



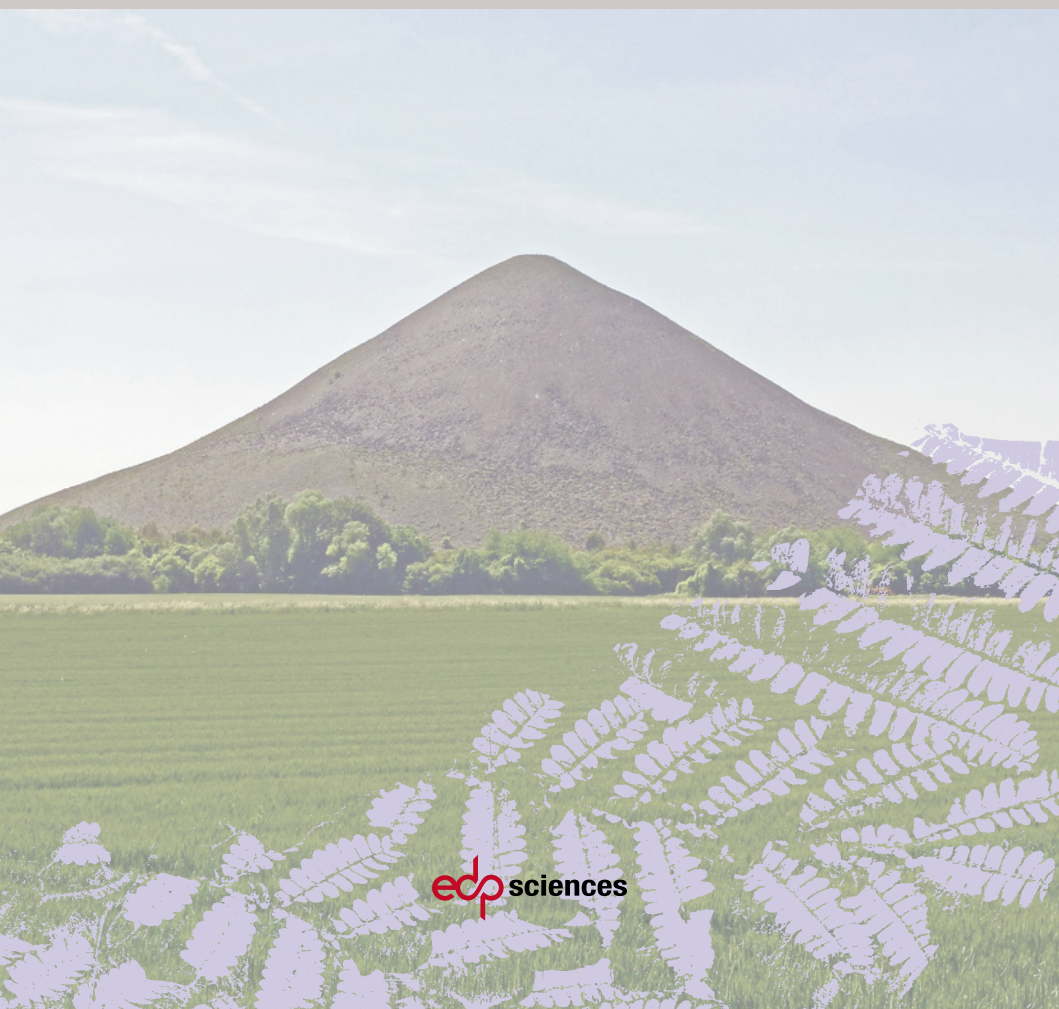
Du vert au noir : le charbon

Patrick De Wever & François Baudin



Du vert au noir : le charbon

Patrick De Wever & François Baudin



Dans la même collection :

La valse des continents, P. De Wever et F. Duranthon, 2015, ISBN : 978-2-7598-1182-3.

L'eau de la vie, P. De Wever, 2015, ISBN : 978-2-7598-1189-2.

Voyage d'un grain de sable, P. De Wever et F. Duranthon, 2015, ISBN : 978-2-7598-1183-0.

COLLECTION « LA TERRE À PORTÉE DE MAIN » DIRIGÉE PAR PATRICK DE WEVER

Cette collection, dont les textes sont ponctués d'anecdotes, de petites questions et richement illustrés, est destinée à un très large public. Elle a pour vocation de présenter et de donner des notions très abordables en géologie sur les phénomènes et constituants de notre planète.

Imprimé en France

ISBN : 978-2-7598-1791-7

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier toutes celles et tous ceux qui les ont aidés à l'élaboration de cet ouvrage : Laurent Carpentier, Marie Dey-Barret, Fabien Graveleau, Guillaume Lemoine, Lilian Cazes, Francis Meilliez, Thierry Oudoire, Thanh Thuy Nguyen Tù.

Nous avons bénéficié de la relecture attentive et amicale de Isabelle Baudin, Dominique Carpentier, France Citrini et Aurélie Chastaingt.

Les dessins sont l'œuvre d'Alexandre Lethiers aussi efficace que compétent.



Sommaire

Remerciements	3
1 Qu'est-ce que le charbon ?	7
Un peu de vocabulaire	8
Du graphite pour écrire	8
Le charbon de bois	11
2 À l'origine du charbon	12
De la lumière à la plante	12
De la plante au charbon	15
Les tourbières : des écosystèmes protégés	16
Évolution des plantes	19
3 Lente (trans)formation	21
Portrait de famille... des plus jeunes aux plus anciens	23
<i>Tourbe</i>	23
<i>Lignite</i>	25
<i>Houille</i>	26
Environnements et conditions de dépôt des charbons	26
Pourquoi des veines de charbon ?	28
Le charbon et le climat : glaciation et réchauffement climatique	33
4 Exploitation	35
Depuis quand utilise-t-on le charbon ?	35
Quels sont les modes d'exploitation ?	38
Terrils !	44
Pourquoi exploite-t-on le charbon ?	46
<i>Chauffage</i>	46
<i>Enduit imperméable</i>	47
<i>Machine à charbon</i>	48
<i>Électricité</i>	49
<i>Gazéification et liquéfaction</i>	50
<i>Coke</i>	52

5 Ressources / Réserves	54
Échanges commerciaux.....	56
Âge des principaux gisements.....	59
Répartition des gisements.....	60
Coût humain de l'exploitation du charbon.....	60
6 Charbon et arts	63
Fusain.....	66
Pierre noire.....	67
Jais.....	68
Le charbon des blasons ou « et pourtant c'est vrai ! ».....	70
Le charbon dans l'art... culinaire.....	70
Charbon et citations	72
Glossaire	74
Bibliographie	77
Index	78





CHARTRE STRATIGRAPHIQUE INTERNATIONALE

www.stratigraphy.org

International Commission on Stratigraphy



Éon	Ère	Série	Étage	GSSP	Âge (Ma)
Phanérozoïque	Cénozoïque	Quaternaire	Holocène	Supérieur	0.0117
				Moyen	0.126
				Calabrien	0.781
					1.806
		Pliocène	Pleistocène	Gélasien	2.588
				Plaisancien	3.600
				Zancéen	5.333
		Miocène	Messinien		7.246
			Tortonien		11.62
			Serravallien		13.82
Phanérozoïque	Paléogène	Oligocène	Langhien		15.97
			Burdigalien		20.44
			Aquitanien		23.03
			Chattien		28.1
		Éocène	Rupélien		33.9
			Priabonien		38.0
			Bartonien		41.3
		Paléocène	Lutétien		47.8
			Yprésien		56.0
			Thanétien		59.2
Phanérozoïque	Crétacé	Supérieur	Sélandien		61.6
			Danien		66.0
			Maastrichtien		72.1 ± 0.2
			Campanien		83.6 ± 0.2
		Moyen	Santonien		86.3 ± 0.5
			Coniacien		89.8 ± 0.3
			Turonien		93.9
		Inférieur	Cénomannien		100.5
			Albien		113.0
			Aptien		125.0
Phanérozoïque	Paléozoïque	Supérieur	Barrémien		129.4
			Hauteriviien		132.9
			Valanginien		139.8
			Berriasien		145.0
		Moyen	Volgagien		182.7
			Serpukhovien		248.0
			Artinskien		252.0
		Inférieur	Permien		259.0 ± 0.4
			Wuchiapingien		254.2 ± 0.1
			Changhsingien		252.2 ± 0.5
Phanérozoïque	Trias	Supérieur	Lopingien		251.2
			Wuchiapingien		254.2 ± 0.1
			Changhsingien		252.2 ± 0.5
			Indien		251.2
		Moyen	Artinskien		252.0
			Ladinien		235
			Garnien		228
		Inférieur	Norien		208.5
			Rhétien		201.3 ± 0.2
			Sinemurien		199.3 ± 0.3
Phanérozoïque	Jurassique	Supérieur	Titonien		152.1 ± 0.9
			Kimmeridgien		157.3 ± 1.0
			Oxfordien		163.5 ± 1.0
			Callovien		166.1 ± 1.2
		Moyen	Bathonien		168.3 ± 1.3
			Bajocien		170.3 ± 1.4
			Aalenien		174.1 ± 1.0
		Inférieur	Toarcien		182.7 ± 0.7
			Pliensbachien		190.8 ± 1.0
			Sinemurien		199.3 ± 0.3
Phanérozoïque	Dévonien	Supérieur	Famennien		372.2 ± 1.6
			Frasnien		382.7 ± 1.6
			Givélien		387.7 ± 0.8
			Eifélien		393.3 ± 1.2
		Moyen	Emmsien		407.6 ± 2.6
			Praguien		410.8 ± 2.6
			Lochkovien		419.2 ± 3.2
		Inférieur	Ludfordien		423.0 ± 2.3
			Gorstien		426.6 ± 0.9
			Homérien		427.4 ± 0.5
Phanérozoïque	Silurien	Supérieur	Wenlock		433.4 ± 0.6
			Sheinwoodien		433.4 ± 0.6
			Telychien		438.5 ± 1.1
			Adronien		440.8 ± 1.2
		Moyen	Rhuddanian		443.4 ± 1.5
			Hirnantien		445.2 ± 1.4
			Katien		453.0 ± 0.7
		Inférieur	Sandbien		458.4 ± 0.9
			Darriwilien		467.3 ± 1.1
			Dapigien		470.0 ± 1.4
Phanérozoïque	Ordovicien	Supérieur	Floien		477.7 ± 1.4
			Tremadocien		485.4 ± 1.9
			Étage 10		489.5
			Jiangshanian		494
		Moyen	Palbien		497
			Guzhangien		500.5
			Dumien		504.5
		Inférieur	Étage 5		509
			Étage 4		514
			Étage 3		521
Phanérozoïque	Cambrien	Supérieur	Fortunien		529
			Tremadocien		521
			Étage 2		514
			Étage 1		509
		Moyen	Étage 5		500.5
			Étage 4		497
			Étage 3		489.5
		Inférieur	Étage 10		485.4 ± 1.9
			Jiangshanian		494
			Palbien		497
Phanérozoïque	Précambrien	Supérieur	Famennien		372.2 ± 1.6
			Frasnien		382.7 ± 1.6
			Givélien		387.7 ± 0.8
			Eifélien		393.3 ± 1.2
		Moyen	Emmsien		407.6 ± 2.6
			Praguien		410.8 ± 2.6
			Lochkovien		419.2 ± 3.2
		Inférieur	Ludfordien		423.0 ± 2.3
			Gorstien		426.6 ± 0.9
			Homérien		427.4 ± 0.5
Phanérozoïque	Mésozoïque	Supérieur	Titonien		152.1 ± 0.9
			Kimmeridgien		157.3 ± 1.0
			Oxfordien		163.5 ± 1.0
			Callovien		166.1 ± 1.2
		Moyen	Bathonien		168.3 ± 1.3
			Bajocien		170.3 ± 1.4
			Aalenien		174.1 ± 1.0
		Inférieur	Toarcien		182.7 ± 0.7
			Pliensbachien		190.8 ± 1.0
			Sinemurien		199.3 ± 0.3
Phanérozoïque	Paléozoïque	Supérieur	Titonien		152.1 ± 0.9
			Kimmeridgien		157.3 ± 1.0
			Oxfordien		163.5 ± 1.0
			Callovien		166.1 ± 1.2
		Moyen	Bathonien		168.3 ± 1.3
			Bajocien		170.3 ± 1.4
			Aalenien		174.1 ± 1.0
		Inférieur	Toarcien		182.7 ± 0.7
			Pliensbachien		190.8 ± 1.0
			Sinemurien		199.3 ± 0.3
Phanérozoïque	Trias	Supérieur	Titonien		152.1 ± 0.9
			Kimmeridgien		157.3 ± 1.0
			Oxfordien		163.5 ± 1.0
			Callovien		166.1 ± 1.2
		Moyen	Bathonien		168.3 ± 1.3
			Bajocien		170.3 ± 1.4
			Aalenien		174.1 ± 1.0
		Inférieur	Toarcien		182.7 ± 0.7
			Pliensbachien		190.8 ± 1.0
			Sinemurien		199.3 ± 0.3
Phanérozoïque	Jurassique	Supérieur	Titonien		152.1 ± 0.9
			Kimmeridgien		157.3 ± 1.0
			Oxfordien		163.5 ± 1.0
			Callovien		166.1 ± 1.2
		Moyen	Bathonien		168.3 ± 1.3
			Bajocien		170.3 ± 1.4
			Aalenien		174.1 ± 1.0
		Inférieur	Toarcien		182.7 ± 0.7
			Pliensbachien		190.8 ± 1.0
			Sinemurien		199.3 ± 0.3
Phanérozoïque	Dévonien	Supérieur	Famennien		372.2 ± 1.6
			Frasnien		382.7 ± 1.6
			Givélien		387.7 ± 0.8
			Eifélien		393.3 ± 1.2
		Moyen	Emmsien		407.6 ± 2.6
			Praguien		410.8 ± 2.6
			Lochkovien		419.2 ± 3.2
		Inférieur	Ludfordien		423.0 ± 2.3
			Gorstien		426.6 ± 0.9
			Homérien		427.4 ± 0.5
Phanérozoïque	Silurien	Supérieur	Wenlock		433.4 ± 0.6
			Sheinwoodien		433.4 ± 0.6
			Telychien		438.5 ± 1.1
			Adronien		440.8 ± 1.2
		Moyen	Rhuddanian		443.4 ± 1.5
			Hirnantien		445.2 ± 1.4
			Katien		453.0 ± 0.7
		Inférieur	Sandbien		458.4 ± 0.9
			Darriwilien		467.3 ± 1.1
			Dapigien		470.0 ± 1.4
Phanérozoïque	Ordovicien	Supérieur	Floien		477.7 ± 1.4
			Tremadocien		485.4 ± 1.9
			Étage 10		489.5
			Jiangshanian		494
		Moyen	Palbien		497
			Guzhangien		500.5
			Dumien		504.5
		Inférieur	Étage 5		509
			Étage 4		514
			Étage 3		521
Phanérozoïque	Cambrien	Supérieur	Fortunien		529
			Tremadocien		521
			Étage 2		514
			Étage 1		509
		Moyen	Étage 5		500.5
			Étage 4		497
			Étage 3		489.5
		Inférieur	Étage 10		485.4 ± 1.9
			Jiangshanian		494
			Palbien		497
Phanérozoïque	Précambrien	Supérieur	Famennien		372.2 ± 1.6
			Frasnien		382.7 ± 1.6
			Givélien		387.7 ± 0.8
			Eifélien		393.3 ± 1.2
		Moyen	Emmsien		407.6 ± 2.6
			Praguien		410.8 ± 2.6
			Lochkovien		419.2 ± 3.2
		Inférieur	Ludfordien		423.0 ± 2.3
			Gorstien		426.6 ± 0.9
			Homérien		427.4 ± 0.5
Phanérozoïque	Mésozoïque	Supérieur	Titonien		152.1 ± 0.9
			Kimmeridgien		157.3 ± 1.0
			Oxfordien		163.5 ± 1.0
			Callovien		166.1 ± 1.2
		Moyen	Bathonien		168.3 ± 1.3
			Bajocien		170.3 ± 1.4
			Aalenien		174.1 ± 1.0
		Inférieur	Toarcien		182.7 ± 0.7

1 Qu'est-ce que le charbon ?

Le charbon est connu de tous mais il s'agit d'un terme très général qui désigne toute une famille de roches contenant au moins 50 % de carbone organique (*Fig. 1*).

Son origine est sédimentaire, c'est-à-dire qu'il est formé par l'accumulation de particules qui se sont déposées, généralement dans l'eau.

Habituellement noir, parfois brun foncé, le charbon a comme origine des restes végétaux lentement transformés.

La majorité des charbons est formée à partir de végétaux terrestres (on parle alors de charbons humiques*), mais une autre catégorie de



Fig. 1 • Charbons ardents.

L'image des boulets de charbon rougeoyant dans le poêle est familière même si, aujourd'hui en France, peu de foyers se chauffent encore ainsi.

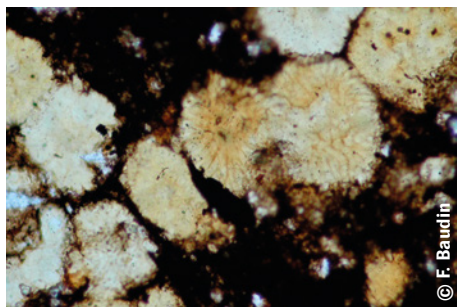


Fig. 2 • Charbon d'algues.

Photographie d'une fine tranche d'un charbon d'algues déposé il y a 295 millions d'années dans la région d'Autun. Chaque petite tache jaune correspond à l'enveloppe d'une colonie d'algues d'un à deux dixièmes de millimètre de diamètre.

charbons est constituée par l'accumulation d'algues lacustres ou marines. On parle alors de charbons sapropéliques* (*sapros* voulant dire « pourriture » en grec) ou bogheads (ce qui veut dire « tête de marécage »). D'autres, plus rares, sont issus de l'accumulation de spores et de grains de pollen (*Fig. 2*). On les appelle des *cannel coal* (ou *candel coal*) car on les taillaient en forme de chandelle pour l'éclairage.

Un peu de vocabulaire

Le mot charbon vient du latin *carbo* (« braise ») dont est aussi issu le mot carbone.

Le charbon, de fait, s'inscrit dans une lignée de matériaux qui passent progressivement de l'un à l'autre : tourbe*, lignite*, houille* et anthracite*. On utilise le mot charbon alors qu'il serait préférable d'utiliser le vocable houille pour la roche située entre le lignite, encore très fibreux, et l'anthracite, tellement pur qu'il a parfois du mal à brûler.

Le mot houille* vient d'un terme wallon *bulhes*, *hoye* pour « fragment, morceau, motte », pour désigner la houille en morceaux qui se trouvait à la surface de la terre. Les charbonniers de la ville de Liège sont d'ailleurs appelés des hoyeux.

IL Y A CHARBON ET CHARBON...

Ce mot recouvre différentes acceptions. Il peut s'agir :

- d'un combustible fossile : la houille. Autrefois appelée charbon de terre ou charbon minéral ;
- d'une inflammation gangreneuse due au bacille du charbon ;
- d'une maladie des céréales, en agriculture, due à un champignon microscopique ;
- d'une pièce conductrice de l'électricité, un balai, assurant la liaison entre les parties fixes et mobiles de machines électriques (moteur, générateur) et qui est constituée en grande partie de charbon ;
- du nom commun d'une plante discrète, la succise des prés (*Succisa pratensis*) ou mors du diable.

Du graphite pour écrire

Le graphite est une espèce minérale qui est, avec le diamant, l'une des formes naturelles cristallisées du carbone pur (*Fig. 3 et 4*). Son nom vient du grec *graphein* = écrire, ce matériau étant celui de nos crayons de papier.

Le graphite laisse une trace sur le papier car sa structure cristalline est en feuillets. Ceux-ci se détachant facilement, certains éléments restent sur le papier, laissant une trace.

À l'inverse, le diamant, matériau naturel le plus dur, correspond à un cristal très compact, constitué de cubes solidement reliés entre eux dans les trois dimensions de l'espace. Ils sont donc particulièrement solides.

Les crayons à papier, ou crayon-mine, sont utilisés pour écrire ou dessiner et résistent à la pluie car le graphite n'est pas soluble dans l'eau. Le mot crayon-mine est utilisé car il vient du crayon à mine de plomb, longtemps utilisé.

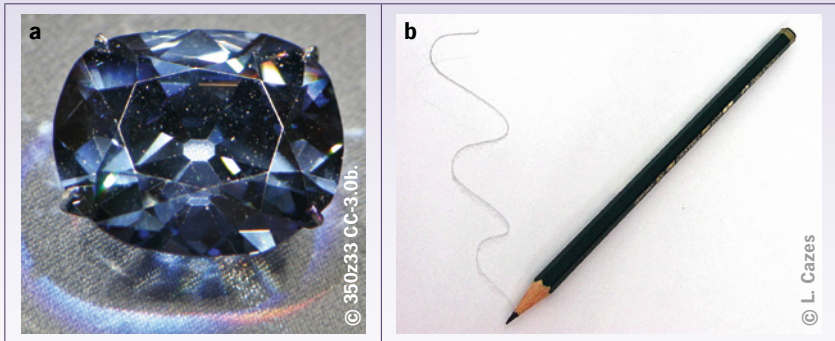


Fig. 3 • Il y a carbone et carbone...

a. Le diamant bleu, le Hope, est aujourd'hui déposé au National Museum of Natural History (aux États-Unis). Sa taille est de 26×31 mm. À l'origine il était un peu plus gros et ornait la toison d'or du roi de France. Volé lors de la Révolution française, il a été retaillé pour être revendu.

b. Crayon de bois. La trace laissée est du graphite, un type de carbone.

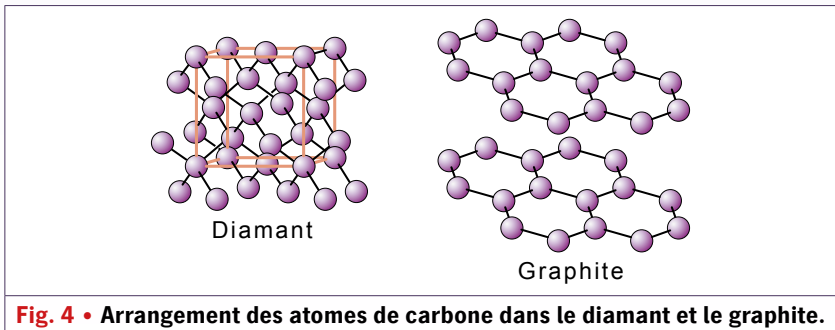


Fig. 4 • Arrangement des atomes de carbone dans le diamant et le graphite.

Pourquoi le charbon est-il noir... alors que le diamant est transparent ?

La réponse est électronique ! L'atome de carbone est constitué d'un noyau entouré de six électrons, dont deux se trouvent sur une orbite proche du noyau et quatre sur une orbite plus éloignée. Or cette orbite peut accueillir jusqu'à huit électrons. Concrètement, cela veut dire que les quatre électrons périphériques de l'atome de carbone peuvent attirer ou être attirés par d'autres électrons et former ainsi de nombreuses molécules. Cela explique pourquoi le carbone est au centre de la chimie du vivant.

Lorsque l'on passe des atomes aux molécules, les électrons fusionnent au point de former des orbitales moléculaires et non plus atomiques. Il y a deux types d'orbitales moléculaires : les liaisons pi (de la lettre

grecque π) ou les liaisons sigma (σ). Dans le diamant, il n'y a que les liaisons sigma, où les électrons ont peu de marge de manœuvre, alors que dans le charbon ou le graphite, on compte un quart de liaisons pi dans lesquelles les électrons sont plus libres d'aller et venir.

Lorsque la lumière vient frapper un diamant dans lequel les électrons sont stables, elle n'est pas absorbée et les photons en ressortent quasi inchangés. Au contraire, dans le graphite ou le charbon, les liaisons sigma capturent les photons et toute la lumière visible est absorbée, ce qui les fait apparaître noirs à nos yeux.

LE NOIR DES GROTTES ORNÉES EST-IL DU CHARBON ?

La peinture des grottes ornées fait appel à deux pigments : noir et ocre (Fig. 5). L'ocre, du jaune au rouge, est à dominante d'oxyde de fer. Le noir est constitué soit par du charbon de bois (de genévrier ou de pin) ou plus rarement par du charbon d'os, soit par de l'oxyde de manganèse (grottes de Lascaux, Chauvet, Pech-Merle...). Cette association n'est pas neutre. En effet, quand l'oxyde de manganèse est mélangé à du charbon de bois, les propriétés toxiques sont équivalentes à celles d'une drogue (de type mescaline ou L.S.D.) et peuvent favoriser un état de transe, parfois évoqué pour les conditions de réalisation de ces peintures (chamanisme). Ce carbone permet la datation de l'art pariétal en utilisant le carbone 14, une variété de carbone, dont l'activité radioactive décroît régulièrement avec le temps.



Fig. 5 • Chevaux et bovins de la grotte Chauvet.

Le charbon de bois

Le charbon de bois dont on se sert pour le barbecue n'est pas un charbon naturel. Il est obtenu par pyrolyse du bois à 400 °C. On la réalisait autrefois dans les forêts, dans de grandes meules (tas de bois protégés de l'air pour éviter qu'ils ne brûlent), à l'intérieur desquelles on mettait le feu. Aujourd'hui, on utilise plutôt de petites unités de production industrielle moins polluantes, où la pyrolyse s'effectue par contact de gaz chauds.

Le charbon de bois ne sert pas uniquement à allumer un barbecue, on l'utilise également dans des filtres, par exemple pour l'épuration des eaux (voir encadré ci-après).

Pilé, il peut également être utilisé pour améliorer ou régénérer les sols agricoles ou forestiers, car il contribue à en restaurer les propriétés physiques, chimiques et biologiques. Il participe ainsi au stockage du carbone, ce qui explique que ce charbon de bois (ou de tout autre végétal), que l'on appelle alors « biochar », suscite un intérêt croissant dans le contexte des préoccupations concernant l'augmentation du CO₂ d'origine humaine. En effet, stocker beaucoup de biochar dans les sols permettrait de diminuer la concentration en CO₂ de l'atmosphère.

POURQUOI LE CHARBON ACTIF EST-IL ÉPURANT ?

Le charbon actif est utilisé depuis l'Antiquité, vers 1550 ans av. J.-C., par les Égyptiens en médecine et pour la purification de l'eau.

Le charbon actif, ou charbon activé, est constitué essentiellement de carbone à structure poreuse. Le charbon a subi une préparation de carbonisation à haute température et, de ce fait, possède la propriété de fixer et de retenir des molécules amenées à son contact par adsorption, c'est-à-dire qu'il est capable de retenir à sa surface des molécules.

Le charbon actif est utilisé pour ses propriétés adsorbantes et réductrices dans de nombreux domaines : pour la filtration d'air (d'abris souterrains, hottes de cuisine, filtres à cigarettes, masques à gaz), pour la décontamination d'eau (captation des pesticides) dans les aquariums, mais aussi, en chimie, sur des textiles pour le « détachage » de vins blancs (pigments de raisins retenus par le charbon), pour extraire l'or des minerais, ou encore en médecine (épuration digestive, antidiarrhéique, aigreurs d'estomac...).

On peut produire du charbon actif à partir de matériaux très différents (noix de coco, tourbe*, houille*...). Le produit est activé par un traitement thermique ou chimique pour accroître sa porosité (la taille des pores) et ses capacités d'adsorption. Les industriels le fournissent en poudre ou en grains. Certains charbons actifs sont régénérables, d'autres pas...

2 À l'origine du charbon

De la lumière à la plante

Un organisme vivant reste quelque chose d'extrêmement improbable, non seulement parce qu'il est très localisé à l'échelle de l'Univers, mais aussi parce qu'il possède une structure très ordonnée alors que les principes fondamentaux de la thermodynamique indiquent que le désordre (« l'entropie » pour donner le mot savant) doit augmenter avec le temps. Il semble y avoir là un paradoxe. L'explication réside tout simplement dans la capacité des êtres vivants à consommer de l'énergie. Quand un organisme n'a plus cette capacité, il retourne vers le désordre, c'est-à-dire qu'il se décompose et disparaît. Bref, il n'y a pas de vie s'il n'y a pas consommation d'énergie,

et réciproquement. La première nécessité pour la vie est donc de disposer d'une source d'énergie. À la surface de la Terre, l'énergie la plus aisément disponible est l'énergie solaire. Fort logiquement, les premières formes de vie l'ont utilisée, directement ou indirectement.

Les organismes photosynthétiques utilisent le rayonnement du Soleil pour convertir l'eau et le dioxyde de carbone en sucres (*Fig. 6*) grâce à leurs pigments et à l'énergie lumineuse selon :

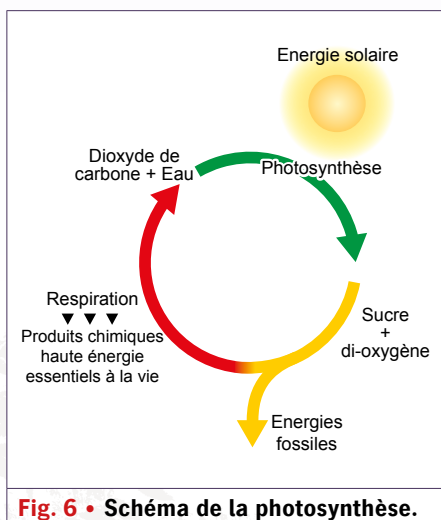
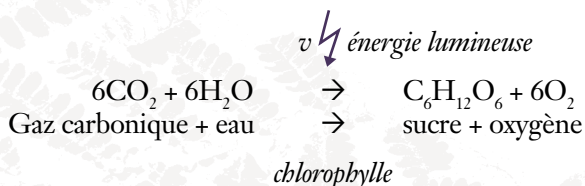


Fig. 6 • Schéma de la photosynthèse.



Six molécules de gaz carbonique et six molécules d'eau réagissent pour former une molécule de sucre (glucose) et six molécules de dioxygène. Environ 5 % de l'énergie solaire incidente est convertie en matière végétale.

Les végétaux ont transformé l'énergie lumineuse, fugace et diffuse, en énergie chimique susceptible d'être stockée. Mais ces processus de transformation libèrent un sous-produit, un déchet en quelque sorte : l'oxygène (voir encadré « un déchet vital » ci-après).

UN DÉCHET VITAL

Très oxydant, l'oxygène rejeté lors de la photosynthèse a bien entendu été nocif pour les organismes d'alors. Mais la vie s'adapte à tout et certains organismes ont même fini par incorporer ce produit toxique dans leur métabolisme, à tel point que l'on pourrait croire que l'oxygène est un élément fondamental de toute vie.

Les organismes qui réalisent la photosynthèse sont appelés les producteurs primaires de la chaîne alimentaire. Il s'agit des plantes vertes et de certaines bactéries. D'autres organismes puisent à leur tour cette énergie stockée sous forme chimique en se nourrissant des plantes dont ils digèrent les sucres. Ils consomment aussi l'oxygène produit par les végétaux pour « brûler » leur nourriture dans des réactions qui dégagent de l'énergie. Plus loin dans la chaîne alimentaire, d'autres animaux mangent ces herbivores, et ainsi de suite.

De même, quand nous exploitons des énergies fossiles, telles que le charbon, le pétrole ou le gaz naturel, c'est la réaction inverse de la photosynthèse effectuée il y a très longtemps qui se produit. Quand nous brûlons un charbon de l'époque Carbonifère, c'est de l'énergie solaire stockée chimiquement il y a 300 millions d'années qui nous chauffe.

Quand un organisme meurt, sa matière organique se décompose et restitue alors la vapeur d'eau, le gaz carbonique (CO_2) et l'énergie stockée. Ce processus se fait par le feu (forêts, savanes) en dégageant de la chaleur, ou dans le sol par l'intermédiaire de bactéries ou encore quand cette matière organique est consommée par les animaux, dont l'Homme. La biosphère interagit ainsi avec deux composants atmosphériques influents : la vapeur d'eau et le gaz carbonique. Quand cette énergie n'est pas dissipée précocement, elle peut être stockée pendant des millions d'années et donner naissance à des ressources* énergétiques exploitables pour l'homme moderne (charbon, pétrole).

QUELLES MOLÉCULES CONSTITUENT LES VÉGÉTAUX TERRESTRES ?

La matière organique produite par les végétaux est essentiellement constituée d'un petit nombre de molécules chimiques :

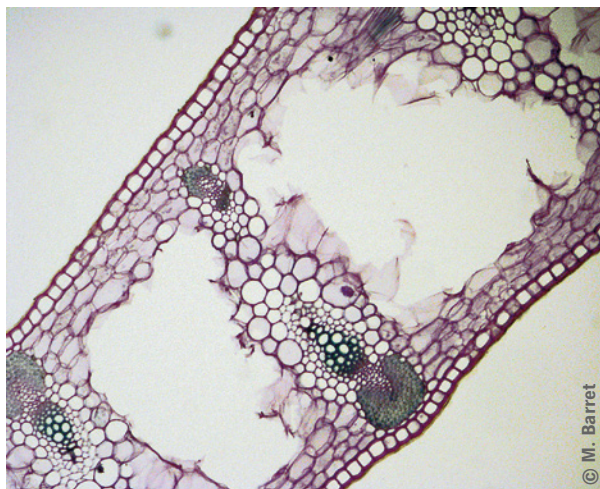


Fig. 7 • Coupe transversale dans une jeune feuille d'iris.

Le contenu cellulaire a été détruit et les parois ont été colorées au carmin-vert d'iode, ce qui fait apparaître les tissus cellululosiques en rose et les tissus lignifiés (bois) en verdâtre. La cuticule de la surface de la feuille est bien soulignée par des alignements de cellules très rouges.

- la **cellulose** est le matériau le plus important des cellules végétales. C'est un polymère constitué de l'assemblage de plusieurs centaines de fois la molécule de glucose produite lors de la photosynthèse. L'assemblage de plusieurs polymères permet la formation de feuillets assez rigides pour constituer la charpente des végétaux. Cette charpente organique est imprégnée d'une matrice constituée de pectine et d'hémicelluloses. Si la pectine est gorgée d'eau (ce qui assure l'hydratation permanente des cellules), les hémicelluloses ont une composition chimique très comparable à celle de la cellulose ;
- la **lignine*** est également un polymère organique mais non linéaire et plus complexe chimiquement que la cellulose. Elle sert d'armature aux végétaux en constituant les parties résistantes du bois. La lignine repousse l'eau (on dit qu'elle est hydrophobe), ce qui explique d'ailleurs en partie pourquoi le bois flotte lorsqu'on le met sur l'eau. Du fait de cette hydrophobie et de sa complexité chimique, ce polymère est très difficilement dégradable. C'est pourquoi, bien que la lignine représente 15 à 30 % du bois sec, elle est un constituant majeur (80 %) des charbons. Seuls les champignons, de type pourriture blanche, sont capables de s'y attaquer ;

- la surface des feuilles, ou épiderme, et des jeunes tiges sont recouvertes d'une couche imperméable : la **cuticule**. Celle-ci est formée par des cires naturelles (des graisses) qui réduisent les pertes en eau par évapotranspiration et protègent de certains herbivores et des bactéries.

De la plante au charbon

Quand une plante meurt, elle se décompose généralement en restituant son énergie, du gaz carbonique et de l'eau. Néanmoins, si elle est enfouie rapidement et soustraite à l'oxydation ou à sa consommation par d'autres organismes (vers, fourmis, insectes, bactéries...), elle a quelques chances de se conserver, mais pas forcément dans son état initial (*Fig. 8 à 10*). Elle subit des transformations au cours du temps, en fonction des conditions de son environnement (température, pression, réactions chimiques...). Parfois elle reste constituée majoritairement de matière organique, d'autres fois elle est imprégnée de composés qui la minéralisent et devient une véritable pierre (*Fig. 10*). C'est ainsi par exemple que l'on retrouve de magnifiques troncs d'arbres fossiles silicifiés en Arizona (États-Unis) qui ont près de 250 millions d'années, ils sont si nombreux que le lieu est dénommé la *Petrified Forest* (forêt pétrifiée).

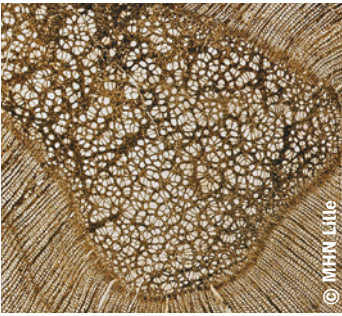


Fig. 8 • Coupe dans un bois fossile.

La qualité est telle que l'on distingue facilement, dans un « cylindre central », les gros vaisseaux conducteurs de la sève brute coupés transversalement. Autour, on peut compter trois cernes d'accroissement dont les lignes « limitantes » sont parfaitement visibles (largeur : environ 3 mm).



Fig. 9 • Bois ancien parfaitement préservé.

Ces bois ont été enfouis, probablement lors d'un orage violent associé à une forte crue (Nouvelle-Zélande). Ces bois de Kauri, qui ont plus de 50 000 ans, sont parfaitement conservés, comme en attestent les fils du bois bien visibles et le bibelot, fait avec ce bois, représentant l'oiseau emblématique de Nouvelle-Zélande : un kiwi.



Fig. 10 • Bois pétrifié.

Ce tronc silicifié d'*Araucaria* du parc national *Petrified Forest* (Arizona, États-Unis) date de près de 250 millions d'années. La pétrification, lente, laisse encore voir les auréoles de croissance de l'arbre.

Les tourbières : des écosystèmes protégés

Une tourbière* (*Fig. 11a*) est une zone humide caractérisée par l'accumulation progressive de matière organique d'origine végétale, peu ou pas décomposée, qui constitue le sol. Cet écosystème fragile produit du méthane, certes, mais représente néanmoins un puits de carbone car il y a plus de production de matière organique que de dégradation. Ces zones humides abritent une biodiversité importante et très souvent des espèces rares ou dont les conditions de vie sont fragiles. La végétation et la faune y présentent souvent des adaptations ou des caractéristiques singulières, parfois uniques : les plantes carnivores (*Fig. 11b*) sont fréquentes et on trouve de nombreux invertébrés rares dans les tourbières.

Les végétaux affectionnant les tourbières sont, entre autres, les mousses, en particulier les sphaignes, mais aussi de nombreux joncs et carex dont les résidus partiellement décomposés forment, après plusieurs siècles, la tourbe*. Les tourbières étant souvent situées dans des secteurs froids ou à humidité très élevée durant une grande partie de l'année, elles accueillent parfois des espèces reliques des périodes glaciaires. Des plantes trouvent ainsi refuge dans les tourbières, parfois très loin de leur aire actuelle de répartition située dans les zones boréales.

Elles abritent aussi une grande quantité de micro-organismes, dont des bactéries et cyanobactéries (un milliard d'individus environ par litre d'eau), des algues unicellulaires (même nombre) qui sont consommées par des protozoaires et des rotifères (100 000 individus par litre présents chacun). On y trouve aussi des vers nématodes (10 000 par litre) et certaines larves d'invertébrés ainsi que des amphibiens.

La majorité des tourbières est située dans les zones de moyenne et haute montagne, près des sources des grands fleuves et rivières. On dit qu'elles sont en « tête de bassin-versant ». Comme les autres types de zones humides, elles ont un rôle important dans le cycle de l'eau :

- pour la rétention de l'eau, elles jouent un rôle de régulation des flux hydriques, en retenant l'eau pendant une période plus ou moins longue avant de la restituer au milieu, évitant des crues. Cela est notamment dû aux caractéristiques de certaines mousses (sphaignes), qui se comportent comme de véritables éponges ;
- pour le filtrage et l'assainissement de l'eau.



Fig. 11 • Tourbière des Narcettes.

a. La tourbière (Plateau de Montselgues, vers 1000 m d'altitude, Ardèche) est un régulateur et épurateur de l'eau. Elle abrite de nombreuses sphaignes et les célèbres *Drosera*, plantes carnivores

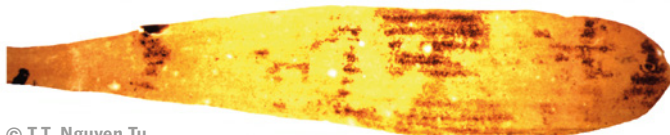
b. Elle bénéficie de plusieurs critères d'intérêt naturel (réseau Natura 2000, ZNIEFF II, CREN...). (b) La *Drosera rotundifolia* est une plante carnivore (poils rouges gluants qui entourent la partie digestive vert jaunâtre), fréquente au milieu des sphaignes (vertes) dans les zones humides acides.

UN RESTE VÉGÉTAL CONSERVÉ EST-IL DU CHARBON ?

Exemple des feuilles fossiles du Cénomanien d'Anjou.

Les fossiles sont les témoins des temps passés. Ces témoins sont d'autant plus rares qu'ils sont fragiles : on retrouve plus facilement les restes d'un escargot que ceux des limaces qui cohabitaient avec eux dans le jardin l'an passé. Les fossiles sont donc souvent des squelettes minéralisés : coquilles de gastéropodes, de bivalves, voire os de vertébrés. En revanche, peu de poulpes ou méduses, peu de vers ou chenilles, mais qu'en est-il des végétaux ? Les végétaux ont un potentiel de préservation intermédiaire grâce aux composants macromoléculaires qui imprègnent leurs parois cellulaires ou recouvrent leurs organes. La sporopollénine, macromolécule qui constitue les spores et les grains de pollen, est très résistante et conduit fréquemment à la préservation de ces petits éléments végétaux. Les feuilles sont quant à elles, recouvertes de cutine, une macromolécule moins résistante à la dégradation que la sporopollénine.

Ainsi, parfois des fossiles sont si bien conservés qu'à côté les momies égyptiennes, avec leurs quelques milliers d'années, ne sont que des poussières en bandelettes. On trouve par exemple en Anjou des feuilles remarquablement conservées dans des argiles* déposées il y a presque 100 millions d'années (Cénomanien inférieur). Elles sont en si bon état qu'elles ont été prises, dans un premier temps, pour des feuilles mortes actuelles (Fig. 12). Cependant, comme les botanistes n'arrivaient pas à les identifier, en les regardant de plus près, ils ont fini par admettre qu'il s'agissait de feuilles fossiles. Ils les ont retrouvées par la suite dans le sédiment du sous-sol. Elles étaient si bien préservées que l'on en a étudié la composition chimique dans une thèse¹. D'autres collègues bretons ont été impressionnés par leur souplesse. Ils pouvaient encore les rouler ! Les rouler ? Tiens, tiens... en rouler une... Une idée leur est alors venue... et si on en roulait une ? Sitôt dit, sitôt fait (le géologue est un homme d'action !).



© T.T. Nguyen Tu

Fig. 12 • Une feuille souple de 100 millions d'années (Cénomanien inférieur). Feuille d'*Eretmophyllum andegavense*. Sa longueur est d'un peu plus de 5 cm. Localité : carrière de Brouillard, Le Gué de Moré, près d'Angers.

1. Nguyen Tu T.T. (1999). Étude isotopique et moléculaire de plantes terrestres céno-maniennes. Thèse de l'université Paris 6, 175 pages.

Évolution des plantes

Si les premières plantes, similaires aux lichens et aux mousses, apparaissent sur Terre il y a 480 millions d'années, la conquête des continents par les végétaux s'est réellement faite entre -435 et -415 millions d'années (au Silurien) dans des conditions climatiques favorables, équatoriales à tempérées. Les plantes terrestres évoluent progressivement avec notamment le développement de vaisseaux permettant le transport de la sève, de racines, d'un tronc et de feuilles. Les fougères géantes (*Fig. 13*) obtiennent ainsi un net avantage sur les autres végétaux et envahissent d'immenses surfaces. Les charbons humiques* (dérivant de végétaux terrestres) les plus anciens datent de -400 millions d'années (Dévonien)



Fig. 13 • Forêt de fougères arborescentes.

Cette forêt de Nouvelle-Zélande évoque les forêts de l'ère primaire.

Index

A

âge 59
Agricola 36
algues 20
Allemagne 40
ambre noir 68
ampélite 67
Anjou 18
anthracite 8, 21, 22, 23, 38, 46, 47, 52, 55
Anthropocène 36, 37
Antiquité 35
arbres 29, 33
Ardèche 17
asphyxie 47
Australie 58

B

bassins houillers 28
bateau à vapeur 43
Béguinage 48
biodiversité 16
biosphère 13
blasons 70
bogheads 7
bois fossile 15
bois pétrifié 16

C

Cambrien 20
cannel coal 7
carbone 8, 9, 23, 26, 52
carbone 14 10
Carbonifère 20, 23, 31, 32, 33, 34, 59, 60, 61
catastrophes 60
cellulose 14

centrale thermique 40, 49, 50
champignon 45
char 24
charbon actif 11
charbon d'algues 7
charbon de bois 10, 11
charbonnage 43
charbons humiques 19, 20
charbons limniques 26, 28
charbons paraliques 27, 28
chauffage 46, 52
chauffeurs 48
Chine 55, 58, 60
Churchill Winston 42
climat 33
CO₂ 33, 34, 49, 50, 62
coke 52
combustible 49
combustion 38
Crétacé 20, 59, 60
Crutzen Paul 37
culinaire 70
cycles 29
cyclothème 29

D

Danemark 21
Decazeville 27
diamant 9

E

échanges commerciaux 57
échelle des temps 37
électricité 49
énergie solaire 12
ère géologique 37

évolution 19
 exploitation 38, 60
 explosions 48
 extraction 36

F

feuille 18
 forêt 20, 29, 34
 forêt houillère 27
 forêt pétrifiée 15, 16
 fosses 43
 fossiles 18
 fougères 19, 20, 31
 fusain 65, 66

G

gaïet 68
 gaïettes 71
 Gaule 35
 gaz à effet de serre 33
 gaz carbonique 13
 gaz des marais 21
 gazéification 50
 gazogène 51
 Germinal 63
 gisements 59, 60
 goudrons 47, 52
 Graissessac 32, 33, 35
 graphite 8, 9, 23, 68
 grisou 41, 42, 60
 grotte Chauvet 10

H

halde 44
 homme de Tollund 21
 houille 8, 21, 22, 26, 38, 55
 houillification 22

I

Inde 58

J

jais 65
 Jurassique 59, 60, 61

L

lampe 42
 Lascaux 10
 libellules 27
 lignine 14, 34
 lignite 8, 21, 22, 23, 25, 38, 40, 41, 46,
 55, 65, 66, 68
 liquéfaction 50
 locomotives 48

M

macadam 47
 machine à charbon 48
 machine à vapeur 36, 37, 41
 Massif central 28, 32, 64
 McAdam John Loudon 47
 météorites 25
 méthane 21, 41, 52, 62
 Meunier Constantin 36, 64, 65
 mines 40, 41, 49, 64, 65
 mineurs 35, 36, 64
 Montceau-les-Mines 27
 Moscou 23

N

Nord-Pas-de-Calais 23, 53
 Nouvelle-Zélande 19

O

origine 12
 oxygène 13

P

Paléolithique 66
 pâte 70
 Pech-Merle 10