LE CHARBON, MATIÈRE COMBUSTIBLE.

HISTOIRE SCIENTIFIQUE ET HUMAINE DU CHARBON

Michel Gastou, membre de la SAGA.

Cet article est un condensé du document de base que j'ai fait paraître en septembre 2014. Nous le diffusons à l'attention de nos membres qui souhaiteraient en lire la totalité, en leur en donnant ici une partie essentielle des chapitres 1 et 2. Dans une prochaine diffusion de Saga Information*, le chapitre 4 « Les témoins de l'exploitation du charbon » sera publié.*

Le chapitre 3 (qui sera à lire seulement dans le document original) fait un retour sur l'histoire de l'exploitation du charbon, avec les titres suivants : Le charbon et son histoire ; Les exploitations industrielles ; Les mines artisanales.

Figure 1. Le charbon a été longtemps la principale source de chauffage des habitations.
(Photo : natura-sciences.com).

Préambule

Un préambule m'a paru utile pour replacer le charbon dans l'ensemble des roches sédimentaires et des combustibles fossiles.

La croûte terrestre est essentiellement formée de roches d'essence purement minérale et de roches liées à l'activité biologique. Les roches d'essence minérale ne seront pas traitées dans cet article parce que hors de notre sujet, non plus que les roches sédimentaires transformées par métamorphisme ou autre.

Parmi les roches sédimentaires résultant de l'activité biologique, on distingue deux grands groupes :

- 1er groupe : les bioconstructions (ex. : les calcaires récifaux) et les roches biodétritiques, souvent carbonatées ;
- 2e groupe : les roches carbonées, dont les charbons, au sens large, les schistes bitumineux et les différents types de pétrole.

Toutes ces roches, bien que très différentes, ont en commun d'être produites par des organismes, aussi bien hétérotrophes qu'autotrophes. Ces organismes, par toute une série de transformations biochimiques de l'oxyde de carbone essentiel à leur développement, seront ensuite recyclés en produits dits « utiles ».

Les organismes hétérotrophes non chlorophylliens

1- Ces organismes peuvent former les tests carbonatés, les exosquelettes (chez des animaux marins tels que bivalves, gastéropodes, etc.).

2- Après la mort de ces organismes, il y a dissolution d'une partie des articles minéralisés, fragmentation plus ou moins poussée et une partie sédimente pour former des boues, puis enfouissement et transformations diagénétiques qui conduisent à la formation d'une roche, le calcaire.

Les organismes autotrophes chlorophylliens

1- ***Matière végétale en milieu marin*** : en exemple, les algues unicellulaire, les coccolithophoridés. Croissance de la matière végétale par assimilation de l'oxyde de carbone CO_2 (photosynthèse), la cellule s'entoure d'une coque de minuscules particules calcaires, les coccolithes. À la mort de l'algue, la matière organique est en grande partie détruite ; les coccolithes se dispersent et sédimentent pour former une vase qui se transformera en une roche, la craie.

2- ***Matière végétale d'origine uniquement continentale*** : le lien entre l'organisme producteur et le produit formé est plus évident : vie, mort du matériel végétal, fossilisation, macération et houillification pour former une roche carbonée, les charbons (développé dans l'article).

L'oxyde de carbone CO_2

L'élément énergétique essentiel qui compose les produits combustibles envisagés ici, selon les classifications en vigueur, est donc le carbone.

Cet atome est produit en masse par nucléosynthèse dans le cœur d'étoiles très massives, genre Soleil, et est présent sur la Terre depuis son accrétion. C'est un élément chimique non métallique, de symbole C et de numéro atomique 6, dans la classification périodique. Il existe dans de nombreux composés naturels : gaz carbonique de l'atmosphère (CO_2), roches calcaires, combustibles (gaz, pétrole, charbons minéraux). C'est de plus un constituant fondamental de la matière vivante.

Par la photosynthèse, les plantes convertissent le gaz carbonique (CO_2) de l'air, avec un apport d'eau par les racines, en glucose (sucre), autrefois nommé hydrate de carbone. Le carbone est donc l'élément essentiel des composés organiques.

Les roches contiennent en moyenne moins de 1 % en poids de matière organique et rarement plus de 5 %. Les argiles et les marnes sont en moyenne plus riches que les carbonates, sables et grès. C'est cette fraction en poids de la matière organique qui est à l'origine des combustibles fossiles : pétrole, gaz naturel, schistes bitumineux et charbons.

Les géochimistes distinguent dans cette matière organique : une matière soluble nommée bitume, qui contient les hydrocarbures, et une matière insoluble dans les solvants organiques, nommée kérogène *(1)*, dont le charbon est un type particulier.

Avant de conclure ce préambule, il faut mentionner qu'il existe d'autres assemblages moléculaires des corps les plus aboutis du carbone. Ce sont le graphite, 100 % de carbone, et le diamant, où chaque atome est fermement lié à quatre voisins proches.

CHAPITRE 1. LE CHARBON : DÉFINITION ET DIAGENÈSE

Le charbon en tant que matière combustible

Le charbon, cette « étrange pierre noire » (Marco Polo, *Voyage en Chine*), nous venons de le voir, est un kérogène *(1)* qui se présente sous la forme d'une roche stratifiée carbonée solide, non cristallisée, dans le sens des réseaux cristallins du matériel inorganique, et provenant pour l'essentiel :

- de la décomposition, à l'abri de l'air, par l'action de micro-organismes, de débris de végétaux enfouis dans de profondes dépressions et recouverts de sédiments terrigènes ;
- puis d'un long processus de macération appelé selon la durée : tourbification, carbonification, nommée aussi houillification.

Classification et description des charbons tant à usage domestique qu'industriel

Il existe de nombreuses classifications, chaque pays producteur ayant créé la sienne. Nous n'en décrirons que deux dans c'est article condensé, qui sont, semble-t-il, les plus significatives.

De façon générale, on classe cette roche en trois lignées principales dont les termes tourbe, lignite, houille et anthracite caractérisent les rangs successifs de combustibles de plus en plus riches en carbone. C'est une classification chronologique :

- la *tourbe* (figure 2), très fibreuse, la plus pauvre en carbone, de 50 à 55 % ;
- le *lignite*, de 55 à 75 % de carbone ;
- la *houille*, de 75 à 90 % de carbone, dont l'anthracite (> à 90 %) est une variété de qualité supérieure.

La tourbe

C'est le produit de la tourbification, ou fossilisation, dans une période de temps relativement courte (de l'ordre de 1 000 à 7 000 ans, à raison de cinq centimètres par siècle) de débris végétaux par des micro-organismes (bactéries, arthropodes, champignons, microfaune) dans des milieux humides et pauvres en oxygène que l'on appelle tourbières. La matière organique décomposée ne représente que 10 à 20 % de la masse mais la teneur en carbone peut atteindre 50 % en poids. Le reste de la masse est constitué majoritairement d'eau et de cendre (entre 80 et 90 %). La tourbe séchée est un bon combustible.

On distingue deux types de tourbe qui dépendent des conditions locales, qui facilitent notamment le développement de végétaux d'affinités différentes au pH :

1- la tourbe calcique (végétaux divers), sur substrat calcaire formée dans des bas-fonds constamment saturés d'eau. Le pH est neutre (ou encore légèrement alcalin) avec un rapport C/N (carbone/azote) inférieur à 30 ;

2- la tourbe acide, oligotrophe (Sphaignes, Bryophytes) qui se forme dans des cuvettes où circulent des eaux pauvres en calcium (d'origine atmosphérique). Le pH est acide (entre 4 et 5) avec un rapport C/N de l'ordre de 40.

D'un point de vue patrimonial et écologique, les tourbières et autres marécages similaires sont considérés comme sites d'importance nationale et sont donc protégés, notamment en Suisse, où, depuis le début des années 1990, la tourbe n'est plus exploitable.

Figure 2. Récolte de tourbe en Irlande (Photo : Guide Irlande.com © I-Stock Photo).

Le lignite

Ce kérogène résulte généralement de la diagenèse de substances ligneuses (bois), ou de la maturation de la tourbe, et donc répond à des critères sensiblement les mêmes de formation, à leur durée près.

Le lignite se forme en séries houillères (cyclothèmes), à faible profondeur, de quelques mètres à quelques dizaines de mètres, isolées par des couches sédimentaires de sables et d'argiles, et il est donc généralement extrait à ciel ouvert.

Les lignites les plus exploitées sont d'âge récent (Crétacé, inférieur à 150 Ma), tertiaire ou quaternaire, mais il existe quelques gisements plus anciens rencontrés dans certains niveaux du Lias (base du Jurassique).

Leur évolution s'est faite sur un temps nettement plus long que pour la tourbe. Ces gisements s'étalent souvent en couches de grande étendue et le minerai extrait est utilisée à plus de 90 % dans les centrales thermiques de forte puissance, notamment en Allemagne.

Le lignite est classé comme charbon de rang inférieur en raison de sa faible maturité organique qui lui laisse une teneur en eau élevée et un pourcentage en carbone limité entre 50 et 60 %. Le lignite est donc un charbon à faible pouvoir calorifique. Sa structure est généralement d'aspect terne et terreux, plus tendre et plus friable que les houilles.

Il faut remarquer qu'il existe une variété de lignite fossile, très riche en carbone (de 70 à 75 %), le jais, d'un beau noir intense, brillant, qui a été considéré un temps comme une pierre de joaillerie.

La houille et l'anthracite

L'appellation courante « charbon » désigne généralement la houille. Ce mot « houille » remonterait au XI^{e} siècle et serait l'équivalent francisé du wallon *hoye*. « Hoye » existait avant la découverte de la houille et signifie en wallon liégeois « fragment, éclat, motte ». Ce fut commode pour désigner la houille en morceaux et le mot se répandit, à partir de 1200, à l'ouest et au sud de la Wallonie.

La houille, comme définie plus haut, est une roche carbonée sédimentaire correspondant à une qualité spécifique de charbon, intermédiaire entre le lignite et l'anthracite (soit de 80 à 90 % de carbone). De couleur noirâtre, elle provient de la carbonisation d'organismes végétaux sur de très longues périodes, supérieures ou égales à 250 Ma, et a donc servi, en raison de son enrichissement en carbone, de combustible solide fossile privilégié.

Elle est utilisée depuis le XI^{e} siècle et son extraction en grande quantité a été le facteur important de la révolution industrielle du XIX^{e} siècle ; la houille a ensuite constitué l'une des principales sources d'énergie des pays industrialisés.

Les cokes, les schistes bitumineux et le charbon de bois, sont classés à part des combustibles domestiques ; leur usage est surtout industriel, sauf pour le charbon de bois dont les usages sont multiples.

Classement du point de vue des constituants

Comme toutes les roches inorganiques qui peuvent être formées par de nombreux fragments, tant de minéraux que d'autres roches, le tissu des houilles (qui elles sont issues, pour l'essentiel, de matière organique après *houillification)* est formé par l'accumulation d'une énorme quantité de menus débris végétaux, très variés, compressés dans le plan de la stratification. Ces débris baignent dans un fond homogène dont le caractère essentiel réside dans leur petitesse et leur constitution pétrographique.

M. C. Stopes *(3)* a défini, en 1919, en s'inspirant des observations des pétrographes, quatre constituants visibles à l'œil nu qui existent dans toutes les houilles et qui constituent le tissu ; elle les a nommés « lithotypes ». Ce sont :

- le ***fusain*** : fibreux et pulvérulent (en proportions très variables dans toutes les houilles) ;
- le ***durain*** : dur et compact, à cassure mate et granuleuse ;
- le ***clarain*** : compact, à cassure unie légèrement brillante ;
- le ***vitrain*** : pâte amorphe compacte, homogène, à cassure conchoïdale.

La notion de rang et de classification macérale

Cette classification descriptive sommaire des constituants a révélé le rôle génétique que joue la transformation thermique des charbons au cours de leur histoire géologique. Ce rôle est majeur. La *houillification* (voir chapitre 2) correspond à l'ensemble des transformations qui concourent à la formation de la houille. On nomme *rang de houillification* un stade déterminé de cette transformation.

Aujourd'hui, avec les microscopes métallographiques *(4)* qui permettent d'analyser des lames opaques en lumière réfléchie (LR), cette première classification des tissus houillifiés en lithotypes n'est plus tellement utilisée (sauf peut-être pour le lignite). On préfère maintenant analyser les tissus par paramètres optiques : c'est la technique de réflexion. Le pouvoir réfléchissant (PR) est croissant avec la houillification, de 0,2 à 0,3 % pour les tourbes, de 10 à 16 % des houilles aux graphites.

On est donc passé à une classification d'un ordre plus fin en créant les macéraux qui constituent maintenant des lignées évolutives.

L'appellation de macéral a été forgée par les pétrographes du charbon, réunis en Comité international (ICCP), à partir de « macération » des tissus végétaux et de « minéral » pour créer une nomenclature lithologique adaptée à leur mode d'analyse en lumière réfléchie (LR), nommée « *classification macérale* ». Cette classification a été publiée par le CNRS dans les éditions successives (1957, 1963, 1971 et 1975) du « *Lexique de nomenclature des charbons* ». C'est la nomenclature qui est la plus utilisée en Europe ; elle atteint un haut degré de complexité mais permet d'unifier le langage d'examen des matières charbonneuses.

Les pétrographes ont privilégié les analyses par paramètres optiques, de préférence à l'analyse des propriétés biologiques ou chimiques qui sont plus difficiles à analyser en pratique. Ces propriétés sont donc restées des caractères secondaires pour la pratique.

Classification macérale

Selon leur pouvoir réfléchissant (PR), dans l'ordre décroissant (indice de réflexion).

1. Le groupe de l'inertinite

(« inertie », en relation avec la fabrication du coke ; les inertinites ne sont pas cokéfiables).

Ce groupe (figure 4a), de couleur blanche en LR (lumière réfléchie), se caractérise par son pouvoir réfléchissant (PR) plus élevé que celui des autres macéraux. De composition ligno-aromatique, les inertinites constituent la partie la plus condensée des matières macérales avec la densité la plus élevée : de 1,4 à 1,5. Elles rassemblent des éléments de structures cellulaires irrégulières ou vasculaires, bien visibles, de tissus végétaux, de champignons et de mycéliums de champignons homogènes... Ces macéraux sont tous totalement dépourvus de fluorescence.

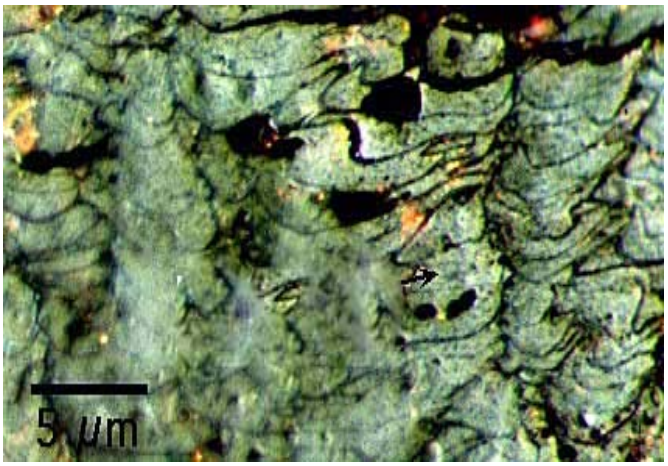


Figure 4a. Groupe de l'inertinite : tissu ligneux aromatisé au cours d'une houillification précoce.

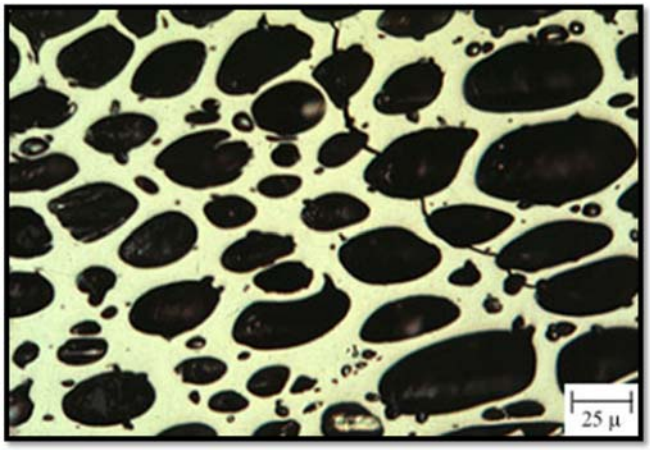
2. Le groupe de la vitrinite

Ce groupe, de composition originelle ligno-cellulosique, est de couleur grise en lumière réfléchie. Les vitrinites (figures 4b) ont un PRV (Pouvoir Réfléchissant de la Vitrinite) intermédiaire entre celui des

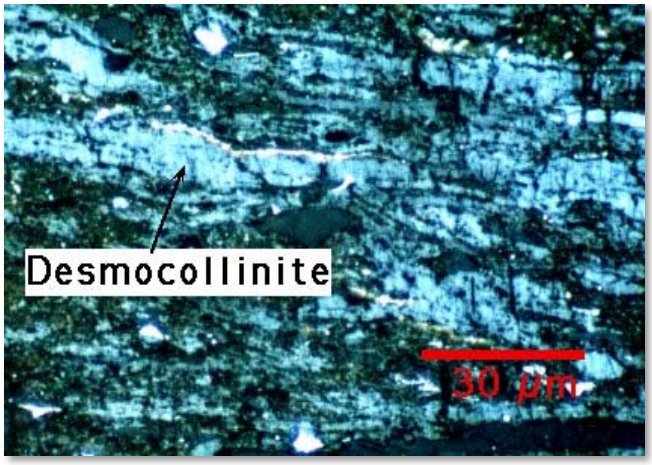
inertinites et des exinites. Elles sont donc un composant moyen, ce qui leur confère le rôle privilégié d'étalon de comparaison.

La morphologie de la vitrinite est beaucoup plus liée aux transformations biochimiques au cours de la houillification qu'à son origine biologique végétale. Elle est très caractéristique par rapport aux deux autres groupes de macéraux retenus par le classement.

Ses propriétés physico-chimiques, à la fois particulières et relativement complexes, sont surtout révélatrices du comportement général des charbons à la houillification.



Textinite : cette structure fait apparaître le maillage cellulaire primaire des tissus ligneux des tiges, branches, feuilles et racines.



Desmocollinite : cette structure est un agrégat des particules riches en cellulose, d'aspect assez homogène en LR.

Figures 4b. Groupe de la vitrinite montrant deux exemples des nombreuses variétés. La vitrinite est définie comme composant moyen par ses propriétés optiques en LR.

3. Le groupe de l'exinite (ou liptinite)

Ce groupe (figure 4c) est de couleur foncée en lumière réfléchie. Les exinites sont les moins réfléchissantes. Leur pouvoir réfléchissant peut être nul pour certaines variétés dans les faibles rangs. Elles sont constituées par des cutines, des exines de spores et de grains de pollen, des cuticules de feuilles, de la résine des appareils sécréteurs (corps résineux).

Les exinites se distinguent toutefois des autres macéraux par leur fluorescence, mais à des degrés divers, avec des spectres particuliers. Les inertinites ne sont jamais fluorescentes, les vitrinites le sont dans des cas exceptionnels.

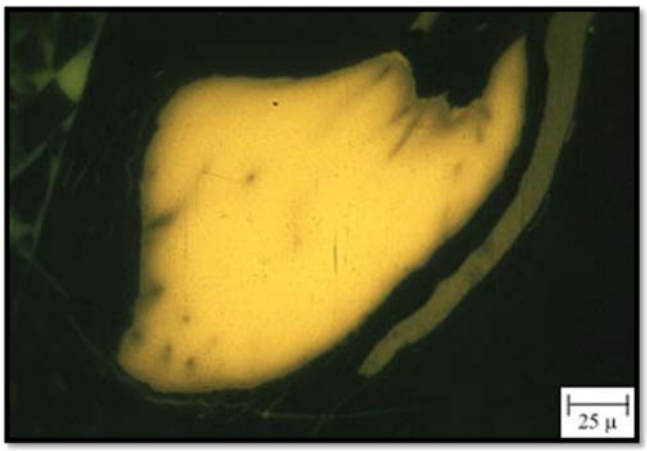


Figure 4c. Groupe de l'exinite : graisse végétale générée par l'écorce, les tiges ou les feuilles.

[Les figures 4a, 4b et 4c de la classification macérale : http://www.ucl.ac.uk/~ucfbrxs/Vitrinite/Vitrinite.htm]

CHAPITRE 2.
FORMATION DU CHARBON

Ce chapitre aborde maintenant le mécanisme de la formation de cette roche non cristalline, d'essence organique, le charbon.

Houillification, ou carbonification

Nous venons de voir que le charbon, quel que soit son rang, c'est-à-dire son degré d'houillification, est le résultat d'une longue maturation des constituants végétaux en anaérobie (en l'absence d'oxygène libre) qui, d'un point de vue physico-chimique, se traduit essentiellement par un enrichissement relatif en carbone au détriment de la matière volatile. En même temps, les caractères des macéraux sont modifiés : couleur, pouvoir réflecteur, anisotropie optique, dureté, résistance mécanique, etc.

Il m'est apparu nécessaire, avant de développer le processus de carbonification, de décrire en trois sous-chapitres sur quels éléments la maturation agit pour l'enrichissement en carbone :

- la constitution de la matière organique ;
- la photosynthèse ;
- les bassins houillers et le dépôt par cycle des sédiments végétaux et minéraux.

Constitution de la matière organique

La structure des végétaux et des animaux est constituée par des éléments de base que l'on appelle des cellules. Il faut remarquer que, si les cellules qui sont l'unité structurale de tous les organismes eucaryotes sont du point de vue fonctionnel les mêmes au niveau des mécanismes moléculaires fondamentaux, elles diffèrent toutefois complètement du point de vue de leur forme et de leur structure externe.

Animale, la cellule est sphérique, nue et molle, uniquement limitée par sa membrane (figure 5). Végétale, elle a la forme d'une « boîte » anguleuse rigide, membraneuse, mais entourée d'une paroi squelettique (exosquelette).

Cette paroi est faite d'un matériau composite typiquement végétal : cellulose, hémicellulose, lignine, et des pectines. Cette différence entre les deux cellules est fondamentale pour la compréhension de la carbonification.

C'est la paroi, essentiellement composée de carbone, qui fournit la presque totalité de l'élément énergétique du charbon. La forme de la cellule, ainsi que la paroi (plus la lignine), ont permis aux végétaux de conquérir la troisième dimension de l'espace, la hauteur, et donc de développer une masse végétale considérable.

La cellulose

C'est un sucre (polysaccharide), de formule $C_6H_{10}O_5$ (soit six atomes de carbone et cinq molécules d'eau). La cellulose est le principal constituant des végétaux et en particulier de la paroi de leurs cellules, elle peut atteindre 50 % de la masse totale du bois ; elle est l'un des nombreux polymères que l'on trouve dans la nature. Le bois, le papier et le coton contiennent de la cellulose. La réunion de plusieurs de ces macromolécules linéaires, parallèles, forme une fibrille, ou micelle, dont la cohésion est assurée par les liaisons hydrogène qui s'établissent d'une macromolécule à une autre. La réunion de ces fibrilles constitue les fibres constitutives de la matière végétale.

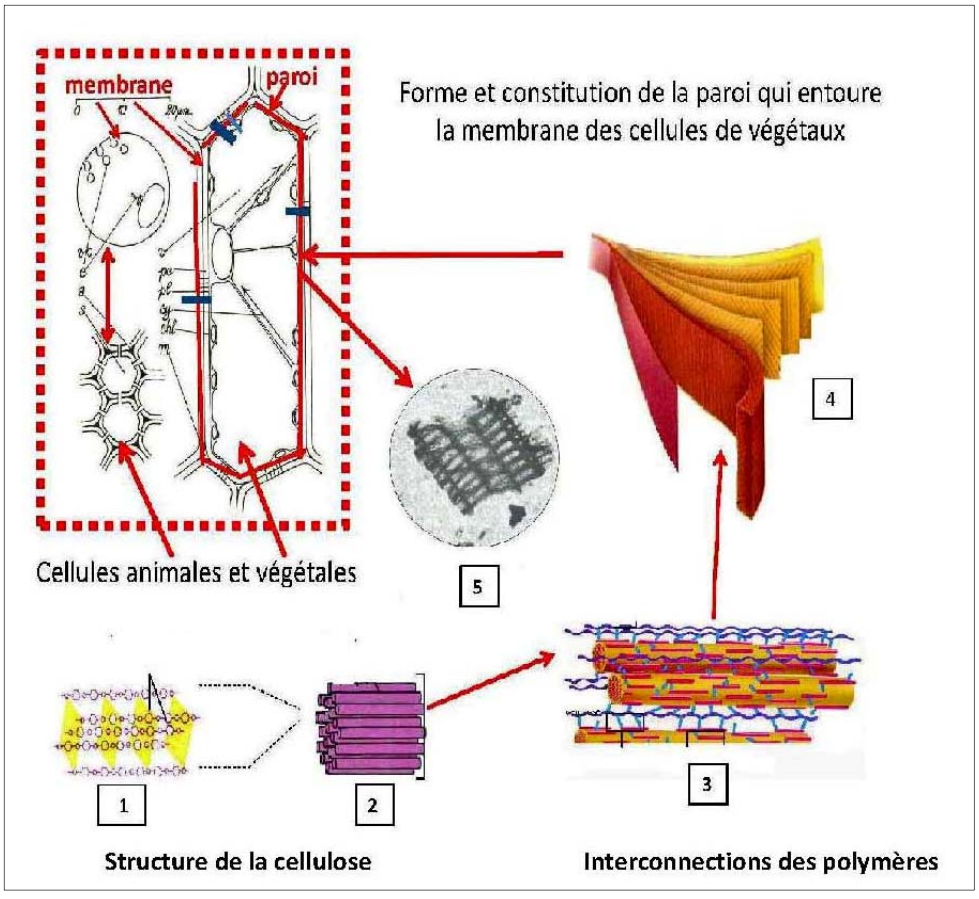


Figure 5. Schéma de l'organisation de la matière organique, montrant la forme et la constitution de la paroi qui entoure la membrane des cellules de végétaux.
*- Structure de la cellulose dans la paroi cellulaire des plantes. Plusieurs molécules de cellulose forment des micelles **1**, regroupées en microfibrilles **2**.*
*- Structure et interconnections des polymères majoritaires dans la paroi de cellules végétales **3**.*
*- Structure d'une paroi cellulaire végétale **4**. - Type de structure réelle **5**.*
(Montage des croquis M. Gastou, à partir de F. Hallé et E. Fernandez Ibaniez).

L'hémicellulose

C'est une des composantes du bois. C'est le deuxième composant de la paroi chez les végétaux, après la cellulose (de 15 à 30 % de la masse) ; elle a un rôle de pontage entre les fibres de cellulose.

La lignine (du latin *lignum*, qui signifie bois)

La lignine (à ne pas confondre avec le lignite) est une des substances principales composant le bois avec la cellulose, l'hémicellulose et les pectines. Elle est la plus abondante des substances organiques. Sa principale fonction est d'apporter de la rigidité, une imperméabilité à l'eau et une grande résistance à la décomposition. Toutes les plantes vasculaires, ligneuses et herbacées, fabriquent de la lignine. La plupart des végétaux fossiles lui doivent leur conservation.

Les pectines

Elles correspondent à l'un des constituants de la paroi végétale. Elles sont le composé prédominant au sein de la lamelle moyenne (signe 4 de la figure 5). Elles maintiennent ensemble les cellules des tissus végétaux. Les pectines jouent donc un rôle structural.

La photosynthèse

Le CO_2, capté essentiellement dans les feuilles, est utilisé par les végétaux pour produire de la biomasse. Ce processus consiste à réduire le dioxyde de carbone par l'eau absorbée par les racines, pour produire notamment du glucose $C_6H_{12}O_6$ (soit six atomes de carbone et six molécules d'eau), grâce à l'énergie lumineuse reçue du Soleil et captée par la chlorophylle des feuilles. Les glucides sont donc la matière première de toute la substance vivante : la photosynthèse est la réaction qui fait pénétrer le carbone dans le cycle vital. En exemple : le bois actuel, ce composé organique, contient en moyenne 50 % de C (carbone), 43 % d'O_2 (dioxygène), 6 % d'H (hydrogène) et 1 % d'N (azote). Autrement dit : une tonne de bois a fixé 0,5 tonne de C, absorbé 1,6 tonne de CO_2 et émis 1,1 tonne d'O_2.

La photosynthèse se présente assez exactement comme l'inverse de la respiration : celle-ci détruit des glucides pour en extraire l'énergie chimique et fabriquer du gaz carbonique, elle fait donc sortir le carbone du cycle vital en l'oxydant, tandis que la photosynthèse fabrique des glucides à partir du gaz carbonique et les faits donc entrer en les réduisant.

Le dépôt cyclique des sédiments végétaux et minéraux dans une série houillère

Les différents bassins houillers

Les bassins houillers sont de vastes dépressions continentales ayant accumulé des débris végétaux suivant un mécanisme rythmique sédimentaire particulier. Ils présentent des caractères différents suivant leur position géographique. On distingue ainsi des bassins paraliques, limniques et de plateformes.

Les bassins paraliques (exemple : le bassin franco-westphalien) se sont formés au voisinage de la mer et sensiblement au même niveau.

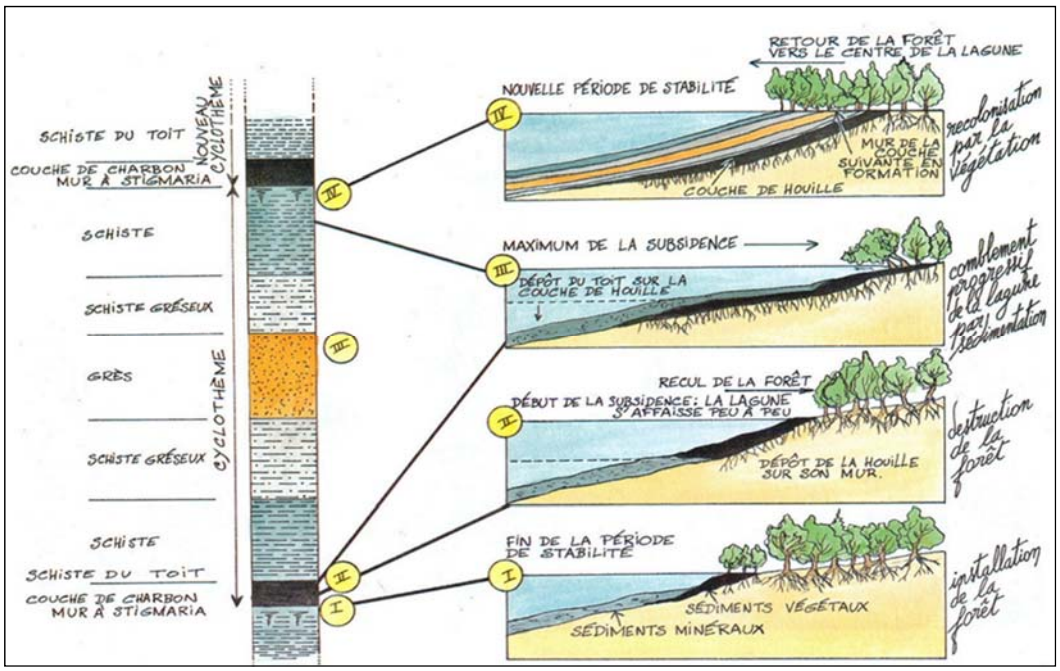


Figure 6. Schéma d'un dépôt cyclique (cyclothème) des sédiments végétaux et minéraux dans une série houillère. (Schéma extrait du Magazine BT n° 1110).

À plusieurs reprises, ces grands bassins ont été submergés par les eaux de la mer proche. Dans les bancs de schistes, on trouve des fossiles marins.

Les bassins limniques (le bassin houiller du Massif central français, par exemple), ne comprennent jamais de couches d'essences marines. Ces bassins se sont formés à des niveaux plus ou moins élevés de la chaîne hercynienne en voie de formation, dans des sortes de lacs de montagne donc hors de portée des invasions de la mer.

Les bassins de plateformes sont inconnus en Europe occidentale. Le phénomène de subsidence n'a pas joué un rôle prépondérant, ces bassins s'étaient formés sur des plateformes continentales rigides. Ils ont une épaisseur totale de charbon toujours faible, avec un petit nombre de couches. Un cas type est le bassin de lignite de Moscou dont la superficie équivaut à peu près au quart de la France.

Les séries houillères

Une série houillère se caractérise par une répétition bien déterminée d'étapes de dépôts (figures 6 et 7), appelée **cyclothème** (les couches de charbon ne représentent que 3 à 4 % de l'épaisseur du dépôt).

Figure 7. Quatre couches de charbon (cyclothème) sont visibles sur ce front de taille qui fait plus de 50 m de hauteur, à Graissessac, Hérault. (Photo Association Clin d'œil, Bernard Henry, Graissessac).

Elle est généralement produite par une succession de subsidences affectant des zones souvent couvertes d'une abondante végétation, en milieu côtier ou lagunaire (bassin paralique), ou en milieu lacustre.

Au Paléozoïque, et plus précisément au Carbonifère, principale période de formation de la houille, c'est une forêt luxuriante (figure 10), aux arbres géants et fougères arborescentes, qui couvrait de vastes étendues. Toutefois ce schéma de forêt luxuriante n'est pas universel et à Graissessac, par exemple, qui est un bassin limnique, la série houillère résulte d'un paléo-environnement complexe ou coexistent à faible distance diverses associations végétales occupant des biotopes différents (figure 11).

Dans le cas le plus général, ces zones sont marécageuses, l'eau abondante stagne. Des affaissements successifs se produisent (subsidence). La pente des cours d'eau augmente légèrement, l'érosion s'amplifie et les sédiments apportés par les rivières ou la mer tendent à recouvrir la forêt et à la faire disparaître. Ces conditions sont favorables à la mise en place du processus d'évolution de la matière organique (développé plus loin dans le texte) qui conduit à la formation des gisements de charbon exploités aujourd'hui.

On constate que ce cycle s'est maintes fois renouvelé au cours de cette longue période de dépôt des sédiments houillers. Par exemple, dans le Nord–Pas-de-Calais (bassin paralique), des séries houillères comportant de nombreuses veines (quelque 400 couches), exploitables ou non, ont pu atteindre 2 500 m d'épaisseur.

Chaque veine représente donc un cycle de formation qui correspond à une succession de quatre étapes que l'on nomme un cyclothème (figures 6 et 7) selon le schéma général suivant :

- **étape 1** : installation de la forêt. D'énormes quantités de végétaux, bois, écorces, feuilles, spores, algues microscopiques s'accumulent ;
- **étape 2** : une subsidence se crée, puis s'amplifie. La forêt est progressivement détruite, par les sédiments terrigènes apportés par les cours d'eau ;
- **étape 3** : comblement de la lagune et assèchement plus ou moins relatif. La couche végétale est ainsi enfouie. Sur ces sédiments alluvionnaires, se reconstitue très vite une nouvelle couche pédologique qui va se végétaliser ; cette nouvelle végétation dépendra des conditions écologiques du moment ;
- **étape 4** : la couche végétale enfouie est isolée de l'air libre. Dans ces conditions anaérobies, commence la fermentation du dépôt (macération aqueuse et thermique). Lentement, les sédiments végétaux s'enrichissent en carbone alors que diminue corrélativement la part des autres substances initialement contenues dans le dépôt.

Plus tard au Cénozoïque (Tertiaire), période de formation du lignite, bien que la forêt ce soit considérablement diversifiée depuis le Crétacé par le développement des angiospermes (plantes à fleur) qui couvraient les terres émergées, le processus de répétition des cyclothèmes est globalement identique aux conditions locales près, notamment de subsidence.

Mécanisme de carbonification

Nous avons vu que tout le carbone formé dans les végétaux par l'assimilation chlorophyllienne (la photosynthèse) est contenu dans la paroi de la cellule et en particulier dans la cellulose. La carbonification, ou houillification, est le processus de diagenèse qui

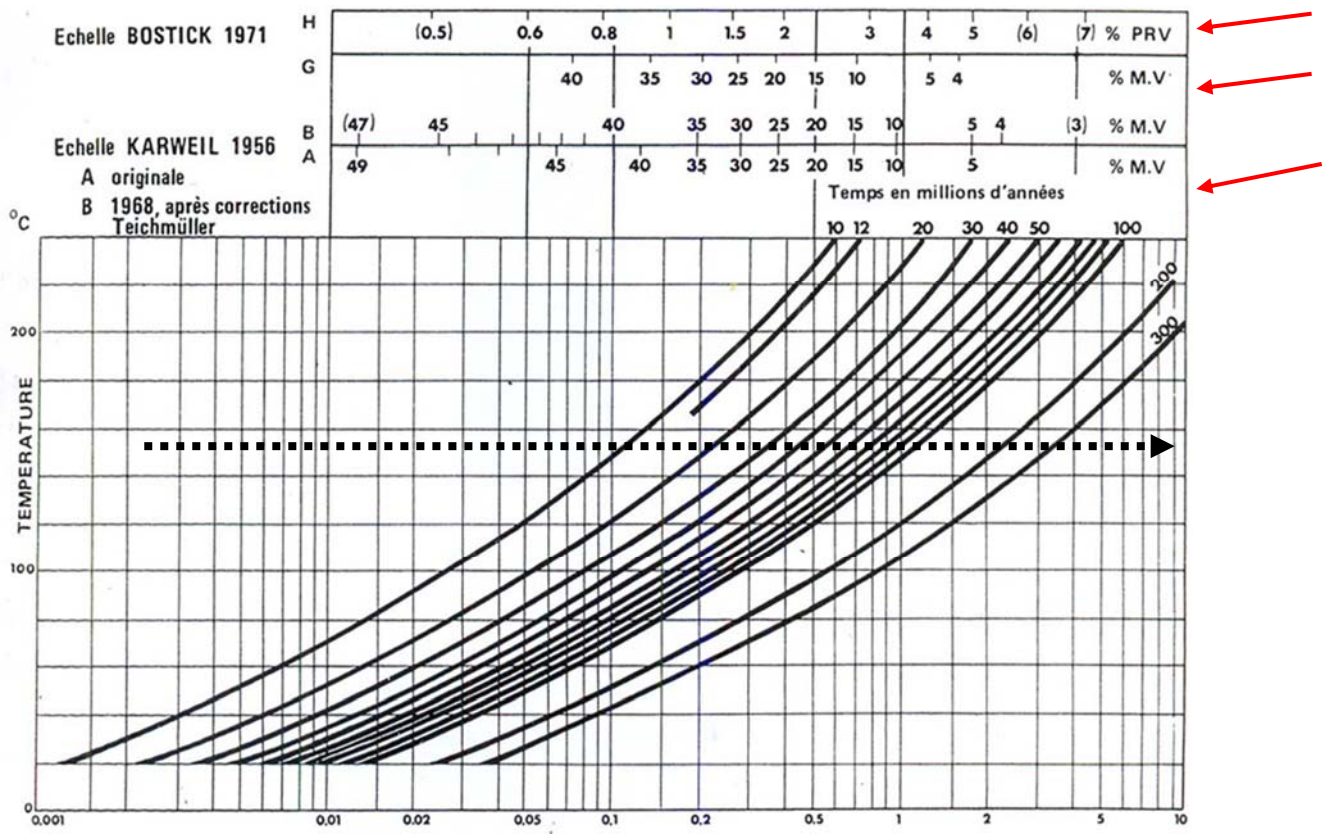


Figure 8. Houillification en fonction de l'âge du charbon. Échelle Z de Karwel (1956).
*Cette échelle fournit un équivalent **relatif** de houillification. Elle permet de passer de la température de réaction au rang du charbon. On remarque que le temps long est un des facteurs déterminants. Corrélativement, la matière volatile **MV** diminue et le pouvoir réfléchissant de la vitrinite **PRV** augmente.*
(Graphique extrait du Mem. 8 P. Robert, Pau, 1985, Elf-Aquitaine).

extrait le carbone de la cellulose et le transforme en charbon.

Depuis le XIX^{e} siècle, on cherche à comprendre ce mécanisme. En 1873, la loi de Hilt exprime que la superposition, donc notion de houillification verticale des charbons, s'accompagne d'une réduction du taux de matières volatiles (MV) avec la profondeur croissante. Le phénomène de carbonification n'était donc appréhendé qu'à travers les variations du taux de matières volatiles, c'est-à-dire de la composition chimique du matériau.

De nouvelles études, notamment dans la plupart des bassins houillers et en laboratoire, ont montré (voir échelle de Karwel, figure 8) que la température et le temps long étaient des facteurs déterminants selon les lieux et le degré de thermicité du bassin. Par contre, selon certains travaux, la pression due à l'enfouissement ne semble pas, en règle générale, jouer un rôle important.

La possibilité de faire en laboratoire, et dans l'industrie, de la carbonification en soumettant des végétaux à des conditions de température de plus en plus élevées, a permis de mieux comprendre les processus de récupération du carbone stocké dans les végétaux, et donc la carbonification.

Le mécanisme de conversion de la cellulose de la paroi en carbone, ainsi que la dégradation de l'hémicellulose, de la lignine et des pectines, est le résultat de la décomposition séparée de chacun de ces composants au cours de la diagenèse du charbon. Ce processus a été observé en laboratoire par les chercheurs Tang et Bacon[6] ; il se déroule en quatre grandes étapes de décomposition thermique dans un domaine de températures bien défini :

- 1, la désorption de l'eau qui a été adsorbée à partir de 150 °C ;
- 2, la perte de l'eau structurale de la cellulose entre 150 et 300 °C, ce qui va libérer le carbone ;
- 3, la rupture des chaînes, ou dépolymérisation, et rupture des liaisons C/O et C/C, entre 240 et 400 °C ;
- 4, l'aromatisation *(7)*, à partir de 400 °C, aboutit à la formation des couches de type graphitique.

Au cours de ce processus en quatre étapes, s'effectue la décomposition chimique de l'hémicellulose entre 200 et 260 °C, puis celle de la cellulose entre 240 et 350 °C, et finalement la dégradation de la lignine entre 280 et 500 °C.

On peut donc avancer que la houillification, ou carbonification, est un processus en partie semblable à celui qui conduit au métamorphisme des minéraux, où le facteur **θ** (température) est prédominant sur le facteur P (pression) mais, pour le rang, le facteur T (temps) joue très probablement un grand rôle. Le lignite en serait la démonstration.

Rappel des principales caractéristiques des trois combustibles classés charbon

• La houille et l'anthracite (rang le plus élevé) s'extraient en veines successives à des profondeurs pouvant aller à plus de 2 500 m (de l'ordre de 400 veines pour 2 000 m dans le bassin franco-westphalien), d'âge long (Carbonifère, environ de – 360 à – 295 Ma), pour des teneurs en carbone de 75 à plus de 90 % pour l'anthracite.
• Le lignite (rang moyen) se forme à relativement faible profondeur à partir de tourbe et d'autres végétaux non tourbéfiés (jusqu'à 450 m en Allemagne), dans un temps d'âge intermédiaire (du Lias, pour les plus anciens, au Tertiaire), pour une teneur en carbone de 65 à 75 %.
• La tourbe, combustible de faible rang, se fossilise à faible profondeur (quelques dizaines de mètres maximum), dans un temps court, de 1 000 à 7 000 ans, pour une teneur en carbone de 50 à 65 %.

Avant de clore ce chapitre sur la formation du charbon, nous dirons un mot sur la combustion des solides riches en carbone. On constate qu'elle se produit essentiellement dans une phase gazeuse, selon deux étapes :
- 1, au moment de l'allumage, gazéification partielle du solide par le comburant *(2)* ;
- 2, combustion des gaz comburants (méthane et hydrogène) obtenus au contact de l'atmosphère sous forme de flamme de diffusion de la chaleur, puis continuité du processus.

Distillation de la houille

Bien que cet article soit dédié au charbon en tant que matière combustible, il peut être intéressant pour le lecteur de donner quelques informations sur l'obtention (non exhaustive), par distillation de la houille, de sous-produits secondaires, utilisables pour divers usages industriels et domestiques.
La distillation de la houille dégage jusqu'à 20 % de son poids en un mélange complexe de gaz incondensables (hydrogène 50/58 %, méthane 25/28 %, oxyde de carbone 8/12 % et 2 % d'eau ammoniacale), et un grand nombre de produits organiques condensables, dont :
- le benzol brut, dont on extrait le benzène, le toluène, le xylène, le solvant naphta ;
- les goudrons classés selon leur température de distillation en : huiles légères, phénoliques, naphtaléniques, huiles lourdes et huile anthracéniques.

Il faut noter que les goudrons sont une source importante de produits organiques de structures cycliques, polycycliques, hétérocycliques, qui ont permis de fonder l'industrie des colorants et des produits pharmaceutiques. De plus, la saccharine, ou « sucre de houille », a été le premier édulcorant historique de remplacement du sucre.
Les produits de distillation dépendent de l'origine de la houille et aussi de la température de distillation :
- à 500/600 °C, « craquent » : goudrons riches en huiles et produits phénoliques ;
- à 1 000/1 300 °C, « craquent » : molécules organiques lourdes, produits gazeux et benzol.
Il reste le coke, ce résidu a reçu de nombreuses utilisations et notamment :
- l'utilisation dans l'industrie sidérurgique comme source de carbone pour réduire l'oxyde de fer ;
- la production de ***gaz de houille.*** Ce gaz a été utilisé pour l'éclairage jusqu'à la fin du XIX^{e} siècle et, plus généralement, comme gaz de ville jusqu'en 1950, époque où il fut remplacé par le gaz naturel.

Le gaz de houille était constitué de 50 % de dihydrogène (H_2), 32 % de méthane (CH_4), 8 % monoxyde de carbone (CO) et, pour les 10 % restant, par divers autres gaz mais en faibles proportions. Pour sa commercialisation, ce gaz est ensuite mélangé à une certaine quantité d'air naturel et d'eau lui conférant un pouvoir calorifique variant entre 4 000 et 5 000 calories/m^3 ; épuré, ce gaz est incolore.

Contextes paléogéographique et climatologique

La houille exploitée actuellement s'est formée principalement pendant le Paléozoïque (ère primaire), plus précisément au Carbonifère/Permien, entre – 360 et – 285 Ma, sous des conditions climatiques équatoriales, sans saisons nettement marquées, en Laurasie et au Gondwana.
Le plein développement de la forêt houillère primitive, composée de diverses associations végétales, généralement luxuriantes selon leur situation (voir figure 11 : paléo-environnement complexe à Graissessac), favorise le développement d'une flore déjà variée, mais qui pour la plupart n'existe plus aujourd'hui, de fougères géantes arborescentes, prêles, etc. qui donneront le charbon, après enfouissement et transformation (figures 10 et 11).

*- À la fin du **Carbonifère**, les continents qui composent l'Amérique du Nord moderne et l'Europe sont entrés en collision avec les continents du sud du Gondwana pour former la moitié occidentale de la Pangée. **La glace a recouvert la plupart de l'hémisphère Sud tandis que le long de l'équateur se formaient les énormes marécages de maturation du charbon**. »* (Traduction, dans l'esprit, de la légende de la carte paléogéographique du Carbonifère, de Christopher R. Scotese).

La figure 9, ci-après, qui n'est pas due à C.R. Scotese *(8)*, situe les principales régions des bassins houillers du Carbonifère qui encadrent l'équateur, ainsi que les régions englacées à cette époque.

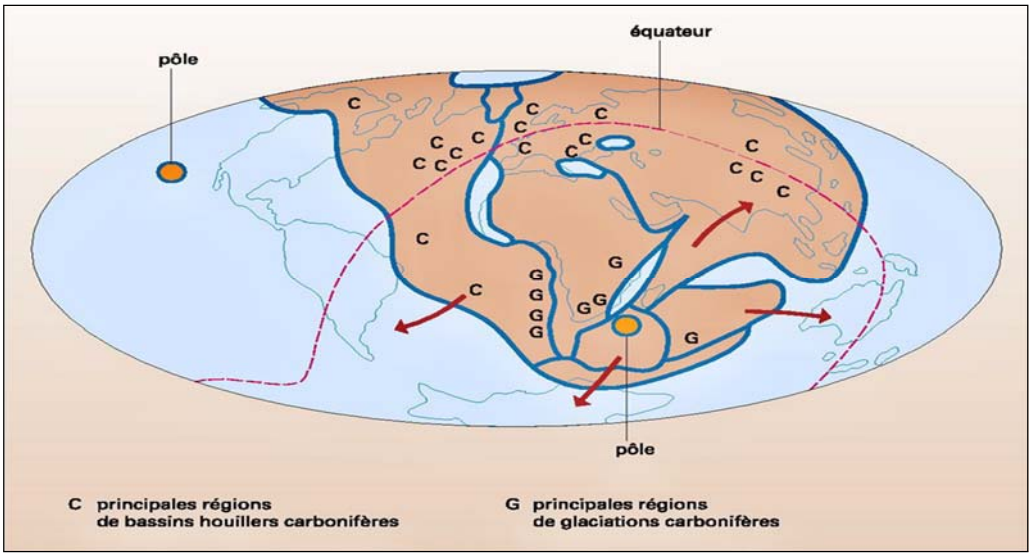


*Figure 9 (image Google). Cette carte synthétise la position de l'équateur (en tiretés) par rapport au groupement des terres émergées à un moment du Paléozoïque. En filigrane, la position actuelle des terres émergées C'est pendant cette période que s'est formé le charbon actuel matérialisé par **C** (bassins carbonifères) le long de cette ligne. La répartition de ces bassins n'est pas uniforme à la surface du globe. On note des concentrations considérables dans des « provinces nommées houillères » : - provinces houillères de la chaîne hercynienne : Appalaches, Angleterre, bassin franco-belge, Ruhr, Silésie, Donetz ; - provinces houillères des formations permiennes : dans la province du Gondwana, en Amérique du Sud, Afrique du Sud, Inde, Chine, Australie et, sur le continent asiatique, la province de l'Angara.*

Paléontologie végétale et animale

Au Protérozoïque (avant l'ère primaire), la vie n'était représentée que par des cyanobactéries (responsables notamment de la construction calcaire des stromatolithes), des bactéries et des algues. Entre – 600 et – 540 Ma, se produit une grande diversification des organismes procaryotes et eucaryotes *(5)*.

Au Paléozoïque (ère primaire), des macro-organismes, Spongiaires, Brachiopodes, Coraux… apparaissent ; puis l'accroissement progressif du taux d'oxygène dans l'atmosphère terrestre entraîne des révolutions biosphériques qui conduiront progressivement aux conditions environnementales de la forêt houillère.

Au début du Silurien, les algues vertes se diversifient et évoluent, ce qui conduira aux premières plantes terrestres dont on connaît des fossiles au Silurien supérieur (Cooksonia).

La colonisation du milieu terrestre a été rendue possible grâce à des innovations permettant de résister à la dessiccation et grâce à la vascularisation des axes (troncs et branches) assurant la circulation de l'eau et des éléments nutritifs.

C'est pendant le Dévonien et le Carbonifère que le monde végétal subaérien s'est vraiment développé, apparition des feuilles (au Dévonien), des graines (au Carbonifère), mais il faudra attendre la fin du Trias pour que les fleurs et les fruits apparaissent avec les Angiospermes.

La forêt houillère (figures 10 et 11), esquissée au Dévonien supérieur et largement développée surtout au Carbonifère supérieur, dans la zone tropicale de l'époque, couvre une partie importante de la Laurasie et de l'Afrique du Nord.

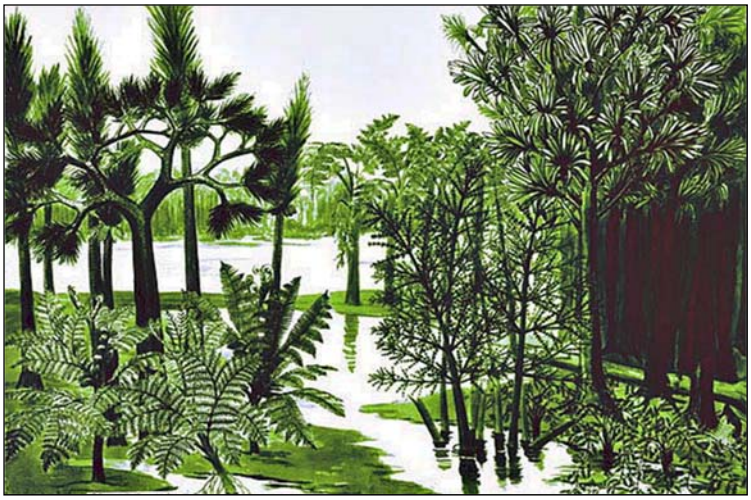


Figure 10. Type de forêt houillère primitive luxuriante, due à la situation d'inondation des plaines côtières qui favorise le développement de fougères géantes arborescentes, de prêles, etc. (Image Wikipedia).

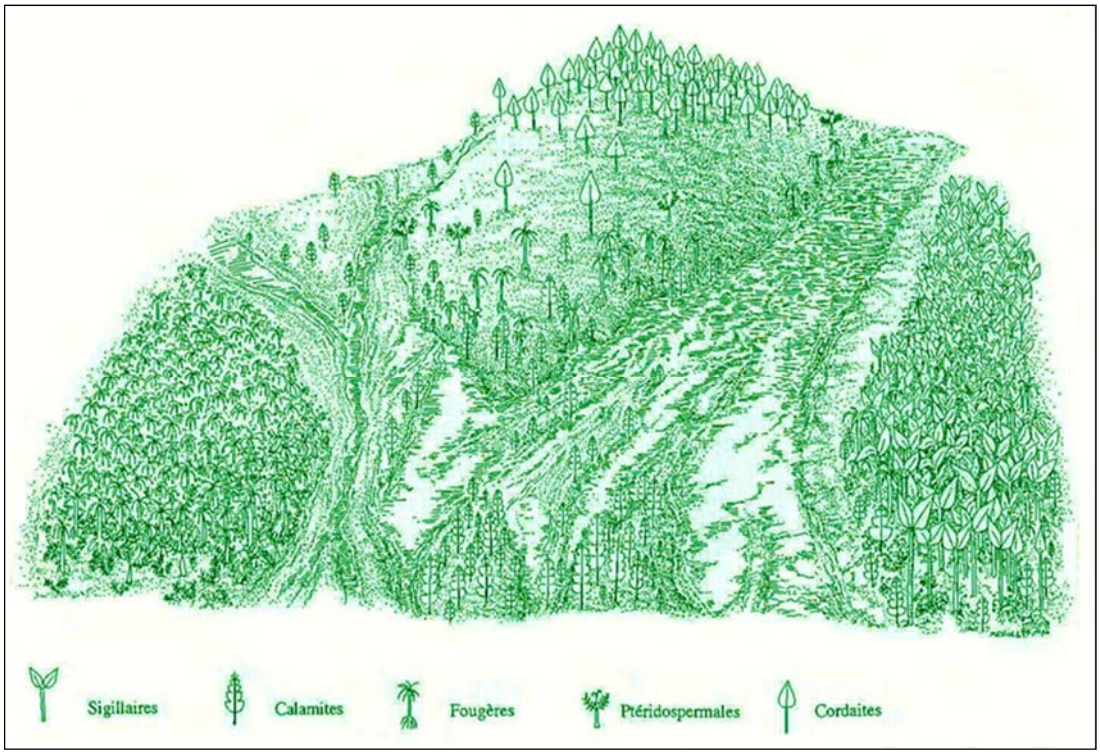


Figure 11. Type d'un paléo-environnement complexe (Graissessac) où coexistent, à faible distance, diverses associations végétales occupant des biotopes différents.
(Source : Galtier J., Paléoflore carbonifère de Graissessac, 1999).

Les plantes fossiles du Carbonifère/Permien

Les empreintes *(9)* de plantes que l'amateur peut encore trouver sur les roches stériles, dans les veines de charbon, nous renseignent sur la phytosociologie des forêts qui en sont l'origine. On constate qu'il y a des variations des espèces dominantes entre chaque grande région houillère en fonction surtout de leur géomorphologie, collines, marais, etc.

Parmi les nombreuses plantes (figures 12 et 13) qui constituèrent les forêts houillères de l'hémisphère Nord à l'époque du Carbonifère, deux catégories peuvent être distinguées. Le premier groupe de plantes se reproduit par des spores, le second possède des organes reproducteurs plus évolués : les ovules.

Les spores sont des éléments de reproduction primitifs. Actuellement, les prêles, les mousses et sphaignes (tourbe), les algues, les fougères et sélaginelles se reproduisent par l'intermédiaire de spores.

L'ovule est l'élément reproducteur femelle, ou gamète, devenant un œuf après fécondation et se développant pour donner naissance à un nouvel individu.

Les Médullosales sont semblables aux fougères mais s'en distinguent par les ovules. Les Cordaitales, Gymnospermes primitifs, étaient aussi dotés d'un élément reproducteur femelle par ovule. Ces deux groupes se sont éteints à la fin de l'ère primaire.

Aperçu de la faune du Carbonifère

À la fin du Dévonien, les premiers tétrapodes semi-aquatiques et semi-terrestres apparaissent, mais le plein épanouissement de la faune se fait au Carbonifère, tant sur la terre que dans les eaux.

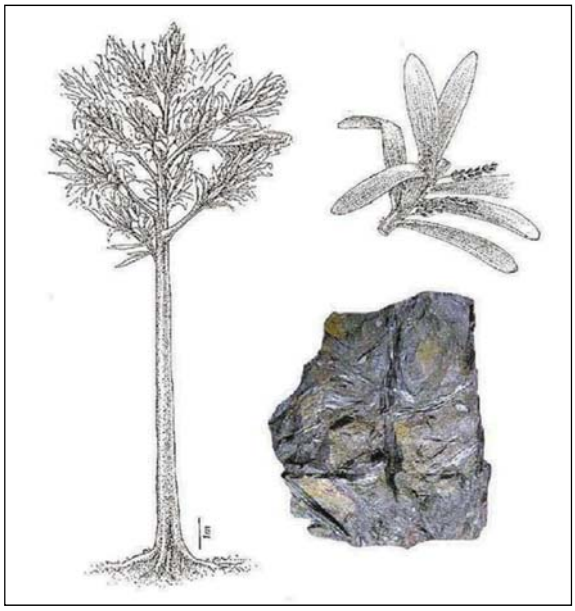


Figure 12. Reconstitution d'une Cordaitale, Graissessac) et empreinte provenant de Ransart (Charleroi, Belgique). Ces végétaux, se reproduisant par ovules, étaient souvent de grande taille, de 30 à 40 m de hauteur (extinction à la fin du Paléozoïque).

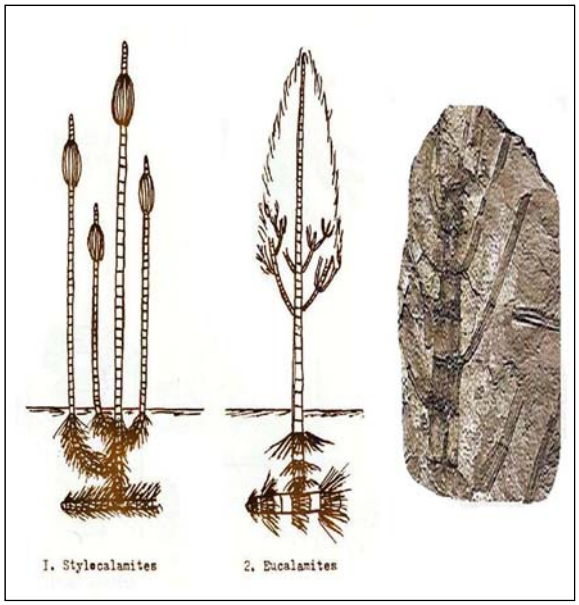


Figure 13. Reconstitution de deux Calamites de ports différents. L'empreinte atteste l'espèce Eucalamite. Ce végétal arborescent formait des arbres d'environ 10 m de hauteur et d'un mètre de diamètre, et vivait dans un biotope marécageux. Il se reproduisait par spores. Nos prèles actuelles sont ses descendantes possibles. www.fossiliraptor.be/carboniferesuperieur.htm

La vie marine est très riche

Les premiers tétrapodes aquatiques apparaissent. Les Poissons cuirassés disparaissent (extinction biologique du Dévonien), remplacés par les Ganoïdes et les Sélaciens. Les Foraminifères sont nombreux, Saccamina, Fusulines. Les Polypiers appartiennent aux groupes des Tabulés, des Tétracoralliaires et des Axophyllidés. Les Échinodermes sont des Cystides, Blastoïdes et de nombreux Oursins. Les Brachiopodes redeviennent abondants, Spirifers et Productus. Les Mollusques abondent, Gastéropodes, Bivalves, Céphalopodes [Nautiles et Ammonitidés (Goniatites)]. Les Crustacés ne consistent plus qu'en quelques genres de Trilobites, qui ont complètement disparu au Permien, et en Décapodes Macroures (à queue développée, homards et écrevisses).

La vie terrestre se développe

Avec l'extension des forêts, ainsi qu'avec la température tropicale humide, se développent de nombreuses espèces d'Arthropodes dont certains de 1,5 m de long. Parmi les insectes, on trouve des Thysanoures, des Névroptères, dont Meganeura, de 0,70 m d'envergure, des Orthoptères et des Homoptères, des Blattes, des Phasmes et des Sauterelles.

Les tétrapodes aquatiques restent inféodés à l'eau jusqu'à ce que leur œuf, espèce de boule de gelée flottant dans l'eau, soit doté d'une coquille. Il sera alors pondu sur terre permettant à l'animal de quitter le milieu aqueux. Ce sera l'avènement des Reptiles.

Au Permien, juste après le Carbonifère terminal, apparaît un étrange reptile, le *Dimétrodon*, qui est doté d'une sorte de « voilure » de dimensions imposantes, sur son dos (figure 14).

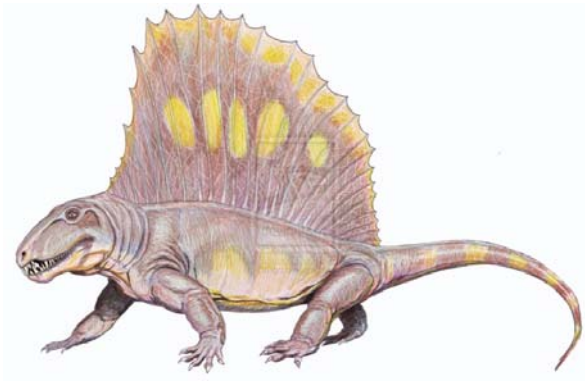


Figure 14. Reconstitution de Dimetrodon angelensis, *un grand reptile mammalien carnivore du Permien. (Dessin : http://dibgd.art.deviantart.com).*

Notes

(1) Kérogène : dans la couche sédimentaire, en l'absence de dioxygène (O_2), des bactéries anaérobies extraient de la matière organique l'oxygène et l'azote dont elles ont besoin. Le résidu est appelé « kérogène » : c'est un mélange principalement constitué de carbone et d'hydrogène. Cette activité constitue la dernière partie biologique du cycle de transformation.

(2) Comburant : corps chimique qui se combine avec un combustible, dans une réaction de combustion.

(3) Marie Carmichael Stopes (1880-1958) était une paléobotaniste écossaise. En plus de sa contribution à l'étude des premiers angiospermes, son nom est attaché au charbon par sa contribution à la définition de la nature et à la terminologie des lithotypes aujourd'hui redéfinis et appelés macéraux.

(4) Le microscope métallographique optique est conçu pour observer les matériaux par focalisation d'un faisceau optique sur un échantillon plan et réfléchissant. L'observation se fait par l'intermédiaire d'un objectif et d'une source lumineuse focalisée par un condenseur, rendu sensiblement parallèle à l'axe optique du microscope au moyen d'un illuminateur.

Ce type de microscope réfléchissant se différencie donc nettement du microscope polarisant.

(5) Les eucaryotes correspondent aux organismes uni- ou multicellulaires qui possèdent un vrai noyau : animaux, plantes et champignons, ainsi que les protistes. Le groupe des protistes rassemble toutes les espèces unicellulaires à noyau distinct. On y distingue notamment les Protophytes (végétal unicellulaire), appartenant au règne végétal, possédant des chloroplastes et réalisant la photosynthèse. Par opposition, simplifiée, les procaryotes sont dépourvus de noyau.

(6) MM. Tang et Roger Bacon : *Carbonization of cellulose fibers, Carbon 2*, 211 (1964).
(7) Le terme d'« aromatique » a été donné à ces molécules avant la compréhension du phénomène physique d'aromaticité. Ces molécules ont une odeur douce.
Le terme d'aromatisation s'applique à une structure kérogénique. Selon la règle de Hückel, dans cette structure, les atomes sont liés par un cycle possédant une alternance de liaisons simple et double, que nous ne définirons pas. Il s'agit donc ici de créer ce type de liaison. Les liaisons de ces deux types sont générales.
(8) Christopher R. Scotese est professeur de géologie à l'université du Texas, à Arlington. Notre collègue Jacky Rousselle et moi-même avons eu le plaisir de le rencontrer à l'Académie des Sciences, à Paris, lors du colloque de Paléogéographie qui s'y est tenu les 8 et 9 mars 2004.
(9) La plupart des empreintes montrées dans les musées proviennent directement des mines. Elles ont été récoltées au moment de l'extraction, ce qui explique les beaux spécimens que l'on peut y voir.

Ndlr. Le prix « Paul Grenier » 2013 a été remis, par le Président de la SAGA, à l'issue de l'Assemblée Générale du 2 février 2013, à notre collègue Michel Gastou, administrateur de la SAGA, pour son remarquable travail, intitulé : ***Le charbon, matière combustible****. Celui-ci est disponible à la bibliothèque de la SAGA. L'ouvrage est également en vente auprès de l'auteur au prix de 15 €.*

GÉOFESTIVAL 2017

Le Géofestival 2017 est un événement festif, ludique et culturel pour tous les publics, qui se déroulera, du 16 septembre au 15 octobre 2017, à proximité de Paris, sur le territoire de la Réserve de Biosphère de Fontainebleau et du Gâtinais.

Cette manifestation propose de voir autrement un territoire en reliant la biodiversité, la géologie et les activités humaines ; c'est aussi l'occasion de fédérer tous les acteurs concernés sur ce territoire.

La réserve, qui s'étend sur les deux départements franciliens de l'Essonne et de la Seine-et-Marne, intègre le massif forestier de Fontainebleau et le Parc Naturel Régional du Gâtinais français.

Cette réserve de biosphère est classée par l'UNESCO dans le cadre du programme *Man and Biosphere* (MAB). Ce territoire présente des atouts exceptionnels que nous aimerions vous faire découvrir.

Vous trouverez toutes les informations complémentaires sur le site :
http://www.geofestival.org/fg/doku.php

GÉOLOGIE SUR LE TOUR DE FRANCE

Patrick De Wever, géologue, professeur du Muséum, département Histoire de la Terre.
UMR 7207, *Centre de Recherche sur la Paléobiodiversité et les Paléoenvironnements.*

À chaque étape, un commentaire géologique des paysages traversés

Beaucoup de téléspectateurs, environ un tiers, regarderaient le Tour de France cycliste pour les paysages plus que pour la course, ce qui explique qu'un commentateur dédié présente les châteaux et les églises. Dans cet état d'esprit, il a été proposé d'insérer un commentaire géologique qui explique le paysage traversé. Et, cette année, un document de 93 pages relevant des éléments de géologie le long du parcours qu'emprunte le Tour de France a été transmis à Franck Ferrand*, qui relaie très bien comme commentateur des étapes. Il l'insère dans ses parties historiques, n'hésitant pas à parler du « stratotype de l'Albien », par exemple. Ce document a été établi par le Muséum national d'Histoire naturelle, avec la participation de collègues des mondes académiques (ENS, Univ. Savoie Mont-Blanc, etc.) et d'associations (GeolVal, AGA, AGSO, Géoparcs, etc.).

L'accumulation de ces « petites » touches permettra de faire prendre conscience que la nature est un tout, que la géodiversité est non seulement le socle de la biodiversité mais aussi le fondement de nos paysages et de l'aménagement du territoire.

Le bilan

La géologie n'est pas apparue plaquée artificiellement mais bien intégrée. Bien entendu, quelques points remarquables de géologie n'ont pas été mentionnés sur certaines portions d'étapes car il se passait des événements de course importants, alors… la priorité restait à la course.

Outre ces mentions en direct pendant la course, des relais ont été effectués sur des médias sociaux : blogs (ex. : GéolE), sites web, etc. Parmi ces sites, on peut retenir le site web de l'ENS Lyon, qui mettait notamment à disposition du public le fascicule avec des informations complémentaires pour les enseignants. On a aussi noté celui de la SGF, de la SGN, de l'AGSO, de l'AGBP, et en particulier de GeolVal. En effet, les retransmissions où de la géologie était mentionnée ont été sélectionnées par un membre de GeolVal qui l'a mis à disposition de tous et reste accessible sur leur site.