'a pas de conséquence, la silice est même requise pour les ciments blancs.

Filière de niche : « pharmacie, cosmétique, agriculture, alimentation animale »

Cette filière représente quelques pourcents du marché du kaolin et des argiles kaoliniques. Les contraintes sur la qualité du gisement sont particulièrement exigeantes sur l'absence de contaminants toxiques : métaux (Pb, As, Hg, Cd et plus récemment Al soupçonné d'être neurotoxique), amiante, dioxine, etc.

4.5.3 Modes d'extraction

Les modes d'extraction du kaolin dépendent :

- **de la dureté du matériau** : en France tous les gisements exploités se présentent sous la forme de matériau tendre ne nécessitant pas de minage. L'extraction est réalisée à la pelle (Figure 39 et Figure 40). Toutefois, certains éléments inclus dans le gisement ou la découverte, peuvent localement nécessiter une phase de minage ;
- **de la qualité du matériau** qui conditionne son usage. Ainsi, une utilisation qui requiert peu d'exigence de qualité n'aura pas les mêmes méthodes d'exploitation qu'un matériau avec des spécificités de qualité strictes à respecter pour une utilisation plus spécifique.

Pour les gisements de kaolin et argiles kaoliniques à faible contrainte de qualité, l'exploitation s'effectue directement à la pelle mécanique et chargée sur camion. Le tri sur site est succinct.

Pour les gisements de kaolin et argiles kaoliniques à forte contrainte de qualité, un tri est opéré sur place. L'exploitation s'effectue à la pelle mécanique de petite taille, un minage continu est envisageable, toujours avec un chargement sur camion ou par convoyeur. L'opérateur s'appuie à la fois sur le plan d'exploitation issu du modèle qualité réalisé, du suivi qualité durant l'exploitation mais aussi sur un contrôle visuel pour les qualités de gisement visible à l'œil nu (comme les fractures riches en oxydes de fer de teinte rouge). La précision du plan d'exploitation et l'expérience des opérateurs à l'extraction est importante car elle conditionne la bonne alimentation de la chaîne de traitement en qualité ainsi que sa régularité.



Figure 40 : Pelle mécanique manipulant le kaolin en attente de traitement à Ploemeur (Source : BRGM).

Le kaolin et les argiles kaoliniques étant argileux, les conditions météorologiques sur l'exploitation sont parfois déterminantes et l'extraction peut parfois s'opérer uniquement lors de périodes favorables.

Sur certains sites présentant la possibilité de lagunage et une production par voie humide, une exploitation partielle du site par lance à eau de type monitor est opérée. Les fronts de taille sont creusés à la lance à eau puis pompés sur place.

Certaines unités de production d'argiles kaoliniques correspondent à un co-produit. C'est le cas des sites du secteur d'Hostun (Drôme) qui produisent plusieurs centaines de milliers de tonnes par an de sables siliceux pour l'industrie ainsi que 10 kt/an d'argiles kaoliniques issues du lavage des sables.

4.5.4 Prétraitement

Voie humide

Sur les installations par voie humide (Figure 41), le matériau est préalablement débourbé, lavé et classé sur crible. Si un système de pompage de pulpe existe, la pulpe est acheminée jusqu'à un classificateur par voie humide.

Les éléments grossiers sont écartés et seules les particules les plus fines alimentent la voie humide des installations.

Voie sèche

Sur les installations par voie sèche, l'objectif est d'éviter le contact avec l'eau et de favoriser durant le traitement le séchage naturel afin de limiter les coûts de séchage dans l'installation.

Ainsi, le matériau sorti de l'exploitation est débourbé, criblé et entreposé sous hangar abrité et ventilé permettant un pré-séchage naturel. L'extraction peut aussi s'effectuer par temps sec.



Figure 41 : Usine de traitement à Ploemeur (Source : BRGM).

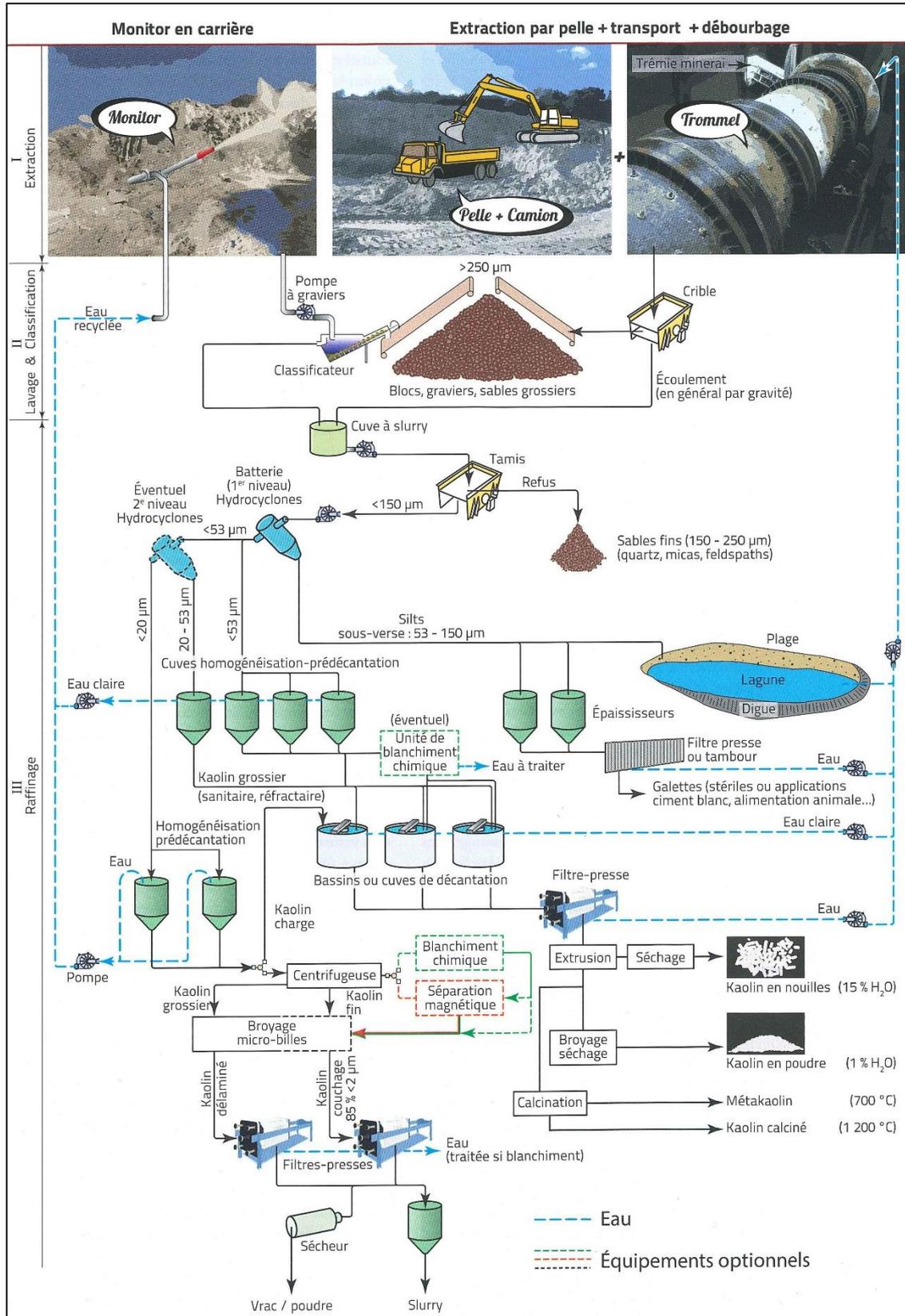


Figure 42 : Production de kaolin par voie humide (Source : d'après Imerys et Pouliquen, 2014).

4.5.5 Les principes de traitement

La transformation après le prétraitement va être très variable en fonction des produits et des filières. Sont distingués dans le traitement : la classification, la séparation, le broyage et pour certaines applications une phase de calcination et des traitements spécifiques.

a) Classification, séparation

D'une manière générale, que le procédé de traitement s'effectue par voie sèche ou par voie humide, le matériau arrivant de l'unité de prétraitement est classé par une série de tamis puis de cyclones (voie sèche) et d'hydrocyclones (voie humide, Figure 43). Le classement permet :

- à la fois la sélection directe de certains produits finis ;
- de préparer un broyage ;
- de séparer les impuretés : sables fins, silts, quartz, feldspath, micas (ces coproduits peuvent par ailleurs être valorisés comme à l'usine de Lanvrian (Ploemeur) qui produit 16 kt de micas (muscovite) par an.



Figure 43 : Hydrocyclones emboîtés à l'usine de traitement de la carrière d'Échassières (Source : BRGM).

Certains produits et coproduits sont commercialisables à l'issue de cette étape.

b) Broyage

Par voie humide, le produit est préalablement essoré dans des filtres presse, puis séché. Il est fréquent d'observer une autre phase de séparation avant le broyage. Le broyage par voie sèche permet de commercialiser des poudres grossières, fines ou micronisées. Mais pour les granulométries les plus fines, un broyage par voie humide est nécessaire (broyeur à microbilles). Le produit fini obtenu par voie humide peut être commercialisé sous forme de :

- poudres et granulés séchés ;
- « nouilles » extrudées (Figure 44) ;
- slurry (produit mélangé à de l'eau formant une pulpe).

Le *slurry* est une gamme très importante dans les charges minérales, notamment dans l'industrie papetière qui incorpore directement la pâte kaolinique liquide dans son procédé industriel. Le kaolin est utilisé dans les usines à papier en voie acide, qui est en diminution par rapport au procédé par voie basique qui incorpore des GCC (*Ground Calcium Carbonates* : carbonates transformés à partir de calcaire, marbre, craie ou calcite blanche).

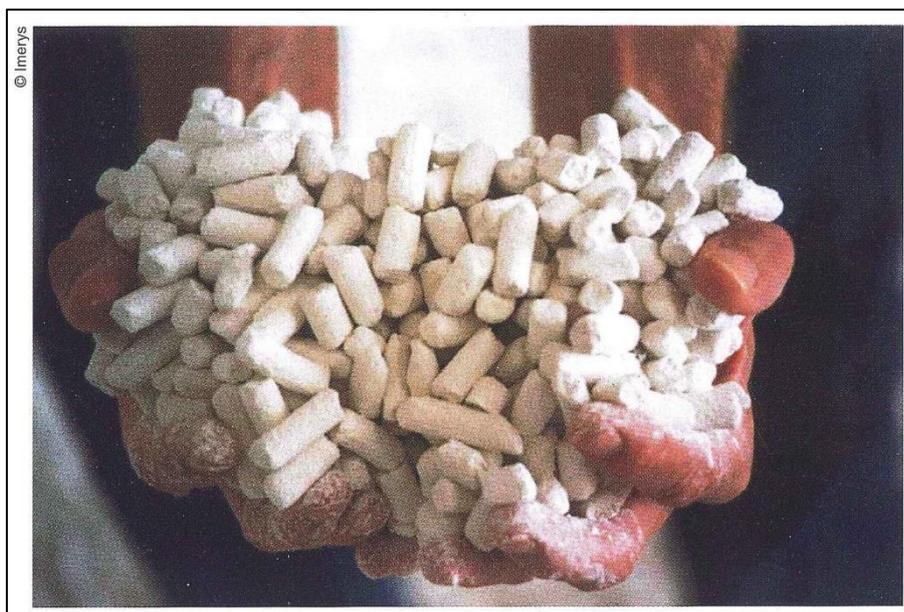


Figure 44 : Kaolin extrudé et séché (Source : Imerys).

À l'issue de cette étape, presque tous les produits sont commercialisables dans les filières sans calcination : charges pour papier, caoutchouc, peintures, plastiques et polymères, adhésifs et mastics, chimie, verrerie et fibres de verre ainsi que les applications de niche où le kaolin est en plus désinfecté (pharmacie, cosmétique, alimentation, agriculture).

c) Traitements spécifiques

Pour certaines applications, le kaolin peut être traité. Ces opérations ajoutent un surcoût et concernent les produits les plus spécifiques et les plus coûteux. Plusieurs méthodes existent :

- **délamination** (améliore le coefficient de forme d'un facteur de 20 à 40), cette opération augmente les propriétés d'écoulement dans les applications papier et plastiques et augmente la résistance à la traction et à la lumière pour les plastiques ;

- **calcination** (métakaolin) pour améliorer la blancheur et la microporosité dans les applications papier et plastiques, au détriment toutefois du coefficient de forme et de l'abrasivité qui augmente ;
- **mélange** : un assemblage GCC-kaolin-talc est parfois réalisé dans la filière papier et un mélange GCC-kaolin est observé dans les charges pour peintures pour sa qualité lamellaire et de durabilité. L'adjonction de GCC, moins coûteux que le kaolin abaisse les coûts des charges. Dans la filière céramique, l'incorporation de très nombreux additifs dans la formulation est réalisée (chamotte réfractaire, argiles grésantes, autres argiles, sables siliceux, feldspath, talc, défloculants, etc.) ;
- **modification des particules** qui permet des usages spécifiques notamment dans les plastiques : kaolin organo-modifié, aussi appelé « greffé ».

d) Calcination

Pour les filières céramique et réfractaire, les additifs pour bétons, les additifs pour liants routiers et de rares produits pour charges industrielles, le kaolin nécessite une calcination. On distingue deux types de calcination :

- **Calcination basse température** entre 650 et 800 °C qui donne le **métakaolin**. Le métakaolin ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) a perdu la fonction hydroxyle OH du kaolin : $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$. La calcination basse température concerne les additifs pour bétons haute performance, additifs pour liants routiers et certaines charges minérales. Le métakaolin est introduit dans la formule du ciment post-cuisson, avec un dosage de 5 à 25 % et dans les liants bitumés routier ;
- **Calcination haute température** entre 1 200 et 1 600 °C qui donne la **chamotte**. La chamotte correspond à une recombinaison complexe en plusieurs phases cristallines constituées de :
 - o mullite (silicate d'alumine) ;
 - o une phase vitreuse et amorphe ;
 - o cristobalite (équivalent du quartz à haute température avec un système cristallin tétragonal). Les modes opératoires ont pour objectif de limiter ou de ne pas former de cristobalite cancérogène.

La calcination haute température concerne les applications céramique et réfractaire. Durant la cuisson, il est fréquent d'y incorporer de très nombreux additifs dans la formulation : chamotte réfractaire, argiles grésantes, autres argiles, sables siliceux, feldspath, talc, défloculants, etc.

Exceptionnellement, le kaolin peut remplacer la phase argileuse du ciment lorsque celui-ci est plus accessible. Le kaolin entre alors dans la constitution du clinker (20% environ) puis est cuit à 1 450 °C dans un four rotatif.

Sont distinguées deux méthodes de calcination :

- **calcination classique** par cycle de plusieurs heures en four fixe (nécessite un matériau grossier cohérent pour l'aération du four) ou en four rotatif (incorpore des matériaux fins) ;
- **calcination « flash »** : calcination très rapide d'un lit fluidisé de matériau préalablement broyé et séché qui permet d'obtenir une meilleure qualité de produit et une économie d'énergie car la température de cuisson est moins importante de 50°C, avec un temps de cuisson réduit. Le séchage est en partie effectué avec les fumées chaudes recyclées. Ce système de cuisson permet également des économies en émission de CO₂ qui complète l'enveloppe des bénéfices de cette méthode.

Les phases de calcination s'opèrent très souvent en deux ou plusieurs phases de cuisson progressives. La pré-calcination permet de limiter les variations de volumes liées aux changements de structure des minéraux chauffés.

Le phasage et la température de calcination sont très variables, le Tableau 3 illustre la variabilité au travers de quelques exemples.

Exemple de filière	Produits	Additifs	1er cuisson	Opérations entre les cuissons	2eme cuisson	Opérations entre les cuissons	3eme cuisson
Céramique (sanitaire)	Chamotte	chamotte réfractaire, argiles grésantes siliceuses, sable siliceux, porcelaine virtifiée, feldspath, talc, défloculants (carbonate ou silicate de sodium)	1250-1280 °C				
Céramique (faïences grand feu)	Chamotte	argiles	1050 °C	Glaçure stannifère, décoration, émailage	1250-1300°C		
Céramique (faïences petit feu)	Chamotte	argiles	1050 °C	Glaçure stannifère, émailage	1250-1300°C	décoration	1250-1300°C
Céramique (grès culinaires)	Chamotte	argiles grésantes	1250-1300 °C (atm. réductrice)				
Céramique (porcelaine-faïence)	Chamotte issue que de kaolinite	argiles blanches, montmorillonite, halloysite, silice broyée, feldspath K	980-1000 °C (atm. oxydante)		1300-1400°C	émailage	3eme cuisson
Céramique (porcelaine-industrie)			1320-1350°C				
Céramique (carrelage)	Chamotte	argiles, feldspath	1er cuisson	(émailage)	(2eme cuisson)		
Céramique (émail basse température)	Chamotte	silice broyée, feldspaths Na, néphéline ou pegmatite, argiles, carbonates, cendres, K ₂ O Na ₂ O, B ₂ O ₃ PbO CaO, MgO, pigments colorants (oxydes Fe, Cu, Co, Mn), source d'alumine (metakaolin), oxydes Sn et Zr, ZnO, TiO ₂	900-1100 °C				
Céramique (émail haute température)	Chamotte		1200-1350 °C				
Réfractaire	Chamotte	argiles, source d'alumine (bauxite réfractaire, corindon, Andaloussite, ...),	1200-1300 °C		1740°C		
Aditifs pour ciments et liants routiers & charges minérales	Metakaolin		750-800°C (calcination classique)				
			700°C (calcination flash)				

Tableau 3 : Divers exemples de calcination suivant les filières.

Applications principales		Substance	Apports techniques et remarques	Critère qualité / Exploitabilité	Remarques sur le traitement
% marché en volume (in Pouliquen, 2014)	Applications				
43-50%	Papeterie : Charges (masse)	Kaolin	Dispersion dans l'eau (propriétés hydrophiles), blancheur-éclair, indice de refraction élevé, non abrasivité, adhésivité, inerte chimiquement, forme en lamelle (coef de forme : diamètre moy./épaisseur), adhésivité, améliore la résistance à la rupture, l'imprimabilité, l'opacité, la densité et la qualité d'impression. Application fortement concurrencé par les GCC/PCC et le talc.	Blancheur requise et fuseau granulométrique spécifique. Absence de quartz, d'hallowysite et de smectite (Pouliquen, 2014).	Broyage fin (micronisation) et traitement en voie humide pour applications papetière en process par voie acide (le process par voie acide est en diminution par rapport au process par voie basique qui incorpore des GCC). Teinte bleuté appréciée (certains gisements présente un blanc légèrement bleuté, des azurants optiques peuvent aussi être incorporés). Un mélange GCC-kaolin-talc es parfois observés. Le kaolin peut pour certaines applications ou rendu être traité : 1) délamination (améliore le coefficient de forme avec un facteur de 20 à 40) ; 2) Calcination pour améliorer la blancheur et la microporosité (au détriment toutefois du coefficient de forme et de l'abrasivité en augmentation)
	Papeterie : Pigments (agent de couchage)	Kaolin			
28%	Céramique ("ball-clays") : sanitaire, vaisselle (faïences, grès culinaires) carrelage, émaux, frites et engobes	Argiles kaoliniques et Kaolin	Couleur blanche, faible conductivité thermique, faible cout. Apporte la plasticité, contrôle du retrait et de la porosité en régulant la mullite et la phase vitreuse (Pouliquen, 2014).	Comportement rhéologique (coulabilité : viscosité, concentration en solide : densité, temps de prise), la présence de quartz est utile car il empêche la déformation de la céramique pendant la cuisson (Rahimi et Matin, 1989) et au démoulage. Faible teneur en Fe et Ti est requise pour la blancheur, présence de micas entre 10-15%, pas de smectite : néfaste au coulage et au retrait à la cuisson (Pouliquen, 2014). Les qualités les plus faibles sont utilisées pour les carrelages (masse des carreaux) avec une granulométrie grossière de l'ordre de 45-60 microns. Présence d'hyalosite améliore la plasticité (pour les porcelaines)	Broyage par voie humide (barbotine), puis calcination haute température entre 900 et 1400° (Chamotte). Incorporation de très nombreux additifs dans la formulation (chamotte réfractaire, argiles grésantes, autres argiles, sables siliceux, feldspath, talc, défloculants, ...)
	Céramique ("ball-clays") : vaisselle (porcelaine)	Kaolin			
Applications secondaires et de niches					
4%	Réfractaire ("Fire-clays")	Argiles kaoliniques et Kaolin	Faible conductivité thermique, chimiquement inerte même à haute température, faible cout	Deux ensembles : 1) Réfractaire silico-argileux 10%<A12O3>30% ; 2) Réfractaire à haute teneur en alumine 30%<A12O3>45% (4 catégories I III III IV). Faible teneur en fer et titane, en oxydes alcalins K2O Na2O CaO MgO et en quartz (le quartz crée une variation volumique néfaste), perte au feu doit être limitée, présence de fer intéressante pour cette application (effet positif car abaisse le point de fusion de 20 à 30°C), toutefois nécessite une constance dans la teneur en impuretés influençant les diagrammes de phase : oxyde de Fe et Ti, muscovite, feldspath.	Calcination haute température à 1200-1600° : Chamotte.
5%	Fibre de verre : construction en dehors des laines de verre (sans kaolin), électronique, chimie, aérospatiale, armement, sport, auto, bateaux)	Argiles kaoliniques, kaolin	Chimiquement inerte, apport d'alumine	Faible teneur en F, Ti, éléments trace (As, Hg, autres métaux lourds) et certains minéraux réfractaires (chromite, rutile, corindon, andalousite). Composition doit être la plus constante possible (notamment en oxyde de Fe qui influence la viscosité et dont la teneur doit rester basse). Fuseau granulométrique spécifique (inf à 200 microns).	Les fibres de verres sont produites à partir d'un poudre à base de silice, mélangés à de très nombreux additifs : GCC, carbonates de soude, borates, feldspaths, néphéline, kaolin, hydrate d'alumine, zircon.

3%	Aditifs pour bétons haute performance et lants routiers	Argiles kaoliniques	Propriété pouzzolannique très élevée : Matériaux silico alumineux qui en présence d'eau et de chaux, à températures normales, forment des lants durables très peu solubles semblables à ceux produits par l'hydratation du silicate tricalcique (principal constituant du ciment Portland). Apporte la blancheur pour les ciment blanc ou un contrôle des teintes. L'usage de metakaolin permet : 1) Eliminer les efflorescences (en capturant une partie de la portlandite) ; 2) Réduire la porosité (taille des particules de l'ordre du micron) limitant l'adsorption capillaire et la pénétration d'éléments agressifs pour le béton et les armatures métalliques ; 3) Augmenter la résistance mécanique ; 4) Limiter la réaction sulfatique (formation d'ettringite) et fixer les alcalis responsables de l'alcali-réaction. Il contribue ainsi à une meilleure durabilité du béton ; 5) Contrôle de l'aspect de surface et des couleurs (blancheur permettant le contrôle des couleurs et diminuant l'usage d'autres sources d'alumine dans les bétons qui renferment des oxydes colorés (Fe, Mn notamment) ; 5) Plus résistant aux agressions chimiques.	Présence de silice indifférent, elle est même requise pour les ciment blancs.	Calcination basse température : Metakaolin. Deux méthodes : 1) Calcination classique d'agglomérats à 750-800°C ; 2) Calcination flash à 700°C ; calcination très rapide d'un flux de matériaux préalablement broyés et séché qui permet d'obtenir une meilleure qualité de produit et une économie d'énergie (libre de CO2 émis). Le metakaolin est introduit dans la formule du ciment post cuisson, avec un dosage de 5 à 25 %. Le kaolin peut remplacer la phase argileuse du ciment lorsque celui-ci est plus accessible (cas rare), le kaolin entre alors dans la constitution du clinker (20% environ) puis cuit à 1.450° dans un four rotatif.
4%	Charges pour caoutchoucs	Kaolin	1) "Kaolin dur" (75-80% inf. à 2 microns) : Améliore la résistance mécanique à la traction, au déchirement et à l'abrasion, augmente la rigidité. 2) "Kaolin mou" (20-45 % inf. à 2 microns) accroît la stabilité de forme et l'état des surfaces extrudées, mais diminue l'élasticité. Application fortement concurrencé par les GCC et le talc	Fuséau granulométrique spécifique, absence de quartz.	Broyage fin (micronisation) par voie humide ou sèche. Une modification des particules permet des usages spécifiques notamment dans les plastiques (kaolin organo-modifié / "griffé"), une calcination (metakaolin) peut être opérée pour améliorer la blancheur ou un déblanchage pour les propriétés d'écoulements et augmenter la résistance à la traction et à la lumière pour les plastiques. Le kaolin est utilisé en adjuvant aux GCC, moins coûteux que le kaolin, dans les charges pour peintures pour sa qualité lamellaire et de durabilité ("une charge pour charge")
5%	Charge pour peinture	Kaolin	Chimiquement inerte (acide et base), résistance à la lumière, durabilité améliorée, blancheur-état, opacité, pouvoir suspensif (améliore l'écoulement), hydrophile (peinture à l'eau). Application fortement concurrencé par les GCC et le talc.	Fuséau granulométrique spécifique, absence de quartz, blancheur.	Broyage fin (micronisation) par voie humide ou sèche. Une modification des particules permet des usages spécifiques notamment dans les plastiques (kaolin organo-modifié / "griffé"), une calcination (metakaolin) peut être opérée pour améliorer la blancheur ou un déblanchage pour les propriétés d'écoulements et augmenter la résistance à la traction et à la lumière pour les plastiques. Le kaolin est utilisé en adjuvant aux GCC, moins coûteux que le kaolin, dans les charges pour peintures pour sa qualité lamellaire et de durabilité ("une charge pour charge")
2%	Charges pour plastiques & polymères	Kaolin	Chimiquement inerte (résistance aux produits corrosifs notamment), surface plus lisse, augmente la stabilité de forme et la durabilité. Application fortement concurrencé par les GCC et le talc. Retardateur de flamme minéral en remplacement aux organohalogénés (Cl, Br) et organophosphorés toxiques (application concurrencé par les oxydes d'antimoine, d'aluminium de magnésium ou de bore)	Fuséau granulométrique spécifique, absence de quartz, blancheur.	Broyage fin (micronisation) par voie humide ou sèche. Une modification des particules permet des usages spécifiques notamment dans les plastiques (kaolin organo-modifié / "griffé"), une calcination (metakaolin) peut être opérée pour améliorer la blancheur ou un déblanchage pour les propriétés d'écoulements et augmenter la résistance à la traction et à la lumière pour les plastiques. Le kaolin est utilisé en adjuvant aux GCC, moins coûteux que le kaolin, dans les charges pour peintures pour sa qualité lamellaire et de durabilité ("une charge pour charge")
2%	Charges pour adhésifs & mastics	Kaolin	Chimiquement inerte, finesse des particules	Fuséau granulométrique spécifique.	Produit broyé et désinfecté
	Pharmacie (Régulateur, cataplasme intestinal, test de coagulation du plasma, ...)	Kaolin	Chimiquement inerte, capacité d'absorption (effet tampon), application concurrencé par d'autres argiles (smectites, montmorillonites, ...)	Absence de contaminants toxiques : métaux (notamment Pb, As, Hg, Cd et plus récemment Al soupçonné d'être neurotoxique), amiante, dioxine...	
	Cosmétique (poudre, crèmes, rouge à lèvres, ...)	Kaolin	Chimiquement inerte, blancheur-état (permettant un contrôle des couleurs), opacifiant, propriété suspensive anti-mottant (comme le talc)	Absence de contaminants toxiques : métaux (notamment Pb, As, Hg, Cd et plus récemment Al soupçonné d'être neurotoxique), amiante, dioxine...	
5%	Agriculture (traitement des agrumes, pêchers, oliviers, cerisiers, pommiers)	Argiles kaoliniques et kaolin	Pouvoir couvrant, opacifiant		
	Alimentation animale (porcs et ruminants)	Argiles kaoliniques et kaolin	Limite les troubles digestifs, apports minéraux		
	Pisciculture	Argiles kaoliniques et kaolin	Accroît la turbidité de l'eau et augmente l'activité et l'alimentation des poissons		
	Industrie pétrochimique (propriétés et support catalytique)	Argiles kaoliniques et kaolin	Forte résistance à l'écrasement, chimiquement inerte. Deux applications émergentes : 1) Bille millimétrique en céramique dans une suspension aqueuse qui contribue à empêcher une faille créée par fracturation hydraulique de se refermer, destinées à l'extraction pétrolière et gazière afin d'en améliorer le rendement ; 2) Billes de céramiques servant de supports de lits de catalyseur pour maintenir ce lit en place dans un réacteur chimique.		Calcination haute température à 1550-1650° (Chamotte)
	Chimie (produits phytosanitaires)	Argiles kaoliniques et kaolin	Chimiquement inerte, propriétés suspensive anti-mottant (comme le talc mais aussi les carbonates et la montmorillonite).		
	Verrerie	Argiles kaoliniques et kaolin	En remplacement des feldspaths, améliore la qualité mécanique		

5 Filières industrielles du kaolin et des argiles kaoliniques

5.1 DOMAINES D'UTILISATION DANS L'INDUSTRIE

5.1.1 Charges minérales

Charges pour l'industrie du papier

Le plus grand utilisateur de kaolin est l'industrie du papier où il est employé comme matériau de remplissage (charge) dans la feuille et comme couchage à sa surface. Les propriétés qui sont importantes pour le fabricant de papier sont la dispersion, la rhéologie, l'éclat, la blancheur, l'indice de réfraction, la douceur, l'adhésivité, la résistance de la pellicule à la rupture, la réceptivité à l'encre, et la qualité d'impression.

Il est estimé que près de la moitié de la consommation mondiale de kaolin porte sur les applications liées à l'industrie du papier.

La kaolinite est hydrophile et elle se disperse aisément dans l'eau avec l'addition d'un peu de dispersant chimique. La dispersion des particules de kaolin dans un système à base d'eau est essentielle afin de donner des propriétés d'imprimabilité, de douceur et d'opacité à une feuille de papier.

Produit		Taille des particules (% <2 μ)	Blancheur* (GE)	Viscosité Brookfield (cP)** (% solide/spinelle/ppm***)	Prix en moyenne (\$ /tonne)	
Standard	Blancheur normale	#1 fine	95	86.0-87.5	300 (70/1/20)	75-85
		#1	90-94	86.5-88.8	300 (70/1/20)	75-85
		#2	80-82	85.5-87.0	300 (70/1/20)	60-70
		#3	73	85.0-86.5		
	Blancheur élevée	#1 fine	95	90-92	600 (70/2/20)	130-140
		#1	90-94	90-92	300 (70/1/20)	130-140
#2		80-82	88-90	300 (70/1/20)	115-125	
Délaminé	fine	95	87-89	400 (67.5/3/20)	85-95	
	normal	80	88-90	400 (67.5/3/20)		
	gros		84-89	400 (67.5/3/20)		
Calciné	Blancheur bas	86-92	80-83	500 (50/2/20)	280-320	
	Blancheur standard	86-92	Mín. 92.5	500 (50/2/20)		

* Reflet mesuré à 457 nm. - ** Centi-poise - *** Révolution par minute

Tableau 4 : Spécifications pour les produits standards de qualité « couchage » pour l'industrie du papier (Source : Elzea Kogel J., 2002).

Charges pour peintures

La kaolinite est hydrophile et elle se disperse aisément dans l'eau avec l'addition d'un peu de dispersant chimique pour inverser la charge des bordures liées aux liens cassés. Par conséquent, le kaolin est employé intensivement dans les peintures à base d'eau.

Le kaolin est aussi utilisé en peinture en raison de son inertie chimique, de son opacité et de son pouvoir suspensif qui permet d'améliorer les propriétés d'écoulement et de thixotropie. Il intervient souvent comme adjuvant des pigments blancs du dioxyde de titane, pour abaisser les coûts. La granulométrie joue sur le type de peinture, le kaolin grossier est utilisé pour produire les peintures mates, et les kaolins fins sont utilisés pour fabriquer les peintures brillantes.

Charges pour caoutchouc

Le kaolin améliore la résistance mécanique, la résistance à l'abrasion et la rigidité des produits.

Dans cette industrie, on parle de « kaolin dur » (75 à 80 % <2 µm) qui tend à augmenter la résistance à la traction, au déchirement et à l'abrasion. Le « kaolin mou » (20 à 45 % <2 µm) diminue l'élasticité, mais accroît sa stabilité dimensionnelle et améliore l'état de surface des extrudés.

La consommation de kaolin dans la filière caoutchouc est estimée à environ de 1,3 Mt/an. Dans les années 1970, on estime que 129 kg de kaolin étaient utilisés pour produire 1 t de caoutchouc. Ce taux d'utilisation a progressivement diminué (76 kg de kaolin par tonne de caoutchouc produit en 1990), mais reste aujourd'hui un débouché non négligeable du kaolin.

Charges pour plastiques

L'utilisation du kaolin dans les plastiques permet d'obtenir des surfaces plus lisses, une meilleure stabilité dimensionnelle et une meilleure résistance aux acides.

- dans la fabrication de PVC, le kaolin agit comme agent de renforcement ;
- l'utilisation du kaolin organo-modifié dans les polymères permet d'obtenir des propriétés renforcées pour des taux de charge beaucoup plus faibles ;
- le remplacement d'une partie de la charge des polymères par des nanokaolins peut améliorer la propriété des retardateurs de flamme.

5.1.2 Applications céramique et néocéramique

Les argiles sont les matériaux les plus consommés et aussi les plus anciens dans l'industrie de la céramique.

Une bonne connaissance de la relation entre la composition de l'argile (surtout la composition minéralogique) et ses propriétés physico-chimiques sont indispensables. Les spécifications techniques recherchées pour la fabrication de céramiques fines sont les suivantes (référence : Fiche technique SIM « Argiles pour céramiques fines et réfractaires ») :

- teneur en kaolinite prédominante ;
- éléments colorants non souhaités (argiles cuisant blanc) : $Fe_2O_3 < 2 \%$, $TiO_2 < 2 \%$;
- la présence de quartz peut être souhaitable, sauf pour le réfractaire ;
- présence de feldspaths, micas, illite et calcite à des teneurs < 25 %, souhaitée pour les produits grésés (argiles grésantes) ;

- présence de smectite (teneur < 5 %), d'halloysite et de matière organique souhaitée (amélioration de la plasticité) ;
- présence de gypse et de sels solubles prohibée.

Céramiques sanitaires

Deux catégories de céramiques se distinguent en fonction de leur fabrication :

- les grès fins sanitaires, poreux et lourds, composés essentiellement de chamotte réfractaire (argiles calcinées), d'argiles grésantes fortement siliceuses et de 15 à 20 % de kaolin ;
- le *vitreous* ou porcelaine sanitaire vitrifiée, composé en moyenne de 25 % de kaolin, 25 % d'argiles, 25 % de sables siliceux, 20 % de fondant feldspathique et 5 % de talc.

La porcelaine sanitaire vitrifiée est plus développée car elle est adaptée à l'injection sous haute pression (entre 20 à 40 bar) dans des moules en plâtre ou en résine poreuse, aux formes souvent complexes.

Mais dans ces deux cas, le kaolin joue un rôle essentiel car il permet dans ce mélange de contrôler la densité et la viscosité.

Après une cuisson à 1 250-1 280 °C, la pièce prend forme. La blancheur a une grande importance et est contrôlée par la chimie du kaolin. Cette pièce sera ensuite recouverte d'email pour la rendre lisse et brillante.

Vaisselle

Avec une bonne tenue à la plasticité et la cohésion de la masse en cru, le kaolin a un rôle essentiel dans la blancheur des pièces de vaisselle après cuisson. Les différentes vaisselles obtenues à partir de kaolin et d'argiles kaoliniques subissent une double cuisson (une pour obtenir un biscuit clair et une seconde pour appliquer la glaçure ou l'émail). Toutes les familles suivantes sont composées de kaolin, d'argiles, de silice broyée et d'un fondant de type feldspathique :

- les faïences fines de la vaisselle courante à pâte poreuse et blanche : composées de kaolin et d'argiles (50-60 %), 15 à 20 % de feldspath et 30 à 35 % de silice avec une cuisson à 1 250-1 300 °C ;
- les grès culinaires (récipients allant au four), résistants et peu poreux : composés de chamottes, d'argiles grésantes et de 10 à 15 % de kaolin avec une cuisson à 1 250-1 300 °C ;
- les porcelaines, produits céramiques très blanc, translucides sous faible épaisseur, durs : composées de 40 à 55 % de kaolin, 5 à 10 % d'argiles, 25 % de silice broyée et de feldspath potassique. Les kaolins pour porcelaine sont donc des produits exceptionnels pour leur blancheur après cuisson liée à de faibles teneurs en titane et en fer ;
- la porcelaine vitrifiée ou *vitreous*, destinée à la vaisselle hôtelière qui doit être résistante aux chocs et à l'abrasion. Sa teneur est similaire à la faïence avec une teneur en fondants plus élevée ;
- la porcelaine électro-technique, utilisée dans la fabrication des isolateurs et autres composants électriques (interrupteur, bougie, etc.). Cette porcelaine a une haute résistance mécanique et une grande stabilité thermique. En France, il reste un fabricant, CERALEP, à Saint-Vallier dans la Drôme.

Carrelage

Le kaolin n'est pas couramment utilisé dans la composition de masse pour carreaux, qui sont généralement constitués d'argile et de fondant (feldspath). Dans les carreaux modernes, à faible porosité (les grès porcelainés), la masse doit être claire après cuisson. C'est la raison pour laquelle du kaolin est incorporé dans le carrelage en substitution d'une partie d'argile. Pour des raisons de coût, le kaolin utilisé peut être de qualité moyenne à basse, et de granulométrie grossière (45-60 µm).

Émaux

L'émail, parfois appelée glaçure quand il est transparent dans la vaisselle et la poterie est la couche finale de recouvrement des pièces céramiques. Il permet de corriger les irrégularités éventuelles de surface, de masquer la porosité de masse, de durcir la pièce, d'accroître sa résistance à l'abrasion et, enfin, d'apporter la décoration finale sous forme de pigment de type oxydes métalliques. L'émail est appliqué à sec, en poudre homogène, très fine, ou en liquide appliqué par pulvérisation, par trempage ou encore au pinceau. Puis, la pièce subit une dernière cuisson formant les émaux de basse température à 900-1 100 °C ou des émaux de haute température à 1 200-1 350 °C.

5.1.3 Matériaux réfractaires et isolants

Les matériaux réfractaires sont utilisés dans les procédés de production qui impliquent un contact avec des substances corrosives à haute température. Les matériaux réfractaires doivent être inertes avec les substances avec lesquels ils sont en contact, et doivent résister mécaniquement et thermiquement ($T_{\text{fusion}} > 1\ 500\text{ °C}$). Les principales utilisations de l'argile réfractaire concernent la fabrication de briques réfractaires, de chamottes (argile cuite utilisée comme dégraissant dans les produits céramiques) et de divers ustensiles accessoires, tels que des creusets, les nacelles, cornues, et pots de verrerie, utilisés dans les industries métallurgiques. La kaolinite est un minéral réfractaire avec un point de fusion vers 1 780 °C pour sa forme pure.

Les paramètres jouant un rôle majeur sur les propriétés des produits réfractaires sont les suivantes :

- la teneur en quartz. La transformation du quartz à 573 °C s'accompagne d'une variation volumique qui peut être à l'origine d'un abaissement des propriétés mécaniques des matériaux frittés ;
- la perte au feu. Les argiles kaoliniques ont une perte au feu élevée qui est liée à l'élimination de l'eau de constitution, à la décomposition de certains minéraux associés tels que les carbonates et la combustion de la matière organique ;
- la teneur en fer. Une faible teneur en fer peut baisser le point de fusion de 20 à 30 °C.

La couleur de cuisson est le critère principal sur lequel est jugée la convenance d'une argile pour la fabrication de réfractaire.

La gamme de produits d'AGS comprend des chamottes brutes et broyées, dont la teneur en alumine varie de 38 à 47 %, ainsi qu'une vaste gamme d'argiles déchetées et broyées séchées. Les chamottes sont utilisées en céramique pour le dégraissage.

5.1.4 Bétons et ciments

La majorité des gisements d'argiles se compose de mélange d'argiles et de minéraux non-argileux. Une telle argile n'est généralement pas vendue à l'état brut, mais elle est employée par les producteurs principalement dans l'industrie du bâtiment ou dans la fabrication de ciment.

Les argiles calcinées à basse température, ou métakaolin, présentent des caractéristiques pouzzolaniques très élevées, qui en font d'excellents additifs pour les mortiers et bétons à base de ciment Portland. La kaolinite, en tant que source d'alumine, permet d'éviter la présence de fer pour la production de ciment blanc. Il est alors nécessaire de combler le déficit en silice par l'adjonction de sables siliceux.

5.1.5 Applications en médecine et produits pharmaceutiques

Le kaolin est employé comme diluant et complément dans des médicaments et cataplasmes, comme par exemple en mélange avec de la morphine. Les propriétés absorbantes du kaolin peuvent réduire le taux auquel un médicament est libéré dans le corps et même la quantité réelle absorbée par le corps. La quantité de kaolin change considérablement selon les applications, entre 7,5 % et 55 % de kaolin dans des applications absorbantes, autour de 25 % dans des poudres de saupoudrage, et jusqu'à 55 % pour les cataplasmes.

5.1.6 Applications en cosmétique

L'utilisation principale pour le kaolin en produits de beauté est le fond de teint. Les fonds de teint sont un mélange de poudres teintées et parfumées employées pour améliorer l'aspect de la peau. La quantité de kaolin dans un fond de teint peut varier de 3 % dans une poudre lâche à 10 % dans une poudre à la formulation lourde. Le kaolin est concurrencé par le carbonate de calcium précipité (PCC) comme remplisseur en produits de beauté, mais le kaolin est encore considéré de loin comme supérieur pour cette application. Le kaolin est utilisé dans la formulation des rouges à lèvres.

5.1.7 Autres : alimentation animale, applications phytosanitaires, industrie gazière, etc.

Le kaolin entre peu dans les aliments industriels. Il est néanmoins présent dans les emballages alimentaires (cartons, plastiques). Par contre, il est utilisé dans les rations animales. Le kaolin ingéré aura donc un rôle d'absorbant, actif dans le système gastro-intestinale. Le kaolin apporte également des éléments minéraux aux animaux (Fe, Al, Si, Mg, Cu, Se).

Dans les applications phytosanitaires, le kaolin entre comme charge de dilution, absorbante, suspensive et anti-agglomérante, en concurrence direct avec le talc, la montmorillonite et les carbonates. Pulvérisé sur les arbres fruitiers (pommier, cerisier, pêcher, olivier), le kaolin a un rôle actif direct d'insecticide et de répulsif.

Dans le domaine des forages pétroliers, gaziers ou hydrauliques, le kaolin peut être utilisé comme agent de soutènement. Les agents de soutènement (ou « proppants » en anglais) sont des produits solides (naturels ou synthétiques) qui sont injectés dans les fractures et microfracturations provoquées dans la roche lors des opérations de fracturation hydraulique. Leur rôle est de produire une couche à la fois perméable et assez résistante pour maintenir les microfissures ouvertes après les avoir pénétré. Cette couche crée et conserve un chemin drainant au sein duquel les fluides (gaz, pétrole, eau) percoleront facilement jusqu'au puits d'extraction au fur et à mesure qu'ils seront désorbés de la roche-réservoir. Cet usage du kaolin, particulièrement développé pour l'exploitation de gaz aux États-Unis au cours des années 2013-2014, s'est progressivement restreint pour des raisons de coûts.

6 Marchés et perspectives

6.1 APERÇU DU MARCHÉ MONDIAL DU KAOLIN

Ces dernières années, le marché mondial a été marqué par une évolution diversifiée de la demande par secteur. Entre 2014 et 2016, les difficultés des domaines gaziers et pétroliers ont entraîné un recul des usages du kaolin comme agent de soutènement, remplacé par des substituts moins coûteux (Industrial Minerals, 2017). Les usages pour l'industrie du papier tendent également à diminuer, d'une part du fait de la réduction du marché au profit du numérique, et d'autre part d'une substitution accrue au profit du carbonate de calcium également moins cher que les charges à base de kaolin. Ce phénomène est observé chez de nombreux industriels, en particulier asiatiques, selon les chiffres de la China Paper-Making Industry Association. À l'inverse, son usage sous forme calcinée (métakaolin) connaît une forte hausse notamment pour les bétons de haute performance dans le domaine de la construction.

Les chiffres de production mondiale de kaolin divergent selon les sources. Le Service géologique américain (USGS) publie un chiffre de 35,6 Mt pour 2015. Dans ces statistiques, les États-Unis apparaissent comme le premier producteur mondial avec 5,9 Mt et 16,8 % du total, suivis par l'Inde (4,7 Mt), l'Allemagne (4,3 Mt), la République Tchèque (3,4 Mt), la Chine (3,2 Mt) et le Brésil (2,1 Mt). Des réserves sont cependant à apporter concernant ces chiffres, car de grandes hétérogénéités existent entre les différentes statistiques nationales. Ceci est dû en particulier au manque de précision de l'état des productions répertoriées (kaolin brut ou kaolin traité). Ainsi, le chiffre pour la République Tchèque de 3,4 Mt paraît très exagéré. Le Service géologique britannique (BGS) reporte quant à lui 648 kt pour la République Tchèque sous l'appellation « kaolin traité » (World Mineral Production 2011-2015). De même, les chiffres publiés pour l'Ukraine de 1,8 Mt pourraient être surestimés au regard de la part des kaolins réellement traités dans ce pays, vraisemblablement plutôt de l'ordre de 500-600 kt. Enfin, dans ce classement la France représente à peine 1 % du total avec 320 kt de kaolin produit, chiffre correspondant au recensement des productions européennes ProdCom (<http://ec.europa.eu/eurostat/fr/web/prodcom>), paraissant cependant faible au regard d'une production totale autorisée de 2 Mt de kaolin en France. La production totale de kaolin et d'argiles kaoliniques est estimée entre 400 et 450 kt pour l'année 2017.

Le consultant spécialisé Ian Wilson (2016) estime quant à lui une production mondiale de kaolin traité à 25,2 Mt pour 2015 avec la répartition suivante : États-Unis (25 %), Chine (16 %), Brésil (13 %), Allemagne (4 %), Ukraine (4 %), Royaume-Uni (4 %), autres (35 %).

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

6.2.1 Producteurs de kaolin en France

En 2016, la production française autorisée de kaolin est de 2,1 Mt/an répartie sur 11 carrières, quasi-exclusivement localisées en Bretagne. Trois acteurs principaux se partagent le marché : IMERYS Ceramics France, la SOKA ou Société Kaolinière Armoricaire (rachetée par le groupe Carrières des Lacs en février 2017) et Sibelco France.

IMERYS Ceramics France

Le leader du marché est Imerys Ceramics France, filiale du groupe Imerys qui possède 5 carrières en activité, quatre en Bretagne et une en Auvergne (Échassières, voir paragraphe 4.4). La capacité de production autorisée est de 1 050 kt/an. Après traitement en usine, les produits mis en vente sont destinés pour partie à l'industrie papetière, mais aussi pour l'industrie de la peinture, des plastiques, des polymères, de la céramique et de la faïence.

Le groupe Imerys à l'échelle mondiale est le premier producteur de kaolin avec environ 20 % de la production totale soit de l'ordre de 5 Mt, suivi par la société KaMin et des sociétés Thiele, AKW, BASF et Sibelco.

Les productions de kaolin du groupe sont issues de ses activités aux États-Unis, au Royaume-Uni, au Brésil, en Australie, en Ukraine, en Thaïlande, au Portugal, et en Nouvelle-Zélande, avec des réserves publiées en 2015 à 96,2 Mt et des ressources de 170,7 Mt. Imerys est leader sur la production de kaolin pour papier.

SOKA / Carrières des Lacs

Le deuxième producteur en France jusqu'en 2017 était la Société Kaolinère Armoricaire (SOKA), répartie sur un ensemble de trois carrières, toutes situées en Bretagne. La capacité de production autorisée est de 490 kt/an. En février 2017, la SOKA a été rachetée par le groupe Carrières des Lacs, situé à Saint-Aubin-des-Landes (35).

Le groupe Carrières des Lacs récupère également les activités de SOKA en Ukraine, où se trouvent deux carrières et une usine. Le groupe est également présent dans les pays de l'Est, en Allemagne, en République Tchèque, en Pologne, ainsi qu'en Russie et en Chine. Un plan d'investissement d'un million d'euros par an sur les cinq prochaines années est prévu pour remettre en état le site de Quessoy, optimiser l'outil de production et activer les travaux en R&D.

SIBELCO

Le troisième producteur est Sibelco France (www.sibelco.fr), filiale du groupe belge SIBELCO dont la principale activité au niveau mondial est la production de sables industriels (n°1 mondial avec plus de 200 sites répartis dans 41 pays). En France, l'entreprise est également le plus gros producteur de sables industriels, avec notamment une importante production de sables siliceux extra-purs à partir de 11 carrières (Mémento Silice industrielle, rapport BRGM, 2016).

La production de kaolin et d'argiles kaoliniques par Sibelco est concentrée dans le bassin d'Hostun (Drôme) sur un seul gisement, en coproduit des sables siliceux. L'usine située à Hostun est approvisionnée par deux carrières d'une production totale autorisée de 345 kt/an. Une troisième carrière (production autorisée de 150 kt/an) était en cours de renouvellement en octobre 2017.

ARVEL- Argiles du Velay

L'entreprise Argiles du Velay (Arvel, www.argileduvelay.com) basée à Saint-Paulien en Haute-Loire exploite une formation argileuse illitique à kaolinite, pour une production autorisée de 108 kt/an de kaolin, ainsi que des argiles vertes essentiellement destinées aux marchés de la cosmétique.

6.2.2 Producteurs d'argiles kaoliniques en France

Imerys Refractories

Le principal producteur d'argiles kaoliniques en France est Imerys Refractories (IRM, ex-AGS-Minéraux), qui exploite un ensemble de 24 carrières pour une production autorisée de 1,4 Mt/an.

Le principal centre de production est à Clérac en Charente-Maritime, où est située une usine alimentée par 8 carrières actives, pour une production autorisée de 400 à 495 kt/an. Une partie de la production est exportée directement sous la forme de chamotte (argiles calcinées), essentiellement destinée à la production de produits réfractaires.

Imerys contrôle aussi la production des argiles du bassin de Provins, qui sont traitées dans l'usine de Beaujard (Seine-et-Marne) avec une production autorisée d'environ 120 kt/an, dont plus de 50 % sont destinées à la production de produits réfractaires. L'entreprise est enfin présente dans le bassin de Limagne avec 6 carrières (670 kt/an) et celui du Massif central (30 kt/an).

Argeco Développement

Argeco Développement (www.argeco.fr/) est une filiale de la société Demeter Technologies, basée à Toulouse, qui exploite actuellement à Fumel (Lot-et-Garonne) une carrière d'argiles kaoliniques pour une production autorisée de 185 kt, ainsi qu'une unité de production de métakaolin d'une capacité de 80 kt/an.

La particularité de l'entreprise est l'utilisation de la technologie de calcination Flash (voir paragraphe 4.5.5), qui lui permet de proposer un certain nombre de produits destinés notamment au béton. Ce sont par exemple :

- Argibap : un additif pour bétons composé principalement de métakaolin et de filler calcaire sélectionnés, adaptés à la fabrication des bétons auto-plaçants ;
- Argicem : obtenue par calcination Flash d'une argile kaolinique naturelle, ainsi que de chaux et de ciment.

Carrière Audion Et Fils

Dans le bassin des Charentes, l'entreprise Carrière Audion et Fils, exploite 2 carrières de sables à argiles kaoliniques pour une production autorisée d'environ 200 kt.

Fontes Refractories

Société appartenant au groupe SGI (www.fontes-refractories.com/fr/), Fontes Refractories exploite une carrière d'argiles kaoliniques à Vaudreuille (31) pour une production autorisée de 40 kt. La société s'est spécialisée dans la fabrication de produits réfractaires destinés aux cuves d'électrolyse du secteur de l'aluminium primaire. D'autre part, Fontes Refractories fournit des briques anti-acide et des briques réfractaires à basse teneur en alumine (BTA). Enfin, elle propose quatre coloris de briques réfractaires à destination de l'habitat (cheminées, feux ouverts), des briques répondant aux normes du secteur alimentaire (barbecues, fours à pizza), des produits réfractaires non-façonnés (chamotte, coulis, mortier) et des argiles de différents coloris. Enfin, des produits de terre crue spécifiques à l'habitat écologique et une gamme de matériaux pour la décoration tels que pavés, dalles et briques de parement.

6.3 COMMERCE EXTÉRIEUR DE LA FRANCE

Les données du commerce extérieur français sont publiées sur le site <http://lekiosque.finances.gouv.fr>. Pour les années 2015 à 2017, les échanges sont compilés dans le tableau ci-après.

Le kaolin et les argiles kaoliniques sont distingués dans les nomenclatures douanières (codes NC8) suivantes :

- 25070020 - Kaolin;
- 25070080 - Argiles kaoliniques (à l'excl. du kaolin).

Ces nomenclatures prennent en compte les produits transformés, c'est-à-dire également les argiles à l'état calciné (chamottes).

	2015			2016			2017			Evolution 2016-2017		Principaux partenaires en 2017 (% des tonnages)
	Valeur	Masse	val.unit.	Valeur	Masse	val.unit.	Valeur	Masse	val.unit.	En valeur	En masse	
Kaolin												
Exportations	26 052 k€	151 444 t	172 €/t	28 623 k€	161 828 t	177 €/t	30 830 k€	172 927 t	178 €/t	7.7%	6.9%	Italie 16%, Espagne 13%, Danemark 12%
Importations	28 532 k€	132 402 t	215 €/t	28 555 k€	131 341 t	217 €/t	30 017 k€	133 561 t	225 €/t	5.1%	1.7%	Rép.tchèque 32%, Royaume-Uni 24%
Solde	-2 480 k€	19 042 t		68 k€	30 487 t		813 k€	39 366 t				
Argiles kaoliniques (à l'excl. du kaolin)												
Exportations	15 347 k€	98 551 t	156 €/t	14 279 k€	82 191 t	174 €/t	14 734 k€	80 863 t	182 €/t	3.2%	-1.6%	Italie 24%, Allemagne 20%, Pays-Bas 17%
Importations	5 276 k€	41 492 t	127 €/t	5 146 k€	38 278 t	134 €/t	5 498 k€	39 603 t	139 €/t	6.8%	3.5%	Belgique 31% Maroc 24% Royaume-Uni 15%
Solde	10 071 k€	57 059 t		9 133 k€	43 913 t		9 236 k€	41 260 t				

De manière générale, on observe que quel que soit le produit concerné, les principaux partenaires sont des pays européens.

Pour le kaolin, plus de la moitié des importations sont issues de République Tchèque et du Royaume-Uni et de manière plus modeste de Belgique, d'Ukraine, d'Allemagne et des États-Unis. Ces importations sont faiblement croissantes par rapport à 2016 (+1,7 % en tonnage) avec 133,5 kt de kaolin importé, contre 173,0 kt de kaolin exporté. La balance commerciale est positive, avec une forte augmentation sur deux ans tant en valeur (passage d'un déficit de -2,5 M€ en 2015 à un excédent commercial de 0,813 M€ en 2017), qu'en quantité. Les destinations d'export privilégiées sont l'Italie, l'Espagne et le Danemark.

Pour les argiles kaoliniques, les quantités échangées sont plus faibles avec environ 40 kt importées contre 80 kt exportées en 2017. La balance commerciale est positive depuis 2015, de l'ordre de 10 M€ malgré un léger recul des quantités échangées. Les principaux partenaires sont la Belgique, le Maroc et le Royaume-Uni pour les importations ; l'Italie, l'Allemagne et les Pays-Bas pour les exportations.

6.4 ÉVOLUTION DES PRIX

En l'absence de place de marché, les prix des kaolins sont négociés directement entre acheteur et vendeur. Certaines sources spécialisées (Industrial Minerals, www.indmin.com) répertorient les moyennes hautes et basses de ces contrats pour évaluer les prix des différentes qualités de kaolin sur le marché international.

L'évolution des prix sur les deux dernières années (janvier 2016-janvier 2018) est très limitée. Les principaux écarts de prix concernent la qualité (blancheur, finesse, rhéologie, etc.) et la présentation des produits (par exemple : vrac, ensaché, ou « *slurry* »). Les principales catégories et prix correspondants sur deux ans sont les suivants :

- kaolin pour céramiques sanitaires (-75 µm, blancheur >75), FOB Viêt Nam : 189-200 US \$/t
- kaolin pour vaisselle (-45 µm, blancheur > 90) FOB Vietnam : 231-241 US \$/t
- kaolin pour tuiles céramiques glacées ou émaux (-75 µm, blancheur > 85) FOB Vietnam : 160-180 US \$/t
- kaolin brésilien pour couchage du papier (5 % humidité) : 219-284 US \$/t
- kaolin brésilien pour couchage du papier (« *slurry* ») : 259-316 US \$/t
- kaolin n° 1 de Géorgie pour couchage du papier : 162-223 US \$/t
- kaolin n° 2 de Géorgie pour couchage du papier : 138-218 US \$/t

Entre 2016 et début 2018 les prix n'ont pas montré de variation significative, les moyennes hautes et basses des contrats étant restées aux prix mentionnés ci-dessus, excepté pour les catégories :

- Kaolin pour céramiques sanitaires, ayant baissé de 189 \$/t pour la moyenne basse à 170 \$/t à partir de décembre 2016 (moyenne haute inchangée à 200 US \$/t) ;
- Kaolin pour tuiles céramiques glacées (« *tile glaze* ») ayant baissé d'un prix de 194-210 US \$/t en 2016 à 160-180 US \$/t en 2017.

À l'inverse, tous les prix dans leur ensemble ont augmenté sur une période de 5 ans, illustrant une forte croissance de la demande mondiale. En effet, d'après Pouliquen (2014), les différents prix étaient :

- en 2014 : kaolins à usage céramiques sanitaires, séchés et ensachés FOB Asie : 160-210 US \$/t
- en 2014 : kaolins pour vaisselle, séchés et ensachés FOB Asie : 200-250 US \$/t
- en 2012 : kaolin brésilien pour couchage du papier (5 % d'humidité) : 190-240 US \$/t
- en 2014 : kaolin brésilien pour couchage du papier (5 % d'humidité) : 205-265 US \$/t, et pour la qualité « *slurry* » : 240-295 US \$/t.

En 2014, dans les peintures, le kaolin hydraté, lavé et séché valait 120-150 US \$/t alors que les formes calcinées étaient plutôt dans la gamme 200-250 US \$/t. Les formes les plus chères étaient les kaolins calcinés « *flash* » les plus blancs (jusqu'à 300-450 US \$/t).

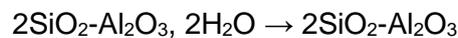
7 Nouveau matériaux, coproduits et développement durable

7.1 LE MÉTAKAOLIN, ADDITIF-CLÉ DANS LES BÉTONS

Définition (source : revue Béton(s) n°24)

Le métakaolin est un matériau ultrafin inorganique, pouzzolanique ou hydraulique latent qui peut être incorporé aux bétons afin d'en améliorer certaines propriétés ou pour obtenir des propriétés spéciales selon la norme NF EN 206-1.

Il est obtenu par calcination du kaolin ou d'argiles kaoliniques à des températures entre 650 et 900°C. Le kaolin ou les argiles kaoliniques subissent une déstructuration de leur structure cristalline initiale lors de la calcination. Cette déshydratation du minéral conduit à une nature amorphe du matériau.



Les métakaolin répond à la norme NF P 18-513 – Addition pouzzolanique pour bétons – Métakaolin – Définition, spécifications et critères de conformité.

Utilité dans les bétons

Depuis 2012, le métakaolin est un additif pour les bétons selon la norme NF EN 206-1. Il peut se substituer partiellement au ciment. Dans un béton contenant initialement 350 kg/m³ de ciment, la formule du béton peut être modifiée pour contenir 50 kg/m³ de métakaolin et 300 kg/m³ de ciment sans en voir ses performances altérées.

Le métakaolin apporte de nombreux avantages comme additif aux bétons :

- améliore la durabilité des bétons ;
- augmente la résistance à la compression et à la flexion ;
- réduit les émissions de gaz à effet de serre ;
- réduit la réaction alcali granulat, un enjeu de taille dans les travaux d'infrastructures ;
- améliore la plasticité et les caractéristiques de mise en place des bétons ;
- prévient des phénomènes d'efflorescence en capturant une partie de la portlandite (hydroxyde de calcium) ;
- la petite taille (de l'ordre du micron) des particules de métakaolin permet de réduire la porosité des bétons et donc de les rendre plus résistants au gel, aux pénétrations de chlorures et d'acides.

Dans un environnement corrosif, les bétons contenant du métakaolin sont plus résistants que les bétons contenant d'autres additifs.

La production du métakaolin se caractérise par une génération de CO₂ trois fois plus faible que celle du clinker de ciment. En effet, la cuisson du kaolin à environ 650 °C se contente de retirer l'eau dans l'argile tandis que la cuisson du clinker à 1 450 °C retire le carbone du carbonate de calcium.

7.2 LES COPRODUITS DES CARRIÈRES DE KAOLIN

Au niveau des carrières de kaolin, l'ensemble des matériaux exploités sont généralement valorisés afin d'optimiser l'extraction et minimiser les pertes. Au cours du temps, une carrière génère toujours des produits de natures différentes en fonction des variations de qualité du gisement. Sur le bassin de Provins, seules les argiles kaoliniques sont valorisées, les autres minéraux sont conservés sur le site d'extraction pour permettre la remise en état.

Ainsi, sur la carrière de kaolin à Ploemeur (Bretagne), l'extraction est optimisée en valorisant le coproduit du mica. L'altération du granite a conduit à générer cette argile qu'est la kaolinite. L'altération de ce granite n'a pas été totale et les micas ne sont pas totalement altérés dans le processus de transformation du granite. IMERYS valorise donc le mica dans son procédé d'extraction. Les micas sont utilisés dans la verrerie ou la fonderie comme fondant ; c'est-à-dire que le mica va permettre d'abaisser la température de fusion et d'optimiser la production de matériaux (ex. verre, acier).

La carrière d'Échassières (Allier) exploite du kaolin issu de l'altération d'un granite à métaux rares. Cette carrière contient une proportion importante de sables kaoliniques, qui sont valorisés comme coproduits de carrière. Cette carrière valorise également un concentré d'étain-niobium-tantale. L'exploitant a obtenu une autorisation de tirer librement partie d'une substance minière concessible par arrêté ministériel.

8 Conclusions et perspectives

Le kaolin et les argiles kaoliniques en France sont associés à deux grands types de gisements que sont les gisements primaires pour le kaolin (développés en place sur des roches granitiques) et les gisements secondaires pour les argiles kaoliniques (kaolin ayant subi une érosion, un transport puis un dépôt). Les gisements primaires sont répartis dans les régions de socle où les roches plutoniques d'âge Varisque affleurent (Massif central et Massif armoricain) alors que les gisements secondaires sont plutôt présents dans les bassins sédimentaires d'âges Mésozoïque et Cénozoïque (Bassin parisien, Bassin aquitain, fossé de Limagne, Bassin du Sud-Est). Les gisements de kaolin et d'argiles kaoliniques sont principalement formés grâce à la circulation de fluides hydrothermaux mais surtout météoriques développant des profils d'altération pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur voire centaines de mètres. Les gisements de kaolin et d'argiles kaoliniques peuvent donc avoir plusieurs étapes géologiques dans leur formation, avec une altération hydrothermale précoce, souvent d'âge Varisque, et une altération météorique postérieure souvent rapportée au Mésozoïque (ex : Crétacé inférieur), au Cénozoïque (Éocène notamment) voire au Quaternaire.

Les gisements à potentiel économique sont répartis sur l'ensemble du territoire métropolitain, avec plusieurs bassins de production spécialisés. En 2017, 41 carrières actives exploitaient le kaolin (11) et les argiles kaoliniques (30).

La production française de kaolin et d'argiles kaoliniques s'établit entre 400 et 450 kt pour l'année 2017. La production de kaolin seul est estimée aux environs de 300 kt pour l'année 2017.

La principale utilisation du kaolin et des argiles kaoliniques dans l'industrie est la papeterie, suivie par les charges pour le caoutchouc, la peinture le plastique et adhésif/mastic, la céramique, les matériaux réfractaires et isolants, les bétons et ciments, la cosmétique, l'agriculture, l'alimentation animale, la pisciculture, l'industrie pétrochimique, la verrerie et les produits phytosanitaires.

Parmi ces usages, il existe une variété de produits avec des prix s'échelonnant de 100 à plus de 400 € la tonne. Ainsi à titre d'exemple, dans les peintures, le kaolin hydraté-lavé-séché valait en 2014 100-125 €/t, contre 160-200 €/t pour le kaolin calciné et jusqu'à 300-400 €/t pour le kaolin calciné « *flash* ».

La France affiche une balance commerciale positive pour le kaolin et les argiles kaoliniques depuis 2015. Ses principaux partenaires sont européens (Italie, Espagne, Danemark, Belgique, Royaume-Uni, Allemagne, Pays-Bas, République Tchèque) auxquels il faut ajouter le Maroc, les États-Unis et l'Ukraine. En 2017, l'activité de ce secteur affichait un excédent commercial de 10,05 M€ dont 9,24 M€ rien que pour les argiles kaoliniques. Il apparaît que l'évolution des prix entre janvier 2016 et janvier 2018 demeure très stable. En revanche, considérant les cinq dernières années, tous les prix ont augmenté.

Le métakaolin apparaît comme un matériau essentiel dans le bilan CO₂ et à l'amélioration de la résistance des bétons. Une autre piste de valorisation à développer davantage pour les carrières de kaolin et argiles kaoliniques pourrait être les co-produits comme le sable, le mica ou encore certains concentrés métalliques (lithium, niobium-tantale, etc.).

À l'horizon 2030, le renouvellement d'autorisation et/ou l'ouverture de nouvelles carrières de kaolin et d'argiles kaoliniques apparaissent primordiaux pour garantir la pérennisation de ces filières. L'anticipation du renouvellement des autorisations d'exploitation actuelles apparaît donc importante dans une démarche de stratégie sur le long-terme.

9 Références

- ALBOUY L., MARTEAU P., ODENT B., ROCHER P., SPENCER C., THIBAUT P.-M., 1994. *Panorama des matériaux (1993)*. Rapport BRGM R-37878, 62 p., 2 fig., 23 tabl.
- BEAUCHAMP J., 2005. *Les argiles*. Université de Picarde Jules Verne. Disponible sur : <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/argiles.htm>.
- 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 dérivés*. 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.
- CERAPLUS, 2015. *Catalogue : Produits et matériels pour la céramique* [en ligne]. Céraplus, Catalogue 2015, 152 p. Disponible sur : <http://www.ceraplus.com/catalogue/Catalogue.pdf>.
- DIRECTION GÉNÉRALE DES DOUANES. 25070080 - *Argiles kaoliniques*. Disponible sur : http://lekiosque.finances.gouv.fr/Appchiffre/LEO/frame_LEO.asp.
- ELZEA KOGEL J., 2002. *The Georgia Kaolins: Geology and Utilization*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Electronic edition published 2009, 256 p. Disponible sur : <http://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/144177/b468c8181927c36065977d15a07ad382.pdf?sequence=1>.
- FEDEM, *FICHES MINÉRAUX*. Disponible sur : <http://www.fedem.fr/Site/MATIERES/tableau.asp>.
- KONESSHLOO M., 2007. *Caractérisation, estimation et valorisation de gisements d'argiles kaoliniques du bassin des Charentes* [en ligne]. Engineering Sciences [Physics]. Thèse Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France, 315 p. Disponible sur : https://tel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/199226/filename/Koneshloo_Thesis.pdf.
- KORNMAN M., 2005. *Matériaux de construction en terre cuite*, Edition Septima, 275 p.
- LE BERRE P., 1979. *Les argiles nobles pour réfractaires et céramiques fines*. Mémento substances utiles (matériaux de carrière), rapport BRGM n°79-SGN-155-MTX, 19 p.
- MARTEAU P., CHASSAGNAC D., HOM L., JALLON S., LEFEBVRE G., 2016. - Mémento Silice industrielle. Rapport BRGM RP-65485-FR, 92 p.
- McCUISTION J., WILSON I., 2004. *Ball Clays*. Industrial Minerals & Rocks: commodities, markets and uses, SME, 343-356. Disponible sur : <http://www.segemar.gov.ar/bibliotecaitemin/LIBROSDIGITALES/Industrialminerals&rocks7e/d/pdffiles/papers/026.pdf>.
- MEUNIER A., 2006. *Why are clay minerals small?*. Clay Minerals 41, 551-566. Disponible sur : <http://claymin.geoscienceworld.org/content/41/2/551.full.pdf>.
- POULIQUEN M., 2014. *Les kaolins*. Mines & Carrières n°218 HS, Octobre 2014, 51-93.

- RAUTUREAU M., CAILLERE S., HENIN S., 2004. *Les argiles*, Edition Septima, 97 p.
- RAUTUREAU M., 2011. Fiches détaillées "Argiles", La SIM, 3 p.
- RAHIMI A., MATIN M., 1989. *Technology of Cermics*. Khak e Chini d'Iran Co., 2 tomes, 572 p.
- ROCHER P., 1992. *Argiles nobles pour produits céramiques*. Mémento roches et minéraux industriels, rapport BRGM R35743, 48 p.
- UNICEM, 2015. *Le kaolin*. UNICEM BRETAGNE, Les industries, les autres industries et prestataires. Disponible sur : <http://www.unicem-bretagne.fr/fr/content.php?pri=4&sub=5&ssub=2>.
- VIRTA T.-L., 2013. *Clay and Shale*. USGS, 2013 Minerals Yearbook, 23 p. Disponible sur : <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/clays/myb1-2013-clays.pdf>.
- WEST D.N., 2017. World Mineral Yearbook-Kaolin. United States Geological Survey. Disponible sur : <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity>.
- WILSON I.R., DE SOUZA SANTOS H., DE SOUZA SANTOS P., 2006. Kaolin and halloysite deposits of Brazil. *Clay Minerals* 41, 697-716.
- WILSON I.R., 2017. Kaolin's Opportunity, *Industrial Minerals* (site internet).

Sites internet des sociétés ou organisations citées dans ce rapport

Imerys : www.imerys.com

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

Revue Béton(s) n° 24 – Septembre/octobre 2009 - [www.portail-béton.fr](http://www.portail-beton.fr)

Revue Béton(s) n° 47 – Juillet/Août 2013 – [www.portail-béton.fr](http://www.portail-beton.fr)

Société chimique de France : www.societechimiquedefrance.fr

West D. N. 2017, World Mineral Yearbook - Kaolin. United States Geological Survey
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity>



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