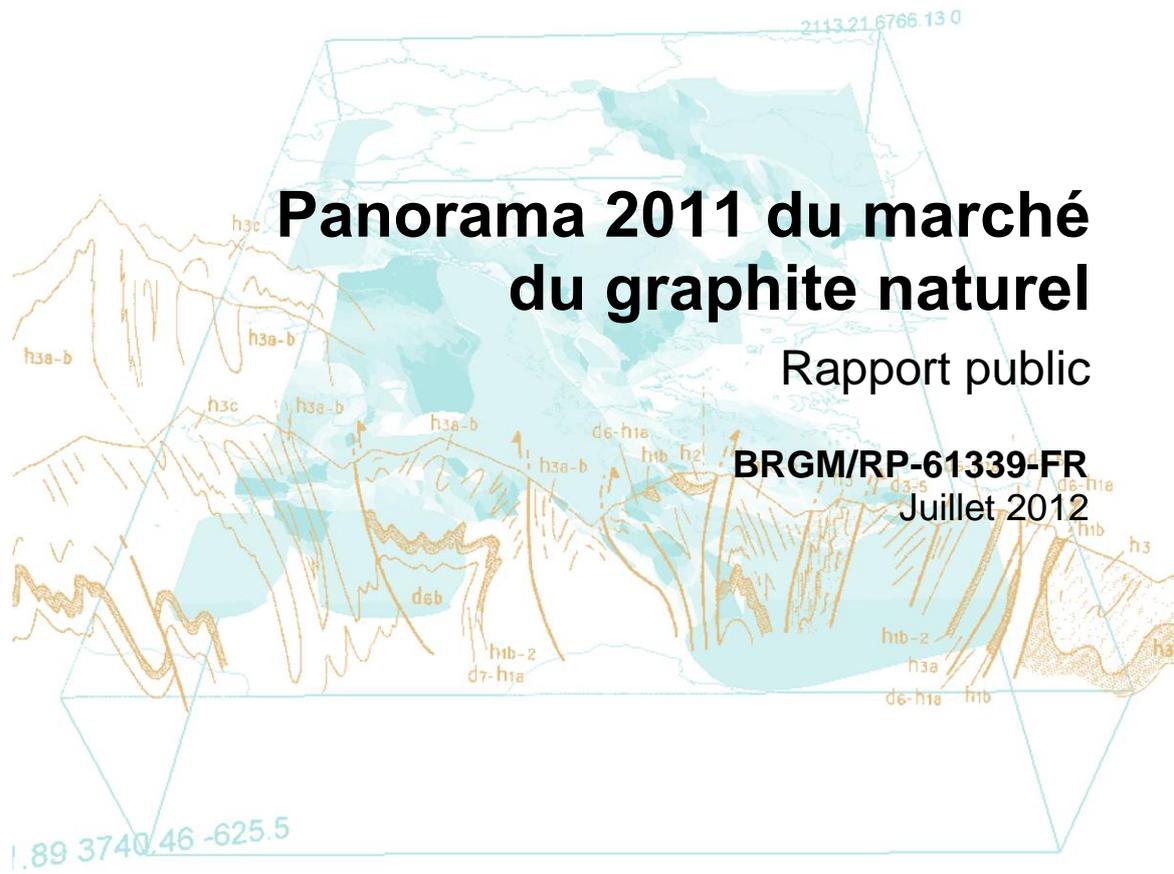


Document public



Document public

Panorama 2011 du marché du graphite naturel

Rapport public

BRGM/RP-61339-FR

Juillet 2012

F. Barthélémy, J.F. Labbé, J.C. Picot

Avec la collaboration extérieure de

la Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS)

Vérificateur :

Nom : Anne-Sophie AUDION

Date : 27/07/2012

Signature : 

Approbateur :

Nom : Anne BOURGUIGNON

Date : 27/07/2012

Signature : 

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008

Mots-clés : Graphite, Ressources minérales, Production, Marché, Approvisionnement.

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

Barthélémy F., Labbé J.F. et Picot J.C. (2012) - Panorama 2011 du marché du graphite naturel. BRGM/RP-61339-FR, 91 p. 15 fig., 20 tabl.

© BRGM, 2012, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

LE GRAPHITE

Le graphite est, avec le diamant, l'une des formes allotropiques naturelle du carbone, un élément chimique non-métallique, le sixième élément du tableau de Mendeleïev. C'est à la fin du XVIII^e siècle que le chimiste suédois C.W. Scheele démontra que la substance qu'il utilisait pour écrire (appelée à l'époque *plombagine*) ne contenait pas de plomb mais était en fait une forme cristalline particulière du carbone. Le nom de graphite lui fut donné par le minéralogiste allemand A.G. Werner en 1789, en référence au grec *graphein* (écrire).

Propriétés et usages

Le graphite est un minéral solide noir, tendre, à éclat submétallique. Les atomes de carbone sont en liaison fortes avec trois de leurs voisins formant un réseau hexagonal (en nid d'abeille). Les plans hexagonaux sont faiblement liés entre eux formant des feuillets dont les plans peuvent facilement glisser les uns par rapport aux autres. En raison de cette texture en feuillets, les propriétés physiques du graphite sont anisotropes ; en particulier, sa conductibilité électrique est très différente dans le plan des feuillets et dans le plan perpendiculaire aux feuillets. Il possède des propriétés de métaux (conductivité thermique et électrique, flexibilité) et de non-métaux (lubrification, etc.). À pression atmosphérique, il ne fond pas mais se sublime à 3 825 °C.

Ses propriétés lui assurent une large utilisation depuis la mine de crayon jusqu'à l'industrie nucléaire (barres de contrôle), en passant par les lubrifiants, les produits réfractaires (creusets, fours), les piles, les batteries au lithium, les piles à combustible, la métallurgie, la fabrication du diamant synthétique et bon nombre d'autres usages.

La consommation pour la plupart des usages devrait suivre une croissance lente jusqu'à ce que l'économie mondiale sorte de la crise, excepté la consommation pour la filière des batteries au lithium liée au développement de la voiture électrique, qui est attendue en forte croissance.

Substituabilité

Selon les usages, certaines substances peuvent être utilisées en remplacement du graphite naturel : lithium métal et titanate de lithium pour les anodes de batteries ; micas, talc, molybdénite dans les lubrifiants ; céramiques dans les produits réfractaires ; matériaux organiques et composites pour les garnitures de freins, et graphite synthétique pour de nombreux usages.

Ressources

Répartie entre les composés organiques, les hydrocarbures, les charbons et ses formes minérales (diamant, graphite, carbonates), l'abondance moyenne du carbone dans la croûte terrestre est estimée à 0,02 %. Les ressources mondiales en graphite sont mal évaluées. Elles atteindraient, selon les sources, jusqu'à 800 Mt (2011).

Il existe plusieurs indices de minéralisation en graphite en France, dont quelques-uns ont donné lieu à des exploitations historiques d'importance anecdotique (7 800 t exploités au Chardonnet, dans le Briançonnais, au début du XX^e siècle). Leurs ressources n'ont cependant pas été vraiment évaluées, et leur inventaire n'est probablement pas exhaustif.

Production

La production de graphite naturel est dominée à 80 % par la Chine pour les deux formes les plus utilisées, paillettes (flakes) et « amorphe » (forme microcristalline), suivie du Brésil (8 %). Le reste de la production se répartit entre une quinzaine de pays (Inde, Canada, Corée du Nord, Sri Lanka, Autriche, Norvège, etc.). La production mondiale a été de 1,24 million de tonnes en 2011.

Recyclage

Le graphite est relativement peu recyclé. Son utilisation dans les pièces de friction et les lubrifiants ne permet pas sa récupération, le graphite se disperse lors de l'usure du support. Les électrodes semblent être partiellement récupérées, broyées et transformées en produits réfractaires.

Prix

Les prix du graphite dépendent de sa nature (paillette ou « amorphe ») et de sa teneur en carbone. Ils ont augmenté entre 2007 et 2008, en raison de l'augmentation de la demande et du relèvement par la Chine de ses taxes à l'export. Ils ont baissé début 2009 avec la crise financière, puis ont ensuite fortement augmenté jusqu'à fin 2011, où les prix s'échelonnaient entre 850 US\$/t pour le graphite microcristallin à faible teneur en carbone et 2 500 US\$/t pour la meilleure qualité de paillettes à forte teneur en carbone.

Le graphite synthétique est en général bien plus cher (7 000 à 20 000 US\$/t). Mais la poudre de graphite microcristallin de très haute pureté (99,9 % de carbone) atteignait 35 000 US\$/t en 2010.

Les acteurs français

La seule société française impliquée dans l'extraction et la production de graphite naturel est la société Imerys, à travers sa filiale suisse Timcal Graphite and Carbon, qui exploite la mine du Lac-des-Iles au Canada.

Les principaux utilisateurs français de graphite sont :

- des fabricants de fours et autre équipements industriels : FNAG, Mersen, ECM-Technologies ;
- des producteurs de batteries Lithium-ion : SAFT qui utilise principalement du graphite artificiel pour fabriquer ses batteries ; E4V qui utilise du graphite naturel et artificiel dans l'assemblage des cellules électrochimiques ;
- les constructeurs automobiles et leurs sous-traitants pour les garnitures de frein et embrayages, diverses pièces mécaniques, ainsi que pour des fours en fonderie au niveau de la fabrication ;
- les constructeurs de véhicules électriques à batteries lithium-ion à anodes en graphite (Renault, PSA) ;
- une société fabrique des encres résistives au graphite pour l'électronique (Vishay Sfernice, filiale de la société étatsunienne Vishay) ;
- certains fabricants de lubrifiants, et en particulier de lubrifiants industriels ;
- plus en aval, les industries ferroviaires, aérospatiales, de défense, de génération électrique, utilisent vraisemblablement, plus en aval, des pièces contenant du graphite (systèmes de freinage, balais de contacts, etc.) fabriqués par des industriels tels que Mersen. Ces industries peuvent aussi utiliser des lubrifiants et graisses graphitées lors de la fabrication de pièces de structure.

Criticité

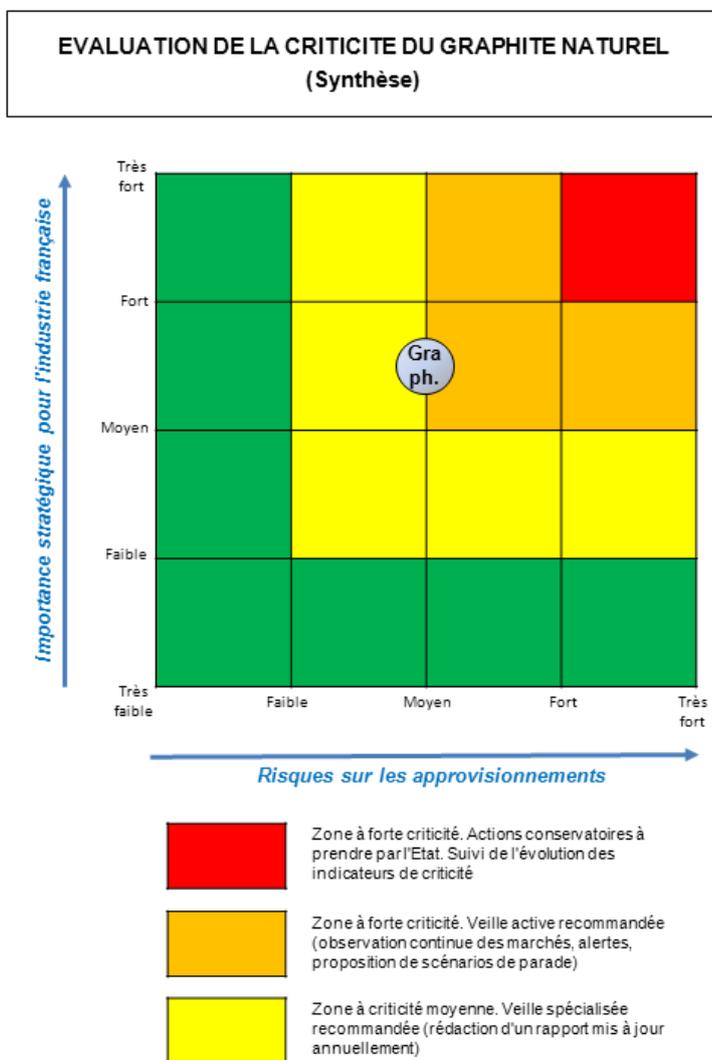


Figure 1 : Criticité du graphite naturel

Sommaire

Synthèse	5
1. Introduction.....	15
1.1. DÉFINITIONS.....	15
1.2. CONDITIONS ET LIMITES DE RÉALISATION DE CETTE ÉTUDE	16
1.3. SOURCES DES DONNÉES	17
2. Le graphite, propriétés et usages.....	19
2.1. LE CARBONE.....	19
2.2. LE GRAPHITE	21
3. Produits graphiteux et spécifications	25
3.1. LES PRODUITS NATURELS.....	25
3.2. LES GRAPHITES NATURELS TRAITÉS.....	26
3.2.1 Le graphite expansé	26
3.2.2 Les feuilles de graphite (« graphite foils »).....	27
3.2.3 Le graphite colloïdal.....	27
3.2.4 Le graphite sphérique ou « potato shape » ou « mango shape ».....	27
3.3. LES GRAPHITES SYNTHÉTIQUES.....	28
3.4. LES NANO-MATÉRIAUX : LE GRAPHÈNE.....	30
3.5. CARACTÉRISTIQUES ET SPÉCIFICATIONS DU GRAPHITE.....	32
4. La demande : usages et consommation	37
4.1. RÉPARTITION DE LA CONSOMMATION.....	37
4.2. RÉFRACTAIRES ET CREUSETS	38
4.3. MÉTALLURGIE DES POUDRES.....	40
4.4. MATÉRIAUX DE FRICTION	40
4.4.1 Garnitures de freins et embrayages.....	40
4.4.2 Balais de contact pour les moteurs et générateurs et autres applications électriques.....	41
4.5. LUBRIFIANTS	43

4.6. CRAYONS	43
4.7. PILES ET BATTERIES D'ACCUMULATEURS	44
4.8. LES PILES À COMBUSTIBLES.....	50
4.9. AUTRES UTILISATIONS DU GRAPHITE	51
4.9.1 Forages	51
4.9.2 Matières plastiques et caoutchouc	51
4.9.3 Peintures	51
4.9.4 Nucléaire	51
4.9.5 Industrie du verre	51
4.9.6 Diverses applications	51
4.10. ÉVOLUTION ATTENDUE DE LA CONSOMMATION	52
5. Substitutions et recyclage.....	53
5.1. SUBSTITUTION.....	53
5.2. RECYCLAGE.....	53
6. L'offre : ressources et production mondiale.....	55
6.1. PRINCIPAUX TYPES DE GISEMENTS.....	55
6.1.1 Le graphite « amorphe »	55
6.1.2 Le graphite en paillettes	56
6.1.3 Le graphite en veines.....	56
6.2. TYPES D'EXPLOITATIONS ET TRAITEMENT DU MINÉRAI	57
6.3. RESSOURCES ET RÉSERVES	57
6.3.1 Évaluation globale des ressources et réserves	57
6.3.2 Les ressources potentielles en France.....	60
6.4. PRODUCTION.....	63
6.4.1 Statistiques de production.....	63
6.4.2 Les producteurs actuels et futurs. Perspectives d'évolution de la production.....	65
7. Les prix.....	71
7.1. LES PRIX RÉCENTS.....	71
7.2. ÉVOLUTION FUTURE DES PRIX	72
8. Les acteurs industriels	73

8.1. LES PRINCIPAUX PRODUCTEURS DE GRAPHITE NATUREL.....	73
8.2. LES PRINCIPAUX FABRICANTS DE PRODUITS INTERMÉDIAIRES EN GRAPHITE	74
8.2.1 Aux États-Unis.....	75
8.2.2 En Chine.....	76
8.2.3 En Inde.....	76
8.2.4 En Suède.....	76
8.2.5 Au Royaume-Uni	76
8.2.6 En Allemagne	77
8.2.7 En Suisse	78
8.3. LES ACTEURS FRANÇAIS	78
8.3.1 Producteurs miniers.....	79
8.3.2 Fabricants de fours et autres équipements industriels utilisant du graphite	79
8.3.3 Électronique.....	80
8.3.4 Fabricants de batteries d'accumulateurs et de piles au lithium.....	80
8.3.5 Constructeurs de véhicules électriques (voitures et cycles)	81
8.3.6 Verres et céramiques.....	82
8.3.7 Fabricants de graisses et lubrifiants.....	82
8.3.8 Autres industries : métallurgie, aérospatiale, défense	82
9. Commerce extérieur de la France.....	83
10. Criticité	87
11. Bibliographie.....	89

Liste des figures

Figure 1 : Criticité du graphite naturel.....	8
Figure 2 : Position du carbone (C) dans le tableau périodique des éléments.	19
Figure 3 : Diagramme de phase du carbone.	20
Figure 4 : Structure cristalline du graphite.	21
Figure 5 : Graphite sphérique (« potato shape ») à gauche et graphite « amorphe » à droite vus au MEB (Microscope Électronique à Balayage).....	28
Figure 6 : Structure du graphène (d'après Jannik Meyer).	30
Figure 7 : Répartition de la consommation du graphite naturel par secteurs industriels.....	37

Figure 8 : Exemples d'applications de balais pour contacts électriques et autres éléments pouvant inclure du graphite, essentiellement synthétique, dans les exemples des secteurs ferroviaire et éolien (© www.mersen.com).....	42
Figure 9 : Perspective d'évolution du marché du véhicule électrique à l'horizon 2020, selon Roskill (2012).....	49
Figure 10 : Perspectives d'évolution de la demande en graphite pour les batteries des véhicules électriques dans l'hypothèse de 6 millions de véhicules électriques à l'échéance 2020 (scénario moyen). (source : Roskill, 2012).	50
Figure 11 : Flottation de graphite à la mine de Konstantin, en République tchèque (© www.grafitovedoly.cz).....	57
Figure 12 : Localisation des principaux gîtes de graphite en France métropolitaine (BRGM, 2012).....	62
Figure 13 : Production mondiale de graphite naturel par pays et type en 2011. (source : Industrial Minerals, 2011. Tonnage ajusté pour l'Inde à 15% du tonnage tout-venant).....	65
Figure 14 : Évolution du prix du graphite.....	72
Figure 15 : Pièces en graphite (en haut) et électrodes pour four à arc (en bas) de GraphTech Intl (© www.graphtech.com).....	75
Figure 16 : Synthèse de la criticité du graphite.	87

Liste des tableaux

Tableau 1 : Propriétés du graphite recherchées dans ses principaux secteurs d'application. ...	22
Tableau 2 : Principales caractéristiques des graphites naturels et synthétiques.....	33
Tableau 3 : Contenu en cendres et composition des cendres de minerais de graphite de différentes provenances.	34
Tableau 4 : Principales utilisations des graphites naturels, graphites traités et graphites synthétiques (adapté d'après Roskill, 2009).	35
Tableau 5 : Principales spécifications requises pour le graphite suivant les utilisations.	36
Tableau 6 : Différentes sources de carbone utilisées dans les batteries.	44
Tableau 7 : Spécifications de produits graphiteux utilisés dans les cathodes des batteries.....	45
Tableau 8 - Quantification des besoins en lithium pour différents véhicules électriques et batteries (adapté d'après Gaines et Nelson, 2010, complété avec une estimation des ordres de grandeur des quantités de graphite requises)	47
Tableau 9 : Comparatif indicatif des besoins en lithium et en graphite pour divers objets utilisateurs de batteries au lithium (par unité d'objet).	48
Tableau 10 : Principaux types de gisements de graphite et leur localisation (d'après Industrial Minerals and Rocks, 7 ^e édition, 2006).	56
Tableau 11 : Estimation des réserves et ressources mondiales en graphite (USGS, Roskill).....	58

Tableau 12 : Récapitulatif des ressources de la Chine en graphite naturel.	59
Tableau 13 : Les principaux gîtes de graphite de France métropolitaine.	61
Tableau 14 : Estimation de la production annuelle mondiale de graphite naturel, toutes formes confondues, en tonnes (USGS, Roskill, Industrial Minerals, BMWFJ).	64
Tableau 15 : Récapitulatif des principales mines de graphite en exploitation.	67
Tableau 16 : Récapitulatif des principaux projets d'exploitation de graphite.	68
Tableau 17 : Évolution des prix du graphite par catégorie entre 2008 et 2012, en US\$ par tonne (source USGS, Industrial Minerals).	71
Tableau 18 : Récapitulatif des principales sociétés productrices de graphite naturel dans le monde.	74
Tableau 19 : Statistiques françaises d'import-export de graphite naturel et de graphite colloïdal. Données CAF-FAB hors matériel militaire (source : http://lekiosque.finances.gouv.fr/).	85

1. Introduction

Cette étude a été réalisée dans le cadre de la Convention 2011 n° 2100485270 relative aux eaux souterraines, aux ressources minérales, au littoral et à l'organisation des connaissances sur la nature et les paysages, signée le 31 août 2011 entre la Direction de l'Eau et de la Biodiversité du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (MEDDTL) et le BRGM.

1.1. DÉFINITIONS

Le glossaire ci-dessous donne la définition de certains termes utilisés de manière récurrente dans ce rapport. Il importe, notamment pour permettre des comparaisons entre différentes sources nationales et internationales relatives aux matières premières minérales, que ces termes soient utilisés de manière standardisée et rigoureuse. C'est malheureusement loin d'être le cas, des termes aussi importants que ressources et réserves étant utilisés de manière disparate.

Criticité : cette étude vise notamment à déterminer les facteurs de criticité pouvant impacter la sécurité des approvisionnements nécessaires aux industries françaises utilisant la/les matière(s) première(s) minérale(s) étudiée(s). Les facteurs sont déterminés et notés selon la grille suivante :

Évaluation de la criticité	Note
Très forte	5
Forte	4
Moyenne	3
Faible	2
Très faible	1

Gisement : concentration naturelle de minéraux, économiquement exploitable.

Indice ou prospect : il s'agit d'une minéralisation dont l'existence est connue grâce à des observations de terrain, éventuellement étayées par quelques sondages et petits travaux miniers (tranchées, galeries de reconnaissance...) et/ou par des observations indirectes (géochimie, géophysique) mais dont l'intérêt économique n'est pas encore démontré.

Minéral/minéraux : désigne une substance inorganique, d'origine naturelle, caractérisée par sa formule chimique et par l'arrangement de ses atomes selon une structure géométrique particulière.

Minerai : désigne une roche contenant une concentration d'un ou plusieurs minéraux en quantité suffisante pour être économiquement exploitable.

Minéralisation : désigne une concentration naturelle élevée de minéraux dont l'exploitation pourrait présenter un intérêt économique. Il s'agit d'un concept plus large que le terme minerai qui, dans les gisements, désigne la partie exploitable de la minéralisation.

Primaire : ce qualificatif, appliqué à un métal ou à un minéral, ou à une production de métal ou un minéral, indique celui qui est produit à partir d'un minerai, en dehors de tout recyclage.

Potentiel géologique : il s'agit d'une première estimation, basée sur des critères et des raisonnements géologiques, de l'existence de gisements dans une région ou un pays.

Réserves : il s'agit de la partie de la ressource dont l'exploitabilité technologique et économique a été démontrée lors d'une étude de faisabilité.

Ressource : il s'agit d'une minéralisation dont l'enveloppe et le volume ont fait l'objet d'une première estimation, encore imprécise, à l'aide de sondages, de petits travaux miniers, de prospection en surface et/ou d'observations indirectes par géochimie, géophysique, etc.

Secondaire : ce qualificatif, appliqué à un métal ou un minéral, ou à une production de métal ou de minéral, indique celui qui est produit à partir du recyclage de déchets, qui peuvent être des produits manufacturés usagés en fin de vie, mais aussi des chutes de fabrication (copeaux, poussières, coulures, bavures, etc.).

1.2. CONDITIONS ET LIMITES DE RÉALISATION DE CETTE ÉTUDE

Cette étude a été réalisée par le Service Ressources Minérales du BRGM, appuyé par la Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS), dans le cadre d'un contrat de sous-traitance. La complexité, l'opacité de la filière, la rareté de la documentation ainsi que le temps limité disponible pour réaliser cette étude en conditionnent le contenu.

Malgré l'utilisation des meilleures sources ouvertes disponibles et le soin apporté à la rédaction de cette étude, le BRGM n'est pas en mesure de garantir l'exactitude des informations et des données citées. L'industrie du graphite n'est pas toujours transparente. C'est souvent le cas des métaux réputés stratégiques, ça l'est encore plus pour le graphite qui relève des « roches et minéraux industriels ». À ce titre, son marché concerne un grand nombre de produits intermédiaires où il n'est pas toujours prédominant et qui sont destinés à un vaste champ de finalités. Les données ouvertes auxquelles nous avons pu accéder sont souvent incomplètes et/ou sujettes à erreurs, intentionnelles ou non. Nous nous efforcerons dans le cadre de cette étude à les souligner et à orienter, si nécessaire vers des études complémentaires.

À noter que le graphite fait partie des 14 substances minérales considérées comme particulièrement critiques dans le cadre de l'étude sur les matières premières critiques

pour l'Union Européenne (« Critical Materials for the E.U. ») publiée le 30 juillet 2010 par la Commission Européenne dans le cadre de l'Initiative Matières Premières.

1.3. SOURCES DES DONNÉES

Ce rapport a été produit à partir de l'importante documentation technique du BRGM, incluant notamment (voir liste bibliographique en fin de rapport) :

- les bases de données et rapports publics de l'United States Geological Survey (USGS) (Shed, 2009, 2010, 2011) ;
- le document « The Economics of Natural Graphite, 7th Edition 2009 », une étude spécialisée sur le graphite produite par Roskill Information Services Ltd en août 2009 ;
- le document « Flake graphite » publié par le British Geological Survey (BGS) en 1993 (Mitchell, CJ Industrial Minerals Laboratory Manual : flake graphite, BGS technical report WG/92/30) ;
- le rapport sur les matières premières stratégiques de la Commission Européenne de juin 2010 ;
- le mémento roche et minéraux industriels « graphite » réalisé par le BRGM en juillet 1989 ;
- le document « ressources minières françaises » incluant les gisements de graphite réalisé par le BRGM en 1983 ;
- la fiche de synthèse carbone réalisée par la SCF (Société Chimique de France) www.societechimiquedefrance.fr ;
- les articles publiés dans la revue Industrial Minerals depuis 1990 (www.indmin.com) ;
- la documentation accessible à travers le site de l'association américaine du carbone, bien que celle-ci concerne majoritairement le graphite synthétique (www.americancarbonsociety.org) ;

ainsi que nombre d'informations ouvertes rassemblées ou consultées dans le cadre de cette étude, en particulier les informations publiées sur les sites Internet de multiples sociétés productrices ou utilisatrices.

2. Le graphite, propriétés et usages

Le graphite est l'un des trois allotropes naturels communs du carbone, avec le diamant et le carbone amorphe.

2.1. LE CARBONE

Le carbone est le sixième élément du tableau périodique. Il constitue environ 0,02 % de la lithosphère (écorce terrestre), essentiellement sous forme de carbonates (calcaires et dolomies) et de produits carbonés (charbons et hydrocarbures) dérivés de la biosphère, dont il est l'un des constituants majeurs.

- symbole : C ;
- numéro atomique : 6 ;
- masse atomique : 12,011 ;
- point de sublimation (à la pression atmosphérique) : 3 825 °C ;
- abondance dans la croûte terrestre : 200 ppm (200 g/t) ;
- concentration dans l'eau de mer : 28 mg/l (sous forme de 140 mg/l d'ions carbonates et bicarbonates).

Le tableau périodique des éléments est présenté ci-dessous. Le carbone (C) est entouré d'un cercle rouge. Les éléments sont classés par numéros atomiques de 1 à 118.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H																	He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	Lanthanides (57-71)	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Actinides (89-103)															
Lanthanides :	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71			
	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
Actinides :	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103			
	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			

Figure 2 : Position du carbone (C) dans le tableau périodique des éléments.

Le carbone est un non-métal possédant quatre électrons sur sa couche externe donnant surtout des liaisons covalentes propices à la formation de molécules très complexes, et en particulier les molécules organiques à la base de la matière vivante.

Sous sa forme pure, le carbone se présente essentiellement sous forme de trois allotropes (formes cristallines) naturels :

- le **carbone amorphe** (non-cristallin) : noir de fumée, par exemple, mais aussi le constituant principal des charbons et de l'antracite en particulier ;
- le **diamant** : carbone cristallisé dans le système cubique, chaque atome de carbone étant relié à quatre autres formant un tétraèdre. C'est la forme cristalline stable à très haute pression. Le diamant est transparent, à éclat adamantin, très dur (la plus dure des substances naturelles, dureté 10 sur l'échelle de Mohs). Sa densité est de 3,51. Il est très rare dans la croûte terrestre supérieure ;
- le **graphite** : carbone cristallisé dans le système hexagonal. Il est formé de feuillets hexagonaux où chaque atome de carbone est fortement lié à trois autres atomes sur un même plan et faiblement avec les feuillets adjacents. C'est la forme cristalline stable du carbone à température et pression ordinaires. Le graphite est opaque, noir à éclat submétallique. Il est tendre, sa dureté est anisotrope (différente parallèlement et perpendiculairement aux feuillets), elle est comprise entre 1 et 2 sur l'échelle de Mohs. Sa densité varie entre 2,1 et 2,3. Il est assez fréquent dans la croûte terrestre supérieure.

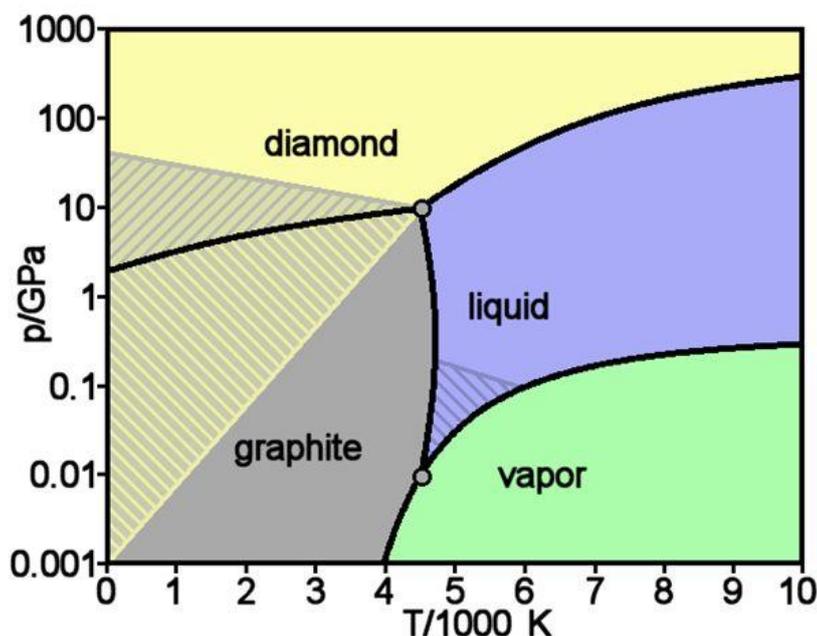


Figure 3 : Diagramme de phase du carbone.
(source : Wikimedia Commons, d'après Zazula, 1997).

Il existe un autre allotrope naturel du carbone, extrêmement peu répandu, la **lonsdaléite**, qui est un allotrope hexagonal du diamant, découverte en 1967 en

quantités microscopiques sur un impact météoritique. La littérature cite aussi un autre allotrope très rare, la **chaoite**, dont la spéciation semble encore discutée.

Enfin il existe des allotropes synthétiques, les **fullerènes**, découverts à partir de 1985, qui sont des « molécules » de carbone formées d'anneaux hexagonaux (comme le graphite) mais aussi pentagonaux, donnant des feuillets courbes, éventuellement fermés comme des ballons de football (molécule C_{60} formée de 20 hexagones et 12 pentagones) ou sous forme de nano-tubes de carbone.

2.2. LE GRAPHITE

Longtemps confondu avec le plomb, d'où sa dénomination initiale de plombagine, ce n'est qu'au XVIII^e siècle que le graphite a été identifié comme une forme cristalline du carbone par le suédois Carl Wilhelm Scheele. Le nom de graphite lui a été donné en 1789 par le minéralogiste allemand A.G. Werner, du grec *graphein*, qui signifie écrire, en référence à l'usage le plus répandu à l'époque, la mine de crayon.

Le graphite utilisé par l'industrie est soit naturel, et se rencontre dans les roches métamorphiques, soit synthétique et élaboré par graphitisation à haute température de coke de pétrole.

À l'état naturel, le graphite est de couleur noire avec un éclat sub-métallique. Il est gras au toucher et tache les doigts et le papier.

Le graphite cristallise sous forme de feuillets composés d'atomes de carbone organisés selon une symétrie hexagonale dans un système planaire. Les feuillets sont superposés avec un léger décalage. Autant les liaisons entre atomes de carbone sont fortes dans un même plan, autant elles sont faibles entre les plans.

La figure 4 montre les arrangements atomiques du graphite (système hexagonal).

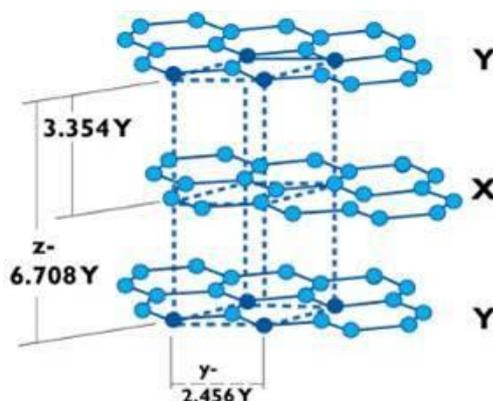


Figure 4 : Structure cristalline du graphite.

Cette structure en feuillets faiblement liés se traduit par l'existence d'un clivage basal parfait, assurant un débit facile suivant ces feuillets, engendrant une faible dureté, un toucher onctueux, ainsi que la compressibilité et la malléabilité du graphite.

Le graphite est un bon conducteur de la chaleur et de l'électricité. C'est le seul non-métal à avoir cette propriété. Il est très réfractaire. À la pression atmosphérique, il sublime à 3 825 °C. Il est chimiquement inerte. Il résiste aux chocs thermiques avec notamment un faible coefficient d'expansion thermique. Il a également un bas coefficient d'absorption des rayons X et un très bas coefficient de friction. Enfin, il est non toxique et non « mouillable » par les métaux. Il est relativement léger, sa densité varie entre 2,1 et 2,3.

	faible absorption des rayons X et des neutrons	faible mouillabilité par les métaux	faible coefficient de friction	inertie chimique résistance à l'oxydation	apport de carbone	faible dureté avant traitement	légèreté	conductivité thermique	conductivité électrique	résistance aux chocs thermiques, faible coefficient d'expansion ou de retrait	réfractarité (résistance aux hautes températures)
batteries				X					X		
balais carbone			X	X					X		
électrodes fours électriques				X					X	X	X
électronique (puits de chaleur)				X			X	X		X	X
enduits conducteurs				X					X	X	X
réfractaires magnésie graphite		X		X				X		X	X
réfractaires alumine-graphite		X		X				X		X	X
garnitures (freins-embayages)								X		X	X
creusets, poches de coulée		X		X				X		X	X
fonderie additifs			X		X						X
fonderie moules			X	X						X	X
aciers, alliages					X					X	X
métallurgie des poudres			X		X					X	X
crayons			X			X					
lubrifiants			X	X				X			X
explosifs				X				X			
boues de forage			X	X			X				X
réacteurs nucléaires	X			X							X
retardateurs de flamme				X						X	X

Tableau 1 : Propriétés du graphite recherchées dans ses principaux secteurs d'application.

Toutes ces propriétés permettent de lui trouver des applications dans un large spectre de secteurs qui relèvent du domaine des industries de base (sidérurgie et réfractaires notamment), du secteur automobile (garnitures de frein ou d'embayages), de l'énergie (batteries), des industries électriques, mais aussi dans celui de la sécurité anti feu, sans oublier bien sûr les mines de crayon, les boues de forage, voire le nucléaire où il intervient comme ralentisseur de neutrons (cf. Tab. 1). L'utilisation du graphite concerne à la fois des utilisations de masse à faible contenu technologique (mines de

crayon) que des utilisations stratégiques présentes : nucléaire, batteries lithium-ion, ou d'avenir dans les piles à combustible ou les microprocesseurs. À ce titre, de grands espoirs sont fondés sur le graphène, nano-graphite récemment individualisé et qui pourrait à terme, si l'on en croit la presse spécialisée, remplacer le silicium dans certains microprocesseurs. Encore faudra-t-il parvenir à industrialiser sa production pour des prix de revient permettant la substitution.

Le graphite est par excellence un minéral industriel car, pour toutes ces applications, les spécifications, les modes d'élaboration et de conditionnement diffèrent notablement pour mieux s'adapter aux performances et aux qualités requises pour chaque application. Le seul contenu en carbone ne suffit pas à les définir. À ce titre, le suivi des données statistiques pose des problèmes de cohérence, liés aux disparités entre les standards techniques des différentes zones de production et de consommation. De notables différences ont ainsi pu être mises en évidence entre les normes occidentales et celles prévalant en Chine. Malgré la mondialisation des échanges, de telles disparités subsistent aussi bien pour des raisons techniques liées aux outils industriels et aux procédés mis en œuvre que pour des raisons de protection commerciale.

Les filières du graphite sont relativement peu transparentes. Les acteurs sont souvent très jaloux de ce qu'ils considèrent comme des secrets industriels dans un contexte de concurrence exacerbée. Un des principaux industriels français du secteur, le groupe Imerys, dont la filiale suisse Timcal Graphite et Carbone est un leader mondial dans le domaine du graphite naturel et synthétique, communique très peu d'informations quantitatives.

L'USGS (United States Geological Survey) qui fournit des statistiques d'échange et de production pour presque toutes les ressources minérales, a effacé la plupart des données concernant le graphite en invoquant la nécessité de ne pas divulguer des données jugées comme étant la « propriété » des compagnies américaines concernées.

Compte tenu de ces disparités, les éléments chiffrés à notre disposition doivent donc toujours être considérés comme des ordres de grandeur puisqu'ils recouvrent des données mal classées et donc difficilement corrélables. Nous tenterons néanmoins de faire émerger des tendances à partir des chiffres disponibles, tout en insistant, une fois de plus, sur la nécessité de les relativiser. Compte tenu des remarques qui précèdent, appréhender la criticité des approvisionnements pour une telle ressource est une gageure que nous tenterons, sans ignorer les limites de l'exercice dans un tel contexte.

Le présent document s'intéressera plus particulièrement au graphite naturel quand bien même des références ne manqueront pas d'être faites au graphite synthétique, les deux filières étant imbriquées aussi bien sur le plan des producteurs que sur celui des utilisations.

3. Produits graphiteux et spécifications

Les produits graphiteux marchands peuvent être regroupés en trois grandes catégories :

- **les produits naturels** sont issus de la mine et correspondent à des « concentrés » ayant subi un broyage, un tri, un lavage par flottation, éventuellement des traitements thermiques et chimiques limités, une classification granulométrique ;
- **les graphites traités** ont subi des transformations physiques telles que leur présentation diffère notablement du graphite « naturel ». Les transformations subies sont destinées à apporter de nouvelles fonctionnalités. Il s'agit des graphites expansés, des feuilles de graphite (graphite foils), du graphite colloïdal, du graphite sphérique ;
- enfin, **le graphite synthétique**, parfois appelé « électro-graphite » est produit par pyrolyse de substances organiques telles que les houilles, le coke de pétrole ou les brais (distillation de goudrons).

Une mention spéciale doit enfin être faite pour les nano-particules de graphite plus connues sous le nom de **graphène**. Leur récente mise en évidence (2004) ne permet pas encore de valider tous les espoirs que les premières expériences laissent entrevoir, malgré l'importante spéculation qui se développe aussi bien sur le plan scientifique que minier.

3.1. LES PRODUITS NATURELS

Trois produits marchands de base du graphite naturel peuvent être distingués. Ils sont différenciés en fonction de la granulométrie, du contenu en carbone, mais aussi du contenu en cendres ainsi que du chimisme de ces cendres.

Le **graphite en masses cristallisées** ou « vein graphite » ou « lump graphite », aussi appelé graphite ultra-cristallin, se caractérise par sa présentation en blocs massifs et son contenu élevé en carbone (95 % en moyenne). Il est spécifiquement produit au Sri Lanka ;

Les **paillettes** (flakes) se caractérisent par des cristaux de taille supérieure à 100 µm, dont le contenu en carbone peut varier de 5 à 40 % avant purification. Cependant, en Chine, le terme de « graphite cristallin » ou « graphite disséminé » désigne des cristaux dont la taille est supérieure à 1 µm (Roskill, 2009) et concerne donc des produits cent fois plus fins. Cette différence notable mériterait d'être inventoriée plus en détail car elle présente des enjeux notables quant aux caractéristiques des produits miniers chinois. Elle ne manque pas également d'induire une certaine confusion dans la catégorisation et jette un flou sur les statistiques officielles fournies par les organismes chinois.

En Chine, les paillettes (flakes) de graphite sont classées suivant le standard national GB/T 3538-95 en quatre catégories suivant leur contenu en carbone :

- Haute pureté (LC) : > 99,9 % C ;
- Haut carbone (LG) : 94-99,9 % C ;
- Carbone moyen (LZ) : 80-94 % C ;
- Faible carbone (LD) : 50-80 % C.

Chacune de ces quatre catégories est subdivisée en 212 grades (10 pour LC, 66 pour LG, 124 pour LZ et 12 pour LD) en fonction du carbone fixé, de la perte au feu et de l'humidité.

Le **graphite improprement appelé « amorphe »** est en fait un graphite micro-cristallin (« crypto-cristallin » en Chine) avec des particules dont la taille est inférieure à 1 µm et dont la teneur en carbone peut varier suivant les gisements entre 25 et 80 %. D'une manière générale, le graphite « amorphe » a un contenu en carbone plus élevé que le graphite en paillettes, tout au moins avant purification et traitement.

Une source de confusion existe concernant les particules fines issues du traitement des paillettes appelées en Occident des poussières cristallines alors qu'en Chine il leur arrive d'être classées dans la catégorie « amorphe ». L'enjeu est loin d'être négligeable car les fines de traitement du minerai peuvent représenter plus de 30 % du concentré traité et présentent une hétérogénéité certaine.

3.2. LES GRAPHITES NATURELS TRAITÉS

Les graphites traités sont des produits de haute performance mis en œuvre dans les procédés relevant de conditions « extrêmes » : hautes températures, hautes pressions, milieux chimiquement agressifs. Ils sont aussi développés dans l'énergie mobile : les batteries lithium-ion. Pour ces applications, les graphites naturels traités sont difficilement remplaçables, ils constituent soit des produits intermédiaires utilisés en association avec d'autres produits (éléments de mousses par exemple) soit des produits finaux (joints).

3.2.1 Le graphite expansé

Il exploite la propriété qu'a le graphite naturel de se modifier en présence d'acide chromique et sulfurique à chaud (> 600 °C). L'hydrolyse permet à l'eau de se déposer entre les feuillets de graphite. Après un chauffage brutal, les feuillets s'expansent dans des proportions qui peuvent atteindre 100 à 700 fois le volume initial. Ce traitement de surface est produit à partir de grosses paillettes à fort contenu en carbone. Le graphite expansé a certaines propriétés similaires à celles de la vermiculite. Il est utilisé comme élément d'isolation dans les procédés de coulage de l'acier, mais aussi comme élément ignifugeant dans les mousses de matelas.

3.2.2 Les feuilles de graphite (« graphite foils »)

Les feuilles de graphite sont produites à partir de graphite naturel par traitement à l'acide sulfurique fumant ou à celle d'un mélange acide nitrique - acide sulfurique. Après hydrolyse, lessivage et séchage, le produit obtenu est brutalement chauffé à 1 000 °C. Il est ensuite comprimé pour obtenir des feuilles de graphite. Ces feuilles de graphite sont brevetées par la société américaine Graftech sous le nom de Grafoil.

Les feuilles de graphite restent souples dans un large spectre de température qui s'étend de -200 °C à 1 650 °C. Elles sont chimiquement inertes et résistent aux attaques d'une grande variété de gaz et de liquides et sont résistantes au feu. Après formage, elles sont utilisées dans les joints de pompes et de valves, elles servent également de bouclier thermique, notamment pour les applications en cryogénie.

Suivant l'acide utilisé pour le traitement de surface, il est également possible de produire des « fluorures de graphite » destinés aux lubrifiants travaillant sous hautes températures.

3.2.3 Le graphite colloïdal

Le graphite colloïdal est un graphite très fin mis en suspension dans un liquide le plus souvent destiné aux lubrifiants ou pour constituer, après séchage, des revêtements conducteurs. Une fois encore les définitions granulométriques divergent. En théorie, la taille des particules « colloïdales » devrait être comprise entre 0,1 et 0,01 µm. En fait, le terme de graphite colloïdal s'applique à des particules dont la taille varie de 1 à quelques µm. Le graphite doit subir un broyage fin ménagé de manière à obtenir des particules au spectre granulométrique adéquat. L'utilisation d'un agent dispersant est nécessaire pour rendre hydrophile les particules de graphite qui seront mises en suspension dans l'eau en milieu alcalin.

Après séchage, le revêtement constitué par les particules, qui se caractérise par sa conductivité électrique et ses propriétés lubrifiantes, est utilisé comme enduit pour améliorer la conductivité de l'enveloppe métallique des batteries alcalines.

Le graphite colloïdal est également mis en œuvre dans les crayons et certaines peintures (peintures en tubes).

3.2.4 Le graphite sphérique ou « potato shape » ou « mango shape ».

Ce graphite a été développé pour optimiser l'usage du graphite dans les anodes (pôle négatif) des batteries lithium-ion. La structure tridimensionnelle des particules permet d'augmenter leur densité et la compacité de l'anode. Une faible surface active par unité de poids est également recherchée.

Le graphite sphérique est majoritairement fabriqué à partir de graphite naturel en paillettes à fort contenu en carbone. La société Timcal, filiale du groupe Imerys,

commercialise du graphite sphérique élaboré à partir de graphite synthétique (source : www.timcal.com).

À titre d'exemple de spécification, la société Aoyu (Heilongjiang-Chine) commercialise un graphite sphérique naturel à 99,98 % de carbone (carbone fixé) et 0,027% de teneur en cendre dont la masse volumique après tassement (tap density) est de 0,95 g/cm³ et la surface spécifique (méthode BET) 5,26 m²/g.

Selon certaines sources, le graphite sphérique produit ne représenterait que 30 à 40 % du concentré de paillettes mise en œuvre pour le fabriquer. Il est ainsi estimé que pour produire les 30 000 t de graphite sphérique utilisées dans les batteries lithium-ion en 2010, il a fallu traiter environ 90 à 100 000 t de graphite en paillettes (soit près du quart de la production de paillettes cette année-là). Les fines et rejets de traitement peuvent être commercialisés pour les usages moins nobles du « graphite amorphe ».

La figure 5 ci-après montre graphite amorphe et graphite sphérique vus au microscope électronique à balayage. La taille des particules varie de 5 à 50 µm.

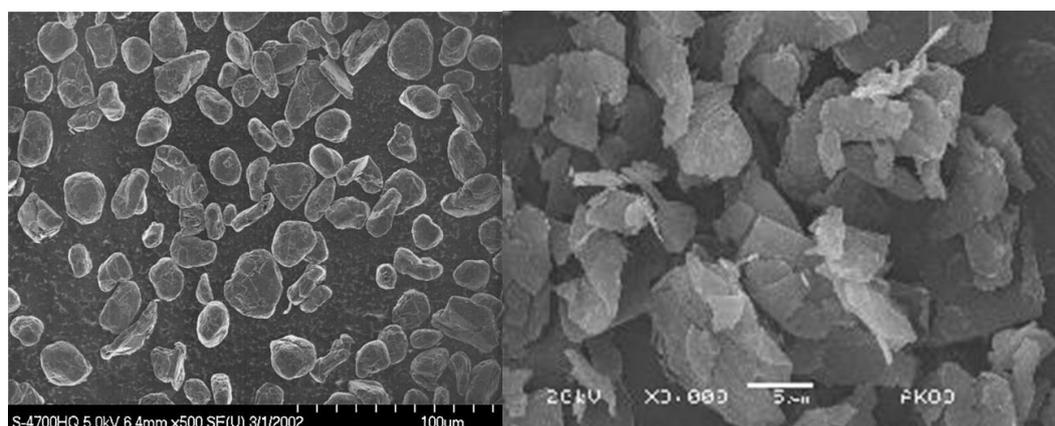


Figure 5 : Graphite sphérique (« potato shape ») à gauche et graphite « amorphe » à droite vus au MEB (Microscope Électronique à Balayage).

Sources : K. Zaghbi *et al.* et société Kaiyu Industrial Ltd.

3.3. LES GRAPHITES SYNTHÉTIQUES

La production de graphite synthétique suppose des matières premières carbonées qui peuvent être diverses : houilles, pétrole, polymères, hydrocarbures, brais (résidus de distillation de goudrons). La principale matière première utilisée est le coke de pétrole privilégié en raison de sa grande pureté (environ 1/3 de la production mondiale de coke de pétrole est destinée à la fabrication de graphite soit plus de 8 Mt). Sont également utilisés les résidus d'usinage du graphite.

La pyrolyse est effectuée en général en chauffant progressivement les matières premières jusqu'à 1 000 °C. Cette pyrolyse permet d'obtenir le départ des matières volatiles par la rupture de liaisons dans les hydrocarbures, par des polymérisations et par l'élimination de l'hydrogène. La partie finale de la pyrolyse se traduit par la

formation d'une phase liquide qui facilite la mobilité des molécules et permet aux molécules aromatiques polycondensées de s'orienter en couches parallèles qui faciliteront ainsi la formation de graphite tri-dimensionnel. À ce stade, les cristaux de graphite ont des dimensions de l'ordre de quelques nanomètres (les « cristallites »).

La graphitisation effectuée vers 2 500 - 3 000 °C se traduit par l'élimination de défauts dans les cristallites et leur croissance. Ces cristaux peuvent atteindre alors quelques dizaines à quelques centaines de nanomètres.

Au cours de la pyrolyse, le départ des matières volatiles induit une porosité importante (jusqu'à 30 %). Celle-ci n'est que partiellement réduite par les traitements complémentaires (imprégnation de brais) et la graphitisation. Au final, les graphites synthétiques se caractérisent toujours par une porosité importante (jusqu'à 15 %), à la différence des graphites naturels où celle-ci dépasse rarement 3 %.

Les graphites synthétiques présentent néanmoins l'avantage d'une grande usinabilité et d'une pureté élevée. Ils sont commercialisés sous la forme de cylindres ou de blocs permettant le façonnage.

Le graphite synthétique est surtout utilisé pour les électrodes pour la métallurgie : électrodes des fours à arc, électrodes pour l'électrolyse de l'aluminium et autres électrolyses industrielles.

Après graphitisation, les produits peuvent subir des traitements complémentaires pour répondre aux besoins des utilisations finales. Ces traitements peuvent consister en des imprégnations secondaires par des résines, des métaux, des verres, du pyrocarbone ou par du phosphate d'aluminium, qui diminuent par exemple l'oxydation des anodes destinées à l'électrometallurgie de l'aluminium. Des purifications (élimination du vanadium, du sodium, par traitement à haute température à l'aide d'halogènes) ou le dépôt de revêtements protecteurs en carbure de silicium sont également réalisés.

De nouveaux procédés de fabrication ont récemment été décrits mais n'ont pas encore atteint un développement industriel. Aux États-Unis, la société Integrated Environmental Services annonce pouvoir fabriquer du graphite à partir de dioxyde de carbone. 3,7 kg de dioxyde de carbone permettraient théoriquement de fabriquer 1 kg de graphite. La proposition est intellectuellement séduisante puisqu'on valoriserait le gaz carbonique tout en diminuant l'effet de serre. À l'heure actuelle, il est difficile de départager l'effet d'annonce et la réelle perspective industrielle.

Le graphite synthétique dit primaire est l'électrographite dont la fabrication vient d'être décrite, le graphite secondaire est constitué par les déchets d'usinage et de fabrication d'éléments en graphite synthétiques.

Le **pyrocarbone** est préparé par craquage d'hydrocarbures (propane) vers 1 450 °C et dépôt sur un support en graphite. Le pyrocarbone présente l'avantage d'être hémocompatible (le sang ne coagule pas à son contact). Il entre ainsi dans la fabrication des valves cardiaques mécaniques et de prothèse de doigts.

Enfin, mentionnons pour mémoire les **fibres de carbone** utilisées comme fibre de renforcement dans les composites. Leur fabrication s'est principalement développée à partir de polyacrylonitrile (PAN). Ce ne sont pas à proprement parlé des graphites. Ils concernent des filières bien séparées et ne seront pas décrits plus amplement.

3.4. LES NANO-MATÉRIAUX : LE GRAPHÈNE

Connu depuis les années 1960, le graphène n'a été isolé et étudié de manière approfondie qu'en 2004. C'est encore un produit de laboratoire. Son prix de revient reste trop prohibitif (un échantillon de 100 g et 12 nm d'épaisseur de graphène se négocie 495 US\$, soit près de 5 000 US\$ le kg) pour envisager des utilisations à grande échelle, même si ses propriétés, décrites ci-après, laissent envisager d'énormes potentialités. Savoir s'il sera fabriqué à partir de graphite naturel ou non est une question encore prématurée, même si cette piste est explorée parmi d'autres.

En l'état actuel des développements, le graphène est un sujet qui, pour animer l'actualité scientifique, n'en constituera pas pour autant une réalité commerciale et industrielle avant un horizon pouvant être fixé à 10 ou 20 ans.

Le graphène peut être décrit comme une monocouche d'atomes de carbone organisés suivant une maille hexagonale.

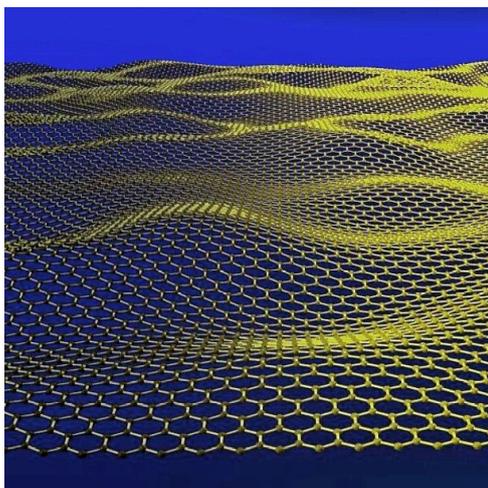


Figure 6 : Structure du graphène (d'après Jannik Meyer).

C'est donc une structure à deux dimensions qui présente la particularité d'être « ondulée » comme le montre la figure 6 ci-dessus. C'est précisément cette dernière caractéristique qui semble rendre possible sa stabilité contre toutes les théories en vigueur. L'enthousiasme actuel doit être mesuré à l'aune de cette « impossibilité théorique » transgressée.

Le matériau a été isolé pour la première fois par André Geim (Royaume Uni) et Kostya Novoselov (Russie) en 2004. L'enthousiasme de la communauté scientifique face à

cette découverte et des potentialités qu'elle induisait a été tel, qu'en 2010, les découvreurs se sont vus octroyer le Prix Nobel de physique.

Le graphène est extrêmement fin : c'est une nanoparticule. Il est transparent dans les infra-rouges et la lumière visible, flexible, 200 fois plus résistant que l'acier. Il conduit la chaleur 10 fois plus vite que le cuivre et peut transporter une densité de courant électrique 1000 fois supérieure au fil de cuivre.

Une des propriétés principales du graphène est la très grande mobilité des électrons qui le parcourent et qui, en évitant les collisions, limitent la production de chaleur, permettant d'envisager ainsi une miniaturisation accrue des transistors.

Le graphène en quelques chiffres :

- épaisseur : quelques dixièmes de nanomètres ;
- vitesse des électrons : 1 000 km/s ;
- mobilité électronique : entre 200 000 et 250 000 cm² par volt et par seconde ;
- résistance mécanique : 42 N/m².

Avec de telles propriétés, décrire le nouveau matériau comme révolutionnaire est un euphémisme car il pourrait transformer la technologie des semi-conducteurs et remplacer, à terme, le silicium. Ceci pourrait constituer une rupture technologique majeure, avec de nouveaux développements dans les écrans digitaux, les transistors ultra-compacts et les stockages de grande capacité. Il pourrait enfin améliorer l'efficacité des cellules photovoltaïques et bouleverser de nombreuses autres applications.

Chez IBM, les chercheurs tempèrent néanmoins les enthousiasmes et imaginent difficilement le remplacement du silicium en pointant notamment l'absence de « lacune de fréquence » permettant de déconnecter le matériau (on-off), principale propriété des semi-conducteurs. Quoi qu'il en soit, les nouveaux développements sont attendus avec impatience.

En 2010, près de 3 000 publications scientifiques traitaient du graphène, avec un objectif majeur : l'industrialisation de la production et les retombées économiques qui en découleront.

L'Union Européenne et la Corée du Sud ont chacune mis en œuvre des programmes de recherche de plus de 1,5 GUS\$ pour tenter de produire les graphènes de prochaine génération. En particulier pour la possible substitution de l'ITO (Indium Tin Oxyde), cette couche conductrice transparente dans la lumière visible, utilisée notamment dans les écrans plats et les cellules photovoltaïques.

En 2011, le gouvernement du Royaume Uni a doté l'Université de Manchester, à l'origine de la découverte, d'un budget de 50 M£ (~60 M€ en déc. 2011) pour financer le Centre de Recherche Globale sur le Graphène, avec comme objectif principal : la commercialisation du produit.

En France, le graphène est étudié à l'Institut de Minéralogie et de Physique des Milieux Condensés¹ (IMPMC) ainsi qu'à l'Institut des Nanosciences de Paris² (INP). Le premier laboratoire a déposé un brevet de fabrication du graphène (brevet WO 2009/07/4755).

À l'heure actuelle, plusieurs techniques de fabrication sont explorées. La méthode par exfoliation de feuillets de graphite et la méthode par épitaxie sur du carbure de silicium sont les deux principales. La première correspond à la technique historique, qui permet de décoller les feuillets (notamment avec un film de ruban adhésif !!) jusqu'à obtenir des feuillets d'épaisseur atomique. Cette méthode de laboratoire laisse peu de perspectives d'industrialisation. L'autre méthode consiste à obtenir le graphène par réduction du carbure de silicium chauffé au-dessus de 1 100 ° C. En général, le carbure de silicium est lié à un substrat de silicium métal.

Parmi les autres méthodes explorées, citons l'épitaxie sur substrat métallique, la réduction de graphite oxydé, la précipitation de bains fondus de métal-carbone, le traitement par ultra-sons (sonication) de particules de graphite naturel.

Les champs du possible restent donc encore très ouverts.

3.5. CARACTÉRISTIQUES ET SPÉCIFICATIONS DU GRAPHITE

Quatre critères sont fondamentaux pour caractériser le graphite. Ils se déclinent en nombreux paramètres physiques et chimiques :

- la **structure cristalline** : une cristallinité élevée ainsi que l'espacement régulier des feuillets sont recherchées ;
- la **texture**, définie par la densité (en général « densité réelle », mesurée par la méthode au xylène) et la surface spécifique. Cette dernière identifie la surface cristalline active. Alors que la surface spécifique permet de caractériser les vides au sein des particules, la densité sur le vrac et celle après tassement (« tap density ») caractérisent les vides entre les particules ;
- la **taille et la forme** des particules : le spectre granulométrique (Particle Size Distribution PSD) est défini par l'utilisation de tamis standards ainsi que la diffractométrie laser. La gamme de produits Timrex commercialisés par la société Timcal Graphite and Carbon s'échelonnent dans un spectre allant de 4 µm à quelques millimètres ;
- la **pureté du graphite** est définie par le contenu en carbone, l'humidité et la composition chimique des cendres. Les graphites naturels peuvent être purifiés pour ne plus contenir que moins de 0,1 % d'impuretés à comparer à 1 à 10 % pour le graphite en morceaux cristallisés, 5 à 20 % pour les paillettes, 12 à 35 % pour le graphite amorphe et 0,01 à 5 % pour le graphite synthétique.

¹ Unité mixte de recherche CNRS / Université Pierre et Marie Curie / IRD.

² Unité mixte de recherche CNRS / Université Pierre et Marie Curie.

	graphite naturel			graphite synthétique		
	flakes	vein	"amorphe"	primaire	secondaire	paillettes
teneur en carbone (%)	90.0%	96.7%	81.0%	99.9%	99.0%	97.0%
dont teneur en graphite (%)	99.9%	100%	28.0%*	99.9%	92.3%	95.0%
teneur en soufre (%)	0.1%	0.7%	0.1%	0.00%	0.01%	0.07%
densité (g/cm3)	2.29	2.26	2.31	2.25	2.24	2.24
espace interfeuille (Angström)	3.355	3.354	3.361	3.355	3.359	3.358
résistivité (ohm.cm)	0.031	0.029	0.091	0.035	0.042	0.024

Source : Harben, 2002 (Industrial Minerals Handybook IV)

* NDLA: Le bon sens commun est réticent à mentionner du "graphite à 28% de graphite". Parmi les explications possibles de cette formulation implicite du tableau, il peut s'agir d'une erreur (coquille) dans le Handybook, ou alors il ne s'agit pas de graphite, mais de "minerai de graphite" qui contiendrait 28% de graphite. Ceci illustre bien le problème récurrent avec les données de ressources, réserves et productions de graphite, qui ne recouvrent pas toutes la même chose : certaines recouvrent du graphite (à plus de 90% de graphite), d'autres du "minerai de graphite", à des teneurs variables en graphite (parfois 10%, parfois 30%, etc.)

Tableau 2 : Principales caractéristiques des graphites naturels et synthétiques.

Les tableaux 2 et 3 présentent les principales caractéristiques des graphites naturels et des graphites synthétiques ainsi que le contenu en cendres de minerais de différentes origines.

Pour compléter les caractéristiques du tableau 2, il convient de retenir :

- la pureté plus élevée du graphite synthétique (jusqu'à 10 fois moins d'impuretés que dans le graphite naturel) ;
- la porosité plus élevée du graphite synthétique (jusqu'à 5 fois plus que le graphite naturel). Corrélativement, le graphite naturel aura une densité plus élevée ;
- la cristallinité plus faible du graphite synthétique comparativement au graphite naturel en paillettes ou en morceaux ;
- la possibilité offerte par le graphite synthétique de pouvoir fabriquer des éléments de taille importante qui se prêtent à l'usinage.

	Madagascar	Mexique	Inde	Chine	Norvège	Canada
teneur en cendres	12.0%	3.8%	11.8%	16.9%	8.8%	23.5%
analyse des cendres						
SiO ₂	44.6%	14.5%	56.0%	49.7%	56.7%	64.8%
Al ₂ O ₃	32.8%	14.5%	20.3%	19.7%	15.6%	13.9%
Fe ₂ O ₃	18.8%	29.5%	14.9%	19.2%	10.5%	12.3%
TiO ₂	0.5%	0.7%	1.1%	1.6%	1.1%	0.4%
CaO	0.2%	1.5%	1.5%	1.9%	3.5%	3.7%
MgO	2.3%	1.5%	3.0%	4.2%	6.1%	1.4%
Na ₂ O	0.1%	0.6%	0.5%	0.7%	3.5%	0.6%
K ₂ O	0.7%	0.7%	2.0%	2.6%	2.4%	2.0%

Source : Harben, 2002 (*Industrial Minerals Handybook IV*)

Tableau 3 : Contenu en cendres et composition des cendres de minerais de graphite de différentes provenances.

Le tableau 3 ci-dessus permet de souligner la grande variabilité du contenu en cendres des différents produits miniers avant purification.

Le tableau 4 ci-après présente les principales utilisations des différentes classes de produits marchands présentés précédemment. Il ressort de ce tableau que si ces produits peuvent entrer en compétition les uns avec les autres dans certains domaines, la substitution n'est pas systématique. Quand elle est possible, le choix du matériau se fera en fonction des propriétés requises déterminantes pour l'application comme la pureté ou d'autres caractéristiques physiques comme la taille des particules, le spectre granulométrique, les propriétés de surface, sans oublier le prix.

Ce tableau montre bien que l'utilisation privilégiée et exclusive du graphite synthétique est la fabrication d'anodes pour les fours électrolytiques destinés à la production d'aluminium ou pour les fours à arcs électriques utilisés dans l'électrometallurgie (fabrication du silicium métal par exemple). Ces anodes, qui peuvent être de taille importante, sont fabriquées par moulage de graphite synthétique. Elles permettent la mise en œuvre de courants de fortes intensités. Pour ces applications le graphite synthétique n'est pas substituable à l'heure actuelle.

Les domaines où il peut y avoir compétition entre les différents produits graphiteux sont les suivants :

- les batteries ;
- les balais de carbone ;
- les garnitures de freins ;
- les puits de chaleur (électronique) ;
- la métallurgie des poudres ;

- les aciers et alliages (apport de carbone) ;
- les lubrifiants.

	graphite naturel			graphite naturel traité		graphite synthétique
	paillettes cristallines	morceaux cristallisés	masses micro-cristallines	exfolié, expansé	colloïdal	graphite synthétique
batteries	X	X		X	X	X
balais carbone	X		X			X
electrodes fours électriques						X
électronique (puits de chaleur)	X		X			X
enduits conducteurs	X		X	X	X	
réfractaires magnésio-graphite	X		X			
réfractaires alumine-graphite	X		X			
garnitures (freins, embrayages)	X		X	X		X
creusets, poches de coulée	X		X		X	
fonderie additifs	X	X	X			
fonderie moules	X		X		X	
aciers, alliages			X		X	X
métallurgie des poudres	X	X				X
crayons	X		X			
lubrifiants	X	X	X	X	X	X
explosifs	X		X			
boues de forage	X					
réacteurs nucléaires	X					
retardateur de flamme	X			X		
diamants synthétiques	X					

Tableau 4 : Principales utilisations des graphites naturels, graphites traités et graphites synthétiques (adapté d'après Roskill, 2009).

Pour les domaines où cette compétition existe, le prix sera souvent l'élément déterminant. Si le graphite synthétique présente le plus souvent un prix de revient supérieur au graphite naturel, le coût induit par la purification de celui-ci peut vite devenir prohibitif (cf. chapitre 7). Cette compétition entre produits graphiteux s'effectue dans un contexte d'exigences accrues des industries utilisatrices, notamment en termes de pureté. Le graphite naturel cristallisé, par ses possibilités de traitement qui restent encore largement à développer, conserve un avantage compétitif indéniable.

Le tableau 5 ci-après, qui présente quelques spécifications requises dans les différents usages, illustre ces exigences de forte cristallinité.

Usage	Contenu en carbone	Taille des paillettes	Remarques / caractéristiques
batteries lithium-ion	>99%	10-1000 µm	Absence d'impuretés métalliques, et S < 0,5 %
batteries alcalines	> 98 %	5 - 75 µm	Pas d'impuretés métalliques (Cu, Co, Sb, As)
balais carbone	95 à 99 %	< 53 µm	< 1 % de cendres/silice. Absence d'éléments pénalisants abrasifs et métalliques
électrodes de fours électriques	> 99 %	n.d.	Moulage des électrodes directement après fabrication du graphite synthétique
électronique (puits de chaleur)	n.d.	n.d.	Graphites de haute pureté, expansés
enduits conducteurs	50-55 %	< 75 µm	Peuvent contenir jusqu'à 25 % de silice, mais pas sous forme sableuse. pyrite et micas pénalisants
réfractaires magnésie-graphite	85-90 %	150-710 µm	Paillettes avec "aspect ratio" 20:1 et cendres < 2 %
réfractaires alumine-graphite	> 85 %	150-500 µm	Paillettes de grande dimension préférées
garnitures (freins, embrayages)	> 98 %	< 75 µm	Un mélange naturel-synthétique 60/40 est parfois utilisé. Minéraux abrasifs pénalisants
creusets, poches de coulée	80-95 %	> 150 µm	Densité brute : 48 à 54 g/cm ³ . Grandes paillettes (> 300 µm). Faible contenu en fer, mica, carbonates.
fonderie additifs	40-70 %	53-75 µm	Sulfures et autres éléments fondants indésirables
fonderie moules	70-90 %	75 µm	
aciers, alliages	98-99 %	5 µm	
métallurgie des poudres	96-99 %	5 µm	
crayons	95-97 %	> 150 µm	
lubrifiants	98-99 %	53-105 µm	Absence de sulfures, matériel abrasif et des éléments métalliques, qui sont pénalisants
explosifs	65%	< 150 µm	absence de sulfures et d'acides, faible humidité
boues de forage	> 80 %	n.d.	
réacteurs nucléaires	> 99 %	n.d.	Absence d'éléments absorbeurs de neutrons comme le bore. Cendres > 0,04 %. < 1 ppm terres rares et bore
retardateur de flamme	> 90 %	200-1700 µm	

Tableau 5 : Principales spécifications requises pour le graphite suivant les utilisations.
(modifié d'après Harben (2006) and Industrial Minerals).

4. La demande : usages et consommation

Depuis 2005, d'après Roskill (2009), la consommation mondiale de graphite naturel évolue dans une fourchette située entre 0,9 et 1,1 Mt par an³. Depuis 2005, cette consommation vient pour plus des 2/3 de l'Asie, principalement Chine, Japon et Inde. Un pays d'Amérique Latine émerge également, le Brésil.

Nous ne disposons pas des statistiques de consommation de graphite synthétique. Le chiffre de 200 000 t est parfois avancé mais mériterait d'être confirmé.

4.1. RÉPARTITION DE LA CONSOMMATION

La figure 7 illustre la répartition de la consommation du graphite naturel par secteur industriel d'après Roskill (2009).

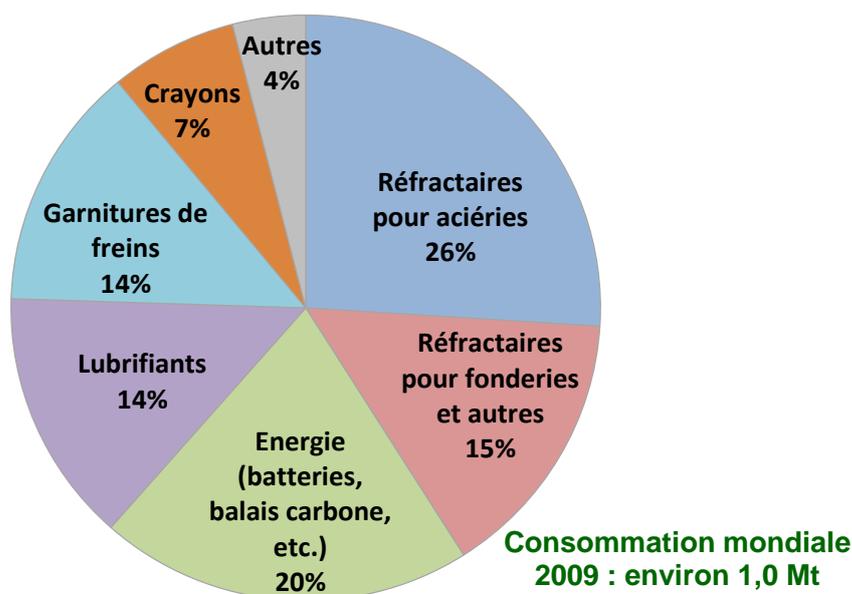


Figure 7 : Répartition de la consommation du graphite naturel par secteurs industriels.
(source : Roskill 2009).

Cette figure montre que le graphite est à 41 % destiné aux réfractaires pour l'industrie lourde (production d'aciers et fonderies). La répartition est cependant variable selon les pays : la part de la consommation pour les réfractaires est encore plus élevée dans des pays comme la Chine (51 %) ou le Brésil (58 %).

³ Il s'agit là d'un ordre de grandeur, en l'absence de statistiques fiables.

Les secteurs relevant des domaines de l'énergie (batteries) ou de la construction électrique (« charbons », balais de carbone) et électronique représentent environ 20 % de la consommation, mais ce sont ces deux secteurs qui présentent le plus d'enjeu en terme aussi bien d'évolution technologique que de fort accroissement de la demande.

Les autres secteurs sont les lubrifiants (14 %), les garnitures de freins (14 %) et enfin les crayons (7 %).

Au cours des trente dernières années, le graphite synthétique a eu tendance à remplacer le graphite naturel dans les domaines de la fonderie, de la métallurgie des poudres et dans celui de la re-carburation des aciers.

Nous allons tenter de décrire dans les paragraphes qui suivent les problématiques de la demande dans les principaux secteurs sans oublier les secteurs stratégiques comme le nucléaire.

4.2. RÉFRACTAIRES ET CREUSETS

La proportion de graphite mis en œuvre dans les réfractaires va grandissant en raison de leur large spectre de propriétés et de leur capacité à résister aux conditions extrêmes de température et de corrosion. Le secteur directeur dans ce domaine est celui des producteurs d'acier. D'autres secteurs sont cependant concernés : l'industrie verrière, les cimenteries ainsi que les usines à chaux.

Parmi les avantages compétitifs apportés par les graphites dans le domaine des réfractaires, citons :

- une conductivité thermique accrue ;
- la limitation de la dilatation ;
- la non-mouillabilité par les laitiers fondus et le métal en fusion, la limitation des interactions entre revêtements et produits finis garantissant une qualité accrue pour ces produits finaux ;
- la résistance aux chocs thermiques et à la corrosion en condition de températures extrêmes ;
- une résistance mécanique accrue par l'utilisation du graphite en paillettes ;
- une plus faible porosité des graphites naturels, qui implique une meilleure inertie chimique, limitant ainsi la corrosion des réfractaires et améliorant leur durabilité ;
- dans les réfractaires monolithiques (moulés), les graphites amorphes confèrent une aptitude à la déformation permettant une mise en place de ces réfractaires facilitée lors de la construction des fours ou lors de remplacements.

Les principaux types de réfractaires à base de graphite sont :

- les **réfractaires magnésie-carbone** (« mag-carbon » / « MgO-C » / « mag-graphite »), fabriqués en liant par une résine de la magnésie fondue et du graphite en paillettes. Un des éléments déterminants pour les spécifications est constitué

par la teneur en carbone qui varie de 87 à 90 %. Ces réfractaires contiennent entre **15 et 20 % de graphite** et constituent en général les revêtements de fours ;

- les **réfractaires alumine-carbone** sont constitués d'alumine, de zircon (parfois remplacé par des spinelles qui sont moins chers) et de graphite comprimé de façon isostatique pour produire la forme souhaitée. Ils contiennent entre **5 et 15 % de graphite**. Les graphites en paillettes à fort contenu en carbone sont préférés. Ces réfractaires sont destinés aux conduits de matière en fusion dans les poches de mélange, les creusets ou la fonderie ;
- les **réfractaires carbure de silicium-graphite** contiennent jusqu'à **3 % de graphite**. Ils sont notamment utilisés dans les revêtements des pyromètres immergés au cours de l'électrolyse du zinc ou de l'aluminium.

Les **creusets**, ou poches de coulées, sont destinés à recueillir les métaux en fusion pour des traitements d'affinage. Ces creusets peuvent contenir entre 0,5 et 1 000 kg de matériel fondu, leur hauteur ne dépasse pas 90 cm.

Ils sont fabriqués à partir d'un mélange de **graphite (jusqu'à 60 %)**, d'argiles (25 à 30 %), de carbure de silicium (5 %) et de borax (5 %). Un graphite en paillettes même de faible qualité est préféré au graphite amorphe car il bénéficie d'une résistance thermique plus élevée et l'orientation préférentielle des paillettes augmente la résistance mécanique du creuset.

L'utilisation du graphite implique la nécessité de revêtir le creuset d'une glaçure pour éviter l'oxydation du graphite qui apparaît dès 400 °C en milieu oxydant. Autre inconvénient, les propriétés réfractaires peuvent être affectées (diminution de la température de fusion) par les interactions avec les alcalins, la magnésie, la chaux et la silice.

Depuis les années 1980, les creusets en carbure de silicium dominant ont en partie remplacé les creusets en graphite, ce qui implique une baisse de la teneur en graphite des mélanges (moins de 40 %) et la mise en œuvre de paillettes de taille deux fois plus faible. Les creusets en graphite sont cependant toujours préférés pour les aciers car, aux températures de manipulation de l'acier, le carbure de silicium est souvent attaqué.

Cette évolution technique implique une tendance à la substitution partielle de graphite en paillettes par du graphite « amorphe » dans ce sous-secteur d'utilisation.

Globalement la consommation de réfractaires est corrélée à celle des aciers. Il faut cependant noter que les procédés récents de production d'acier, en particulier les fours électriques, consomment moins de réfractaires que les hauts fourneaux classiques. La demande de réfractaire progresse à un rythme soutenu dans les pays émergents et régresse dans les pays à économie mature.

4.3. MÉTALLURGIE DES POUDRES

Cette métallurgie spécialisée met en œuvre des poudres aux fins de créer des pièces métalliques aux formes complexes. Le façonnage s'effectue sous forte température, par pressage isostatique. Au métal en poudre est associé du graphite naturel ou synthétique, voire un mélange des deux. Les secteurs concernés sont l'automobile, l'électroménager ou l'aéronautique. D'après Timcal Graphite and Carbon, les poudres de graphite utilisées pour ces applications doivent être suffisamment fluides pour optimiser le temps de remplissage, ne pas générer de poussière lors des manipulations, limiter l'usure des matrices de pressage et augmenter la résistance mécanique des pièces confectionnées. Typiquement, la taille des particules de graphite mises en œuvre est de 5 µm avec des teneurs qui dépassent toujours 96 % (cf. Tab. 5). Mais, compte tenu de la nécessité de limiter au maximum l'usure des matrices de pressage, le contenu en cendres doit être réduit, si bien que les teneurs en carbone avoisinent plus souvent 99 %, d'où la mise en œuvre conjointe de mélanges de graphite naturels et synthétiques.

Pour ces applications, le graphite naturel en paillettes fut concurrencé dans le milieu des années 1990 par le graphite synthétique, mais dans des proportions difficiles à apprécier compte tenu de la mise en œuvre conjointe des deux types de graphite.

4.4. MATÉRIAUX DE FRICTION

4.4.1 Garnitures de freins et embrayages

Du graphite peut être utilisé pour les matériaux de friction des garnitures de freins ou d'embrayages utilisées dans les industries automobile, aérienne, ferroviaire ou les engins de chantier.

Le graphite y a progressivement remplacé l'amiante entre 1980 et 1995 et ce secteur de consommation est passé de 1-2 % à 15 % du graphite. Depuis 1995, la consommation unitaire du graphite s'est stabilisée et a même légèrement baissé, en raison du développement d'autres technologies sans graphite. En effet, le marché des plaquettes de frein se subdivise en plusieurs catégories, les plaquettes « semi-métalliques » à 30 à 65 % de métal (fer, cuivre) mixé avec du graphite et d'autres constituants inorganiques, les plaquettes organiques sans amiante (résines, kevlar, verre, caoutchouc, carbone), les plaquettes mixtes (organiques avec un peu de métal, acier et/ou cuivre), les plaquettes en fibres céramiques.

L'intérêt du graphite pour ces applications est la possibilité d'évacuer la chaleur en raison de sa conductivité thermique élevée. À cela s'ajoutent le maintien de ses performances à températures élevées, son caractère lubrifiant, sa résistance à toutes les formes de corrosion : à l'eau, aux huiles, aux carburants et aux autres agents chimiques. Enfin, il permet de limiter le bruit et les vibrations dans les garnitures de frein et les embrayages où il est mis en œuvre.

Les exigences en terme de pureté évoluent vers des teneurs en carbone de plus en plus élevées, elles sont dorénavant proches de 99,9 %. Le graphite amorphe est de préférence utilisé (pour près de 3/4 de la consommation), quand il est mis en œuvre, le graphite en paillettes doit avoir une granulométrie qui ne dépasse pas 75 µm.

Graphites naturels et graphites synthétiques peuvent être utilisés concurremment ou conjointement, mais aucune statistique n'est disponible concernant la part de graphite synthétique utilisé dans ces applications. Compte tenu de la présence possible de quartz (silice) dans le graphite naturel, celui-ci doit subir une purification poussée à des températures supérieures à 2 500 °C, ce qui suppose des investissements particuliers et des contraintes en termes environnementaux.

Les seules statistiques disponibles sur l'évolution de la consommation de graphite pour les garnitures de freins proviennent de l'USGS et concernent seulement les États-Unis. Elles sont cependant incomplètes depuis 2001 et donc difficilement exploitables.

4.4.2 Balais de contact pour les moteurs et générateurs et autres applications électriques

Les pièces qui assurent le contact électrique entre les parties fixes et mobiles des moteurs et générateurs électriques peuvent être en graphite (« balais » de carbone, ou « charbons »). En France, la société Mersen par exemple est un fournisseur de telles pièces en graphite, mais elle utilise en majorité du graphite synthétique. De telles pièces sont en particulier utilisées dans l'industrie ferroviaire (bandes de pantographes, balais) ou les éoliennes, comme illustré par Mersen (www.mersen.com) (Fig. 8) et dans de nombreuses autres applications.

Plus globalement, la répartition des sources entre graphite naturel et graphite synthétique est mal renseignée et les quantités éventuelles de graphite naturel consommées par ce secteur ne sont pas chiffrées.

MERSEN DANS LE TRANSPORT FERROVIAIRE



MERSEN DANS L'ÉNERGIE ÉOLIENNE



Figure 8 : Exemples d'applications de balais pour contacts électriques et autres éléments pouvant inclure du graphite, essentiellement synthétique, dans les exemples des secteurs ferroviaire et éolien (© www.mersen.com).

4.5. LUBRIFIANTS

Le coefficient de friction peu élevé du graphite dû à sa structure en feuillets faiblement liés est encore valorisé dans ces applications. Graphites « amorphes » et graphites synthétiques sont les formes de graphite les plus couramment utilisées avec des teneurs en carbone supérieures à 98 %. **Le contenu en graphite des lubrifiants varie entre 5 et 10 % suivant les applications.**

Les produits graphiteux utilisés peuvent être d'une grande diversité suivant les contextes :

- le marché prépondérant est celui des dispersions dans des supports lubrifiants, huiles ou graisses ;
- les poudres de graphite ;
- les suspensions de graphite colloïdal ;
- l'addition de graphite dans des poudres métalliques et résines;
- les films secs encollés fabriqués à partir de composés liquides auxquels est jointe une résine liante.

Comme dans le cas des matériaux de friction, les producteurs de produits graphiteux intermédiaires sont les pourvoyeurs clés de ces produits spécialisés.

En référence au marché américain qui consommait 3 000 t en 1990, **il est raisonnable d'estimer la consommation mondiale à environ 7 000 t en 2009.**

4.6. CRAYONS

Le graphité a été utilisé pur dans les crayons dès le XVI^e siècle. Aujourd'hui, un mélange de graphite et d'argile (kaolin ou bentonite) est couramment utilisé.

Le graphite synthétique n'est jamais mis en œuvre pour les crayons (voir tableau 4), la raison invoquée serait une dureté plus importante. Si graphite amorphe et graphite en paillettes sont tous deux utilisés, le graphite en paillettes est préféré dans les produits hauts de gamme. La consommation s'oriente maintenant vers du graphite à teneur en carbone plus élevée (> 97 %) et vers des paillettes plus petites (< 150 µm).

La Chine est maintenant devenue le principal centre de production mondial de crayons. Le bureau d'étude Roskill cite une production mondiale de crayons de 10,2 milliards d'unités en 2007. Selon nos estimations, la consommation de graphite naturel, en Chine, pour la fabrication de crayons varierait entre 9 et 13 000 t sur la base d'une consommation représentant entre 7 et 10 % de la consommation chinoise totale de graphite qui atteignait environ 130 000 t en 2007.

4.7. PILES ET BATTERIES D'ACCUMULATEURS

On distingue couramment les piles (« primary batteries » en anglais), non rechargeables, des accumulateurs (« secondary batteries » en anglais, ou communément « batteries » en français), rechargeables.

Deux sources de carbone sont utilisées dans les batteries : les graphites (graphites naturels généralement traités et graphites synthétiques) et les noirs de carbone qui diffèrent des premiers notamment par leur faible cristallinité et leur mode d'élaboration par oxydation partielle de pétrole (Tableau 6).

type de pile / accumulateurs	types de carbone	emplacement d'utilisation
alcaline (pile / accu.)	graphites	cathode et container
zinc carbone (pile)	noir de carbone	cathode
Lithium (pile)	noir de carbone	cathode
Lithium (accu.)	graphites/noirs de carbone	cathode et anode
Plomb-acide (accu.)	graphites/noirs de carbone	cathode et anode
Nickel-Cadmium (accu.)	graphites/noirs de carbone	cathode et anode
Nickel-hydrure de métal (Ni-MH) (accu.)	graphites/noirs de carbone	cathode et anode

Tableau 6 : Différentes sources de carbone utilisées dans les batteries.
(source : www.timcal.com).

Dans les batteries lithium-ion, le graphite est utilisé en général comme élément conducteur principal pour l'anode et comme éventuel adjuvant conducteur pour la cathode. Le produit graphitique clé utilisé pour les anodes est le graphite sphérique dénommé suivant les produits brevetés « potato shape » ou « mango shape ». Le tableau 7 présente un exemple de spécifications de produits graphitiques utilisés dans les batteries lithium-ion. La nature du graphite (naturel, synthétique ou mixte) n'est cependant pas toujours précisée.

Ces spécifications illustrent les prescriptions liées à ce type d'utilisation : haute pureté (contenu en carbone > 99 %), granulométrie très faible (quelques µm), donc graphite « amorphe » mais très homogène (90 % des particules ont la granulométrie requise), forme des particules adaptée pour augmenter le stockage de l'énergie et sa dispersion. Les particules sont ainsi à la fois isométriques, irrégulières et sphériques (augmentation de la densité apparente). Leur surface spécifique est élevée.

ref	teneur en carbone %	granulo. (d90) μm	forme des particules	surface spécifique (BET) m^2/g	absorption DBP*	densité (Scott) g/cm^3
K54	99.9	4.8	isométriques irrégulières sphériques	26	200 g pour 100 g G	0.05
K56	99.9	6.5	isométriques irrégulières sphériques	20	175 g pour 100 g G	0.07
KS15	99.9	17	isométriques irrégulières sphériques	12	140 g pour 100 g G	0.10
SGG6	99.9	6.5	paillettes anisométriques	16	180 pour 100 g G	0.06

Tableau 7 : Spécifications de produits graphiteux utilisés dans les cathodes des batteries.

(source : www.timcal.com)

* Absorption DBP : Absorption de phtalate de dibutyle : indicateur du degré de structuration cristalline : du noir de carbone à un indice DBP bas, un graphite avec une cristallinité élevée aura un indice DBP élevé.

Le secteur des batteries est techniquement en permanente évolution en raison de la recherche de la légèreté, de la performance électrique sous les plus faibles volumes ainsi que de la longévité. La technologie des batteries Li-ion a été introduite au début des années 1990 par la société japonaise Sony, soit depuis une vingtaine d'années seulement. Elle s'est développée au détriment des technologies concurrentes : Nickel-Cadmium (Ni-Cd), Ni-Hydrures de métal (Ni-MH).

Dans un premier temps, c'est le développement des appareils portables (téléphones, ordinateurs, appareils photos, consoles de jeux portables, lecteurs de musique, etc.) qui a entraîné une envolée de la demande de batteries rechargeables légères, et notamment des batteries lithium-ion dont près de 2,8 milliards d'unités auraient été produites en 2008 (Timcal).

La généralisation des batteries lithium-ion dans l'énergie mobile constitue une importante rupture technologique. Après les applications demandant une énergie faible mais régulière (téléphones portables et ordinateurs représentaient au total 81 % de la demande de batteries lithium-ion), leur utilisation s'est ensuite étendue aux applications exigeant une énergie intense pendant des temps courts comme pour les outils électriques. Cette adaptation est due au développement de nouvelles associations dans les cathodes : lithium-manganate, lithium-nickel-cobalt-manganate et lithium-fer-phosphate. Les premiers outils portables utilisant des batteries lithium-ion de nouvelle génération ont été introduits sur le marché fin 2004. D'après Roskill (2009), le marché représentait déjà près de 20 millions d'unités en 2008, soit seulement 4 ans plus tard.

Mais c'est surtout le secteur de la **voiture électrique**, émergeant et encore bien loin de sa maturité, qui offre un très gros potentiel de croissance de demande, susceptible d'influer de manière très significative sur le marché global du lithium mais aussi du graphite à moyen terme. Ce secteur est complété par la demande pour d'autres moyens de transports tels que le **vélo et le scooter électriques**.

- **Les véhicules électriques**

Les véhicules électriques développés actuellement et nécessitant des batteries sont essentiellement de trois types, généralement distingués dans la plupart des études statistiques et prévisionnelles, les « EV », les « HEV » et les « PHEV ».

Les EV (*Electrical vehicles*) : véhicules équipés d'un moteur exclusivement électrique. Fonctionnement très simple : moteur électrique classique, d'un excellent rendement énergétique. Le moteur est alimenté par des batteries (NiMH, Li-ion ou Li-métal polymère) rechargeables sur secteur ou sur bornes de recharge spécifiques. Les handicaps sont leur faible autonomie électrique, et toujours le coût de ces batteries et du véhicule comparé aux équivalents thermiques. Les avantages sont l'absence de consommation de carburants fossiles directe, de rejet de CO₂ direct, et de pollution sonore ou de particules. Certains pourront objecter que ces avantages sont à moduler par le fait que l'électricité a dû être produite quelque part, par des sources pas forcément renouvelables, éventuellement par des centrales nucléaires (non toujours consensuelles), voire par des centrales thermiques à fuel ou à charbon qui auront consommé le carburant non consommé par le véhicule.

La longévité des batteries, leurs coûts, l'autonomie, la sécurité et le poids font toujours l'objet de Recherche et Développement intenses pour leur amélioration. Ces véhicules ont d'abord occupé des marchés de niche (batteries au plomb puis NiMH, très faible autonomie kilométrique, donc essentiellement des déplacements sur sites industriels). Ils commencent seulement à toucher le public, avec la généralisation des batteries au lithium, avec de premiers lancements fin 2008 et 2009, puis plusieurs lancements de véhicules électriques en France fin 2011 (cf. 6.2.7.) et, par exemple, le lancement en décembre 2011 des « Autolib » (voitures électriques en libre-service dans Paris) avec des Bluecars de Bolloré.

Les HEV (*Hybrid Electrical Vehicles*) : véhicules hybrides électriques. Ce sont jusqu'à présent essentiellement des véhicules à moteur thermique avec appoint électrique. Elles sont équipées, en sus du moteur thermique classique, d'un moteur électrique d'appoint fonctionnant sur batteries qui se chargent par le moteur thermique en roulant et par l'énergie récupérée lors des freinages. La voiture peut être entraînée par chaque moteur séparément ou par les deux moteurs ensemble. Une gestion de la transmission complexe permet toutes les combinaisons. L'autonomie de ces véhicules n'est pas limitée par l'autonomie des batteries, ce qui les rend utilisables sur de longs trajets et à vitesse élevée, sur autoroute par exemple. Le système a l'avantage de récupérer une bonne partie de l'énergie gaspillée par les véhicules thermiques seuls en particulier lors des freinages. Le basculement sur moteur électrique est surtout intéressant aux faibles vitesses, auxquelles le rendement du moteur thermique est moins bon, et pour diminuer la pollution urbaine. Mais l'autonomie sur batterie seule est très faible (une dizaine de km). Ce type de véhicules est arrivé sur le marché avec le début de la

commercialisation de la Toyota Prius en 1997, d'abord avec des batteries NiMH. Plusieurs autres marques ont commercialisé des modèles depuis lors, avec un transfert progressif vers les batteries Li-ion (Mercedes S400 Blue Hybrid depuis 2009). Le nombre de véhicules HEV en circulation serait désormais de 2,3 millions de véhicules (Toyota, 2011).

Les PHEV (Plug-in Hybrid Electrical Vehicles) : ce sont des HEV dont les batteries peuvent aussi être rechargées sur secteur, comme la nouvelle génération de Toyota Prius. Le moteur est hybride mais ouvre la possibilité de recharger la batterie sur un réseau électrique extérieur au véhicule. Le moteur thermique est actionné dès que les batteries sont déchargées ou bien au-delà d'un seuil de vitesse. Les batteries utilisées sont désormais généralement des batteries Li-ion. Disposant du même avantage que les HEV sur les EV, elles peuvent permettre de rouler tout électrique sur des distances de 25 à 60 km. Un autre système PHEV est un véhicule à motorisation de roulage purement électrique, mais avec un moteur thermique d'appoint faisant uniquement tourner un générateur qui recharge les batteries en cas de besoin.

La quantité de graphite utilisée pour les batteries des véhicules électriques dépend des types de véhicules, des autonomies kilométriques en mode électrique recherchées, des modèles et des types de batteries utilisées.

Mais les études synthétiques qui recensent les quantités de graphite utilisés pour chaque type de batterie au lithium manquent. À l'inverse il a été publié des dernières années de nombreuses études détaillées et précises pour l'évaluation des besoins en lithium pour ces mêmes batteries. À titre indicatif, deux tableaux qui synthétisent les besoins en lithium pour différents types de batteries et d'usages sont repris ci-dessous (Tab. 8 et 9), sachant que la plupart des modèles utilisent des anodes en graphite (cf. 2^{ème} ligne du tableau 8).

Gaines et Nelson (2010) avaient récapitulé les ordres de grandeur des quantités de lithium nécessaires pour certaines catégories de véhicules électriques et de batteries sur la base d'une consommation de 186 Wh/km (Tab. 8). Sur la base des ratios des quantités de graphite vs les quantités de lithium requises selon les types de batteries publiés par Roberts (2012) d'après Argonne National Laboratory, 2009, le tableau 8 a été complété avec un ordre de grandeur des quantités de graphite requises.

Quantification des besoins en lithium pour différents véhicules et batteries (adapté d'après Gaines et Nelson, 2010), complété avec les besoins en graphite sur la base des ratios Graphite/Li selon Roberts, 2012.

Type de batterie Li-ion	Electrolyte	Hexafluorophosphate de lithium (LiPF ₆)														Titanate de lithium Li ₄ Ti ₅ O ₁₂			
	Anode	Graphite														Spinelle LiMn ₂ O ₄			
	Cathode	LiCoO ₂ ou Li(Co,Ni,Al,Mn)O ₂				LiFePO ₄				Spinelle LiMn ₂ O ₄				Spinelle LiMn ₂ O ₄					
Type de véhicule	Type de véhicule	HEV	PHEV	PHEV	EV	HEV	PHEV	PHEV	EV	HEV	PHEV	PHEV	EV	HEV	PHEV	PHEV	EV		
	Autonomie kilométrique en mode électrique	6.5 km	32 km	64 km	160 km	6.5 km	32 km	64 km	160 km	6.5 km	32 km	64 km	160 km	6.5 km	32 km	64 km	160 km		
Quantité de lithium par véhicule (en kg Li)	Pour les cathodes	0.34	1.36	2.75	6.88	0.196	0.796	1.61	4.02	0.145	0.587	1.18	2.96	0.287	1.165	2.31	5.78		
	Pour l'électrolyte	0.04	0.104	0.202	0.505	0.045	0.136	0.264	0.528	0.029	0.087	0.17	0.425	0.049	0.167	0.335	0.838		
	Pour les anodes	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.301	1.21	2.43	6.07		
	Total	0.37 kg	1.46 kg	2.95 kg	7.39 kg	0.24 kg	0.93 kg	1.87 kg	4.55 kg	0.17 kg	0.67 kg	1.35 kg	3.39 kg	0.64 kg	2.54 kg	5.08 kg	12.69 kg		
	Ratio Graphite/Li (Roberts, 2012)	8	8	8	8	13	13	13	13	15	15	15	15						
	Qté de graphite par véhicule (en kg)	3.0 kg	11.7 kg	23.6 kg	59.1 kg	3.1 kg	12.1 kg	24.4 kg	59.1 kg	2.61 kg	10.1 kg	20.3 kg	50.8 kg						

Tableau 8 - Quantification des besoins en lithium pour différents véhicules électriques et batteries (adapté d'après Gaines et Nelson, 2010, complété avec une estimation des ordres de grandeur des quantités de graphite requises)

Plus généralement, le tableau 9 ci-après rappelle le comparatif des besoins en lithium pour divers secteurs d'utilisation des batteries Li-ion, d'après Roskill (2009) repris de Trade Press, sur une base moyennée estimée de 80 g de lithium par kWh⁴, complété avec les besoins en graphite, sur la base indicative de 1,4 g/Wh, prise comme médiane de l'estimation de Bayliss et Chegvidden (Roskill, 2012), pour qui les quantités de graphite (naturel et synthétique) nécessaires seraient de l'ordre de 1,2 à 1,6 kg de graphite par kWh, moyennées ici à 1,4. On constate que les ordres de grandeurs restent cohérents avec le tableau 8.

	Voltage (V)	Courant (Ah)	Capacité (Wh)	Lithium (g Li) (base 0,08 g/Wh, Roskill 2009)	Graphite (g) (base 1,4 g/Wh, Roskill 2012)
Matériel électrique et électronique portable					
Téléphone mobile	3.7	0.95	3.5	0.3	4.9
Appareil photo numérique	3.7	1.2	4.4	0.4	6.2
Baladeur MP3/MP4	3.7	1.6	5.9	0.5	8.3
Console de jeu portable	3.7	1.8	6.7	0.5	9.4
Caméscope	7.4	1.3	9.3	0.7	13.0
Outillage sans fil	18.0	3.0	54.0	4.3	75.6
Ordinateur portable	14.8	4.5	67.0	5.4	93.8
Moyens de transport					
Vélo électrique	24.0	9.6	230	18	322
Scooter électrique	48.0	40.0	1 920	154	2 688
HEV (ex: Mercedes S400)			3 000	240	4 200
PHEV (ex: Chevrolet Volt)			16 000	1 280	22 400
EV (ex: Th!nk City)			27 000	2 160	37 800
EV sportive (ex: Roadster Tesla)	375.0	141.3	53 000	4 240	74 200

Tableau 9 : Comparatif indicatif des besoins en lithium et en graphite pour divers objets utilisateurs de batteries au lithium (par unité d'objet).

Sources : Roskill (2009) d'après Trade Press ; Baylis et al., Roskill (2012)

Plus précisément, Moores (2012) cite le cas particulier de la voiture électrique Nissan Leaf, équipée d'un pack de batteries de 24 kWh, qui contient 19 kg de carbonate de lithium (soit 3,6 kg Li) et 38,4 kg de graphite.

Les prévisions d'évolution du marché des véhicules électriques et de son taux de pénétration dans le parc automobile global sont assez variables selon les auteurs.

⁴ Les quantités obtenues pour les véhicules électriques peuvent différer de ceux du tableau 8, mais les regroupements et consolidations ne sont pas les mêmes, et les ordres de grandeurs sont cohérents. Les quantités ne sont qu'indicatives, différent d'une marque à l'autre, d'un modèle à l'autre, d'une version à l'autre, et évoluent dans le temps avec les progrès de R&D

Roskill a présenté en janvier 2012 une estimation à 6 millions de véhicules électriques vendus, dont encore 1,1 millions de PHEV avec batteries NiMH et 4,9 millions de PHEV, HEV et EV avec batteries au lithium (Fig. 9).

Ses prévisions de l'évolution des besoins correspondants en graphite dans l'hypothèse de croissance de base (Taux de Croissance Annuel Moyen du marché des véhicules électriques de 23 % de la figure 9) sont présentées en figure 10 ci-après. La croissance de la demande en graphite pour ce secteur serait de plus de 40 % par an, passant de 4,4 kt en 2011 à 106 kt en 2020.

Il y aura aussi une demande croissante de batteries au lithium pour les vélos électriques, dont le marché commence à se développer en Occident avec des batteries au lithium, et dont le marché était déjà très développé en Chine (plus de 22 millions d'unités vendues chaque année) mais avec des batteries au plomb et dont une partie pourra basculer vers des batteries au lithium, plus chères mais bien plus légères.

Enfin, le développement des productions d'énergies renouvelables mais intermittentes (éolien, solaire) demande le développement de solutions de stockage de l'énergie électrique de réseau fixe. Si ce stockage par accumulateurs était encore largement basé sur des accumulateurs plomb-acide (sites isolés de type relais téléphoniques, par exemple), les solutions par batteries au lithium sont en fort développement.

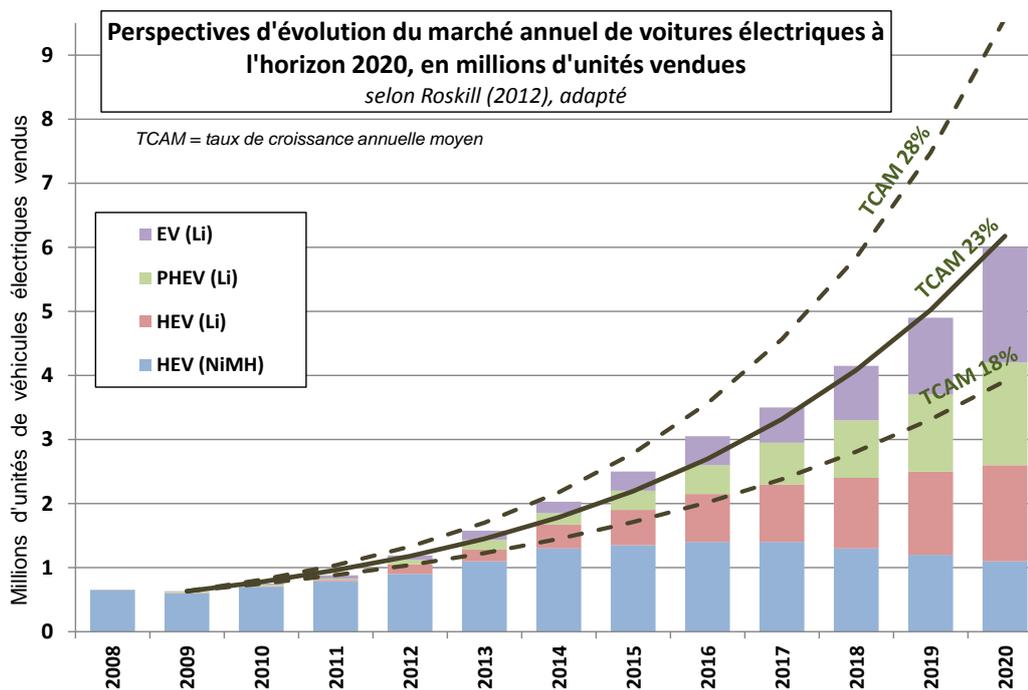


Figure 9 : Perspective d'évolution du marché du véhicule électrique à l'horizon 2020, selon Roskill (2012).

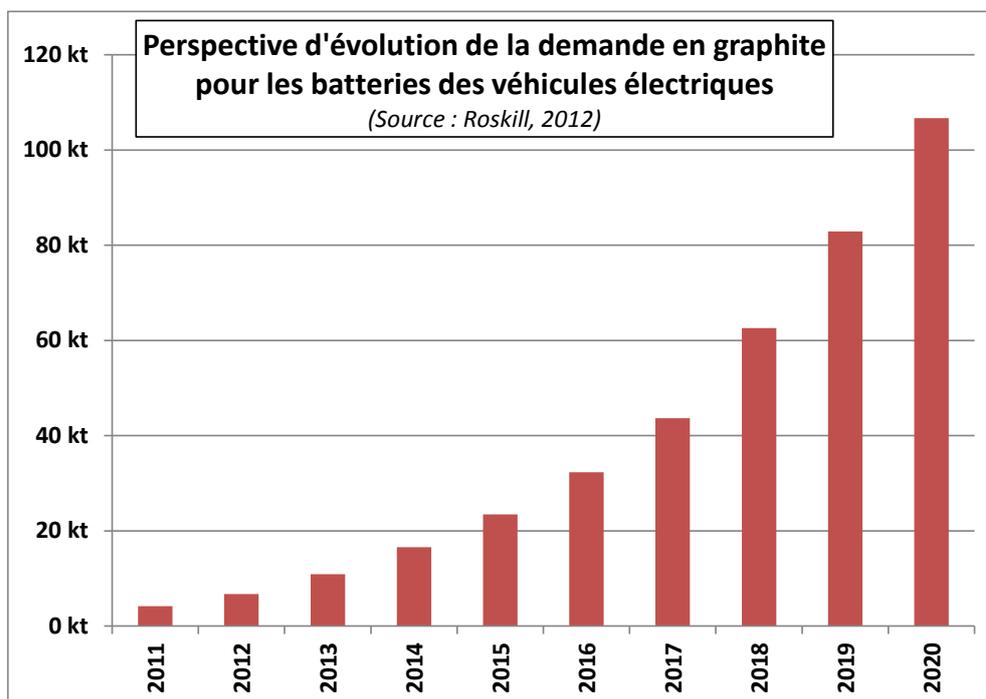


Figure 10 : Perspectives d'évolution de la demande en graphite pour les batteries des véhicules électriques dans l'hypothèse de 6 millions de véhicules électriques à l'échéance 2020 (scénario moyen). (source : Roskill, 2012).

4.8. LES PILES À COMBUSTIBLES

Les piles et batteries traditionnelles se contentent de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique, que ce soit en une seule fois (piles) ou de manière renouvelable (batteries rechargeables). Les piles à combustibles sont, elles, des systèmes qui permettent de transformer de l'énergie chimique en énergie électrique avec une alimentation en carburant (combustible), généralement de l'hydrogène, du méthane ou du méthanol.

Les piles à combustibles sont d'un usage encore limité (bien que déjà utilisées dans les missions spatiales Gemini et Apollo dans les années 1960), mais plusieurs systèmes sont en développement avec des applications envisagées pour les véhicules électriques (piles à hydrogène), ou même les ordinateurs portables (méthanol).

Parmi les différents concepts, les piles à hydrogène dites à membrane d'échange de protons (PEM – Proton Exchange Membrane) requièrent une quantité significative de graphite. Parmi leurs applications possibles, il y a les véhicules électriques et la génération domestique dans les lieux isolés.

4.9. AUTRES UTILISATIONS DU GRAPHITE

4.9.1 Forages

Le graphite est utilisé comme additif dans les boues de forage où il contribue à renforcer le « mud-cake » essentiel pour la tenue des parois des forages.

4.9.2 Matières plastiques et caoutchouc

Le graphite naturel est utilisé dans la fabrication des matières plastiques antistatiques, des protections électromagnétiques, des peintures électrostatiques, des revêtements pour polystyrène extrudé.

Le noir de carbone est utilisé en additif dans les caoutchoucs pour renforcer leurs propriétés mécaniques et augmenter leur conductivité. Lorsque qu'une résistance thermique est en plus requise, le graphite naturel est alors utilisé sous forme de poudres de haute pureté et d'excellente cristallinité. Le graphite synthétique peut également être utilisé.

4.9.3 Peintures

Ajouté à la peinture, le graphite aide à protéger les surfaces métalliques contre la corrosion. Ses propriétés de bonne conductivité empêchent l'accumulation de charges d'électricité statique. Pour cet usage, le graphite microcristallin contenant 50 à 55 % de carbone est utilisé.

4.9.4 Nucléaire

Le graphite présente une faible absorption des rayons X et des neutrons, une forte conductivité thermique et une aptitude à conserver ces propriétés à haute température. Il est utilisé dans les réacteurs nucléaires comme modérateur de neutrons (barres de contrôle de la puissance des réacteurs) et dans des pièces réflectrices de neutrons. La technologie des « Pebble bed modular reactor » (PBMR), réacteurs nucléaires à lit de boulets (en graphite), utilise un graphite de haute pureté composé de 25 % de graphite naturel et 75 % de graphite synthétique.

4.9.5 Industrie du verre

Les équipements utilisés pour la fabrication du verre utilisent de préférence du graphite amorphe, de granulométrie très fine ($> 1 \mu\text{m}$).

4.9.6 Diverses applications

- Graphite expansé : revêtements anti-feu, incorporé dans les mousses de polymères il joue le rôle d'ignifugeant ;

- Graphites en feuilles flexibles : joints de pompes, boucliers thermiques ;
- Diamant synthétique ;
- Équipements médicaux ;
- Emballage des munitions ;
- Enrobage des semences ;
- Industrie aérospatiale : équipements de protection thermique, joints de pompe à carburant et de tuyauteries, tuyères pour missiles et fusée Ariane, disques de frein pour Airbus.

4.10. ÉVOLUTION ATTENDUE DE LA CONSOMMATION

L'une des causes importantes de l'évolution attendue de la consommation de graphite est le développement des batteries Lithium-ion. On estime qu'aujourd'hui plus de 100 000 tonnes de graphite en paillette (flake) sont dédiées à l'industrie des batteries Lithium-ion, ce qui représente 25 % de la production mondiale de cette catégorie de graphite. La croissance exponentielle prévue pour la voiture électrique va faire augmenter la consommation de graphite.

Certaines projections de l'industrie automobile pour 2025, montrent qu'il faudrait consacrer 400 000 tonnes de graphite en paillette à la fabrication du graphite sphérique utilisé dans les batteries Lithium-ion et dans les piles à combustible, ce qui correspondrait à 100 % de la production annuelle d'aujourd'hui. Le graphite sphérique peut toutefois aussi être produit à partir du graphite synthétique.

Globalement, la consommation de réfractaires est corrélée à la production des aciers. Il faut cependant noter que les procédés récents de production d'acier, en particulier les fours électriques, consomment moins de réfractaires que les procédés classiques. La demande de réfractaires progresse encore à un rythme soutenu dans les pays émergents mais régresse dans les pays à économie mature. L'industrie de l'acier continue d'utiliser d'importants tonnages de graphite.

Si les réacteurs nucléaires de type PBMR (réacteurs à lits de boulets) se développent et deviennent une norme, il faudra s'attendre à une forte demande de graphite naturel, non recyclable, de très haute pureté. Pour chaque réacteur, il faut 300 tonnes de graphite au démarrage, puis une consommation de 60 à 100 tonnes par an pour son fonctionnement (modération de la réaction en chaîne). Le premier prototype est actuellement opérationnel en Chine. La Chine se prépare d'ici à 2020 à en construire 30 autres pour remplacer ses centrales à charbon très polluantes. Des recherches conduites à la West Virginia University estiment que 500 réacteurs PBNR de 100 GW pourraient être construits aux États-Unis d'ici à 2020, nécessitant 400 000 tonnes de graphite. La demande en graphite pourrait être beaucoup plus élevée si cette technologie venait à se répandre dans le reste du monde.

5. Substitutions et recyclage

5.1. SUBSTITUTION

Pour de nombreuses utilisations, une alternative à l'emploi du graphite naturel est son remplacement par du graphite synthétique (production de l'acier, fonderies, balais pour moteurs électriques, anodes).

Pour les emplois ci-dessous, en fonction des caractéristiques du produit final et du coût des substituts, diverses alternatives sont possibles :

- retardateur de feu : le graphite peut être remplacé par des oxydes d'antimoine, des borates, de la diatomite, de la magnésite, de la vermiculite, de la pierre ponce, de la perlite, de la chromite, etc. ;
- matériaux de friction : les plaquettes de frein semi-métalliques (métal et graphite) se partagent déjà le marché avec d'autres types sans graphite (organiques, organo-métalliques, céramiques). Dans les plaquettes semi-métalliques, le graphite peut être remplacé par divers autres substances minérales, avec des propriétés variables (barytine, attapulgite, kaolin, sépiolite, pyrophyllite, etc.) ;
- lubrifiants : le graphite peut être remplacé par des composés de lithium, de la molybdénite, du talc, du mica ;
- produits réfractaires : le graphite peut être remplacé par du carbure de silicium, de la céramique, de l'andalousite, de la bauxite, de la chromite, du disthène, de la magnésite, des argiles réfractaires, de la sillimanite, du zircon... ;
- anodes : le graphite peut être remplacé par des oxydes de titane ou des titanates. À long terme, une autre alternative au graphite pourrait venir de l'emploi du silicium (en cours de recherche).

5.2. RECYCLAGE

Le recyclage du graphite est très limité.

Dans certains domaines d'utilisation, il « disparaît » en cours d'usage : pièce d'usure des freins, balais.

Les électrodes peuvent être récupérées, broyées et transformées en nouvelles électrodes ou utilisées comme substitut du graphite amorphe, en particulier pour les réfractaires.

Les produits réfractaires sont recyclés davantage pour les autres composants que pour le graphite contenu (entre 15 et 25 %).

6. L'offre : ressources et production mondiale

6.1. PRINCIPAUX TYPES DE GISEMENTS

La description ci-dessous est largement reprise de Jébrak et Marcoux (2008), p. 449.

Le graphite est un minéral formé par métamorphisme des résidus organiques, bitumes et charbons contenus dans certaines formations sédimentaires. C'est donc un minéral des roches métamorphiques. Le métamorphisme transforme les composants carbonés d'abord en graphitoïde mal cristallisé, puis en graphite de mieux en mieux cristallisé au-dessus de 400 °C. Sa cristallinité est directement liée à l'intensité du métamorphisme :

- un métamorphisme modéré, de contact par exemple, dans des charbons ou des schistes bitumineux, donne du graphite amorphe en fines particules disséminées (gisements du Mexique, de Corée N & S, d'Autriche) ;
- un métamorphisme régional plus intense donnera du graphite en paillettes (« flakes »), le plus commun (Chine, Canada, Brésil, Madagascar). Les roches-hôtes peuvent être des quartzites, des marbres, des micaschistes, des paragneiss, des quartzites, et le graphite peut se présenter en dissémination ou en lentilles avec parfois une accumulation par fluage dans les charnières des plis (Canada). Certaines lentilles atteignent 1 000 m de long et 20 m de puissance ;
- le « lump graphite » (graphite en masse ou en veines) est beaucoup plus rare. Il proviendrait de pétrole métamorphisé (Jébrak et Marcoux, 2008). Il se trouve en veines (remplissage de fissures) d'une puissance de 1 cm à 1 m. C'est un graphite très pur (> 90 % C). Un tel graphite est exploité au Sri Lanka.

Le tableau 10 ci-après présente les types de gisements décrits par Industrial Minerals and Rocks, 7th edition, 2006.

Delfau et Duhamel (BRGM, 1983) décrivaient comme suit la géologie des trois principales variétés commerciales de graphite naturel :

6.1.1 Le graphite « amorphe »

Le graphite « amorphe » (en réalité microcristallin) ou « graphitoïde » est formé par métamorphisme thermique de couches charbonneuses. Il a un grain très fin, il est un peu poreux, sa pureté dépend de la pureté des charbons originels. Cette variété de graphite est la principale exploitée dans le monde, en gisements épais, profonds ou non, dont les teneurs en graphite peuvent aller de 50 % à 90 % (Delfau et Duhamel, 1983).

Type de gisement	Pays	Observations
Paillettes de graphite disséminées dans des roches sédimentaires riches en silice, métamorphosées (schistes, gneiss).	USA, Canada, Allemagne, Norvège, Madagascar, Chine, République Tchèque	Les paillettes ont une apparence variée (forme, épaisseur, densité, résistance), contiennent en moyenne 10-12 % C. Certaines avec 2 % C ont été exploitées ; d'autres, comme à Madagascar, contiennent plus de 60 % C.
Paillettes de graphite disséminées dans des marbres.	Canada (Lac des Iles)	Le marbre peut contenir de 1 à 10 % de graphite. Gisements plus difficiles et moins souvent exploitées que les paillettes contenues dans les schistes ou les gneiss.
Graphite « amorphe » en fait finement cristallisé, formé par métamorphisme du charbon ou de sédiments riches en matière organique.	Autriche, Mexique, Corée du Sud, USA, Chine, République Tchèque	Le rapport entre graphite et matériaux non graphitisés est très variable ; les gisements mexicains contiennent plus de 95 % de graphite, ceux de Corée du Sud très peu et le minerai est utilisé comme combustibles en raison de l'abondance des charbons.
Veines de graphite remplissant des fractures et des cavités.	Mexique, Sri Lanka, USA, Inde	L'origine de ces veines est mal connue ; des aiguilles de graphite pouvant atteindre 10 cm de long y ont été observées.
Gisements de métamorphisme de contact ou dépôts hydrothermaux dans des marbres.		Les concentrations de paillettes de graphite dans des roches carbonatées silicifiées sont dues soit au métamorphisme de contact soit aux fluides hydrothermaux associés à ce métamorphisme. Ces gisements de basse teneur ont une faible importance

Tableau 10 : Principaux types de gisements de graphite et leur localisation (d'après *Industrial Minerals and Rocks*, 7^e édition, 2006).

6.1.2 Le graphite en paillettes

Le graphite en paillettes (graphite « cristallin », en écailles, en feuillets, en « flakes ») se trouve habituellement sous forme disséminée dans des roches sédimentaires affectées par un métamorphisme régional (gneiss, micaschistes, schistes, marbres, etc.). Cette variété « cristalline » est également exploitée dans des gîtes secondaires (gisements éluviaux) à Madagascar, où le graphite a été libéré de la roche originelle altérée par latéritisation. La grande taille des écailles de graphite de ces gisements éluviaux augmente la valeur marchande du produit. Ces gisements présentent en général des teneurs assez faibles en graphite (5 % à Madagascar) et la dimension des paillettes peut varier de 1 mm ou moins à 5 cm exceptionnellement.

6.1.3 Le graphite en veines

Le Sri Lanka est pratiquement le seul producteur de cette variété de graphite que l'on trouve à grande profondeur, en remplissage de fissures, sous forme de masses de grains microcristallins (graphite « amorphe ») et de lamelles et agrégats fibreux ou

aciculaires (graphite cristallin). Le minerai peut contenir jusqu'à 70 % et plus de graphite.

6.2. TYPES D'EXPLOITATIONS ET TRAITEMENT DU MINERAI

Le traitement des minerais de graphite consiste généralement en un concassage grossier pour le graphite en paillettes et un broyage fin pour le graphite amorphe, suivis de tamisage, classification par air (soufflage) ou flottation, laquelle est particulièrement efficace pour le graphite en paillettes.



Figure 11 : Flottation de graphite à la mine de Konstantin, en République tchèque
(© www.grafitovedoly.cz).

Des minerais à 5 % de graphite peuvent être ainsi enrichis en concentrés à 80 à 90 % de graphite.

Pour obtenir des concentrés très purs (> 99 %, et jusqu'à 99,95 %, par exemple pour les usages dans le nucléaire), on utilise des procédés chimiques.

6.3. RESSOURCES ET RÉSERVES

6.3.1 Évaluation globale des ressources et réserves

Comme on le verra aussi pour les chiffres de production en 7.3, il est très difficile d'avoir un chiffre consolidé fiable des ressources et réserves en graphite au niveau mondial. En effet, peu nombreuses sont les publications de ressources et réserves aux normes NI43-101 (canadienne) ou JORC (australienne), et les tonnages publiés précisent rarement les teneurs : il n'est pas toujours précisé s'il s'agit de graphite (produit marchand, à > 90 % de graphite) ou bien de « minerai de graphite », de tout-venant minier avant concentration.

Le tableau 11 récapitule l'état des réserves tel que publié en janvier 2012 par l'USGS, des « Réserve base » (la part des ressources les plus susceptibles d'être exploitables) tel que publié par l'USGS en 2010, et les ressources pour un certain nombre de pays mentionnées par Roskill (2009) telles que passées en revue ci-après.

	Réserves (USGS, Jan.2012)	Réserves base (USGS, Jan.2009)	Ressources (Roskill, août 2009)
Chine	55 Mt	140 Mt	217 Mt
Inde	5.2 Mt	11 Mt	168.8 Mt
Tchéquie		14 Mt	14.2 Mt
Mexique	3.1 Mt	3.1 Mt	3.1 Mt
Madagascar	0.94 Mt	0.96 Mt	
Brésil	0.36 Mt	1 Mt	153 Mt
USA		1 Mt	
Australie			23 Mt
Autres pays	6.4 Mt	44 Mt	221 Mt*
Total	71.0 Mt	215.1 Mt	800 Mt*

**Le complément de 221 Mt a été inséré pour atteindre 800 Mt au total qui est l'estimation globale des ressources (y compris inférées) de l'USGS (2012).*

NDLA : Il n'est pas certain que les tonnages annoncés recouvrent tous le contenu en graphite. Certains tonnages recouvrent peut-être du tout-venant ayant un contenu minoritaire en graphite, sans que cela soit toujours précisé.

Tableau 11 : Estimation des réserves et ressources mondiales en graphite (USGS, Roskill).

Les plus importantes ressources en graphite répertoriées se trouvent en Chine. Les ressources totales se monteraient à environ 217 Mt (Tab.12), dont 51 % dans la province de Heilongjiang (paillettes), 15,6 % dans le Hunan (« amorphe »), 7,5 % dans le Sichuan (paillettes) et 6,0 % dans le Shandong (paillettes). Globalement, les ressources chinoises se répartissent en 172 Mt de graphite en paillettes et 45 Mt de graphite « amorphe » (cryptocristallin).

Les réserves de graphite naturel en Inde étaient estimées par l'« Indian Minerals Yearbook » à 168,8 Mt en 2005, mais il s'agit plutôt de minerais à des teneurs variables en carbone (seulement 1,1 Mt répertoriées comme contenant plus de 40 % de carbone). La plus grande partie des réserves est concentrée dans l'Arunachal Pradesh et le Jammu-et-Cachemire.

Les réserves du Mexique sont estimées à 3,1 Mt par l'USGS, comprenant des réserves de graphite en paillettes, microcristallin et quelques occurrences de veines de graphite.

Province	Nombre de gisements	Réserves en graphite (Mt)	principaux districts concernés
Graphite amorphe			
Beijing	2	n.d.	Nanan He; comté de Fangshan (arrêt de l'exploitation)
Jilin	2	4.99 Mt	Panshi, Dunhua
Guangdong	2	3.51 Mt	Fogang, Lianping
Hunan	4	33.75 Mt	Chenzou, Guiyang, Lengshuijiang, Lutang
Shaanxi	2	2.27 Mt	Meixian, Huxian
Graphite en paillettes			
Mongolie intérieure	13	5.48 Mt	Jining, Xinghe, Fenzheng, wuchuan, Baotou
Shanxi	4	3.18 Mt	Datong, Tienzhen
Hebei	3	0.38 Mt	Chicheng, Shuiquan, Huaian, Yangyuan, Quinlong, Xingtaï
Helongjiang	21	111.06 Mt	Luobei, Jixi, Huma, Linkou, Muling, Mishan, Boli, Shuanyashan, Liuniao
Liaoning	2	0.57 Mt	Xiuyan, Hengren
Shandong	13	13.10 Mt	Pingdu, Laixi, Laiyang, Nansu, Beisu, Wendeng, Muping
Jiangxi	1	2.18 Mt	comté de Jinxi
Fujian	1	0.54 Mt	Jianyang
Anhui	1	0.17 Mt	Comté de huaining, Hengshan
Henan	3	7.46 Mt	Hengling, Xiaodouling, Xiaochagou, Lingbao.
Hubei	4	1.56 Mt	Yichang, Guangshui
Hainan	3	0.58 Mt	Qonghaï, Ledong
Guangdong	1	0.17 Mt	Wuchuan
Sichuan	3	16.22 Mt	Nanjiang, Xianggyangpo, Panzhuhua
Yunnan	2	2.44 Mt	Yuannyang, Kunming.
Tibet	1	2.44 Mt	Zuogong
Shaanxi	8	3.68 Mt	Xi'an, Danfeng, Changan, Tongguan
Gansu	3	0.62 Mt	Weiwu, comté d'Anxi
Xinjiang	1	0.24 Mt	Qitaï
	total	216.59 Mt	Source : China Mining Association

Tableau 12 : Récapitulatif des ressources de la Chine en graphite naturel.
(source : China Mining Association).

Les réserves de la République tchèque étaient estimées, en 2006, à 14,2 Mt de graphite naturel réparties entre graphite en paillettes et graphite microcristallin.

Madagascar dispose de réserves de graphite en paillettes estimées à 940 kt contenant une importante quantité de grandes paillettes.

Le Brésil a d'importantes réserves de graphite naturel estimées à 153 Mt par DNPM Sumario Mineral en 2007.

L'Afrique reste largement sous-explorée pour le graphite et ses ressources sont mal évaluées. Le graphite est exploité au Zimbabwe. Le Malawi a des réserves estimées à 2,7 Mt, le Mozambique 33 Mt à 15 % de graphite. D'autres pays comme la République Centrafricaine, la Tanzanie, le Rwanda pourraient disposer de réserves importantes

L'Australie dispose de ressources évaluées à 350 Mt à 6-7 % de graphite.

Il y a une douzaine de gisements de graphite identifiés en Russie, avec des réserves totales contenant environ 34 Mt de graphite, dont 34 % correspondent à des gisements en exploitation. Le plus gros gisement de graphite-paillottes est celui de Soyuznoye (réserves de 1,5 Mt), et le plus gros gisement de graphite « amorphe » celui de Kureiskoye (8 Mt).

6.3.2 Les ressources potentielles en France

De très nombreuses occurrences de graphite disséminé sont connues dans les formations métamorphiques régionales (micaschistes, gneiss, quartzites et marbres graphiteux) en France métropolitaine, dans le Massif armoricain, le Massif central, les Pyrénées. Des micaschistes et quartzite graphiteux sont en particulier connus dans le briovérien (Protérozoïque supérieur) du Massif armoricain et le Massif central. Ces formations graphiteuses sont cartographiées sur les cartes géologiques au 1/50 000 de la France mais il resterait à en compiler une synthèse générale.

Le graphite y est le plus souvent sous forme microcristalline (graphite « amorphe »), très disséminé, en généralement très loin de pouvoir être économique. Il en existe cependant localement de petites concentrations sous forme de lentilles. À Penn ar Roc'h, sur l'île d'Ouessant, il en existe un développement sous forme de veines (cf. Tab. 13).

D'autres occurrences de graphite se sont formées par métamorphisme de contact dans des formations charbonneuses, en particulier dans le Briançonnais (05).

La littérature cite un certain nombre de concentrations de graphite qui ont pu être étudiés, et pour certains exploités à petite échelle, à la fin du XIX^e siècle et au début du XX^e siècle. Une partie de ces gîtes est reprise dans le rapport « Ressources Minières Françaises, Tome 14, Les Gisements de sillimanite, d'andalousite, de disthène, de magnésite, de graphite, de feldspaths, situation en 1983 » réalisé par le BRGM sous l'égide du Comité de l'Inventaire des Ressources Minières Métropolitaines (Delfau et Duhamel, 1983).

Le tableau 13 et la figure 12 ci-après récapitulent un certain nombre de ces gîtes et indices.

Un chiffre de production historique n'est renseigné que pour le gisement du Chardonnet (05), d'où 7 800 t auraient été extraites au total entre 1901 et 1926, pour la fabrication de creusets pour la métallurgie. Ce tonnage est assez négligeable au regard de la production annuelle mondiale actuelle de l'ordre du million de tonnes.

Principaux indices de graphite en France métropolitaine (sources : Delfau et Duhamel, BRGM, 1983; Chauris, 1969)

Nom	Dept	X	Y	Type de graphite	Teneur	Période d'exploitation	Tonnage total extrait	Usages	Ressources résiduelles	Géologie	Remarques	Bibliographie
Le Chardonnet	05	6.4980	45.0280	"amorphe"	54 à 87,8% C	1901 à 1926	7 807 t	Creusets pour la métallurgie	inconnues	Graphitisation partielle de schistes et grès anthraciteux westphaliens (carbonifère) par métamorphisme de contact avec une diorite et ses sillons associés.	Il y a eu 5 couches exploitées	Delfau et Duhamel, 1983, se référant à Feys R., 1953
Cote Peallias	05	6.5390	44.8980	non précisé	57 à 68% C	Travaux de recherche en 1928-1929	0 t		très faibles	Dans schistes et grès charbonneux du Carbonifère dans lambeau synclinal pincé	Mauvaise qualité du graphite	Delfau et Duhamel, 1983, se référant à Vaysse A., Feys R., Greber C., 1950
Les Infourmas	05	6.0976	44.7217	non précisé		vers 1900	minime	"pour cirer les boîtes"	inconnues	Indice de graphite en veinules et amandes proche du contact Lias / socle		Pierrot et al., 1972
Tire-cabre (Trémouilles)	12	2.6849	44.2218	non précisé	Jusqu'à 65% C	Episodique entre 1844 et 1919. Compléments de recherche en 1940-1943	inconnu		Prospection électrique en 1943 non concluante. Zone à reconsidérer.	Graphite en filets lamellaires de 1 à quelques cm dans des gneiss et micaschistes à 2 micas, avec lentilles locales de puissance métrique et de plusieurs dizaines de m de longueur. 3 alignements principaux allongés sur 0,8 à 1,2 km.	Grattages et tranchées à partir de 1839. Concession entre 1844 et 1919. Couche de 15 de long sur 25 cm d'épaisseur à 5 m de profondeur. Puits et galerie ayant rencontré une couche de 50 cm de graphite pur à 10 m de profondeur	Cosson, 1974; repris par Delor et al., 1989
Dournets	12	2.6769	44.2141	non précisé						Encaissé dans gneiss et micaschistes		Delor et al., 1989
Dussac	24	1.0838	45.4011	non précisé	Tout-venant à 3 à 3,5% C	Analyses en 1965	0 t		non évaluées	Niveaux graphiteux dans schistes	Teneurs insuffisantes	Fiches BSS
Plufur	22	-3.5760	48.6070	paillettes		Essais de flottation en 1942-1943	0 t			Couches stratiformes dans gneiss granulitique, de 5 cm à > 1 m de puissance	Essais de flottation par la Société Minière et Financière de Madagascar	Chauris, 1969
Penn ar Roc'h (Ile d'Ouessant)	29	-5.0895	48.4402	veines			0 t		non évaluées	Graphite en chapelet de veines de 2 à 2,5 m de long sur 0,2 à 0,3 m de puissance ou en nodules de 0,1 m, sur une extension totale de 600 m, dans un complexe de micaschistes à niveaux d'amphibolite recoupé par un stock de granite.		Chauris, 1969 ; Pierrot et al., 1973 ; Delfau et Duhamel, 1983
Kergonano	56	-2.9089	47.6148	non précisé		XIXème siècle					Aurait fait l'objet d'une tentative d'exploitation au XIXème siècle	Chauris, 1969, citant Lacroix, 1896
Le Houx (Abbaretz)	44	-1.4562	47.5783	non précisé		non précisé		colorant		Ampélites graphiteuses (métamorphisme de contact)	Aurait fait l'objet d'exploitations ponctuelles pour colorant	Chauris, 1969
Etang d'Albe	09	0.8771	42.8165	paillettes			0 t		inconnues	Graphite en lamelles "les plus grosses découvertes en France" dans les schistes et quartzites noirs graphiteux ordoxoviens de la base du calcaire de Bentaillou		Delfau et Duhamel, 1983
Maignac	31	0.6574	42.8732	"amorphe"	4% à 24% C	Essais de flottation en 1942, peu convaincants	0 t		"masses énormes" mais graphite trop disséminé	Graphite finement disséminé dans des schistes charbonneux du Gothlandien	Les essais de flottation n'ont permis de concentrer qu'un max. 7,5%. Localisation à rebocaliser	Capdecoste, 1942

Tableau 13 : Les principaux gîtes de graphite de France métropolitaine.

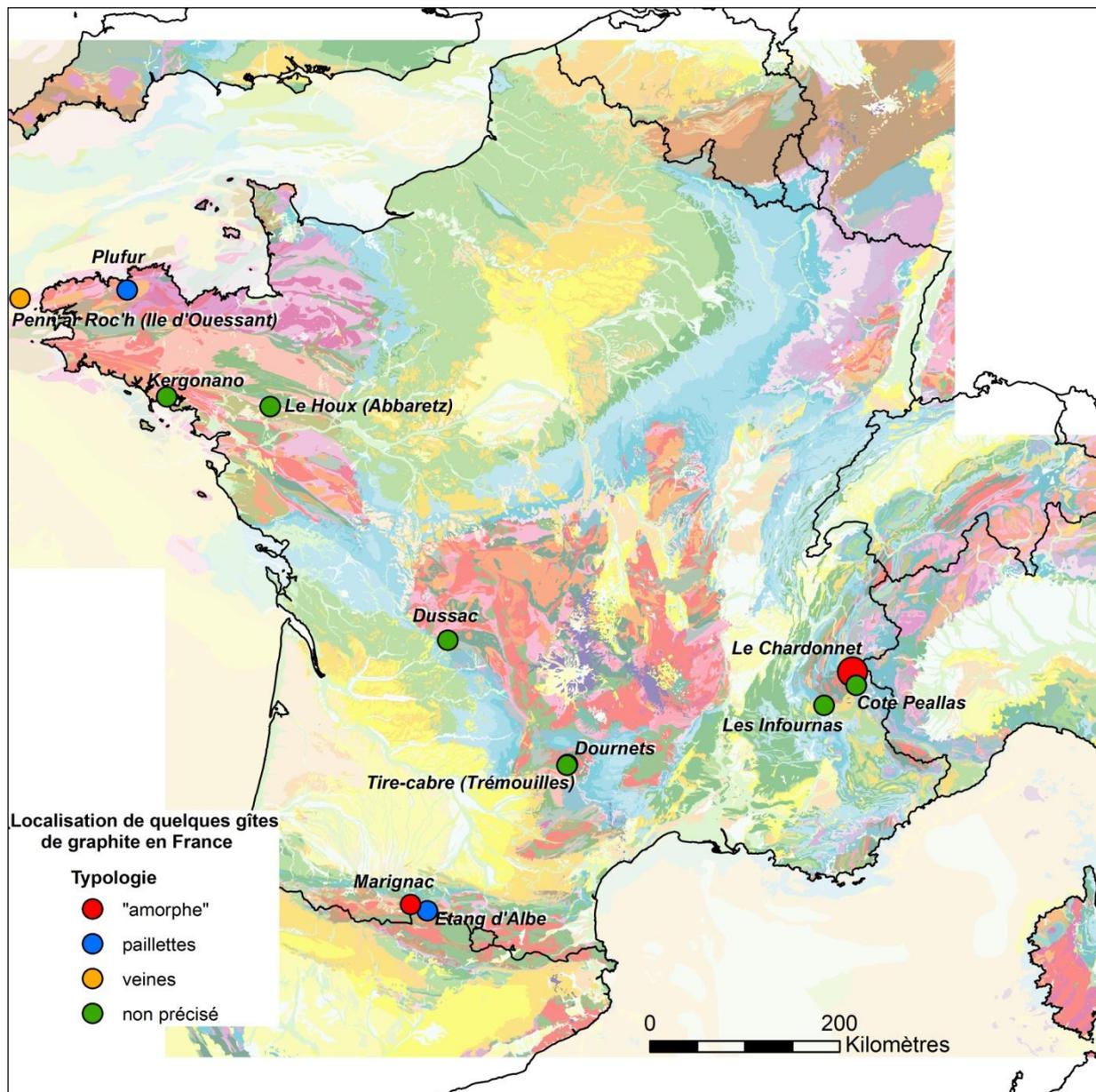


Figure 12 : Localisation des principaux gîtes de graphite en France métropolitaine (BRGM, 2012).

Les autres sites qui ont produit du graphite en France sont très anecdotiques. On relèvera par exemple le gîte des Infournas, dans les Hautes-Alpes, qui aurait été exploité, probablement artisanalement, « pour cirer les bottes » ! (Pierrot *et al.*, 1972). On peut imaginer que l'extraction n'a pas excédé quelques tonnes au mieux.

La « Carte des Gîtes Minéraux de la France » au 1/500 000 en huit coupures éditée par le BRGM en 1979 ne retient comme « gîte minéral » à graphite qu'une seule de ces occurrences, le gîte de graphite massif en veines de Penn ar Roc'h, sur l'Ile

d'Ouessant (29). Chauris (1969), citant Debeauvais (1923), écrit : « Le graphite est visible sur au moins 600 m depuis l'ouest de la cale de Penn ar Roc'h jusqu'aux abords de la pointe de Porz an Ejen. Il se présente soit en veines lenticulaires de 2 à 2,5 m d'extension sur 0,2 à 0,3 m de puissance, qui se pincent rapidement pour ne former qu'un mince filonnet sur quelques mètres, soit en nodules atteignant 0,1 m, soit enfin en écailles ou en mouches ».

Il n'en existe pas d'évaluation chiffrée des ressources de ces divers gîtes de graphite.

Par ailleurs, les travaux de l'Inventaire Minier de la France menés dans les années 1970-1980 ne s'étaient pas vraiment intéressés au graphite. Une synthèse et un récapitulatif global des formations graphiteuses en France resteraient à faire et à cartographier. Même si on peut ne pas s'attendre à des gisements importants, les ressources des plus importants gîtes (Ouessant, Étang d'Albe, Briançonnais) resteraient à estimer. L'existence des divers gîtes répertoriés montre que les conditions de formation ont été localement favorables, et l'existence de gisements cachés plus importants n'est pas à exclure a priori. Les quelques explorations géophysiques passées autour des indices connus semblent avoir été peu concluantes, mais elles datent des années 1940 avec les méthodes et technologies d'alors, qui ont bien évolué depuis.

6.4. PRODUCTION

6.4.1 Statistiques de production

Pour les métaux majeurs, on peut généralement connaître une production minière par pays (c'est-à-dire la quantité du métal contenue dans les minerais extraits sur le territoire de chaque pays producteur). Mais pour le graphite, dont les chiffres de production sont, en fonction des producteurs, exprimés soit en produit commercialisable (la majorité des producteurs) soit en tonnage brut extrait (Chine, Inde et Turquie), l'exercice est plus délicat. L'USGS reprend dans ses statistiques ce qu'elle estime de la production de produit commercialisable pour la Chine, mais mentionne au contraire le « tout-venant » pour l'Inde et la Turquie, en précisant en annotation que « la production commercialisable indienne est de 10 à 20 % celle du tout-venant » reporté dans son tableau, et que la production turque est d'environ 5 % de celle de tout-venant reporté dans son tableau. Les sommations mondiales ne sont donc pas pertinentes.

Roskill (2009) publie quant à lui des chiffres de productions indienne et turque d'un ordre de grandeur bien inférieur à ceux de celle de tout-venant de l'USGS, qui correspondraient alors plutôt au produit marchand, mais qui ne correspondent pas aux pourcentages mentionnés par l'USGS.

Il est par ailleurs très difficile de se fier à certains chiffres. Par exemple, le service des statistiques minières canadien (NRCAN) ne publie pas les quantités de graphite produit au Canada, considérées comme confidentielles. Les deux sociétés productrices Timcal Graphite and Carbon et Eagle Graphite ne publient pas non plus leurs chiffres de

production. Industrial Minerals publie, dans un seul et même article dans son numéro de Décembre 2011, p.18, un tableau indiquant une production canadienne de 21 kt en 2011, avec une indication de production en croissance, alors que le texte accompagnant ce tableau mentionne que la production canadienne a continué à chuter pour atteindre 10 kt en 2011 !

Autre exemple, la revue Industrial Minerals cite une production autrichienne de 5 000 t de graphite pour 2009 puis 10 000 t de graphite pour 2010 et 2011 (Moore, 2011) alors que le Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend (BMWFJ) autrichien cite une production de 750 t pour 2009 et 420 t pour 2010. Ces quantités diffèrent d'un facteur de 24, et aucune des deux sources ne précise s'ils parlent du graphite marchand ou d'un éventuel tout-venant à basse teneur. La société productrice elle-même, Grafitbergbau Kaisersberg, ne publie aucune donnée de production.

Le tableau 14 ci-après récapitule une partie des données disparates de production disponibles.

Production mondiale de graphite naturel entre 2001 et 2011, en tonnes (données indicatives, incomplètes, variables selon les sources)

Année :	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Source et date de l'information :	Roskill, 08/2009	Roskill, 08/2009	Roskill, 08/2009	Roskill, 08/2009	USGS, 03/2011	USGS, 03/2011	USGS, 03/2011	USGS, 03/2011	USGS, 03/2011	USGS, 01/2012	Industrial Minerals, 12/2011
Chine (~70% amorphe, 30% paillettes)	862 000	669 000	710 000	700 000	720 000	720 000	800 000	810 000	800 000	600 000	1 000 000
Inde - Tout venant (USGS)					130 000	120 000	130 000	140 000	130 000	140 000	130 000
Inde - Produit marchand (Roskill)	15 872	15 909	13 081	16 223	18 848	18 658	17 327	21 000 e	19 500 e	21 000 e	19 500 e
Brésil	60 666	60 922	70 739	76 332	77 494	76 194	77 163	76 200	76 200	76 000	102 000
Corée du Nord					32 000	30 000	30 000	30 000	30 000	30 000	40 000
Canada	20 984	15 039	12 500	15 000	28 000	28 000	28 000	27 000	25 000	25 000	21 000
Mexique	21 442	14 065	8 730	14 769	12 357	12 500	12 500	7 229	5 011	7 000	12 000
Autriche	116	100	100								
Autriche, selon Industrial Minerals (tout venant ? non précisé)									5 000	10 000	10 000
Autriche, selon BMWFJ, 2012 (produit marchand ? non précisé)								250	750	420	n.d.
Norvège	9 070	8 600	1 000	6 000	2 300	2 300	2 000	2 000	2 000	2 000	8 000
Madagascar	12 580	7 522	2 170	7 770	6 400	4 857	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000
Sri Lanka	6 585	3 619	3 387	5 374	4 370	5 756	9 593	10 000	11 000	8 000	5 000
Turquie - Tout venant (USGS)					100	300	400	400	400	2 000*	5 000
Turquie - Produit marchand (Roskill)	750	70	47	50	55	60	60	60 e	60 e	300	750
Tchéquie	17 000	16 000	9 000	5 000	3 000	5 000	3 000	3 000			
Allemagne	3 190	3 312	2 840	3 155	2 638						
Corée du Sud					39*	68*	52*	73*	48*	34*	
Roumanie					500					20 000	
Russie	16 500	12 100	9 500	13 600	14 000	11 100	9 900	9 000			
Suède	963										
Ukraine					10 400	5 800	5 800	5 800	5 800	6 000	
Ouzbékistan	60	60	60	60	60	60	60	60	60		
Zimbabwe	11 837	9 700	6 280	10 267	4 298	6 588	6 000	5 000	2 500		4 000
Autres / Non détaillé										6 000	15 000
Total ("produit marchand" ?)	1 059 615	836 018	849 434	873 600	936 759	926 941	1 006 455	1 011 672	987 179	816 334	1 242 250

e = extrapolé / estimé * source : BMWFJ, 2012

Tableau 14 : Estimation de la production annuelle mondiale de graphite naturel, toutes formes confondues, en tonnes (USGS, Roskill, Industrial Minerals, BMWFJ).

La Chine domine largement la production mondiale (fig. 13) en fournissant bon an mal an environ 80 % du graphite naturel mondial. Ces 80 % se répartissent environ à 70 % sous forme « amorphe » et 30 % sous forme de paillettes. Dans la province du Hunan,

un grand nombre de mines propriété de l'État ont cessé leur activité en 2011 (environ 180 sur 200) pour des raisons environnementales et de protection de la ressource.

Le Brésil, qui est le seul pays producteur de graphite naturel en Amérique du Sud, a considérablement augmenté sa production et passe, en 2011, au 2^e rang mondial, avec environ 8 % de la production (cf. Tab. 14).

Le reste de la production se répartit entre une quinzaine de pays (Inde, Canada, Corée du Nord, Sri Lanka, Autriche, Norvège, etc.).

La production mondiale aurait été de l'ordre de 1,24 million de tonnes en 2011.

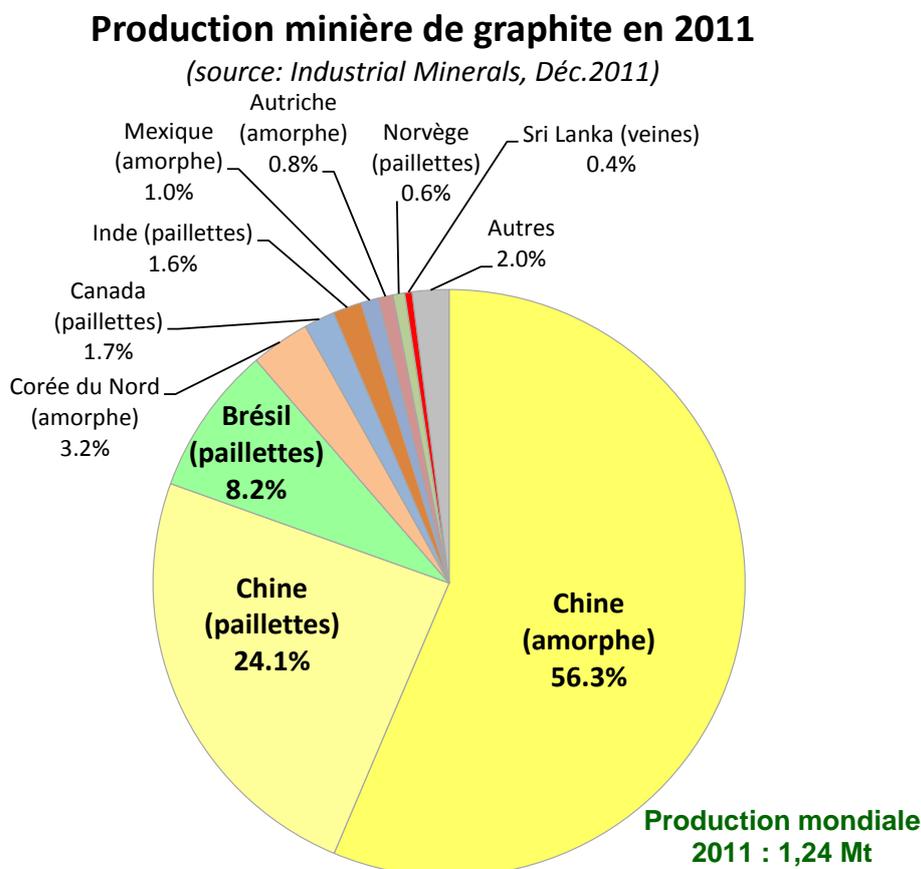


Figure 13 : Production mondiale de graphite naturel par pays et type en 2011.
(source : Industrial Minerals, 2011. Tonnage ajusté pour l'Inde à 15% du tonnage tout-venant).

6.4.2 Les producteurs actuels et futurs. Perspectives d'évolution de la production

Le tableau 15 ci-après récapitule les principales mines en exploitation.

Depuis 2011, le graphite est sous le feu des projecteurs. De nouvelles recherches ont été engagées, profitant du boom prévu du marché des batteries Lithium-ion. Le tableau

16 récapitule les projets en développement et en exploration avancée, ainsi que quelques mines qui avaient été suspendues.

La Chine, plus gros producteur, voit la qualité de son graphite naturel baisser progressivement, et les gisements facilement exploitables se raréfient. Les coûts de production augmentent à mesure que les exploitations se font plus profondes. De nombreuses mines chinoises sont de petite taille et ont une activité saisonnière. Dans l'extrême nord de la Chine elles cessent toute activité pendant l'hiver. Des mesures prises pour assurer l'approvisionnement de sa forte consommation interne, notamment pour la production d'acier, et les taxes instaurées à l'exportation, pourraient affecter à terme les approvisionnements pour le reste du Monde.

Gisement	Pays	Province / Région	Société	Nature	tonnage minéral et teneur	graphite contenu (Mt)	capacité annuelle minéral	capacité annuelle graphite	statut
Kaisersberg (réouverte en 2008)	Autriche	Styrie	Grafitbergbau Kaisersberg	amorphe, paillettes	n.d.			10 000 t	
Serra Azul Mateus Leme	Brésil	Minas Gerais	Grafita MG	amorphe, paillettes	n.d.		20 000 t	7 000 t	
Maiquinique	Brésil	Bahia (Macal Mt)	Extrativa Metalquimica	amorphe, paillettes	25 Mt amor. 13 Mt paill.		20 000 t	12 000 t	
Itapecerica, Pedra Azul, Salto da divisa	Brésil	Minas Gerais	Nacional de Grafit	paillettes				70 000 t	
Lac des îles	Canada	Québec	Timcal	paillettes	25 Mt @ 7%			15 000 t	
Black cristal	Canada	British Columbia	Eagle Graphite		5,7 Mt @ 4%			3 600 t	
Liugeshuang	Chine	Shandong	Heilongjiang Luobei Haïda Graphite Co	paillettes	612 Mt			80 000 t	
Jixi city	Chine	Heilongjiang	Jixi Liumaog Graphite Resource Co	amorphe, paillettes	360 Mt @ 15%	54 Mt		100 000 t	
Pingdu district	Chine	Shandong	Quingdao Heilong Graphite Co	paillettes	90 Mt			30 000 t	
Pingdu Liugezhuang	Chine	Shandong	Quingdao Haïda Graphite Co	paillettes	100 Mt			26 000 t	
Panshi	Chine	Jilin	Jiling Graphite Industry	amorphe	n.d.			30 000 t	
Yeonchong (et divers)	Corée du Nord	Hwanghae Sud	Korea Resources (Kores) Samcheolri	amorphe	n.d.	6.25		30 000 t	
Chung Nam, Kang Won, Kyong Gi, Lyung Pak.	Corée du Sud		n.d. (production anecdotique)	amorphe	n.d.	2,5-3 Mt am. 1,5Mt		55 t	
Madaguda (ciel ouvert)	Inde	Orissa (Sambalpur)	TP Mineral industries (TPMI)	paillettes	n.d.		23 000 t		
Sargipali (souterrain)	Inde	Orissa (Sambalpur)	TP Mineral industries (TPMI)	paillettes	n.d.				
Bolangir	Inde	Orissa (Sambalpur)	GR Graphite industries	paillettes, amorphe	n.d.		18 000 t		
Tureikela (Bolangir)	Inde	Orissa (Sambalpur)	Lakshminarayan Makkhanlal (LMCO)	paillettes, amorphe	n.d.		12 000 t		
Gargabahal (Bolangir)	Inde	Orissa (Sambalpur)	Lakshminarayan Makkhanlal (LMCO)	paillettes, amorphe	n.d.		8 000 t		
Antsirakambo, Marovintsy, Ambalafotaka	Madagascar	Toamasina Vatomandry	Etablissements Gallois	paillettes	n.d.			5 000 t	3 sites d'exploitation
Hermosilla	Mexique	Sonora	Grafitos Mexicanos (Ashbury Carbons USA)	amorphe	n.d.	3.1	n.d.		
Traelen Skaland Mts	Norvège	Ile de Senja	Skaland Graphite Norway	paillettes	n.d.	2.0	12 000 t	8 000 t	
Kureiskoe	Russie	Krasnoyarsk	Krasnoyarskgraphit	amorphe	n.d.		8 000 t		
Taiginsky (Kyshtym)	Russie	Krasnoyarsk	Ouralgraphit	n.d.	n.d.	14	7 000 t		
Bogala	Sri Lanka		Bogala Graphite Lanka (Grafit Kropfmühl) AG	veines	n.d.			8 000 t	
Velké Vrbno-Konstantin	Tchéquie	Staré Mesto	Grafitove doly Staré Mesto	paillettes	n.d.			7 000 t	
n.d.	Turquie	Izmir	Karaback Metal & Mining		n.d.			50 000 t	
Zavalye district	Ukraine	Kutahya	Zavalyevsky graphite complex	paillettes	n.d.			40 000 t	
Lynx mine	Zimbabwe	Karoi	Zimbabwe German Graphites Mines (ZGGM) (Graphit Kropfmühl AG)	paillettes, amorphe	n.d.		10 000 t	7 000 t	

Tableau 15 : Récapitulatif des principales mines de graphite en exploitation.

Gisement	Pays	Province / Région	Société	Nature	tonnage minierai et teneur	graphite contenu (Mt)	capacité annuelle minierai	capacité annuelle graphite	statut
MINES SUSPENDUES									
Uley Graphite mine	Australie	Australie du Sud	Strategic Energy Resources Ltd	paillettes	3,2 Mt @ 9 %		14 000 t	/	Arrêté en 1993. Redémarrage prévu
Kringelgruvan	Suède	Hälsingland (Edsbyn)	Woxna Graphite, Flinders Resources (www.flindersresources.com)	paillettes	6,9 Mt @ 8,8% G		13 000 t	/	Arrêté en 2001. Redémarrage prévu en 2013
PROJETS MINIERIS EN PHASE DE DEVELOPPEMENT									
Munglinup	Australie	Australie-Occidentale	Zimtu (www.zimtu.com) / Pinestar Gold Inc.	paillettes	1,47 Mt @ 18,2%		n.d.	11 200 t	Projet en traction
Kootenay Mountains	Canada	British Columbia	Fortune Graphite Producers (USA)	amorphe et paillettes	6,7 Mt @ 7%		n.d.	/	
Bisset Creek	Canada	Ontario (Maria township)	Northern Graphite Corp. (www.northerngraphite.com)	paillettes	12 Mt @ 2,2-3,1%		24 000 t	/	
Kearney	Canada	Ontario	Ontario Graphite (www.ontariographite.com)	paillettes	20-25 Mt		25-30 000 t	/	Démarrage annoncé pour mi-2012
Lac de Guéret	Canada	Québec	Consolidated Thompson Mines	paillettes	2,6 Mt @ 6%		n.d.	/	
Ambatomitamba	Madagascar	Moramanga	Somagra (Société Malgache du Graphite)	paillettes	10 Mt @ 3,5 %		4 000 t	/	Démarrage annoncé pour fin 2011
Ancuabe	Mozambique	Cabo del gade	discussions en cours avec Graphit Kropfmühl AG	paillettes	1 Mt @ 10 %		7 000 t	/	
Ihala	Russie	Karélie	Prominvest	paillettes	n.d.		n.d.	/	
PROJETS EN EXPLORATION AVANCEE									
Steamboat	Afrique du Sud	Limpopo	Jonkelkosa Minerals and Resources	paillettes	8%		100 t	/	
Sugarloaf & Campoona	Australie	Southern Australia	Archer Exploration (www.archerexploration.com.au)	paillettes				/	Exploration en cours
Superior Graphite Properties Group	Canada	British Columbia (Kootenays Mts)	Worldwide Graft Producers	paillettes	55 Mt @ 9%		n.d.	/	Exploration en cours
Lac Knife	Canada	Fermont Québec	Focus Metals (www.focusmetals.com)	paillettes	8 Mt		n.d.	/	Projet suspendu

Tableau 16 : Récapitulatif des principaux projets d'exploitation de graphite.

En Europe, cinq pays produisent du graphite. Deux seulement ont une production significative, la Norvège qui produit du graphite en paillettes (flake) et l'Autriche qui produit du graphite microcristallin (« amorphe »).

Deux mines seulement produisent du graphite en Amérique du Nord ; elles sont situées au Canada qui dispose d'un potentiel important. Un boom de l'exploration a vu l'ascension de nouvelles compagnies minières junior. La production pourrait augmenter dans les années à venir.

L'Inde recèlerait d'importantes ressources de graphite en paillettes. Sa production est imprécise : elle est évaluée à 130 000 à 140 000 tonnes par an de tout-venant, mais dont seulement 15 % serait commercialisable (USGS, 2011 ; Roskill, 2009). Une croissance de la production peut être envisagée.

Le Brésil pourrait apporter une réponse à la sécurité des approvisionnements. Il a continué d'accroître sa production depuis plusieurs années et abrite le plus gros

producteur non chinois, la Nacional de Grafite. En 2011 il produisait plus de 100 000 tonnes de graphite. Sa production pourrait encore s'accroître.

Jusqu'à la mi-2011, en dehors de la Chine, la plus grande partie de l'exploration se limitait aux pays déjà producteurs et aux mines dont l'activité était suspendue. De nouveaux pays vont entrer en lice. L'Australie pourrait devenir dans un futur proche un producteur de graphite. Plusieurs projets y sont en cours d'exploration.

7. Les prix

7.1. LES PRIX RÉCENTS

Il n'y a pas de cotation publique des prix du graphite, ils sont négociés directement entre les acheteurs et les producteurs.

Le prix du graphite naturel n'est pas unique. Il varie en fonction du type de graphite (paillette et « amorphe »), et pour chaque type, du degré de pureté, de la teneur en carbone et de la taille des cristaux pour les paillettes (Tab. 17).

Les prix avaient augmenté entre 2007 et 2008, tirés par une augmentation de la demande et l'instauration de taxes à l'exportation par la Chine. Ils ont chuté à partir du 2^e semestre 2008 et début 2009 avec la crise financière, puis ont repris leur forte croissance bien au-delà des niveaux pré-crise (cf. Tab. 17 et Fig. 14).

Classification	2008	2009	2010	2011	2012
Amorphous high grade powder 99 % to 99,9 %C, +400 mesh	nc	nc	35 000	nc	nc
Amorphous 99 % to 99,9 % C, +50 mesh	nc	nc	nc	nc	4 500 à 6 000
Crystalline large 94 % to 97 % C, +80 mesh CIF	900 à 1 000	1 100 à 1 350	2 500	2 000 à 2 500	2 500 à 3 000
Crystalline large 90 % C, +80 mesh	700 à 800	700 à 800	1 375	nc	2 000 à 2 500
Crystalline medium 94 % to 97 % C, +100-80 mesh	800 à 900	880 à 1 150	1 795	1 800 à 2 300	2 200 à 2 500
Crystalline medium 90 % C, +100-80 mesh	680 à 780	650 à 750	1 150	1 050 à 1 300	1 500 à 2 000
Crystalline medium 85 % to 87 % C, +100-80 mesh	670 à 770	650 à 750	1 020	1 500 à 1 900	1 500 à 1 900
Crystalline fine 94 % to 97 % C, -100 mesh	600 à 700	620 à 1 000	1 489	nc	2 000 à 2 400
Crystalline fine 90 % C, -100 mesh	550 à 650	550 à 600	1 050	nc	1 400 à 1 800
Amorphous powder 80 % to 85 C	460	430	850	600 à 800	600 à 800
Synthetic 99,95 % C2	5 550 à 17 900	6 200 à 19 000	nc	nc	7 000 à 20 000

Tableau 17 : Évolution des prix du graphite par catégorie entre 2008 et 2012, en US\$ par tonne (source USGS, Industrial Minerals).



Figure 14 : Évolution du prix du graphite.
 (© www.flindersresources.com, d'après Industrial Minerals).

7.2. ÉVOLUTION FUTURE DES PRIX

La crainte d'une tension dans les approvisionnements s'est traduite depuis janvier 2011 par une forte augmentation des prix (cf. fig. 14).

Selon Industrial Minerals (février 2012), il n'y a pas d'indication formelle montrant que la Chine pourrait appliquer au graphite le même schéma que pour les terres rares. Cependant, sa politique concernant les matières premières tend à en limiter l'exportation. L'Organisation Mondiale du Commerce contesté la légalité des pratiques de la Chine dans l'exportation de matières premières concernant la fabrication de l'acier (bauxite pour réfractaire, spathfluor, carbure de silicium, zinc) pouvant conduire à une refonte de son système d'exportation.

Sauf à produire à moindre coût un substitut du graphite, la filière des batteries Lithium-ion et les nouvelles technologies (énergie mobile) vont avoir un besoin croissant en une certaine catégorie de graphite (microcristallin, teneur > 99 % C, granulométrie très faible de quelques μm).

Pour le long terme, l'augmentation du coût de l'énergie et de la lutte contre la pollution associée à de possibles restrictions des exportations chinoises exercera une tendance haussière sur le prix du graphite. Elle pourrait toutefois être partiellement compensée par une augmentation de la production de graphite en provenance de nouvelles exploitations (Brésil, Canada et Australie notamment).

8. Les acteurs industriels

8.1. LES PRINCIPAUX PRODUCTEURS DE GRAPHITE NATUREL

Le nombre de producteurs de graphite naturel est de moins d'une trentaine (cf. 4^e colonne du tableau 16 et du tableau 18 ci-après). La Chine à elle seule représente 80 % de la production, les 20 % restant sont répartis entre les autres producteurs.

Le tableau 18 récapitule les principales sociétés qui produisent des produits graphiteux ou du graphite naturel.

En Europe, les producteurs miniers de graphite naturel sont :

- **Grafitbergbau Kaisersberg** (www.grafit.at) en Autriche (capacité de 8 kt/a de graphite) ;
- **Grafitove Doly Staré Mesto** (www.grafitovedoly.cz) en Tchéquie (capacité de 7 kt/a) ;
- **Skaland Graphite** (www.graphite.no) en Norvège (capacité de 8 kt/a) ;
- **Zavalyevsky Graphite Complex** en Ukraine (production de 6 kt sur une capacité de traitement de 40 kt/a).

Citons aussi au voisinage les producteurs en Turquie et en Russie centrale :

- **Karaback Metal and Mining** en Turquie, avec une capacité affichée de la mine de Kutahya de 50 kt/an (Roskill, 2009), mais une production réelle de 60 t/an seulement ces dernières années, montée à 750 t en 2011, selon Industrial Minerals ;
- **Uralgraphite** et **Krasnoyarskgrafit** en Russie, qui exploitent des gisements dans les régions de Chelyabinsk et de Krasnoyarsk respectivement.

Parmi les sociétés européennes qui n'exploitent pas de graphite en Europe mais en contrôlent des exploitations sur d'autres continents, on citera :

- la société allemande **Grafit Kropfmühl** (www.graphite.de) (cf. 8.2.6.) n'exploite plus de graphite en Allemagne (mine de Kropfmühl, en Bavière) depuis 2006, mais contrôle des exploitations minières au Sri Lanka (Bogala Graphite Lanka), au Zimbabwe (ZGGM) et a des participations en Chine, pour une capacité totale supérieure à 21 kt/an ;
- la société suisse **Timcal Graphite & Carbon** (www.timcal.com) (cf. 8.2.7.), filiale du groupe français **Imerys** (www.imerys.com), exploite la mine de graphite de Lac des Iles, au Québec (Canada) à travers sa filiale canadienne **Timcal Canada**. Timcal produit aussi du graphite synthétique (usine en suisse), du noir de carbone et du carbure de silicium.

Principaux producteurs de graphite et produits graphiteux naturels en 2008 (Roskill, 2009)

Société	pays	Province / Etat	Capacité annuelle de commercialisation de graphite	origine de l'approvisionnement en minerais
ASIE				
Jixi Liuniao Graphite Resource Co	Chine	Heilongjiang	100 000 t	interne
Heilongjiang Aoyu Graphite group	Chine	Heilongjiang	80 000 t	interne
Luobei Yxiang Graphite	Chine	Heilongjiang	30 000 t	interne
Qingdao Hensen Graphite	Chine	Shandong	38 000 t	interne
Qingdao Heilong Graphite	Chine	Shandong	30 000 t	interne
Qingdao Haida Graphite Co	Chine	Shandong	26 000 t	interne
Jiling Graphite Industry	Chine	Jilin	30 000 t	interne
TP minerals	Inde	Orissa	23 000 t	interne
Lakshminarayan Makkhanlal	Inde	Orissa	20 000 t	
GM Graphite Industries	Inde	Orissa	18 000 t	
JV Kores / Samcheoiri	Corée S / Corée N		3 000 t	Yeongchong, Corée du N
AMERIQUES				
Timcal Canada	Canada	Québec	25 000 t	majoritairement interne
Eagle Graphite	Canada	British Col.	3 600 t	
Grafitos Mexicanos	Mexique	Sonora	n.d.	
Nacional de Grafite	Brésil	Minas Gerais	70 000 t	interne
Extrativa Metalquimica	Brésil	Bahia	30 000 t	interne 1/3, externe 2/3
Grafita MG	Brésil	Minas Gerais	20 000 t	
EUROPE ET LIMITOPHES				
Grafit Kropfmühl	Allemagne	Bavière	> 21 000 t	Sri Lanka, Zimbabwe, Chine
Grafitbergbau Kaisersberg	Autriche	Styrie	8 000 t	interne
Grafitové doly Staré Mesto	Tchéquie		7 000 t	
Skaland Graphite	Norvège		8 000 t	
Zavalyevsky Graphite Complex	Ukraine	Kirovograd	40 000 t	interne
Karaback Metal & Mining	Turquie	Kutahya	50 000 t	
Krasnoyarskgraphit	Russie	Krasnoyarsk	8 000 t	
Uralgraphit	Russie	Krasnoyarsk	7 000 t	
AFRIQUE				
Ets Gallois	Madagascar		10 000 t	interne
Total			705 600 t	

Tableau 18 : Récapitulatif des principales sociétés productrices de graphite naturel dans le monde.

8.2. LES PRINCIPAUX FABRICANTS DE PRODUITS INTERMÉDIAIRES EN GRAPHITE

Les fabricants de produits intermédiaires et semi-finis en graphite sont surtout développés aux États-Unis, en Chine et en Europe occidentale, principalement en Allemagne.

8.2.1 Aux États-Unis

Asbury Carbon (www.asbury.com), basé à Asbury, dans le New-Jersey est un des principaux fournisseurs de graphite naturel et synthétique, ainsi que d'autres formes de carbone. Cette société a six usines de transformation de graphite aux États-Unis, une au Canada et une au Mexique, avec une capacité totale de traitement de 370 kt/an. Elle n'a pas de mines et importe du graphite naturel de Chine et du Mexique. Elle produit des barres et plaques de graphite, qu'elle peut usiner (électrodes). Elle produit du graphite pour réfractaires, produits de friction (freins), lubrifiants, etc.

GrafTech International (www.graphtech.com), basé dans l'Ohio, est un important producteur de produits en graphite (graphite extrudé, moulé ou usiné, graphite expansé, électrodes en graphite pour fours à arc, réfractaires, feuilles de graphite flexibles, etc.).



Figure 15 : Pièces en graphite (en haut) et électrodes pour four à arc (en bas) de GraphTech Intl (© www.graphtech.com).

Graphite Machining Inc. (www.graphitemachininginc.com) et sa filiale **Advanced Carbon Technologies** (www.advancedcarbon.com), basés en Pennsylvanie, produisent et commercialisent toute une gamme de produits en graphite et en carbone usinés.

Poco Graphite (www.poco.com), basé au Texas, filiale de la société **Entegris Inc.** (www.entegris.com) basée dans le Massachussetts, produit du graphite à grain fin, du carbure de silicium et des mousses de carbone-graphite. Il a des implantations en France (Poco Graphite SARL, à Limonest (69)) et en Chine.

Superior Graphite (www.superiorgraphite), basé à Chicago (Illinois), produit du graphite synthétique et traite et commercialise du graphite naturel en provenance du Mexique. Il dispose de six installations aux États-Unis et une en Suède (Stockviksverken Graphite Plant à Sundsvall). Il produit des électrodes, des réfractaires et des poudres de graphite.

8.2.2 En Chine

Roskill (2009) liste quarante sociétés chinoises d'extraction et de traitement de graphite, situées dans l'Heilongjiang, la Mongolie-Intérieure, le Hebei, le Shandong, le Henan, le Hubei, le Sichuan et le Shanxi pour le graphite en paillettes et dans le Jilin, le Shaanxi et le Hunan pour le graphite « amorphe ». Roskill (2009) cite aussi six sociétés qui transforment le graphite en semi-produits et en particulier en anodes pour batteries, entre autres pour batteries Li-ion :

BTR New Energy Materials, à Shenzhen, produit 1 kt/an de composites de graphite, 3 kt/an de graphite conducteur, 300 t/an de graphite expansé de haute pureté, et d'autres matériaux. Il serait le 1^{er} producteur chinois et le 3^e producteur mondial d'anodes pour batteries en graphite. Il a acquis en 2008 **Tianjin Tiecheng Battery Material**, situé à Tianjin, qui produit des matériaux pour anodes de petites batteries au lithium (pour téléphones portables et autres appareils nomades).

Changsha Hairong Electronic Materials produit environ 2 kt/an de graphite pour anodes pour batteries.

Hunan Huiyu Science and Technology, dans le Hunan, fait de la R&D et a une capacité de production de 500 t/an de graphite pour anodes.

Liaoning Hongguang Technology, dans le Liaoning, a une capacité de production de 900 t/an.

Shanghai Shanshan Science and Technology a une capacité de production de 1 kt/an d'électrodes.

Roskill (2009) rapporte aussi qu'il y a plus de 350 sociétés de commercialisation de produits graphiteux en Chine.

8.2.3 En Inde

Roskill (2009) liste vingt-neuf sociétés indiennes de traitement de graphite, situées dans le Gujarat, l'Orissa, le Jharkhand et le Tamil Nadu.

8.2.4 En Suède

Minelco Group (www.minelco.com), filiale de LKAB, est un spécialiste du traitement de minéraux industriels. D'après Roskill (2009), il traitait entre autres du graphite, mais le graphite n'est plus mentionné parmi les divers minéraux traités sur le site Internet de Minelco (mai 2012).

8.2.5 Au Royaume-Uni

James Durran Group (www.durrans.co.uk) traite et commercialise des produits graphiteux importés.

Morgan Crucibles (www.morgancrucibles.com) produit des matériaux technologiques dont des produits en graphite (creusets, anodes, balais).

8.2.6 En Allemagne

Graphit Kropfmühl (www.graphite.de), filiale à 93,5 %⁵ du néerlandais **Advanced Metallurgical Group** (www.amg-nv.com), exploitait du graphite à Kropfmühl, en Bavière (Allemagne), jusqu'en 2005. Il exploite désormais, à travers ses filiales locales, les mines de graphite de Bogala au Sri Lanka et de Lynx et Karoi au Zimbabwe.

Il possède aussi sept usines de traitement de graphite, dont trois en Allemagne (Kropfmühl, Werk Wedel à Holstein près de Hambourg et Edelgraphit à Bad Godesberg), une en Chine (Qingdao Kropfmühl Graphite), une au Sri Lanka (Bogala), une au Royaume-Uni (à Epping, au travers de sa filiale Branwell Graphite) et une en Tchèque (Graphite Tyn spol).

La société produit pratiquement tout l'éventail de produits en graphite pour les réfractaires, les matériaux de friction, les batteries, les balais en carbone, les lubrifiants, les mines de crayon, les poudres métallurgiques, etc.

L'usine d'Holstein, près de Hambourg, trie et homogénéise les graphites importés, de ses filiales et l'usine de Bad Godesberg fabrique les pièces en graphite et les lubrifiants. La capacité totale de ces deux usines est de 8 000 t/an.

SGL Group (www.sglgroup.de), basé à Wiesbaden, est un des leaders mondiaux des produits à base de carbone, avec 40 sites de production dont 22 en Europe, 6 en Amérique du Nord et 6 en Asie. Sa branche graphite (30 % de son chiffre d'affaires en 2011) produit des électrodes pour fours à arcs et aciéries, mais aussi des graphites de spécialité et des graphites expansés. SGL est aussi le plus important producteur européen de fibre de carbone (15 % du chiffre d'affaires en 2011).

Carl Nolte Söhne est une filiale allemande du britannique Morgan Crucibles et fabrique des creusets et autres produits en graphite.

Georg H Luh (www.luh.de) produit et commercialise divers produits en graphite et autres minéraux pour réfractaires et lubrifiants.

Plusieurs autres sociétés allemandes traitent et/ou commercialisent des produits graphiteux : **NGS Naturgraphit** (www.graphit.de), **Possehl Erzkontor** (www.erzkontor.com), **Thielmann Graphite** (www.kwthielmann.de), **ThyssenKrupp Metallurgical Products** (www.thyssenkrupp-metallurgical-products.com), etc.

⁵ Annonce de mai 2012

8.2.7 En Suisse

La société suisse **Timcal Graphite and Carbon** (www.timcal.com), filiale du groupe français Imerys (www.imerys.com), basée à Bodio (Tessin), est l'un des principaux producteurs mondiaux de graphite et de produits graphiteux. Elle extrait du graphite en paillettes au Canada (gisement de Lac-des-Iles, au Québec), avec une capacité de 25 kt/an⁶ (source : Industrial Minerals). Elle a des usines de traitement de produits graphiteux :

- en Suisse, à Bodio (Tessin) : graphite synthétique, carbure de silicium, coke calciné, graphite en dispersion aqueuse ;
- au Canada (Terrebonne, Québec) : traitement du graphite naturel et synthétique. Exfoliation ;
- en Chine (Changzhou et Baotou) : traitement du graphite naturel, purification, exfoliation, formage, etc. ;
- au Japon (Fuji) : graphite colloïdal aqueux.

Elle a aussi en Belgique une unité de production de noir de carbone.

Timcal Graphite et Carbone développe toute une gamme de produits brevetés, sous le nom de TIMREX, depuis la gamme des graphites naturels (GN) comme E-PG 10 et PG 25, jusqu'à celle des graphites synthétiques primaires (GSP) comme le F 10 et le E-F25.

8.3. LES ACTEURS FRANÇAIS

La seule société française impliquée dans la production minière de graphite est Imerys, à travers sa filiale suisse Timcal Graphite and Carbon (cf. 8.2.7.). Plusieurs sociétés fabriquent des fours industriels incorporant du graphite (Mersen, ECM-Technologies, FNAG). Deux sociétés sont impliquées dans la fabrication d'accumulateurs lithium-ion, (Saft et E4V)⁷. Une société fabrique des encres résistives au graphite pour l'électronique (Vishay Sfernice). Certains fabricants de lubrifiants, et en particulier de lubrifiants industriels, utilisent probablement du graphite mais les informations précises resteraient à rassembler⁸.

Plus en aval, les équipementiers et constructeurs automobiles sont vraisemblablement consommateurs de graphite pour les garnitures de frein, d'embrayage et certaines pièces mécaniques, mais leurs consommations réelles ne sont pas renseignées. Il en est de même pour les industries ferroviaires et aéronautiques (disques de freins

⁶ Sa production réelle n'est pas publiée mais elle n'a pas dépassé 21 kt en 2011 puisque ce tonnage correspondrait à la production totale du Canada, partagée entre Timcal et Eagle Graphite.

⁷ Les batteries fabriquées par une troisième société, Batscap, filiale de Bolloré, entre autres pour équiper les véhicules électriques Bluecar de Bolloré, sont à anodes en lithium métallique et non en graphite.

⁸ L'enquête de CEIS n'a pas encore inclus les fabricants de lubrifiants ni les équipementiers.

d'Airbus). Les constructeurs automobiles peuvent aussi utiliser du graphite dans les fours en fonderie au niveau de la fabrication (production de boîtes de vitesse par exemple).

Enfin, certains constructeurs de véhicule électrique utilisent des batteries Li-ion à anodes en graphite (Renault, PSA).

Dans les industries aérospatiales et de défense, des lubrifiants et graisses graphitées sont utilisées lors de la fabrication de pièces de structure.

8.3.1 Producteurs miniers

Imerys (75007 Paris, www.imerys.com) est la maison-mère de Timcal Graphite and Carbon (Suisse), qui exploite le gisement de graphite naturel de Lac-des-Iles, au Québec, et élabore divers produits graphiteux, ainsi que du graphite synthétique et autres produits carbonés (cf. 8.2.7.). Imerys se présente, dans son Document de Référence (Rapport Annuel) 2011, comme le n° 1 mondial du graphite pour piles alcalines, des additifs conducteurs pour batteries Li-ion, des lubrifiants pour tubes sans soudure, et du graphite lamellaire naturel.

8.3.2 Fabricants de fours et autres équipements industriels utilisant du graphite

FNAG (Furnaces Nuclear Applications Grenoble) (38800 Le Pont de Claix, www.fnag.eu), est spécialisé dans la production de fours à frittage et autres technologies utilisatrices de graphite pour des applications nucléaires.

C'est une filiale de la société allemande ALD Vacuum Technologies GmbH (www.ald-vt.com), elle-même filiale du néerlandais AMG (www.amg-nv.com) qui est aussi la maison-mère du producteur allemand Graphit Kropfmühl (cf. 8.2.6.).

FNAG fabrique notamment des fours à frittage pour la fabrication de pellets de combustibles nucléaires (UO₂ et MOX). FNAG a aussi développé une technologie à base de graphite naturel pour l'encapsulation d'éléments de combustibles nucléaires usagés.

Mersen (92400 La Défense, www.mersen.com), est le nouveau nom, depuis 2010, de l'ancienne société Carbone Lorraine. Mersen fabrique des matériaux et équipements pour les environnements extrêmes, la sécurité et la fiabilité des équipements électriques, en particulier pour le ferroviaire, l'éolien (cf. fig. 8), etc. Il produit de nombreux composants de haute technologie en graphite. Il est l'un des leaders mondiaux en équipements anticorrosion en graphite, en balais pour moteurs électriques, et en applications haute température du graphite isostatique et en fusibles industriels. Il produit par exemple des fours haute température en graphite pour la fabrication de silicium polycristallin pour le photovoltaïque.

Mersen est implanté dans de nombreux pays, avec des usines en France (Pagny-sur-Moselle, 54), en Allemagne, en Amérique du Nord, en Asie (Chine, Corée, Japon Inde), en Australie. Son chiffre d'affaires 2011 était de 830 M€, en croissance de 12 % par rapport à 2010.

Mersen utilise cependant surtout du graphite synthétique, et seulement une faible proportion de graphite naturel ($\leq 5\%$).

ECM Technologies (38039 Grenoble, www.ecm-furnaces.com ou www.ecm-fours-industriels.fr) fabrique des fours industriels, en particulier des fours de cémentation basse pression. Cette société a des filiales aux États-Unis et en Chine.

8.3.3 Électronique

Vishay Sfernice (06000 Nice) est une filiale du groupe étatsunien Vishay (www.vishay.com) basé en Pennsylvanie. Elle utilise de petites quantités de graphite pour des encres résistives pour circuits imprimés.

8.3.4 Fabricants de batteries d'accumulateurs et de piles au lithium

Trois sociétés françaises sont présentes dans la production de batteries au lithium, mais deux seulement avec des anodes en graphite.

Saft (93170 Bagnolet, www.saftbatteries.com) a été créée en 1918. Elle avait été rachetée intégralement par Alcatel en 1995 et sortie de bourse, et y a été réintroduite en juin 2005 (au Compartiment B de l'Euronext) après sa revente en 2004. Saft se présente comme le leader mondial de la conception, du développement et de la production de batteries de haute technologie pour l'industrie.

Saft produit en particulier des batteries Li-ion pour applications industrielles et militaires, pour les marchés du stockage d'énergie renouvelable, du transport et des réseaux de télécommunications. Elle utiliserait cependant essentiellement du **graphite synthétique**. La société est implantée dans 19 pays.

E4V (92200 Neuilly-sur-Seine, www.e4v.eu), fondée en 2008, achète les cellules électrochimiques déjà élaborées et les assemble dans son usine au Mans pour en faire des batteries. Celle-ci, inaugurée en avril 2011, a commencé sa production en août 2011. Elle prévoit atteindre progressivement en 2012 une capacité de 10 000 packs de batteries par an. Ses clients sont les constructeurs automobiles français Aixam Mega, Éco & Mobilité et Mia Electric (ex-Heuliez).

Batscap (29556 Quimper, www.batscap.com), filiale à 80 % du groupe **Bolloré** (www.bolloré.com) et à 20 % d'EDF, implantée à Quimper et à Montréal (Canada), développe et fabrique les batteries Lithium-Métal-Polymère (LMP), ainsi que des « supercapacités », qui équipent entre autres les « Bluecar » de Bolloré. Mais les anodes de ces batteries sont en lithium métallique et non en graphite.

8.3.5 Constructeurs de véhicules électriques (voitures et cycles)

Après plusieurs années de développement, plusieurs voitures entièrement électriques et avec batteries au lithium sont arrivées sur le marché français en 2011, avec un démarrage d'une production à l'échelle industrielle.

Renault : le constructeur automobile Renault (92100 Boulogne-Billancourt, www.renault.fr) travaillait depuis des années au développement du véhicule électrique. Il a lancé depuis peu la commercialisation de 3 modèles de véhicules entièrement électriques (EV) à batterie Li-ion, l'utilitaire Kangoo ZE, assemblée à Maubeuge, et la berline Fluence ZE depuis fin octobre 2011 et le petit quadricycle Twizy ZE depuis début 2012. La berline compacte électrique Zoe, construite à Flins (78), officiellement présentée au Salon de Genève en mars 2012, devrait être disponible à la vente à l'automne 2012.

Renault prévoit atteindre 200 000 véhicules électriques en 2015-2016.

Renault prévoit aussi ouvrir un centre de production de batteries sur le site de Flins d'ici 2014, avec une capacité de production de l'ordre de 250 000 accumulateurs Li-ion par an.

PSA Peugeot Citroën : le constructeur automobile PSA Peugeot Citroën (www.psa-peugeot-citroen.com) commercialise depuis fin 2010 sous la marque Peugeot la compacte citadine électrique Peugeot-iOn et sous la marque Citroën la C-Zéro, qui sont des déclinaisons de la Mitsubishi i-MiEV, lancée au Japon en 2006. Ces véhicules sont assemblés à Mizushima au Japon. Peugeot commercialise aussi depuis l'automne 2011 le « crossover » 3008 en version hybride, avec des batteries Ni-MH.

Les batteries Li-ion sont fabriquées par Lithium Energy Japan et GS Yuasa Corp, des fabricants japonais de batteries au lithium.

Par ailleurs, **Peugeot-Cycles** (www.cycles.peugeot.fr) fabrique et commercialise une gamme de vélos électriques à batteries au lithium, et **Peugeot Scooters** (www.peugeot-scooters.com), du groupe PSA, prévoit lancer en mars 2012 son scooter électrique e-vivacity™.

Bolloré : le Groupe français Bolloré (92811 Puteaux, www.bollore.com) a initié en 2009 sa voiture électrique Bluecar™, une voiture citadine électrique d'une autonomie de 250 km et qui peut atteindre 130 km/h. Sa batterie au lithium-métal-polymère (LMP) a été conçue par sa filiale à 80 % Batscap. Son anode est cependant en lithium métallique et non en graphite comme dans la plupart des batteries lithium-ion.

Mia Electric : la société Mia Electric (79140 Cerizay, www.mia-voiture-electrique.com), créée en 2009 (ex-Heuliez), a lancé en septembre 2011 sa petite citadine électrique « mia » avec batterie au lithium. Elle aurait atteint les 1 000 exemplaires vendus fin février 2012.

Aixam-Méga (73101 Aix-les-Bains, www.mega-vehicules.com) construit et commercialise de petits véhicules utilitaires et commerciaux électriques à batteries Lithium-Fer-Phosphate (E4V), adaptés pour les collectivités, les espaces verts et les espaces fermés (modèles Mega-City, E-Worker et Multitruck-Electrique).

8.3.6 Verres et céramiques

Saint-Gobain (92400 Courbevoie, www.saint-gobain.fr), à travers sa filiale Saint-Gobain Ceramics, produit notamment des briques et des monolithes alumine-carbone et alumine-graphite-carbure de silicium (Alfrax™).

8.3.7 Fabricants de graisses et lubrifiants

L'usage de graphite comme additif dans les lubrifiants et graisses en France reste à documenter. Depuis le retrait du marché de l'huile moteur pour voiture « Antar molygraphite », les huiles moteur françaises (marques Total, Elf) n'affichent plus explicitement contenir du graphite⁹, mais leur éventuel contenu en graphite reste à documenter. Par ailleurs, les fabricants de lubrifiants et graisses industriels sont de probables utilisateurs de graphite.

8.3.8 Autres industries : métallurgie, aérospatiale, défense

Du graphite est utilisé dans des lubrifiants et graisses de fabrication et autres procédés de production d'industries variées (métallurgie, aérospatiale, défense).

⁹ La société belge Xenum (www.xenum.be) commercialise explicitement des huiles moteur au graphite.

9. Commerce extérieur de la France

Concernant le graphite, les douanes françaises publient sur le kiosque du Ministère des Finances, <http://lekiosque.finances.gouv.fr/> les quantités et valeurs du graphite brut importé et exporté par la France, en données FAB (exportations) / CAF (importations), sous les nomenclatures suivantes :

- réf. 25041000 : graphite naturel, en poudre ou en paillettes ;
- réf. 25049000 : graphite naturel (autre qu'en poudre ou en paillettes) ;
- réf. 38012010 : graphite colloïdal en suspension dans l'huile ; graphite semi-colloïdal ;
- réf. 38012090 : graphite colloïdal (à l'exclusion du graphite en suspension dans l'huile et du graphite semi-colloïdal).

Elles publient aussi les quantités et valeurs de divers éléments plus ou moins ouvrés pouvant ou non contenir du graphite naturel, comme :

- réf. 38019000 : préparations à base de graphite ou d'autre carbone, sous forme de pâtes, blocs, plaquettes ou d'autres demi-produits (à l'exclusion des pâtes carbonées pour électrodes et des pâtes similaires pour le revêtement intérieur des fours) ;
- réf. 68151090 : ouvrages en graphite ou en autre carbone (à l'exclusion des articles pour usages électriques, des fibres de carbone et des ouvrages en fibres de carbone) ;
- réf. 96091010 : crayons à gaine avec mine de graphite.

Ces chiffres publiés par « le kiosque » n'incluent pas les matériels militaires.

Le tableau 19 ci-après récapitule les données concernant le graphite naturel et le graphite colloïdal pour les années 2009, 2010 et 2011. Les références 38012010 et 38012090 concernant le graphite colloïdal et semi-colloïdal ont été regroupées.

On constate que le poste graphite naturel et colloïdal est un poste déficitaire du commerce extérieur français, d'une amplitude croissante, de 12,4 M€ de déficit en 2009, 13,1 M€ en 2010 et 16,7 M€ en 2011.

Cette augmentation du déficit est surtout liée à une augmentation des tonnages importés (passé de 14,7 kt en 2009, 15,3 kt en 2010 et 17,4 kt en 2011).

En 2011, l'essentiel des déficits se sont faits avec l'Allemagne (10,9 M€), la Chine (1,84 M€) et l'Espagne (1,06 M€).

On remarquera aussi que les produits échangés sous l'une ou l'autre nomenclature recouvrent très probablement des spécifications très différentes. Ainsi, du « graphite naturel en poudre ou en paillette » a-t-il été importé de Chine de 0,67 à 0,89 €/kg et du

Japon de 9,9 à 13,7 €/kg entre 2009 et 2011, soit 12 à 20 fois plus cher. Ou encore, 5 700 t de « graphite naturel autre qu'en poudre et en paillettes » a-t-il pu être importé d'Espagne à 0,19 €/kg tandis qu'une seule tonne (c'est un arrondi, la quantité réelle peut être comprise entre 0,51 et 1,49 t) a été importée des États-Unis pour 32 k€, soit entre 21 et 65 €/kg. Il s'agit vraisemblablement d'un produit aux spécifications bien plus pointues que les produits importés d'Espagne.

L'interprétation des données consolidées est donc délicate.

	2009			2010			2011		
	Valeur	Masse	val.unit.	Valeur	Masse	val.unit.	Valeur	Masse	val.unit.
25041000 - Graphite naturel, en poudre ou en paillettes									
Exportations FAB									
Chine	14 k€	4 t	3.50 €/kg				74 k€	42 t	1.76 €/kg
Malaysia	27 k€	11 t	2.45 €/kg	13 k€	5 t	2.60 €/kg	51 k€	19 t	2.68 €/kg
Argentine				25 k€	10 t	2.50 €/kg	45 k€	17 t	2.65 €/kg
Afrique du Sud	10 k€	5 t	2.00 €/kg	13 k€	5 t	2.60 €/kg	28 k€	10 t	2.80 €/kg
Allemagne	12 k€	16 t	0.75 €/kg	15 k€	28 t	0.54 €/kg	8 k€	24 t	0.33 €/kg
Royaume-Uni							4 k€	5 t	0.80 €/kg
Suisse	1 k€	28 t	0.04 €/kg	1 k€	28 t	0.04 €/kg	4 k€	12 t	0.33 €/kg
Espagne	6 k€	2 t	3.00 €/kg	2 k€	1 t	2.00 €/kg	2 k€	1 t	2.00 €/kg
Maroc	20 k€	16 t	1.25 €/kg	6 k€	5 t	1.20 €/kg	2 k€	0 t	
Tunisie	9 k€	5 t	1.80 €/kg	0 k€	0 t		2 k€	0 t	
Algérie	10 k€	11 t	0.91 €/kg	1 k€	0 t				
Australie	20 k€	2 t	10.00 €/kg	21 k€	2 t	10.50 €/kg			
Pays-Bas	2 k€	0 t		20 k€	7 t	2.86 €/kg			
Autres pays	5 k€	5 t	1.00 €/kg	12 k€	1 t	12.00 €/kg	8 k€	1 t	8.00 €/kg
Total	136 k€	105 t		129 k€	92 t		228 k€	131 t	
Importations CAF									
Chine	779 k€	873 t	0.89 €/kg	1 376 k€	2 081 t	0.66 €/kg	1 915 k€	2 879 t	0.67 €/kg
Japon	377 k€	34 t	11.09 €/kg	849 k€	86 t	9.87 €/kg	1 084 k€	79 t	13.72 €/kg
Allemagne	867 k€	997 t	0.87 €/kg	1 036 k€	1 275 t	0.81 €/kg	1 033 k€	1 074 t	0.96 €/kg
Brésil	116 k€	96 t	1.21 €/kg	454 k€	356 t	1.28 €/kg	690 k€	837 t	0.82 €/kg
Pays-Bas	3 k€	1 t	3.00 €/kg	144 k€	86 t	1.67 €/kg	245 k€	218 t	1.12 €/kg
Norvège				91 k€	160 t	0.57 €/kg	152 k€	191 t	0.80 €/kg
Inde							144 k€	15 t	9.60 €/kg
USA	103 k€	14 t	7.36 €/kg	43 k€	8 t	5.38 €/kg	108 k€	21 t	5.14 €/kg
Royaume-Uni	347 k€	108 t	3.21 €/kg	50 k€	48 t	1.04 €/kg	34 k€	23 t	1.48 €/kg
Italie	40 k€	15 t	2.67 €/kg	25 k€	3 t	8.33 €/kg	17 k€	4 t	4.25 €/kg
Corée du Sud	41 k€	3 t	13.67 €/kg						
Kirghizstan	182 k€	143 t	1.27 €/kg	59 k€	5 t	11.80 €/kg			
Autres pays	118 k€	104 t	1.13 €/kg	91 k€	55 t	1.65 €/kg	282 k€	182 t	1.55 €/kg
Total	2 973 k€	2 388 t	1.24 €/kg	4 218 k€	4 163 t	1.01 €/kg	5 704 k€	5 523 t	1.03 €/kg
Déficit	-2 837 k€	-2 283 t		-4 089 k€	-4 071 t		-5 476 k€	-5 392 t	
25049000 - Graphite naturel (autre qu'en poudre ou en paillettes)									
Exportations FAB									
Brésil	388 k€	113 t		679 k€	225 t		317 k€	139 t	
Allemagne	17 k€	2 t		167 k€	10 t		93 k€	15 t	
Algérie							57 k€	2 t	
Danemark	16 k€	1 t		14 k€	0 t		33 k€	3 t	
Turquie							24 k€	25 t	
Espagne	8 k€	1 t		8 k€	0 t		3 k€	0 t	
Italie				32 k€	2 t				
Autres pays	18 k€	5 t		2 k€	30 t		17 k€	2 t	
Total	447 k€	122 t		902 k€	267 t		544 k€	186 t	
Importations CAF									
Espagne	1 238 k€	7 470 t	0.17 €/kg	788 k€	5 246 t	0.15 €/kg	1 065 k€	5 708 t	0.19 €/kg
Allemagne	203 k€	310 t	0.65 €/kg	331 k€	323 t	1.02 €/kg	257 k€	295 t	0.87 €/kg
Brésil	8 k€	22 t	0.36 €/kg	94 k€	196 t	0.48 €/kg	104 k€	126 t	0.83 €/kg
Japon	147 k€	0 t		134 k€	0 t		74 k€	20 t	3.70 €/kg
USA	53 k€	0 t		25 k€	2 t	12.50 €/kg	32 k€	1 t	32.00 €/kg
Chine	966 k€	84 t	11.50 €/kg	81 k€	7 t	11.57 €/kg	16 k€	4 t	4.00 €/kg
Inde	208 k€	95 t	2.19 €/kg	66 k€	30 t	2.20 €/kg			
Autres pays	60 k€	11 t	5.45 €/kg	84 k€	13 t	6.46 €/kg	60 k€	43 t	1.40 €/kg
Total	2 883 k€	7 992 t	0.36 €/kg	1 603 k€	5 817 t	0.28 €/kg	1 608 k€	6 197 t	0.26 €/kg
Déficit	-2 436 k€	-7 870 t		-701 k€	-5 550 t		-1 064 k€	-6 011 t	

Tableau 19 : Statistiques françaises d'import-export de graphite naturel et de graphite colloïdal. Données CAF-FAB hors matériel militaire (source : <http://lekiosque.finances.gouv.fr/>).

	2009			2010			2011		
	Valeur	Masse	val.unit.	Valeur	Masse	val.unit.	Valeur	Masse	val.unit.
38012010 et 39082090 - Graphite colloïdal et semi-colloïdal									
Exportations FAB									
Tchéquie	6 k€	0 t							
Roumanie	17 k€	6 t	2.83 €/kg				2 k€	0 t	
Royaume-Uni	17 k€	2 t	8.50 €/kg						
Italie	37 k€	5 t	7.40 €/kg	38 k€	5 t	7.60 €/kg	17 k€	3 t	5.67 €/kg
Allemagne	8 k€	2 t	4.00 €/kg	7 k€	1 t	7.00 €/kg	6 k€	1 t	6.00 €/kg
Egypte	4 k€	1 t	4.00 €/kg	5 k€	1 t	5.00 €/kg	5 k€	1 t	5.00 €/kg
Turquie				11 k€	2 t	5.50 €/kg	4 k€	1 t	4.00 €/kg
Maroc	4 k€	1 t	4.00 €/kg	3 k€	0 t		3 k€	0 t	
Algérie	19 k€	1 t	19.00 €/kg	29 k€	1 t	29.00 €/kg			
Belgique	5 k€	1 t	5.00 €/kg	8 k€	1 t	8.00 €/kg			
Bosnie-Herzégovine	1 k€	0 t		15 k€	1 t	15.00 €/kg			
Brsil				55 k€	23 t	2.39 €/kg			
Madagascar	11 k€	0 t							
Pays-Bas	24 k€	3 t	8.00 €/kg	2 k€	0 t				
Portugal	16 k€	2 t	8.00 €/kg	2 k€	0 t				
Autres pays	14 k€	1 t		10 k€	2 t		13 k€	1 t	
Total	183 k€	25 t	7.32 €/kg	185 k€	37 t	5.00 €/kg	50 k€	7 t	7.14 €/kg
Importations CAF									
Royaume-Uni	119 k€	55 t	2.16 €/kg	120 k€	61 t	1.97 €/kg	130 k€	59 t	2.20 €/kg
Pays-Bas	1 172 k€	370 t	3.17 €/kg	121 k€	19 t	6.37 €/kg	101 k€	23 t	4.39 €/kg
Allemagne	5 711 k€	4 087 t	1.40 €/kg	7 933 k€	5 545 t	1.43 €/kg	9 718 k€	5 849 t	1.66 €/kg
Autres pays	306 k€	52 t	5.88 €/kg	291 k€	64 t	4.55 €/kg	274 k€	86 t	3.19 €/kg
Total	7 308 k€	4 564 t	1.60 €/kg	8 465 k€	5 689 t	1.49 €/kg	10 223 k€	6 017 t	1.70 €/kg
Déficit	-7 125 k€	-4 539 t		-8 280 k€	-5 652 t		-10 173 k€	-6 010 t	
Cumul du graphite naturel									
Déficit	-12 398 k€	-14 692 t		-13 070 k€	-15 273 t		-16 713 k€	-17 413 t	

Tableau 19 (suite) : Statistiques françaises d'import-export de graphite naturel et de graphite colloïdal. Données CAF-FAB hors matériel militaire (source : <http://lekiosque.finances.gouv.fr/>).

10. Criticité

La criticité du lithium est résumée comme suit (fig. 16)

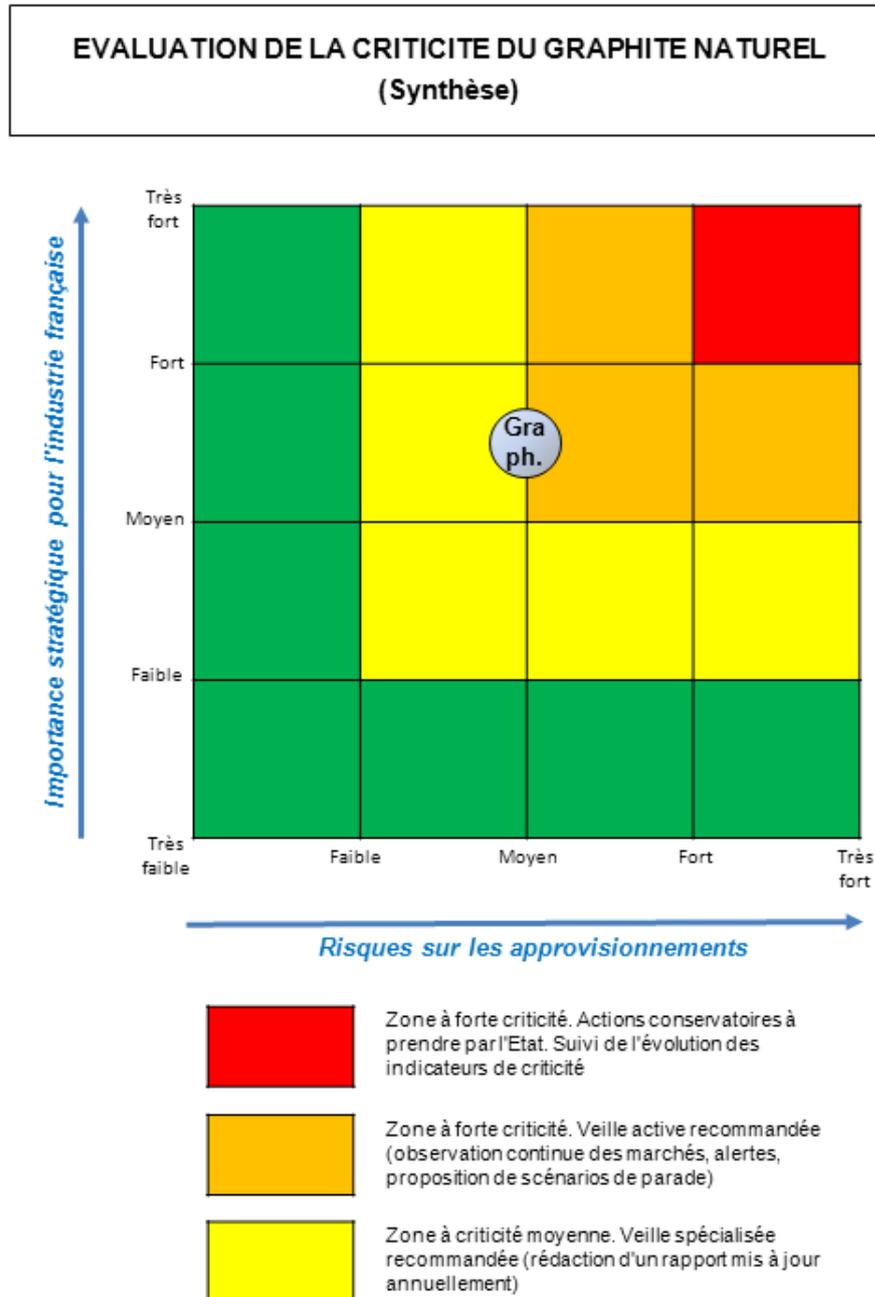


Figure 16 : Synthèse de la criticité du graphite.

11. Bibliographie

Ad-Hoc Working Group of the European Commission (2010) - Critical raw materials for the E. Commission Européenne, DG Entreprises (Bruxelles, Belgique). <http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/>.

Baylis R. (2012) - Vehicle electrification and other lithium end-uses: How big and how quickly? .Roskill presentation to the 4th Lithium Supply & Markets Conference, Buenos Aires, Argentina, 23-25th January 2012.

Baylis R. et Chegwiddden J. (2012) - Industrial minerals for electric vehicle technologies. Roskill presentation to the Industrial Minerals International Congress and Exhibition, Budapest, Hungary, 27th March 2012. Disponible en ligne : www.roskill.com/news/roskill-at-the-21st-industrial-minerals-congress-exhibition-budapest/at_download/attachment1.

British Geological Survey (2011) - Risk list 2011, 9 p, disponible en ligne : www.mineralsuk.com.

Carlin J.F Jr (USGS, 2011) - 2010 Minerals Yearbook: Graphite, 2011, 9 p., disponible en ligne : <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/graphite/>.

Chauris L et Gignes J. (1969) - Gîtes minéraux de la France, Volume 1, Massif Armoricain. Mémoires du BRGM n° 74. 100 p., 15 fig., 4 tab., 8 cartes hors texte.

Delfau M. et Duhamel M. (1983) - Ressources minières françaises, Tome 14. Les gisements de sillimanite, d'andalousite, de disthène, de magnésite, de graphite, de feldspaths, situation en 1983. Étude BRGM sous l'égide du Comité de l'Inventaire des Ressources Minières métropolitaines.

Feys R. (1953) - Bassin houiller briançonnais. Gisement de graphite du Chardonnet (Hautes Alpes). Rapport BRGG A287.

Harben P.W. (2006) - The Industrial Minerals Handybook, a guide to markets, specifications and prices, 4th edition. IMI (www.indmin.com), UK, 408 p.

Jébrak M. et Marcoux E. (2008) - Géologie des ressources minérales. *Société de l'Industrie Minérale*. 667 p.

Mitchel C.J. (1992) - British Geological Survey, Technical report WG/92/30, 31 p.

Moore S. (2012) – The natural graphite industry in 2012. Reshaping for a hi-tech revolution. Industrial Minerals presentation to the Graphite Express Conference, Toronto, 22d May 2012.

Olson D.W. (2009) - USGS 2009 Minerals Yearbook, Graphite.

Olson D.W. (2012) - USGS 2011 Minerals Commodity Summary, Graphite (Natural).

Pierrot R., Picot P., Poulain P.A. (1972) - Inventaire minéralogique de la France, Hautes-Alpes. Editions BRGM.

Raw Material Group (2011) - Raw Material Data (base de données).

Roberts J. (2012) - Graphite Special 2012, *in* Industrial Minerals, March 2012, p. 35-51.

Roskill Information Services (2009) – The Economics of Natural Graphite, 234 p., 3 annexes.

Vaysse A., Feys R., Greber C. (1950) - Note sur le gisement de graphite de Cote Peallas (Hautes-Alpes). Rapport BRGG A214.

Zajec O., Anquez M., Hocq J. et de Gliniasty M. (2011) - Stratégie de sécurisation des approvisionnements en matériaux critiques. Audit de perception industrielle. Graphite, lithium, tantale, tungstène, antimoine. Rapport de la CEIS, 79 p.

Sites Internet :

Sites généraux

- Industrial Minerals : www.indmin.com
- Société française de chimie : www.societechimiquedefrance.fr

Sites des sociétés minières et industriels concernés

- Cités au fil du texte.



**Centre scientifique et technique
Service ressources minérales**

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34