

# GRAPHITE 2024

En 2016, la consommation mondiale de graphite a été de 2,45 millions de t dont 950 000 t de graphite naturel et 1,5 million de t de graphite synthétique.

## État naturel

Dans les gisements, le graphite se présente :

- Sous forme de paillettes (flakes, en anglais) de taille supérieure à 100 µm, disséminées dans des roches métamorphiques (gneiss, micaschistes). La teneur en graphite est comprise, avant enrichissement, entre 5 et 40 %. Ils sont principalement présents en Chine, dans la province d'Heilongjiang et au Brésil.
- Sous forme « amorphe » (terme impropre car le graphite est cristallisé) de fines particules, inférieures à 1 µm, dans des gisements, en général, plus jeunes que les précédents. La teneur est de 25 à 80 % en graphite, avant enrichissement. Ils sont principalement présents en Chine dans la province du Hunan et au Mexique dans l'État de Sonora.
- Sous forme de filon dans des veines (vein ou lump, en anglais) qui peuvent atteindre plusieurs mètres d'épaisseur. La teneur des veines peut varier entre 88 et 99 %. Ce type de gisement est exploité exclusivement au Sri Lanka et représente moins de 1 % de la production mondiale. La société [Graphit Kropfmühl](#), filiale du groupe néerlandais [AMG](#) exploite dans ce pays la mine souterraine de Bogala. Les mines souterraines de Kahatagaha et de Kolongaha sont exploitées par la société étatique Kahatagaha Graphite Lanka Limited.

En 2018, les paillettes comptent pour 600 000 t à 800 000 t, le graphite amorphe, 300 000 t et celui en filon, 4 000 t.

Les minéraux, après broyage, sont enrichis par flottation, le graphite étant naturellement hydrophobe. Les concentrés mis sur le marché ont généralement une teneur de 60 à 70 % en carbone avant une purification, également par broyage et flottation, donnant une teneur d'environ 85 %.

Des teneurs plus élevées, de 99 % jusqu'à 99,95 %, peuvent être obtenues par traitements chimiques, en particulier à l'aide d'[acide fluorhydrique](#) pour éliminer la [silice](#), ou thermiques.

## Productions

### Production de graphite naturel

*En milliers de t, en 2024, pour un total mondial de 1,6 million de t. Source : USGS*

*en milliers de t*

Chine	1 270	Russie	20
Madagascar	89	Canada	20
Mozambique	75	Corée du Sud	9,6
Brésil	68	Corée du Nord	8,1
Inde	27,8	Norvège	7
Tanzanie	25	Sri Lanka	3,3

*Source : USGS*

Avec le développement des besoins suscités par la demande pour les batteries au lithium, de très nombreux projets d'exploitation minière sont en cours d'étude.

- La production chinoise provient, principalement, des provinces de Heilongjiang et Shandong. Elle est à 15 % « amorphe » et à 85 % sous forme de paillettes.

- Au Mozambique, les exploitations minières sont situées au nord du pays dans la province de Cabo Delgado, le graphite produit étant destiné à l'exportation par le port de Pemba.
  - La société [Graphit Kropfmühl](#), filiale du groupe néerlandais [AMG](#) exploite en association avec l'Empresa Moçambinaca de Exploração Mineira, la mine à ciel ouvert de Ancuabe dans la province de Cabo Delgado, réouverte en juillet 2017, avec une capacité de production de 9 000 t/an. Par ailleurs, exploite des mines de graphite en Allemagne, à Kropfmühl, au Sri Lanka, à Bogala et en Chine.
  - En novembre 2017, la société australienne [Syrah Resources](#) a commencé à produire, dans sa mine à ciel ouvert de Balama avec, en 2023, une production de 94 000 t de graphite en paillettes à une teneur de 98 %. La capacité de production est de 350 000 t/an. Les réserves prouvées et probables sont de 110 millions de t de minerai renfermant 16,4 % de graphite. Le minerai renfermant également du [vanadium](#) avec une teneur de 0,23 % de  $V_2O_5$ , l'exploitation de cette coproduction est envisagée. Par ailleurs, Syrah Resources a construit, à Vidalia, en Louisiane, aux États-Unis, une usine, BAM, de fabrication de graphite sphérique destiné aux batteries lithium-ion d'une capacité initiale de 11 250 t/an pouvant être portée à 45 000 t/an.
  - [Triton Minerals](#), société des Émirats Arabes Unis dans laquelle le groupe chinois Jinan Hi Tech a une participation de 34 %, développe le projet d'Ancuabe, adjacent à la mine de [Graphit Kropfmühl](#), avec des réserves de 24,9 millions de t de minerai renfermant 6,2 % de graphite. La production prévue est de 60 000 t/an. Développe également le projet Cobra proche de la mine de Balama exploitée par Syrah avec des ressources estimées à 103 millions de t renfermant 5,2 % de graphite.
  - Sur le gisement de Balama, la société australienne [Battery Minerals](#) a développé un projet minier contigu à celui de Syrah avec des réserves de 19,66 millions de t renfermant 11,06 % de graphite. La production prévue est de 58 000 t/an. Par ailleurs a développé un autre gisement proche, celui de Montepuez possédant des réserves de 42,19 millions de t à 9,27 % de graphite et une production prévue initialement de 50 000 t/an et pouvant atteindre 100 000 t/an. En 2022, cette activité a été vendue à [Tirupati Graphite](#).
- La production brésilienne provient de l'État du Minas Gerais. Les mines sont exploitées principalement par la société [Nacional de Grafite](#), avec une capacité de production de 70 000 t/an, dans les usines de Pedra Azul, avec 36 000 t/an, Salto da Divisa, avec 12 000 t/an et Itapecerica, avec 9 000 t/an.
- Madagascar produit, depuis 1907, du graphite de qualité exceptionnelle. En 1925, Madagascar était premier exportateur mondial. Exploité à ciel ouvert, la teneur, de 3 à 10 % est concentrée, par flottation, à 85 – 90 %. Les principaux producteurs sont :
  - Les [Établissements Gallois](#) avec 140 000 t/an dans 2 mines (Antsirakambo avec 80 000 t/an et Marovintsy avec 60 000 t/an) situées sur la côte est, dans la région de Toamasina. En 2017, la production a été de 60 000 t.
  - [Greenwing Resources](#) (ex Bass Metals) qui a débuté, en 2018, l'exploitation de la mine de Graphmada, avec une production de 1 962 t renfermant 93 % de graphite et une production prévue de 6 000 t/an pouvant être portée à 20 000 t/an. Les ressources sont de 61,9 millions de t renfermant 4,5 % de graphite.
  - [Tirupati Graphite](#), société indienne, développe deux projets, Vatomina et Sahamamy à 70 km du port de Toamasina. En 2022-23, la production est de 4 770 t avec une capacité de production de 30 000 t/an. Les ressources indiquées sont de 4,6 millions de t de minerai renfermant 4,2 % de graphite. En 2022, a acquis le gisement de Balama, développé par [Battery Minerals](#), au Mozambique
  - La société canadienne [NextSource](#), développe dans le sud de l'île, le projet Molo avec une capacité de production de 17 000 t/an pouvant atteindre 45 000 t/an. Les réserves prouvées et probables sont de 23,6 millions de t renfermant 7,02 % de

graphite. La première expédition de graphite a eu lieu en octobre 2023.

- En Inde, en 2018-19, la production provient à 59 % de l'État d'Odisha, avec les mines du district de Nuwapara et à 40 % de celui de Jharkhand, avec les mines du district de Palamau. 3 des plus importantes mines, sur un total de 9, donnent 82 % de la production.
- En Russie :
  - La société [Krasnoyarskgrafit](#) exploite le gisement de Kureyskoe situé à la confluence de la rivière Kureika et du fleuve Ienisseï. La capacité de production est de 15 000 à 20 000 t/an.
  - La société [UralGraphite](#) exploite la mine à ciel ouvert de Taiginsky dans la région de Chelyabinsk, depuis 1942. La capacité de production est de 15 000 t/an.
  - La société [Dalgraphite](#) développe l'exploitation du gisement de Soyaznoye, dans la région de Birobidzhan, dans le Sud-Est de la Sibérie avec une capacité de production prévue de 40 000 t/an et des ressources de 116 millions de t renfermant 12,5 % de graphite.
- En Ukraine, la production est principalement assurée par [Zavalivskiy Graphite](#) qui exploite un gisement dans la région de Kirovograd avec une capacité de production de 30 000 t/an.
- En Norvège, la société [Mineral Commodities \(MRC\)](#) exploite la mine souterraine de Trælen dans la péninsule de Skaland située dans le nord du pays. La capacité de production est de 16 000 t/an avec des réserves de 0,60 million de t renfermant 24,8 % de graphite. En 2023 la production a été de 6 483 t de concentrés renfermant 93 % de graphite.
- La production canadienne se développe avec :
  - La mine du Lac-des-Îles, située au Québec, qui était exploitée depuis 1989, par [Imerys](#). La mine, à ciel ouvert, a une capacité de production de 25 000 t/an. En décembre 2021, la mine a été acquise par [Northern Graphite](#). En 2023, la production a été de 4 261 t de concentré de graphite et les ressources indiquées sont de 3,29 millions de t renfermant 6,4 % de graphite. Par ailleurs, Northern Graphite développe des projets en Namibie à Okanjande avec une production prévue pour 2025 avec 31 000 t/an et au Canada, en Ontario à Bisset Creek avec 44 000 t/an prévues pour 2026.
  - La mine Black Crystal, en Colombie Britannique est exploitée, depuis 2016, à ciel ouvert, par [Eagle Graphite](#). En 2019, la production est de 92 592 t de minerai renfermant 9 % de paillettes soit 7 500 t de graphite avec une pureté comprise entre 94 et 98 %. Les ressources mesurées et indiquées sont de 19,23 millions de t de minerai renfermant 1,35 % de paillettes de graphite.
  - La mine de Kearney, dans l'Ontario, exploitée par [Ontario Graphite](#), prévoit une production de 22 000 t/an. La mine avait extrait entre 1989 et 1994 17 000 t de graphite. Les réserves prouvées et probables sont de 23 millions de t renfermant 1,95 % de graphite.
  - Dans la province du Québec, plusieurs projets sont à l'étude dont celui du Lac Knife, proche de la ville de Fermont, développé, à ciel ouvert, par [Focus Graphite](#) avec des réserves prouvées et probables de 7,86 millions de t renfermant 15,13 % de graphite et une production envisagée de 44 300 t/an de concentrés de graphite ou celui du lac Télémisca également par Focus Graphite ou celui au Lac Guéret par la société [Mason Resources](#).

**Commerce international** : en 2024.

Principaux pays exportateurs sur un total de 455 485 t.

en t

Chine	190 447	Allemagne	17 787
Madagascar	83 036	Canada	12 872
Mozambique	35 305	Brésil	11 764

Tanzanie	30 957	Pays Bas	11 306
Belgique	19 125	États-Unis	9 187

*Source : ITC*

Les exportations chinoises sont destinées à 44 % au Japon, 17 % à la Corée du Sud, 8 % aux États-Unis.

Principaux pays importateurs, sur un total de 487 337 t.

en t

États-Unis	74 086	Corée du Sud	29 400
Inde	66 113	Belgique	21 608
Allemagne	54 476	Autriche	16 575
Chine	52 088	Turquie	13 665
Japon	44 311	Pologne	13 588

*Source : ITC*

Les importations des États-Unis proviennent à 49 % de Chine, 14 % du Canada, 11 % de Madagascar, 11 % du Mozambique.

## Réserves de graphite naturel

*En millions de t, en 2024, sur un total mondial de 290 millions de t. Source : USGS.*

en millions de t

Chine	81	Russie	14
Brésil	74	Vietnam	9,7
Madagascar	27	Inde	8,6
Mozambique	25	Turquie	6,9
Tanzanie	18	Canada	5,9

*Source : USGS*

## Situation française

En 2024.

Pas de gisement exploité.

## Commerce extérieur :

Les exportations étaient de 207 t avec comme principaux marchés à :

- 46 % l'Algérie,
- 21 % le Brésil,
- 15 % l'Allemagne,
- 10 % les États-Unis.

Les importations s'élevaient à 5 384 t en provenance principalement à :

- 40 % d'Espagne,
- 29 % d'Allemagne,
- 6 % de Chine,
- 6 % du Brésil.

## Utilisations du graphite naturel

Consommation : dans le monde, en 2020, 1,1 million de t dont 76 000 t aux États-Unis, en 2023.

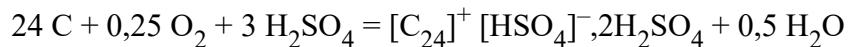
Surtout utilisé pour ses qualités réfractaires (briques, creusets), lubrifiantes, de conduction électrique et sa résistance chimique.

Propriétés particulières : la structure cristalline du graphite constituée de feuillets de graphène liés entre-eux par des liaisons faibles de Van der Waals, lui confère ses propriétés originales :

- lubrifiantes : par glissement des feuillets les uns par rapport aux autres,
- d'anisotropie électrique : la conductivité électrique est d'environ 1000 fois plus importante dans les feuillets qu'entre-eux,
- d'intercalation : diverses espèces chimiques peuvent s'insérer entre les feuillets. Cette propriété qui donne une famille de produits appelés composés d'intercalation est employée pour d'une part fabriquer le graphite expansé et d'autre part intercaler des métaux réducteurs comme le [lithium](#) pour élaborer les anodes des batteries lithium-ion.

Afin de satisfaire ses diverses utilisations, le graphite naturel peut subir des traitements variés qui donnent :

- du graphite expansé : il est obtenu par traitement de paillettes de graphite à l'aide d'un mélange d'[acides sulfurique](#) et chromique ou [nitrique](#). On obtient ainsi un composé d'intercalation avec oxydation du carbone selon la réaction suivante :



Un chauffage brutal, vers 900-1000°C, se traduit par l'expulsion, sous forme gazeuse, des espèces intercalées et l'exfoliation des feuillets de graphène.

- du graphite sphérique : la forme arrondie des particules permet d'augmenter la compacité des anodes pour batteries. La pureté nécessaire est de plus de 99,95 % et la taille des particules doit être comprise entre 10 et 30 µm. Cette production est concentrée en Chine.
- des feuilles de graphite : elles sont obtenues par compression de graphite expansé. Elles sont souples et permettent l'élaboration de joints d'étanchéité pour hautes températures.

## Secteurs d'utilisation du graphite naturel

Secteurs d'utilisation : dans le monde, en 2018.

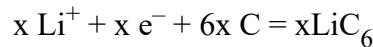
Réfractaires	46 %	Lubrifiants	5 %
Batteries	14 %	Recarburation de l'acier	4 %
Fonderies	14 %	Produits en graphite	2 %
Produits de friction			6 %

Source : Roskill

- Comme produit réfractaire, le graphite présente l'avantage de ne pas être mouillé par les laitiers et les métaux en fusion et de posséder une bonne résistance aux chocs thermiques. Il peut être utilisé seul dans les creusets de hauts fourneaux mais il est plutôt employé associé à d'autres matériaux réfractaires, par exemple en [sidérurgie](#) sous forme de revêtements magnésie-alumine-graphite dans le fond des poches de coulée de l'[acier](#), sous forme de magnésie-graphite dans les convertisseurs à oxygène, les fours électriques à arc, les cordons de laitier des poches d'affinage, sous forme d'alumine-graphite pour les buses de coulée continue. La consommation est d'environ 5 kg/t d'acier. En 2017, la consommation mondiale par la sidérurgie est de 560 000 t.
- Les batteries [lithium](#)-ion utilisent des anodes obtenues à 65 % à partir de graphite naturel sphérique, 30 % à partir de graphite synthétique et 5 % à partir d'autres matériaux. La quantité de graphite utilisé varie de 5 g pour un smartphone à 90 g pour un ordinateur portable et jusqu'à 70 kg pour un véhicule électrique. Le lithium intercalé de façon réversible entre les feuillets de graphène donne une composition correspondant au maximum

à  $\text{LiC}_6$ , la distance inter-feuillet augmentant de 335 pm à 370 pm.

Lors de la décharge, à l'anode, les ions  $\text{Li}^+$  s'insèrent, en se réduisant, entre les feuillets de graphène selon l'équation :



à la cathode, le lithium est oxydé selon l'équation :



Lors de la charge, les réactions inverses ont lieu. L'électrolyte peut être un hexafluorophosphate de lithium,  $\text{LiPF}_6$ , dissous dans un solvant organique. En 2017, la consommation dans les batteries est de 120 000 t.

- Le graphite expansé est utilisé comme retardateur de flamme, en remplacement des composés bromés, en particulier dans les mousses de polyuréthane.
- Crayons : inventé par Nicolas-Jacques Conté, en 1794, le crayon graphite classique est consommé, dans le monde, au rythme de 50 millions d'unités par jour. La mine est constituée par un mélange d'argile et de graphite, plus la teneur en argile est élevée, plus le crayon est dur. En Europe, la dureté est donnée par une échelle du plus dur 9H au plus tendre 9B en passant par H, F, HB, B, le crayon étant d'autant plus noir qu'il est tendre. La société Bic qui produisait les crayons graphite de marque Conté dans son usine de Boulogne-sur-Mer au rythme de 700 000 à 800 000 crayons en bois par jour a arrêté cette production après la mise sur le marché du crayon « Évolution » dont tous les composants, y compris la mine, sont fabriqués, par extrusion, à partir du même polymère de base. La production est de un million six cent mille unités par semaine dans l'usine de Boulogne-sur-Mer.

## Graphite artificiel et matériaux en carbone

Ils possèdent de meilleures propriétés mécaniques que le graphite naturel (les particules de graphite sont liées entre elles par une phase vitreuse).

### Pyrolyse et graphitation

Ces matériaux sont obtenus par pyrolyse (décomposition thermique en l'absence d'agents chimiques extérieurs) de substances organiques telles que les houilles, le pétrole, les polymères, les hydrocarbures, les brais (obtenus par distillation des goudrons). La pyrolyse se traduit par le départ des matières volatiles contenues dans les matières premières, par la rupture de liaisons dans les hydrocarbures, par des polymérisations et par l'élimination de l'hydrogène. De façon générale, la pyrolyse est effectuée en chauffant progressivement les matières premières jusqu'à environ 1 000°C.

Lorsque le chauffage est réalisé rapidement à haute température, en phase gazeuse, on obtient les noirs de carbone et les pyrocarbones.

Lorsque la pyrolyse se traduit par un ramollissement des matières premières (par formation d'une phase liquide) on a cokéfaction : on obtient ainsi le coke et les produits carbonés aptes à la graphitation. La formation d'une phase liquide qui facilite la mobilité des molécules permet aux molécules aromatiques polycondensées de s'orienter en couches parallèles qui faciliteront ainsi la formation de graphite tridimensionnel. Les microcristaux de graphite ont des dimensions de l'ordre de quelques nm.

La graphitation effectuée vers 2 500 – 3 000°C se traduit par l'élimination de défauts dans les cristallites et le grossissement de celles-ci qui atteignent quelques dizaines à quelques centaines de nm.

## Matières premières

Les matériaux en graphite artificiel sont souvent utilisés dans des applications qui demandent une grande pureté du graphite. Pour cette raison, on utilise principalement comme matière première le coke de pétrole. Sur une production mondiale annuelle de l'ordre de 25 millions de t de coke de pétrole, environ 1/3 est utilisée pour élaborer des produits carbonés. Sont également utilisés les cokes de brai, l'anthracite calciné et le graphite récupéré lors de l'usinage de pièces en graphite et qui est ainsi recyclé.

## Fabrication

Les matières premières calcinées sont broyées puis mises en forme à l'aide d'un liant (goudron ou surtout brais utilisés à 150-180°C). La mise en forme est effectuée par extrusion pour des sections jusqu'à 50 mm de diamètre, par pressage hydraulique jusqu'à 1,2 m, par vibrotassage ou pilonnage pour des diamètres supérieurs. Les produits obtenus, appelés produits crus, sont comparables à des produits céramiques avant cuisson. La mise en forme peut également être réalisée par pressage isostatique à chaud.

**Cuisson** : elle consiste à réaliser la pyrolyse du liant, ce qui se traduit par un départ de matières volatiles et un retrait du produit qui peut atteindre jusqu'à 35 % en volume. Afin d'éviter, dans le matériau, des contraintes internes importantes, la vitesse de chauffage ne dépasse pas 1°C par heure lorsque les pièces ont un volume important. La cuisson est réalisée entre 800 et 1 200°C dans des fours à chambre ou à sole mobile.

**Imprégnation primaire** : après cuisson, le produit peut subir une imprégnation primaire qui a pour objet de diminuer la porosité (qui peut atteindre 30 % du volume) créée lors de la cuisson. L'imprégnant est en général du brai de houille qui par chauffage ultérieur (par exemple lors de la graphitation) donnera un squelette carboné qui en étayant les parois des pores augmentera la résistance mécanique du matériau. L'imprégnation est effectuée entre 150 et 180°C sous 8 à 30 bar dans des autoclaves, les pièces à imprégner ayant été préalablement dégazées sous vide.

**Graphitation** : ne concerne qu'une partie de la production de produits en carbone. Elle est effectuée vers 3 000°C par chauffage par effet Joule (dans des fours Acheson ou unifilaires) ou par induction (pour les produits de faibles dimensions). Lorsque le chauffage est réalisé par effet Joule, les pièces doivent être en contact les unes aux autres ou liées par de la poudre de graphite. Le calorifugeage du four qui peut représenter de 3 à 7 fois la masse des pièces à graphitiser est assuré par de la poudre de produits en carbone. Un cycle de graphitation dure de 1 à 3 semaines dont 8 heures à 3 jours sous tension. L'intensité mise en jeu peut atteindre 120 000 A. L'énergie consommée est de 3 000 à 6 000 kWh/t.

Après graphitation, les produits peuvent subir, en fonction des utilisations futures, des imprégnations secondaires, par des résines, des métaux, des [verres](#), du pyrocarbone ou par du phosphate d'aluminium qui diminue l'oxydation des anodes destinées à l'[électrométallurgie 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 [SiC](#)...) sont également réalisés.

## Productions

La production mondiale de graphite synthétique est, en 2016, de 1,515 million de t dont 697 000 t en Chine.

**Producteurs** : quelques producteurs mondiaux.

Showa Denko (SDK) devenu [Resonac](#), au Japon, important producteur d'électrodes pour [aciéries](#) électriques avec 259 000 t/an.

GrafTech, produit des électrodes pour aciéries électriques et pour l'élaboration de métaux non ferreux aux États-Unis à St Marys, en Pennsylvanie, au Mexique à Monterrey, en Espagne à Pampelune, en France à Calais (62) avec au total 178 000 t/an en 2024. En 2020, la production est de 134 000 t.

Graphite India, produit des électrodes pour métaux ferreux et non ferreux en Inde à Durgapur, Nashik et Bangalore ainsi qu'en Allemagne à Nurnberg, avec 98 000 t/an.

SGL, groupe allemand producteur de produits en carbone à vendu, en octobre et novembre 2017 son activité d'électrodes à Showa Denko et Triton, sa capacité de production était de 96 000 t/an.

HEG, société indienne, créée en 1977 en collaboration avec la Société des Électrodes et Réfractaires Savoie (SERS), filiale de Pechiney, produit des électrodes à Mandideep, dans l'État de Madhya Pradesh, avec une capacité de production de 100 000 t/an.

Mersen, ex Carbone Lorraine est une société française qui regroupe deux activités :

- Les systèmes et matériaux avancés regroupant les applications à base de graphite ou d'autres matériaux performants. Cette activité fabrique des revêtements anticorrosion en graphite pour lesquels Mersen est n°1 mondial, des pièces de graphite obtenues par pressage isostatique à chaud en vue d'applications telles que la production de silicium destiné à la fabrication de cellules photovoltaïques, des échangeurs de chaleurs pour l'industrie chimique ou pharmaceutique.
- Les applications électriques regroupent les balais d'alimentation électrique et porte-balais pour machines électriques, les frotteurs pour captage de courant par caténaire, les baguiers et systèmes de transfert de signaux. Mersen est n°1 mondial pour la fabrication de balais en graphite pour moteurs électriques industriels.

Les usines de production de produits en graphite sont situées à Gennevilliers (92) et Pagny-sur-Moselle (54) en France, Saint Marys (Pennsylvanie), Bay City (Michigan) et Salem (Virginie) aux États-Unis, Chongqing, en Chine.

## Utilisations

Consommation : la consommation mondiale de produit ayant subi la graphitisation, en 2016, est de 1,5 million de t.

Secteurs d'utilisation, du graphite synthétique et naturel, dans le monde, en 2012 :

Électrodes	34 %	Batteries	4 %
Réfractaires pour élaboration de l'acier	20 %	Pièces en graphite	4 %
Lubrifiant	6 %	Produits de friction	2 %
Fonderies (revêtement de creusets)	5 %	Recarburation de l'acier	1 %

Source : Roskill

- Électrométallurgie de l'aluminium : annuellement, dans le monde, 6 millions de t d'anodes et plusieurs dizaines de milliers de t de cathodes. La consommation d'anodes est de 450 kg/t de Al. Chaque anode pèse plus de 1 t. Leur production est, en général, intégrée dans l'usine d'aluminium. Elles sont préparées par vibrotassage à partir de coke de pétrole et la cuisson est effectuée à 1 100°C dans des fours à chambres à feux tournants. Le traitement de graphitation n'est pas nécessaire. Afin de réduire la combustion de l'anode, celle-ci est recouverte d'une couche d'aluminium obtenue par pulvérisation de métal liquide. Les cathodes, dont les durées de vie atteignent de 8 à 10 ans, sont réalisées à partir d'anthracite calciné ou de graphite recyclé. La cuisson a lieu à 1 100°C. Les éléments constituant la cathode (0,7 x 0,5 x 3,3 m) sont liés entre eux par des joints en pâte carbonée qui cuisent lors du démarrage des cuves.
- Électrodes pour fours à arc : production mondiale : 1 million de t/an. L'arc électrique produit

entre les électrodes apporte la chaleur destinée à fondre la charge du four (dans ce cas l'arc se forme entre les électrodes et le produit à fondre) ou à réduire la charge (dans ce cas, les électrodes s'enfoncent dans la charge).

- Fours à fusion : pour la production d'acier (25 % de la consommation totale d'électrodes), de réfractaires électrofondus, d'abrasifs (corindon...).
- Fours à réduction : électrométallurgie pour produire les ferro-alliages, le silicium, le carbone de calcium, le phosphore...

Consommations : 100 kg/t de silicium, 30 kg/t de phosphore, 2,5 kg/t d'acier.

Les électrodes pour les fours à fusion ont subi la graphitation. Les électrodes pour les fours à réduction sont seulement cuites à 1 000-1 150°C.

#### Autres utilisations :

- Balais pour moteurs électriques et générateurs : le graphite assure le contact électrique et autolubrifie la surface métallique.
- Creusets de hauts fourneaux : ils sont constitués de plus de 1 000 t de blocs de carbone, à base d'anthracite calciné, cuits à 1 100°C.
- Moules : les métaux, les verres, les scories ne mouillent pas le graphite. Les moules en graphite sont utilisés pour mouler des pièces de verrerie, pour souder des rails par aluminothermie grâce à l'excellente tenue aux chocs thermiques du graphite. L'électro-érosion utilise des électrodes en graphite.
- Tuyères : pour missiles tactiques, fusée Ariane, tubes d'injection de diazote dans les bains en fusion d'alliages légers.
- Disques de frein pour avions (Airbus), pour les TGV...
- Anticathodes : utilisées dans les tubes à rayons X de radiologie. Elles sont en graphite revêtu de tungstène par dépôt chimique en phase vapeur ou par brasage d'une feuille mince. Elles tournent à 12 000 à 15 000 tours/min. Le graphite permet d'évacuer la chaleur engendrée par l'impact des électrons et limiter les effets liés à la force centrifuge (faible masse volumique du carbone).
- Génie chimique : dans les échangeurs de température, dans les appareillages de synthèse de HCl (plus de 400 unités vendues par Mersen dans le monde, 75 % du marché), les pompes, les colonnes, les évaporateurs... La résistance à la corrosion du graphite est meilleure que celle de la plupart des métaux (sauf Ta, Ti, Zr). La porosité du graphite est éliminée par imprégnation secondaire à l'aide de résines (phénoliques ou furaniques qui sont polymérisées « *in situ* ») ou de pyrocarbone.
- Isolation thermique de bâtiments par dispersion dans du polystyrène expansé. Le gain d'isolation, pour une même épaisseur peut atteindre environ 20 %.
- Nucléaire : les réacteurs de la filière graphite-gaz, actuellement, en France, arrêtés, contiennent 3 000 t de graphite par réacteur. Après le démantèlement de ces centrales, le graphite sera incinéré en lit fluidisé.