04 77 43 83 26
musee-mine.saint-etienne.fr

Saint-Étienne
ville de
L'expérience design

PUITS COURIOT
PARC-MUSÉE DE LA MINE
SAINT-ÉTIENNE

Dossier enseignant

C1 Flore carbonifère du département de la Loire et du Centre de la France, 1873, Cyrille Grand Eury

Le charbon, de la matière organique à la source d'énergie

Lycée

Service médiation – Puits Couriot / Parc-Musée de la Mine – 2017

Présentation de l'animation

Vous avez réservé pour vos élèves une **visite thématique** autour de la **formation du charbon**. Construite à partir des programmes de **Sciences et Vie de la Terre** pour les **secondes** et **premières scientifique**, cette animation propose une approche croisée : **étude du vivant**, **géologie**, **enjeux climatiques et environnementaux actuels**.

Objectifs de l'animation

Pour les classes de seconde :

- Appréhender la Terre à l'époque du Carbonifère et comprendre les mécanismes qui ont conduit à la formation du charbon il y a 300 millions d'années.
- Comprendre que les êtres vivants interviennent pour partie dans le cycle du carbone organique (rôle de la photosynthèse et activité industrielle).
- Comprendre les enjeux liés à l'activité humaine sur le cycle du carbone organique.

Classes de première S :

- Appréhender les mécanismes de formation d'un grand bassin houiller continental (tectonique extensive, caractéristiques morphostructurales et paléoenvironnementales).
- Comprendre comment les études menées sur les bassins houillers au XIXe siècle ont fournis par la suite des éléments qui ont permis à Alfred Wegener de développer son modèle de dérive continentale ;
- Saisir l'importance que peuvent revêtir les travaux paléobotaniques pour la reconstitution des climats, les environnements et l'histoire de la Terre.

Déroulement de l'animation

L'animation d'**1h30** se déroule en 2 temps :

- Un **diaporama commenté** en salle d'animation qui présente la période Carbonifère et les mécanismes de formation du charbon.
  35 élèves au maximum visionneront en même temps le diaporama pour des questions de confort.

- Un **parcours** dans les espaces du musée, *par demi-groupes (15 élèves environ)*. **Visite des espaces d'exposition, muséographiques et patrimoniaux** afin de présenter des familles de végétaux anciens, des fossiles et de la documentation scientifique (illustrations paléobotaniques de Grand'Eury). Le parcours s'organise autour d'une découverte des collections du musée (extraits d'atlas minier, grand plan relief de l'exposition universelle de 1889, coupes de puits, maquettes) ainsi que d'une lecture géologique du paysage et de l'observation des végétaux actuels proches parents de ceux du Carbonifère (collections végétales Puits Couriot/Parc-Musée de la Mine et Muséum national d'histoire naturelle-Paris).

Cette animation de comprend pas la descente dans la galerie de mine reconstituée.

Pour plus d'informations sur le contenu de l'animation ou les collections végétales ;
Rodolphe HERNANDEZ – Médiateur référent SVT
04 77 43 83 36 – rodolphe.hernandez@saint-etienne.fr

Présentation du livret

Ce livret est un outil vous permettant de préparer votre venue au musée, d'approfondir l'animation en classe et d'avoir accès à des articles scientifiques en liens dans les notes de bas de page).

I. Approche géologique et paléoenvironnementale

1. L'étage géologique de Saint-Étienne
    - Les premières observations
    - L'étude de la flore fossile du bassin de la Loire
    - Quand Saint-Étienne donne son nom à un étage géologique : le Stéphanien
    - Vers une nouvelle représentation de la région au Carbonifère
2. Le Carbonifère, une période froide
3. Le pic de O_2, le rôle du règne végétal

II. Approche du vivant et de la biodiversité

1. Paysage du présent, paysage du passé
2. Un jardin stéphanien

III. Glossaire

IV. Sources, bibliographie et liens internet

I- Approche géologique et paléoenvironnementale

1. L'étage géologique de Saint-Étienne

S'étendant sur environ 200 Km^2 aux marges orientales du Massif Central, le bassin de la Loire forme une structure géologique remarquable, témoinagnage direct de plusieurs millions d'années d'histoire de la Terre. Les couches de charbon y sont *puissantes* (certaines pouvant atteindre par endroit plus de dix mètres d'épaisseur) et affleurent souvent à flanc de coteau. La région de Saint-Étienne fit partie des premières régions en Europe à connaître une exploitation pré-industrielle de la houille, attestée par les sources historiques à la fin du XIIIe siècle... et vraisemblablement plus ancienne encore.

Les premières observations

Dès le XVIIIe siècle, la littérature scientifique des Lumières témoigne des interrogations récurrentes sur la nature et l'origine des gisements du *charbon de terre.* Les couches de charbon affleurantes de la région permettent à Antoine de Jussieu (1686-1758) de recueillir des *impressions de plantes* à Saint-Chamond[1] et à Buffon (1707-1788) de réaliser des observations sur les couches de charbon de terre de Rive-de-Gier[2].

A la suite de la loi de 1810, qui redéfinissait et réorganisait les concessions minières, Louis-Antoine Beaunier (1779-1835) fut chargé de dresser une première topographie souterraine du bassin houiller de la Loire. Vers 1820, la description qu'Alexandre Brongniart (1770- 1847) fit des empreintes de végétaux de la carrière du Treuil (actuelle rue Desjoyaux, quartier de la plaine Achille-Châteaucreux)[3] fut largement commentée par la communauté scientifique, y compris à l'étranger. Dès **1822**, le terme « **Carbonifère** » apparaît dans la littérature scientifique[4], il est utilisé au départ pour le contexte géologique de la Grande-Bretagne.

L'esquisse réalisée vers 1821 par le fils d'Alexandre Brongniart, Adolphe,
fut largement reprise dans les ouvrages de sciences naturelles du XIXe siècle.

1 A. DE JUSSIEU, Examen des causes des Impressions des Plantes marquées sur certaine Pierres des environs de Saint-Chaumont dans le Lyonnais. Mém. de l'Acad . des Sciences, 12 novembre 1718.

2 G.-L. LECLERC BUFFON, Oeuvres complètes T.5., p. *398.* (Ed. 1828).

3 Al. BRONGNIART, Notice sur les végétaux traversant les couches du terrain houiller, Annales des Mines, Paris, 1821.

4 CONYBEARE & PHILIPS (1822)

Dans le courant du XIXe siècle, le géologue anglais Charles Lyell (1770-1875) posait les principes fondamentaux de la géologie et son ami Charles Darwin (1809-1882) avouait qu'il ne saurait reposer en paix sans que les mystères entourant la formation du charbon n'aient été élucidés[5]. Les travaux de ce dernier sur l'évolution des espèces alimentait les controverses au sein d'une communauté scientifique partagée entre convictions religieuses et observations scientifiques objectives. Alors que l'histoire de la Terre et les mécanismes d'évolution des êtres vivants commençaient à être esquissés, la végétation disparue des bassins houillers apparaissaient soudainement comme une pièce importante du puzzle.

L'étude de la flore fossile du bassin de la Loire

Les travaux paléobotaniques de François Cyrille Grand'Eury (1839-1917) apportèrent un éclairage nouveau. L'étude systématique de la flore fossile du bassin de la Loire qu'il réalisa entre 1863 et 1875, publiée dans les Mémoires de l'Académie des Sciences en 1877 et pour laquelle il reçut la Légion d'honneur, fut une véritable révolution scientifique en France en termes de prospection minière. Dans la lignée des travaux de Brongniart, il présente une étude stratigraphique appliquée aux gisements de charbon lui permettant de proposer une chronologie relative de l'ensemble des couches du bassin.

En identifiant la flore qui avait donné naissance aux couches, en recensant systématiquement l'apparition et la disparition de certaines espèces, il parvint à reconstituer les écosystèmes disparus du Carbonifère. Il était désormais possible de connaître l'âge relatif des couches de charbon et donc de déterminer la position d'un gisement providentiel.

Grand'Eury proposa un découpage du bassin en cinq étages successifs communs aux bassins houillers continentaux français, chacun présentant une flore spécifique :

1. L'étage de Rive-de-Gier caractérisé par une flore Westphalienne (*lycophytes* arborescents communs au bassin de la Loire et à celui de la Rhur en Allemagne)
2. L'étage correspondant aux mines des Cévennes
3. L'étage des *cordaïtes* (une espèce d'arbres qu'il identifie et propose comme les prédécesseurs des conifères)
4. L'étage des *filicacées* (les fougères)
5. L'étage des *calamodendrés*
6. L'étage ambigu dit *Autuno-Stephanien* regroupant les terrains les plus récents du bassin, fortement érodés sauf en quelques points (Villeboeuf, Bellevue), qui marquerait la fin du Carbonifère et le début du Permien.

François Cyrille GRAND'EURY (1839-1917)

Quand Saint-Étienne donne son nom à un étage géologique : le Stéphanien

Le terme « stéphanien » apparaît la première fois en 1878 dans une note manuscrite de Karl Mayer-Eymar. En 1893, Munier-Chalmas et Lapparent le définissaient ainsi : « *L'étage Stéphanien correspond à celui de l'Ouralien, s'appliquera aux assises renfermant les flores houillères qui se succèdent depuis l'assise de Rive-de-Gier jusqu'à celle du bois d'Avaize inclusivement de manière à comprendre tous les bassins houillers de l'Est du Plateau Central.* ».

5« *I am particulary glad you have been at the Coal : I have often since you went gone on maundering at the subject, & I shall never rest easy in Down church-yard, without the problem be solved by someone before I die* » Correspondance de Charles Darwin, 10 Mai 1848.

Les six étages de Grand'Eury furent regroupés deux par deux en Stéphanien inférieur, moyen et supérieur[6], renommés ensuite Stéphanien A[7], B et C[8]. Cette classification fut adoptée à l'occasion des deux premiers Congrès de Stratigraphie du Carbonifère à Heerlen en 1927 et 1931.
Malgré cette reconnaissance internationale, entre 1930 et 1950, les recherches géologiques sur le bassin semblent piétiner, la logique d'exploitation l'emportant sur la recherche scientifique[9]. Ainsi, si les subdivisions du Stéphanien étaient reconnues, la datation des limites inférieures et supérieures de l'étage avec le Westphalien (Carbonifère)[10] et l'Autunien (Permien) posaient problème :

- pour la limite supérieure, des travaux menés sur l'*étage ambigu Autuno-Stéphanien* tentèrent de définir un Stéphanien D[11] qui ne fut jamais validé ;
- pour la limite inférieure, l'étude poussée d'une série du Nord de l'Espagne semblait indiquer que la transition Westphalien/Stéphanien, telle qu'elle apparaissait dans la séquence du bassin de Sarre et Lorraine, comportait une lacune et qu'un long intervalle s'était écoulé entre les deux périodes[12]. Ces conclusions amenèrent à introduire un nouvel étage dit « Cantabrien » entre Westphalien D et Stéphanien A englobant l'assise de Rive-de-Gier[13,14].

En 1978, des anomalies révélées dans la Loire par une campagne de sondages (effectués entre 1955 et 1961) conduisent à l'élaboration d'une théorie proposant que le bassin ait été l'objet d'un charriage de grande ampleur. Ce modèle, d'une extrême complexité, et qui par la suite ne résista pas à l'analyse tectonique[15], jetait un premier doute sur la chronologie de la formation du bassin.

Ce fut essentiellement l'absence de représentativité des faciès continentaux qui entraîna finalement la remise en cause progressive du Stéphanien en tant que stratotype universel[16]. Ainsi, le Stéphanien A fut définitivement raccroché au étages régionaux des stratotypes espagnols maritimes Cantabrien et Barruélien en 1984[17], malgré l'absence de lycophytes arborescents en Espagne bien présents dans les bassin d'Europe et d'Amérique.

TABLEAU 6. — Corrélations des subdivisions chrnostratigraphiques majeures du Carbonifère supérieur (d'après RUI & ZHANG, 1990).

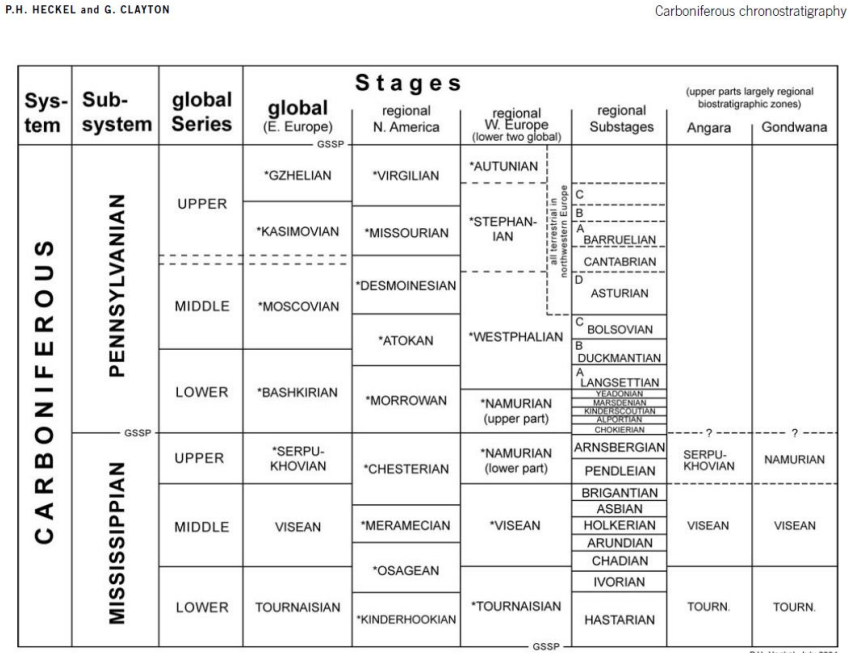
TABLE 6. — Correlations for the Carboniferous main chronostratigraphic subdivisions (after RUI & ZHANG, 1990).

CHINE	JAPON	RUSSIE	EUROPE OCCIDENTALE		AMÉRIQUE DU NORD
MAPINGIEN	SASKAMOTOZAWIEN	ASSELIEN	AUTUNIEN		WOLFCAMPIEN
XIAODUSHANIEN	HIKAWIEN	GZHELIEN	STÉ PHA NIEN	D C B (A) BARRUELIEN CANTABRIEN	VIRGILIEN
		KASIMOVIEN			MISSOURIEN

A ce jour, les séries du Stéphanien B et C n'ont pu qu'être associées par défaut au Kasimovien ainsi qu'au Gzhélien (étages de la chronostratigraphie russe contemporains du Stéphanien) promus au rang de références mondiales pour les terrains du Carbonifère supérieur, mais dont le point stratotypique resterait encore à définir. L'abandon du Stéphanien en tant que stratotype au profit de faciès marins ne régla que très superficiellement la question de la datation des terrains carbonifères en Europe et en Amérique, nombre d'entre eux étant de vastes bassins limniques continentaux. L'histoire de leur formation apparaît désormais en

6 BERTRAND (1918, 1928, 1937), BERTRAND & PRUVOST (1937), CORSIN (1950).
7 PRUVOST & CORSIN (1949).
8 JONGMANS & PRUVOST (1950).
9 « L'École des mines de Saint-Étienne ne développe plus la recherche dans ce secteur et les universités n'ont pas encore prit le relai. Le travail d'étude laissé aux ingénieurs des mines des Compagnies, est évidement plus mené dans une perspective d'exploitation que d'acquisition de connaissances intellectuelles », H. JACQUEMIN, « Le bassin houiller de Rive-de-Gier et Saint-Étienne » *in* Bassin Houiller de la Loire Penser un territoire, Publ. Ville de Saint-Étienne, 1997.
10 La limite entre le Westphalien et le Stéphanien restaient un problème récurent depuis que les deux étages avaient été adoptés en 1927. Nulle part ils n'apparaissent conjointement à l'exception du bassin de Sarre et Lorraine. Ce contact (à la base du conglomérat de Holz) même inconfortable fut largement utilisé pour définir la limite entre les deux périodes (Jongmans & Gothan, 1937).
11 DOUBINGER (1956)
12 WAGNER (1969)
13 GEORGE & WAGNER (1972)
14 BOUROZ *et al.* (1972)
15 BECQ-GIRAUDON (1992)
16 HECKEL (2004), HECKEL & CLAYTON (2006)
17 WAGNER (1984)

marge de la chronostatigraphie de référence. Ainsi, le terme Stéphanien reste couramment employé par les géologues européens pour les bassin houillers continentaux présentant la transition entre Carbonifère et Permien.



Subdivisions officielles du Carbonifère ratifiées par la Commission Startigraphique internationale (2006). Le Stéphanien y figure désormais uniquement à titre d'étage régional d'Europe de l'Ouest.

Vers une nouvelle représentation de la région au Carbonifère

La nature même de la flore fossile du bassin, marquée par la continentalité, souleva de nombreuses interrogations, la flore caractéristique du Permien semblant y apparaître précocement au milieu du cortège floristique typique du Carbonifère[18].

Les travaux paléontologiques menés dans les années 1980-1990 s'attachèrent donc à caractériser la flore commune aux bassins houillers continentaux. Dans la Loire, ces études permirent de mettre en lumière une association originale d'espèces hygrophiles et mésoxérophiles témoignant de la coexistence de zones humides caractéristiques du Carbonifère et de zones plus sèches préfigurant le Permien. Cette hétérogénéité des écosystèmes esquisse un paysage assez éloigné de la vision classique d'une forêt équatoriale chaude et humide, et apparaît comme la conséquence d'une évolution globale du climat à la fin du Carbonifère. Au climat chaud et humide du Carbonifère inférieur aurait succédé un climat plus froid et sec dont les variations saisonnières auraient été marquées par des épisodes de mousson et de sécheresse expliquant à la fois la répartition des espèces végétales et leur évolution : baisse notable du nombre d'espèces, adaptation au froid et besoins en eau plus modestes (réduction de la surface foliaire).

D'autre part, la découverte dans les années 1990 de traces périglaciaires dans le bassin de la Loire ont conduit les géologues à proposer que le bassin ait été situé à l'époque à 4 500-5 000 m d'altitude. Formé à la suite de l'effondrement de la chaîne Hercynienne, le bassin prend l'aspect d'un « *altiplano hercynien* » dominé par une chaine de montagne de type himalayen où l'altitude élevée et la présence de glaciers auraient fortement nuancé le climat équatorial de la région. L'élargissement et le comblement progressif par les dépôts sédimentaires aurait aboutie à la formation d'une plaine lacustre.

18 J. DOUBINGER et C. ALVAREZ-RAMIS, « *Sur la présence de deux biotopes à phytocénoses différentes au sommet de la série stéphanienne de Saint-Etienne* » in C.R. du 105e congrès national des sociétés savantes, 1980.

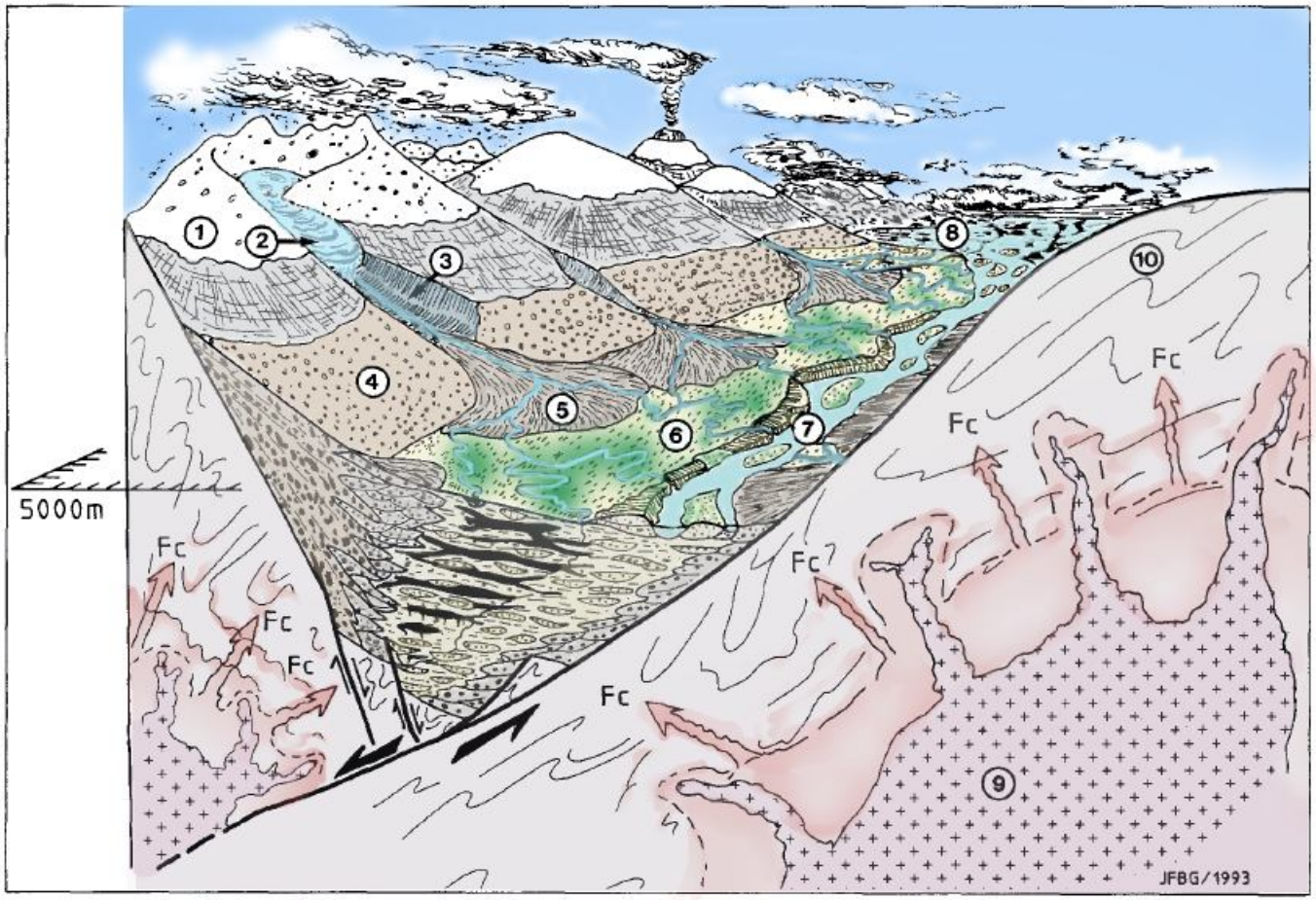


Fig. 16. 3D-diagram of a theoretical Stephanian–Autunian basin. *1* = permanent snow; *2* = mountain glaciers; *3* = torrential valley; *4* = stratified slope deposits; *5* = proximal upper fan; *6* = palustrine flood plain; *7* = main river; *8* = distal lacustrine flood plain; *9* = granites; *10* = metamorphic rocks; *Fc* = caloric flow. Arrows indicate normal fault displacement. Deposits related to environments 1–7, and to environment 8, are corresponding to "Stephanian" and "Autunian" facies, respectively.

Modélisation théorique d'un bassin Autuno-Stephanien (F. BECQ-GIRAUDON *et al.*, 1993[19])

LEGENDE

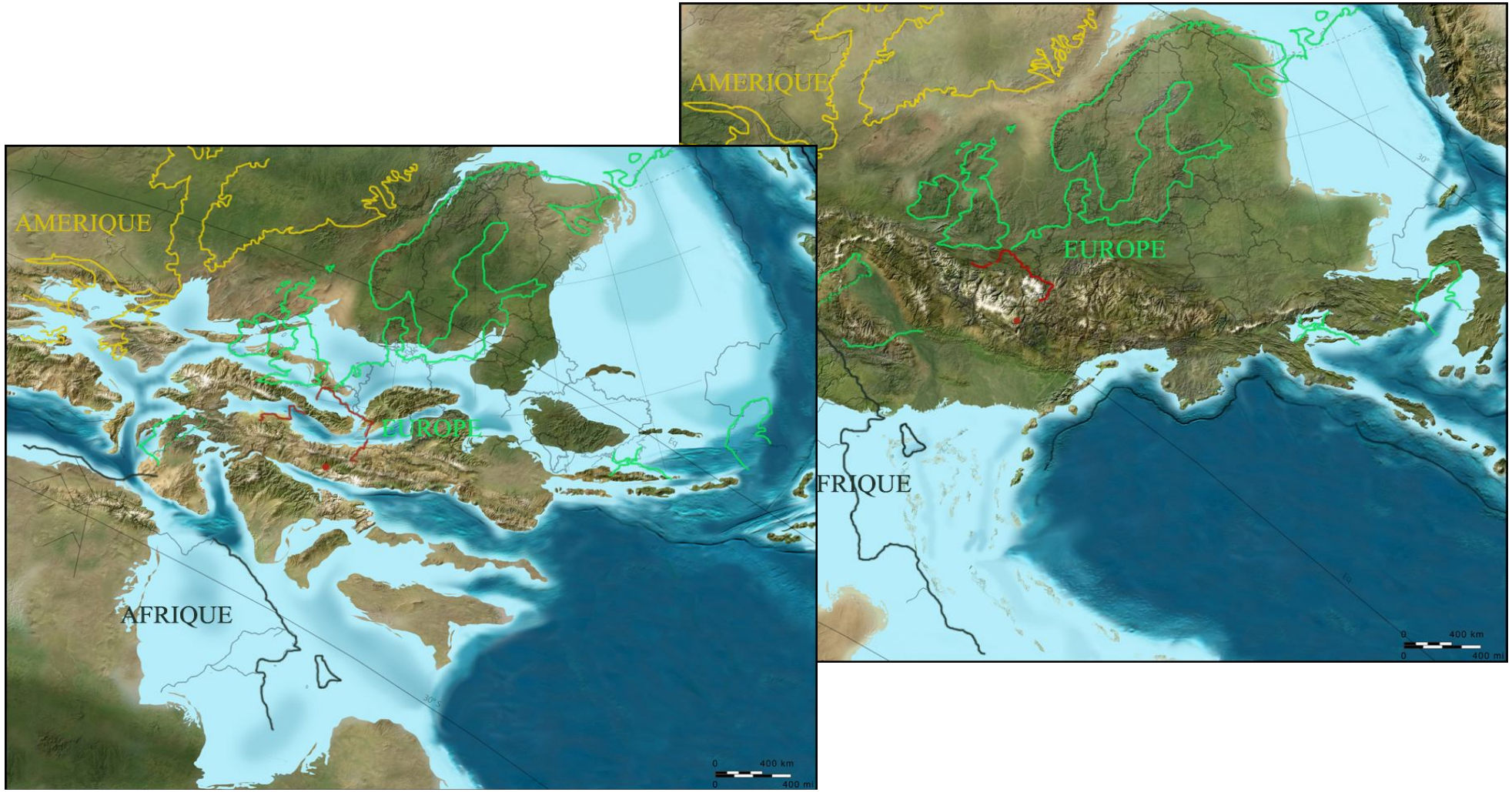
Faciès stéphanien
1- Etage nival
2- Glacier
3- Vallée torrentielle
4- Dépôts de pente stratifiés
5- Cône de déjection
6- Plaine inondable
7- Lit du fleuve

Faciès Autunien
8- Plaine lacustre

Socle du bassin
9- Granites
10-Roches métamorphique
Fc-Flux de chaleur

N.B. : La question de l'altitude du massif hercynien est toujours discutée, certains travaux proposent des altitudes inférieures pour le massif hercynien (2 000m)[20]. Cependant, les études récentes menées sur les Rocheuses confirment l'existence de conditions glaciaires et périglaciaires à la fin du Carbonifère et viendraient confirmer les observations faites dans la Loire [21,22].

19 J.-F. BECQ-GIRAUDON *et al.*, *Hercynian high-altitude phenomena in the French Massif Central tectonic implication*, 1996.
20 M. ROSCHER & J. W. SCHNEIDER, *Permo-Carboniferous climate : Early Pennsylvanian to Late Permian climate development of central Europe in a regional and global context*. (2006).
21 S.G. SOREGHAN, *Reconciling Indicators of Cold and Warmth in Late Palaeozoic Tropical Pangea : High-magnitude Glacial-Interglacial Climate Change*, Geol. Soc. Am. Ann. Conv. Abstr. Prog., vol. 38, p. 36.
22 S.G. SOREGHAN *et al.*, *Upland Glaciation in Tropical Pangea : Geologic Evidence and Implication for Late Paleozoic Climate Modeling*, 2014.

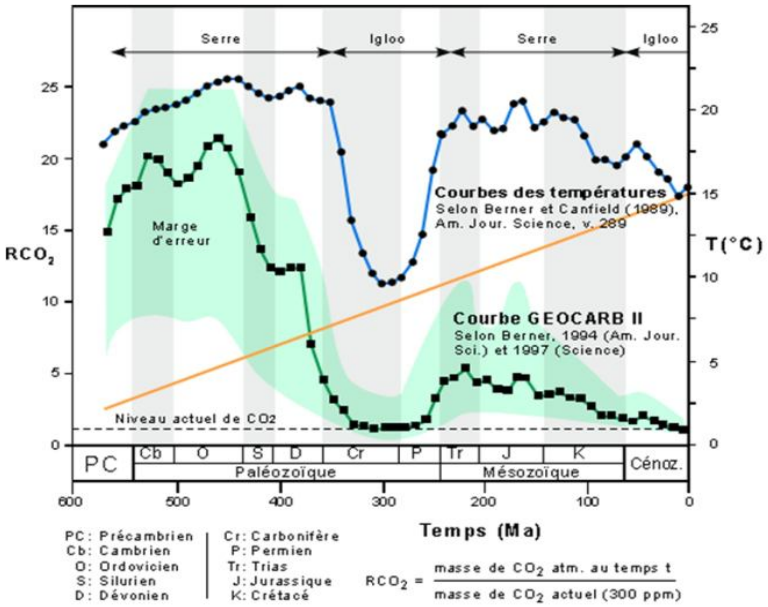


Paléogéographie régionale de l'Europe au Carbonifère[23] :
Au fur et à mesure de l'orogenèse hercynienne l'Europe, constituée au départ d'une série série d'îles (au Carbonifère inférieur, à droite) devient progressivement un milieu continental (au Carbonifère supérieur, à gauche). Les anciens faciès marins ont probablement été effacés par le métamorphisme et le bassin rajeuni par le soulèvement tectonique.

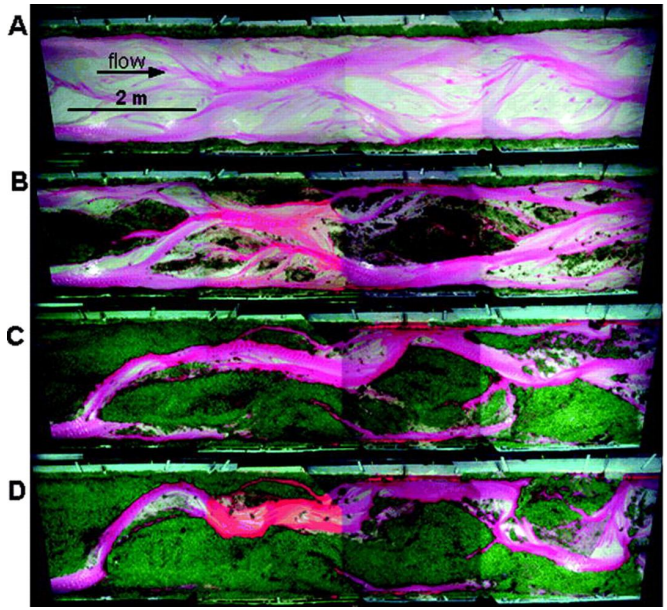
23 D'après les travaux de Ron Bailey *European paleogeography* (tous droits réservés). http://cpgeosystems.com/europaleogeography.html

2. Le Carbonifère, une période froide

Le climat de la Terre est intimement lié à la composition de son atmosphère. Le dioxyde de carbone (CO_2) est l'un des principaux gaz responsables de l'effet de serre, la variation de sa concentration influe directement sur la température globale et le climat à l'échelle du globe.



Estimations de la végétation du CO2 atmosphérique et de la température moyenne globale depuis 600 Ma.
(Source Robert A. BERNER, 1994)



Modélisation analogique mettant en évidence l'influence de la végétation sur un réseau hydrographique (ici grâce à des pousses d'alfalfa).
(source : M. TAL & C. PAOLA, 2007, tous droits réservés)

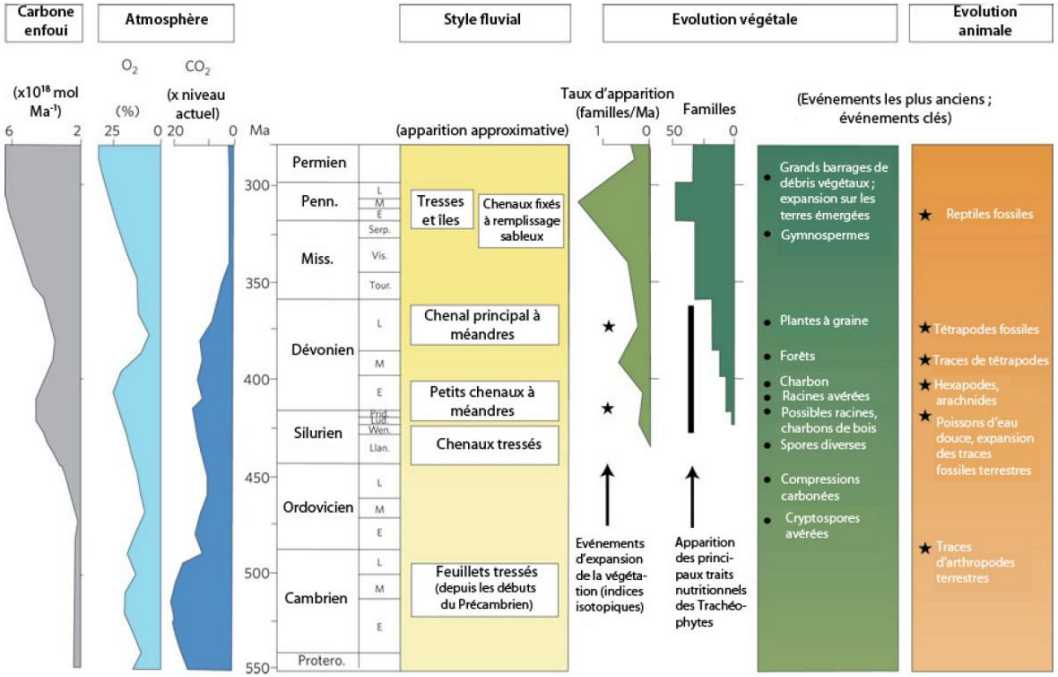
Le cycle du carbone n'est pas équilibré et d'importantes variations du taux de CO_2 atmosphérique sont intervenues au cours des âges géologiques. La chute brutale du taux de CO_2 observable au Dévonien-Carbonifère-Permien inférieur, où il atteint une concentration proche du niveau actuel, est attribuable à la fois à des causes géologiques et biologiques.

Le transport par les fleuves jusqu'à la mer des produits de l'érosion des montagnes (altération des silicates), stocke des quantités très importantes de carbone dans les fonds marins (roches carbonatées). Ainsi, 1,6 millions d'années suffisent à un fleuve de la taille du Rhône pour charrier jusqu'à la mer une quantité de carbone équivalente à celle contenue dans l'atmosphère[24]. Ce mécanisme, appliqué à l'érosion de l'immense massif hercynien, a très vraisemblablement entrainé le refroidissement global de la fin du Carbonifère il a y 300 millions d'années.

Le développement de la flore vasculaire arborescente du Carbonifère et des premières forêts joua alors un rôle fondamental dans ce processus :

- le développement du réseau racinaire de la végétation arborescente a amplifié le phénomène **d'altération profonde des roches** (phénomène que connaissent aujourd'hui encore les zones équatoriales) **favorisant l'altération des silicates** ;
- parallèlement ces mêmes racines ont contribué à la **stabilisation de vastes réseaux hydrographiques** (ancrage des berges) et donc à terme au développement des premiers grands fleuves qui agirent dès lors comme de véritables pompes à CO_2, **favorisant l'accumulation de composés carbonatés sur les fonds marins**.

24 http://acces.ens-lyon.fr/acces/terre/CCCIC/ressources/litho_point3#mo



Développement des paysages fluvatiles, changements atmophériques et évolution du vivant au Paléozoïque
(Source : ENS Lyon d'après Gibling et Davies, Palaeozoic landscapes shaped by plant evolution, 2012)

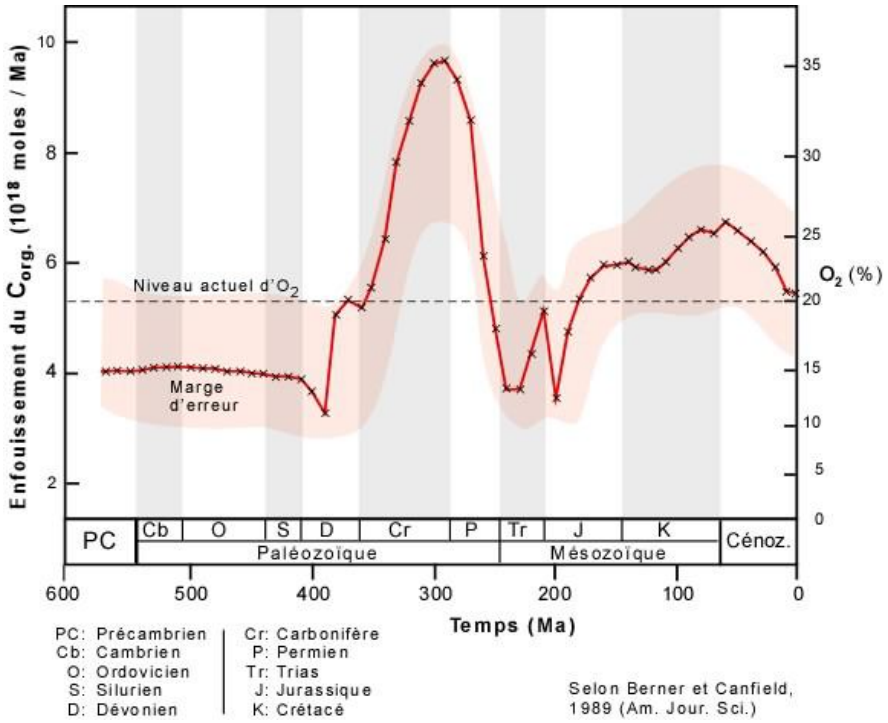
Dépôt alluvial de la fin du Carbonifère (Pennsylvanien) témoignant de l'existence de cours d'eau permanents (Nova Scotia, Canada).
(Source : Michael C. Rygel CC BYSA 3.0 @ wikimedia commons)

Ainsi, en plus du stockage du carbone atmosphérique sous forme de matière organique (photosynthèse), les forêts en façonnant les paysages du Carbonifère, ont contribué a stocker durablement le carbone ; un phénomène amorcé au Dévonien qui connait son apogée au Carbonifère inférieur[25,26,27]. Ce sont de véritables réseaux hydrographiques qui se mettent en place à la fin du Carbonifère. Les dépôts alluviaux, qui accompagnent très souvent les gisements[28], attestent du rôle structurant qu'a joué la végétation.

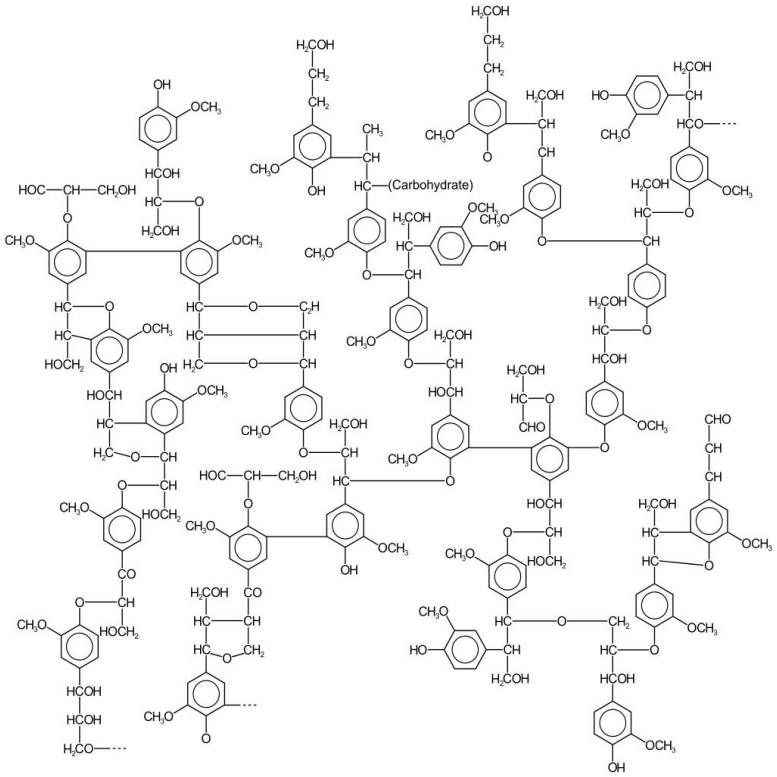
25 C. LANGLOIS, *Le développement de la végétation continentale de l'Ordovicien au Dévonien et ses conséquences géologiques*, ENS Lyon, 2012.
26 R. GIBLING & N.S. DAVIES, *Palaeozoic landscapes shaped by plant evolution*, Nature Geoscience, 2012.
27 R. GIBLING *& al*., *Palaeozoic co-evolution of rivers and vegetation : a synthesis of current knowledge*, Proceedings of the Geologist's Association, 2013.
28 Pour un exemple local voir l'émission « *Carbone 42* » (Hervé Jacquemin, la Rotonde) sur l'affleurement de la Ricamarie (voir également sur le même site de la Béraudière).

3. Production d'O_2, le rôle du règne végétal

L'oxygène que nous respirons est le produit de la photosynthèse du passé. Il est la conséquence de la fossilisation de la matière organique intervenue au cours des âges géologiques[29]. Contrairement à la croyance répandue, les forêts actuelles ne produisent que peu d'oxygène. Aux hautes latitudes l'action saisonnière des décomposeurs consomme quasiment autant d'oxygène (respiré et libéré sous forme de CO_2) que ce que la plante a produit[30](photosynthèse). Il n'y a production durable d'oxygène que si l'organisme qui l'a produit a échappé à la décomposition (comme c'est le cas pour la matière organique à l'origine du charbon, du gaz naturel et du pétrole) .



Estimations de la variations d'O_2 atmosphérique depuis 600 Ma.

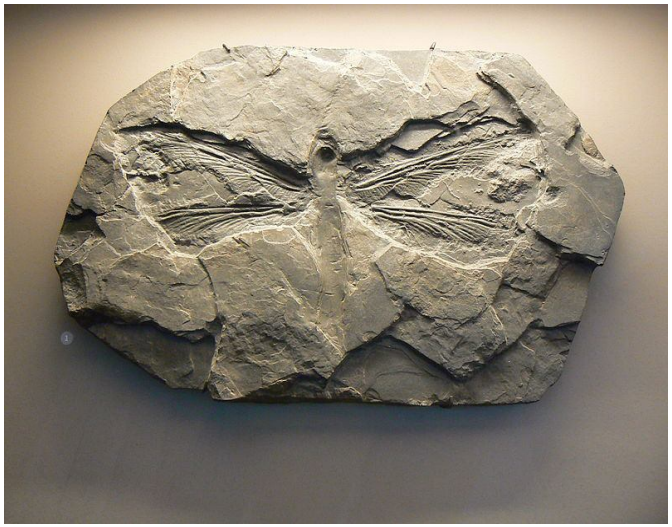


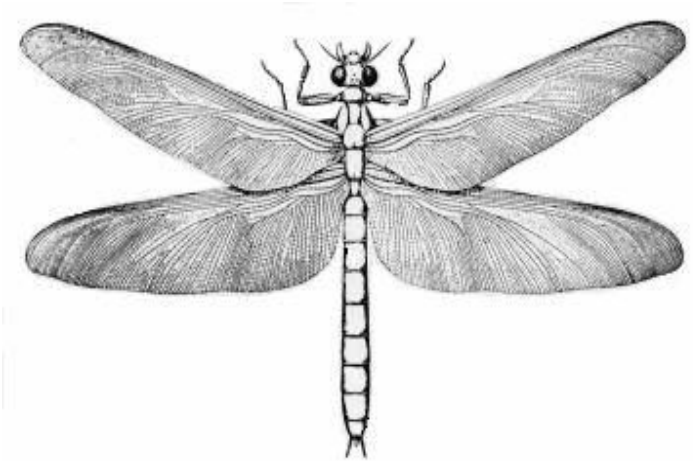
Structure possible d'une lignine
(source : Karol Glab @ wikimedia commons)

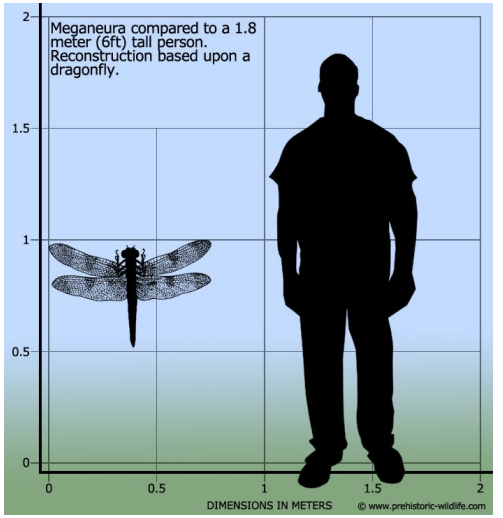
Le pic d'oxygène observable dans les estimations de l'évolution de la concentration en O2 de l'atmosphère coïncide avec l'apparition de la lignine dans le règne végétal. Cette longue molécule, constituant des tissus de soutien des plantes, permit aux premiers arbres de s'élever en hauteur. Seuls les champignons supérieurs sont capables de la dégrader mais ils ne firent leur apparition qu'au Permien (280-252 Ma). Ainsi, au Carbonifère les arbres morts ne pourrissaient pas[31] ! Ils formaient d'épaisses litières de matière organique que nous retrouvons aujourd'hui sous la forme de couches de charbon.

29 P. THOMAS, Cycle du carbone et de l'oxygène, conférence donnée à Lyon, (2000).
30 http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/oxygene-forets.xml
31 D. FLOUDAS *&* al. *The Paleozoic Origin of Enzymatic Lignin Decomposition Reconstructed from 31 Fungal Genomes* Science, 336, 1715, 2012.

Depuis longtemps[32], des indices paléontologiques semblaient indiquer que la concentration en oxygène était plus importante qu'actuellement. Le plus marquant étant la présence de fossiles de libellules géantes (*Meganeura*) ayant pu atteindre 80 cm d'envergure. La respiration des insectes s'effectuant par un système trachéen, leur taille est limitée par la concentration en oxygène de leur environnement[33]. Le gigantisme des libellules du Carbonifère ne pouvait donc s'expliquer que par une concentration en oxygène bien supérieure aux 21% actuels[34,35]. Ce constat, au départ issu des observations des paléontologues, a été depuis confirmé par d'autres calculs.







Fossile de *Meganeura* et reconstitution.

L'absence de fossiles d'insectes géants sur le bassin de la Loire pourrait-elle alors être interprétée comme une conséquence d'une concentration en oxygène inférieure due à l'altitude ?

Un autre indice, témoignant des conséquences de ce taux d'oxygène élevé (estimé à près de 30% par les travaux les plus récents), tient à la présence de traces d'incendies s'étant produits à cette période. Les couches de charbon comportent parfois des inclusions de *fusain* (restes de végétaux carbonisés avant leur enfouissement) indiquant que des incendies catastrophiques[36,37] ont touché les forêts à la fin du Carbonifère. Sur ce point, le bassin de la Loire ne fait pas exception et des *fusains* se retrouvent au toit dans la plupart des grandes couches de la région.

Enfin, la présence de cynérites (épais bancs de roches constitués de dépôts de cendres volcaniques dit « gore blanc ») et des traces d'activité géothermique (geyser de Saint-Priest-en-Jarez[38]) attestent de l'intense activité dans le sous-sol du bassin, en lien avec la fusion partielle consécutive de l'orogenèse hercynienne. Ainsi, le taux d'oxygène élevé, l'activité volcanique et la présence de *fusain* permettent de spéculer sur l'existence à la fin du Carbonifère d'incendies de nature cataclysmiques qui auraient périodiquement modifié le paysage et les écosystèmes de la région.

---

32 HARLE & HARLE (1911)

33 C.J. KLOK, J.F. HARRISON, *Atmospheric hypoxia limits selection for large body size in insects*, Plos One, 2009.

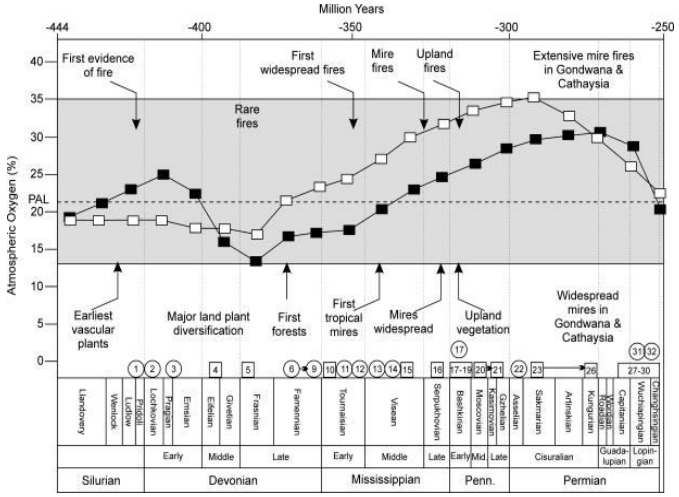
34 R. DUDLY, *Atmospheric oxygen, giant Paleozoic insect and the evolution of aerial locomotor performance*, The journal of Experimental Biology n° 201, mars 1998.

35 J.F. HARRISON *et al.*, *Atmospheric oxygen level and the evolution of insect body size* , Comptes rendus de la Royal Society, juillet 2010.

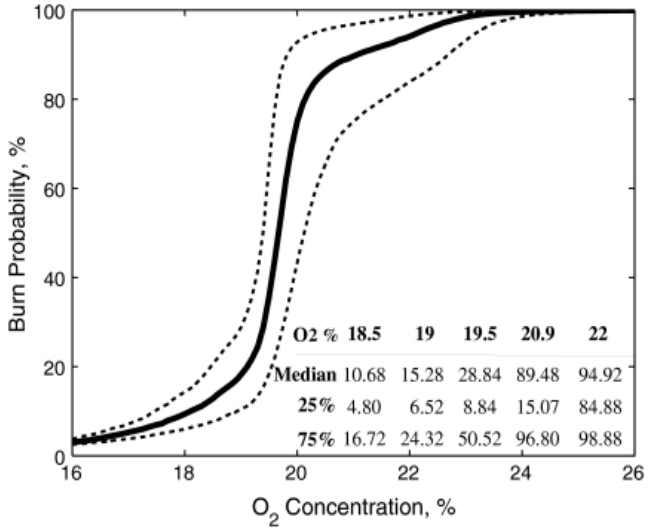
36 C. M. BELCHER *et al.*, *Baseline intrinsic flammability of Earth's ecosystems estimated from the paleoatmospheric oxygen over the 350 million years*, Comptes rendus de l'Académie des Sciences des États-Unis, décembre 2010.

37 H. FALCON-LANG & A. SCOTT, *Upland ecology of some Late Carboniferous cordaitalean trees from Nova Scotia and England*, 2000.

38 Voir le crêt de Saint-Priest-en-Jarez sur le site la Rotonde.



Mise en relation de la variation de la concentration atmosphérique en O_2 depuis du Silurien au Permien avec l 'évolution des écosystèmes (en milieu) et l'occurrence de traces d'incendie (en haut) (Scott & Glasspool 2006).



Modélisation de la probabilité d'incendie en fonction de la concentration d'oxygène dans l'atmosphère (C.M. Blecher et al. 2010) .

L'évolution des écosystèmes durant le Carbonifère[39,40]est une piste de recherche intéressante qui permet de croiser les points de vue entre évolution du vivant (Biologie) et histoire de la Terre (Géologie). Ainsi, il apparaît de plus en plus clairement que le climat plus froid et plus sec[41], le taux d'oxygène élevé et les incendies saisonniers aient conduit par sélection naturelle à l'émergence des premiers conifères au *Stéphanien*[42].

Eclairs volcaniques lors de l'éruption du volcan islandais Eyjafjallajökull
(source : Sigurdur Hrafn Stefnisson-National Geographic, 2010)

Feu de forêt en Californie
(source : Darvi Atkeson/Associated Press, sept. 2014)

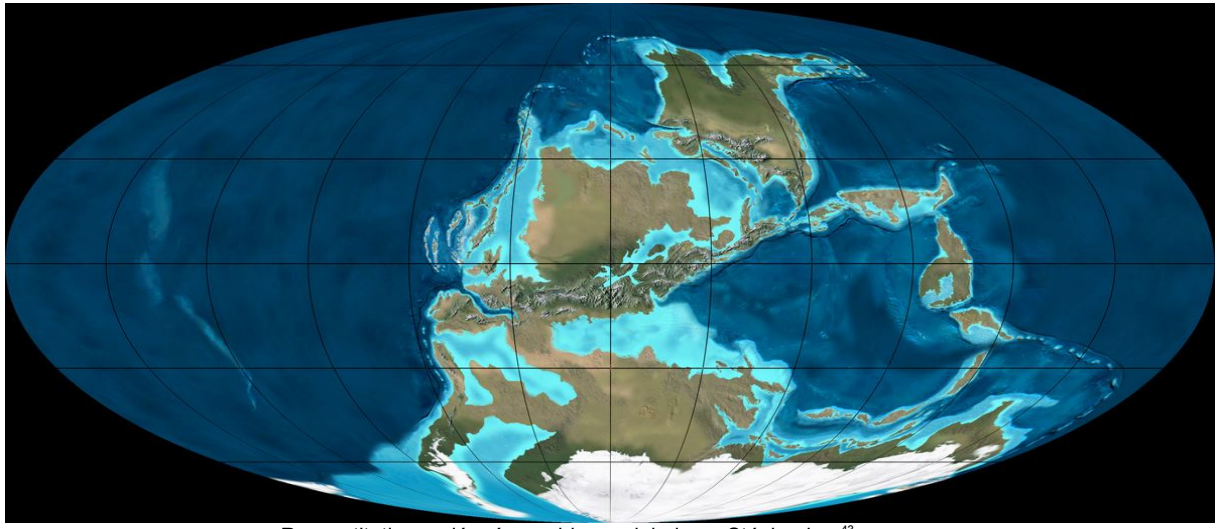
Elk Bath - Feu de forêt dans le Montana
(source : USDA, 2000)

39 A. SCOTT & I.J. GLASSPOOL, The diversification of Paleozoic fire systems and fluctuations in atmospheric oxygen concentration, Comptes rendus de l'Académie des Sciences des États-Unis, juillet 2006.

40 W. A. DIMICHELE, H. W. PFEFFERKORN, R. A. GASTOLDO, Response of Late Carboniferous and Early Permian plant Communities to climate change , 2001.

41 N. J. TABOR, Paleoclimate across the Late Pennsylvanian-Early Permian tropical paleolatitude : A review of climate indicators, their distribution, and relation to palaeophysiographic climate factors, 2008.

42 C. M. BELCHER, Fire Phenomena and Earth System : An Interdisciplinary Guide to Fire, avril 2013.



Reconstitution paléogéographique globale au Stéphanien [43] :
les traces de la glaciation du Carbonifère permirent à Alfred Wegener de développer
son modèle de dérive continentale.

Aujourd'hui, **le Carbonifère est considéré comme une période froide de l'histoire de la Terre**, assez comparable à celle que nous connaissons actuellement. La représentation des régions équatoriales au Carbonifère a évolué. L'image de la forêt archaïque, dense, humide, semblable aux mangroves tropicales s'est nuancée : la région apparaissait comme un haut-plateau continental perché à plusieurs milliers de mètres d'altitude et soumis à un climat froid et sec.

Si la série stéphanienne a été définitivement écartée de la chronostratigraphie mondiale, son contenu floristique reste qualitativement et quantitativement le plus riche et le plus varié d'Europe. Cette association de flores hygrophiles et mésoxérophiles de la fin du Carbonifère supérieur, nommée **flore stéphanienne**, reste un outil de premier ordre pour la biostratigraphie des bassins houillers continentaux.

Le Puncak Jaya (Papouasie Nouvelle Guinée), sommet de l'Océanie (4 884 m d'altitude, 4° Sud) est l'un des rares glaciers équatoriaux actuels. Sur ses pentes les forêts de fougères arborescentes peuvent donner un aperçu de ce à quoi pouvait ressembler la région il y a 300 millions d'années. (Images : Google Earth)

43 Ron Bailey *Global paleogeography* (tous droits réservés). http://cpgeosystems.com/globaltext2.html

II - Approche du vivant et de la biodiversité

1. Paysage du présent, paysage du passé...

A notre époque, beaucoup se plaignent de la laideur des paysages qui entourent nos villes (...). Je n'ai pas la prétention de résoudre le problème des normes des paysages péri-urbains, je voudrais juste faire savoir qu'il existe une porte de sortie permettant de fuir un paysage aussi maussade et d'en admirer un autre radieux, authentique, inchangé depuis le matin du monde (...). Voyez ce Tilleul, juste au coin, devant le bar-tabac, avec ce pigeon perché sur une de ses branches à l'ombre du feuillage. Décidons que l'échelle du paysage ne dépend que de nous et qu'aujourd'hui notre regard n'ira pas de l'usine Renault à la station Shell, mais qu'il se focalisera sur ce Tilleul, sa branche, son pigeon et ses feuilles. Une décision simple mais qui nous offre un paysage vraiment naturel, identique à celui que l'on pouvait voir au Moyen Age, à l'époque romaine, du temps de l'homme de Tautavel ou même longtemps avant que l'être humain ne peuple la Terre, car les Tilleuls et les pigeons existent depuis le Crétacé, 90 millions d'années avant l'apparition de l'être humain actuel. **Changeons l'échelle du paysage** et, ne serait-ce que l'espace d'un instant (…) nous avons le loisir d'admirer un fragment, petit mais significatif, de ce qu'étaient la grande forêt primaire des régions tempérées. Cette nouvelle échelle d'observation c'est celle du botaniste!

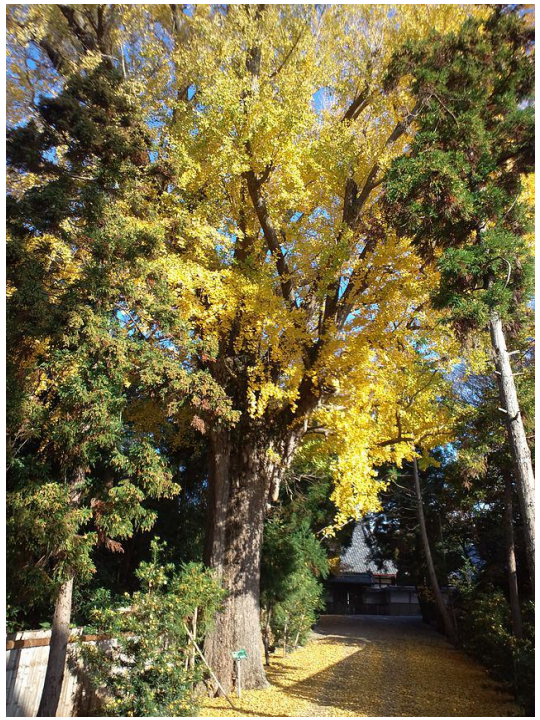
Francis Hallé, *Un jardin après la pluie*, 2013.

La métamorphose d'une libellule (*Aeshna cyanea*) sur une prêle (*Equisetum sp*.). Cette scène peut être perçue comme un fragment actuel de l'époque Carbonifère. Les premières libellules apparues au Carbonifère (*meganeura*) mesuraient près d'un mètre d'envergure, les premières prêles (*calamites*) pouvaient atteindre 10 m de haut.

(source : Böhringer Friedrich CC BY-SA 2.5 @ wikimedia commons)

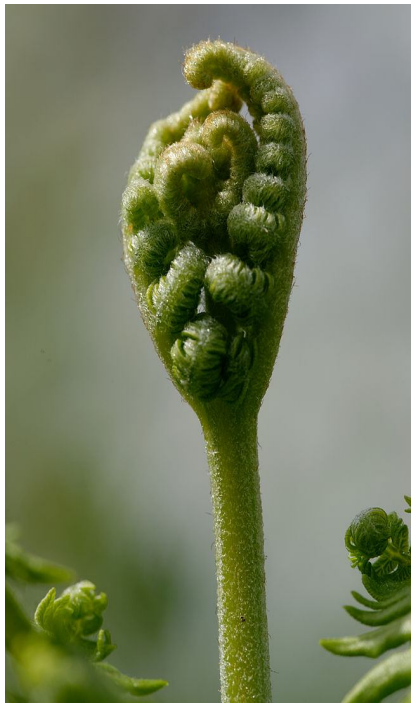
2. Un jardin stéphanien

La flore actuelle est l'héritière de centaines de millions d'années d'évolution. La diversité des espèces végétales peuplant la Terre aujourd'hui est le témoignage vivant de son histoire. La flore présente sur Terre au Carbonifère, il y a 300 millions d'années, a laissé sa trace sous la forme de dépôts de charbon ; elle a également donné naissance à des familles de végétaux qui existent encore aujourd'hui.



Ginkgo biloba
(source :Yanajin33 CC BY-SA 4.0 @ wikimedia commons)

Selaginella helvetica
(source : wikimedia commons)



Pteridium aquilinum
(source :Marie-Lan Nguyen 33 CC BY 2.5 @ wikimedia commons)

Les espèces végétales présentées dans le cadre de l'animation sont issus de familles apparues au Carbonifère. Elles appartiennent aux familles de plantes qui ont été identifiées à l'état de fossiles par Grand'Eury au XIXe siècle. Ces formes de vie intermédiaires entre les végétaux les plus anciens (les mousses) et les végétaux modernes (plantes à fleurs et à graines) se reproduisent soit grâce à des spores soit par des graines « primitives » dites ovules.

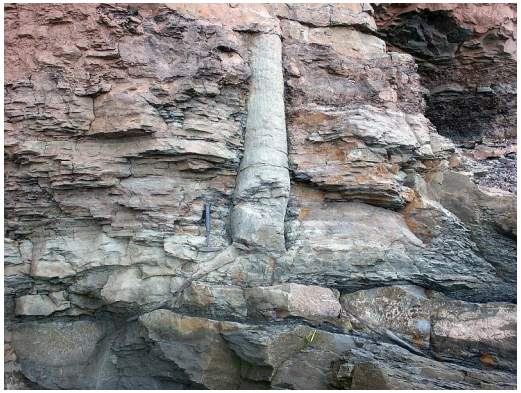
Certes, la plupart du temps, les végétaux actuels n'ont pas conservé toutes les caractéristiques des plantes arborescentes géantes du Carbonifère, celles-ci poussant alors sous l'équateur dans des conditions optimales. Peut-être plus que les autres, ces familles très anciennes ont été l'objet de mécanismes d'évolution et de spéciation induits par la transformation des milieux naturels à l'échelle géologique (mouvements des continents, phases de glaciations puis de réchauffements, composition de l'atmosphère, etc...).

Ainsi, il reste très complexe aujourd'hui de déterminer quel « lien de parenté » exact entretiennent les végétaux éteints du Carbonifère avec les représentants actuels de ces espèces. Les scientifiques hésitent aujourd'hui à les qualifier, comme ce fut souvent le cas par le passé, de *fossiles vivants.* Mais ils portent toujours un vif intérêt pour le bref aperçu, le coup de projecteur sur l'évolution des organismes qu'elle apportent[44].

44 Espèce relicte ou « fossile vivant » ? Un concept fascinant mais à manier avec précaution, UPMC (Sorbonne), E.P.H.E., C.N.R.S. M.N.H.N., communiqué de presse, 2014.

Les sélaginelles et les lycopodes (*lycophytes*)

Abondants au début du Carbonifère, les lycophytes arborescents (*sigillaria*, *lepidodendron*) sont caractéristiques de la flore du Westphalien. Dans la série stéphanienne, ils sont présents dans les couches de Rive-de-Gier puis n'apparaissent plus que très ponctuellement dans l'étage de Saint-Etienne. Cette disparition traduit vraisemblablement un changement climatique ou géographique notable. Plus que pour n'importe quelle autre famille de végétaux, la différence de taille est frappante entre les lycophytes arborescents du Carbonifère et les modestes représentants actuels de cette famille, que l'on pourrait presque confondre avec des mousses.



Tronc fossile de Sigillaire (Nouvelle-Ecosse, Canada)
(source : Michael C. Rygel CC BY-SA 3.0 @ wikimedia commons)

300 millions d'années plus tard, des lycophytes sont toujours présents dans la région. Sur les neufs espèces de lycopodes présentes en France métropolitaine, sept sont présentes dans les Monts du Forez (souvent à plus de 1 000 m d'altitude) et quatre d'entre elles font l'objet de dispositifs de protection pour tenter de les préserver. Tous les lycophytes de France sont plus ou moins menacés d'extinction par la disparition de leur milieu, les stations de lycopodes de la région (Monts du Forez, Pilat) apparaissent d'autant plus exceptionnelles. Les *isoètes* (plantes semi-aquatiques actuelles appartenant au même embranchement) ne sont pas présents dans le département de la Loire.

Diphasiastrum alpinum
(source : BerndH CC BY-SA 3.0 @ wikimedia commons)

Diphasiastrum tristachyum
(source : Kobierski.p CC BY-SA 2.5 @ wikimedia commons)

Les fougères (*filicophytes*)

Les fougères géantes sont les plantes les plus connues du Carbonifère, probablement parce que les larges empreintes de leurs feuilles étaient les plus familières aux premiers observateurs. Frappés par la similitude entre les fougères arborescentes actuelles des zones équatoriales, les chercheurs européens du XIXe siècle en conclurent même un peu trop rapidement que si ces plantes avaient alors pu pousser en Europe... c'est que l'ensemble du globe avait dû connaître un climat beaucoup plus chaud et humide ! Cette idée sera totalement remise en cause par le modèle de dérive continentale d'Alfred Wegener après 1915.

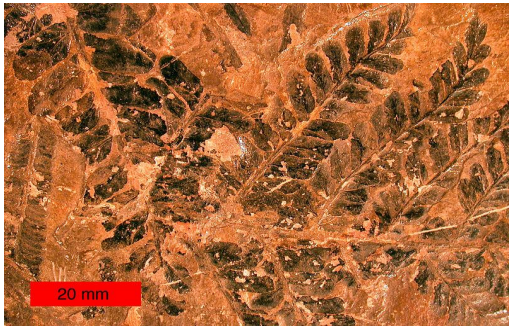
Cyclopteris Br.
(Grand'Eury, 1877)

Dicksonia squarrosa
(source : D-rew CC BY-SA 3.0 @ wikimedia commons)

Les cycas (*cycadophytes*)

Grand'Eury identifia un type de fougères particulières ne se reproduisant pas grâce à des spores. Il proposa que ces «***fougères à graines***» (***Pteridospermatophyta)*** aient été une forme intermédiaire entre les végétaux à spores et les plantes modernes à fleurs. Des travaux plus récents indiquent que certaines de ces étranges fougères auraient pu appartenir à l'embranchement qui donna naissance par la suite au genre ***Cycas***[45,46].

Les cycas ont effectivement, aujourd'hui encore, l'aspect de fougères arborescentes dont les frondes sont particulièrement coriaces. Ils poussent dans les régions chaudes du globe (humides ou sèches) et se reproduisent grâce à des ovules comparables à celles des fougères « à graines » du Carbonifère. Ils sont plus proches génétiquement des conifères que des fougères. Les fossiles de cycas sont abondants au Trias et au Jurassique, périodes où ils ont côtoyé les dinosaures.



Fougère à graine fossile (Neuropteris)

Cycas circinalis

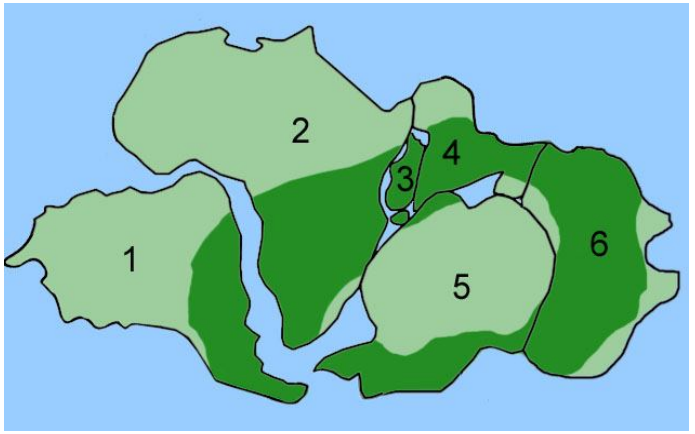
45 http://www.ucmp.berkeley.edu/IB181/VPL/MedCyc/MedCyc1.html
46 W. N. STEWARD & G. W. ROTHWELL, *Paleobotany and the Evolution of Plants*, Cambridge University Press, 1993 (2ème édition).

(source : Wilson4469 @ wikimedia commons)

(source : Tasso Grasso CC BY-SA 2.5 @ wikimedia commons)

Une espèce particulière de fougère à graine du Carbonifère – *Glossopteris* - absente des gisements européens mais abondante en Inde et dans l'hémisphère sud, permit à Alfred Wegener d'émettre l'hypothèse que ces terrains très éloignés aujourd'hui ne formaient qu'un seul continent au Carbonifère, et avaient ensuite dérivé. Attaquée de toutes parts pendant près d'un demi-siècle, cette théorie a finalement donné naissance au modèle actuel de la tectonique des plaques.

Glossopteris (Muséum de Houston, Texas, U.S.A.)



La distribution mondiale
des fossiles de *Glossopteris*

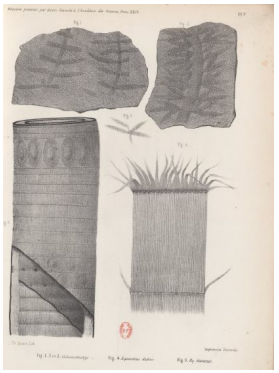
Alfred Wegener (1880-1930).

source : wikimedia commons,
domaine public

Les prêles (*equisetophytes*)

Connues pour être invasives, coriaces, riches en silice ainsi qu'en substances fongicides et bactéricides, les prêles actuelles sont des parentes éloignées de celles qui peuplaient la Terre il y a 300 millions d'années. Aujourd'hui, aux hautes latitudes elles peuvent parfois atteindre près 2 mètres de haut, les prêles géantes des zones équatoriales atteignant 7 à 8 m, une taille bien inférieure aux prêles arborescentes du Carbonifère. Les *calamites* pouvaient alors atteindre 20 m de haut et prenaient l'aspect de véritables arbres, leurs empreintes apparaissent dans tous les terrains carbonifères.

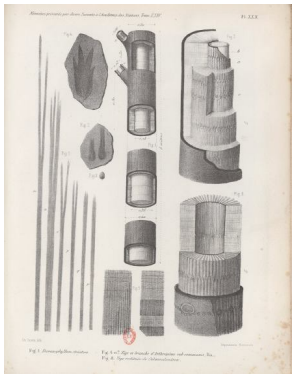
Les prêles sont en fait de proches parentes des fougères. Elles en diffèrent par le fait qu'elles affectionnent les zones humides mais lumineuses, alors que les fougères se développent généralement à l'ombre. Elles peuvent envahir de vastes secteurs de manière impressionnante... au grand dam des jardiniers et des agriculteurs. Une fois installées, on ne s'en débarrasse qu'à grand peine, labourer le sol ne faisant que découper leur rhizome en autant de nouvelles prêles ! Leur reproduction sexuée par spores reste très accessoire étant donnée la vigueur de leur multiplication végétative. C'est en fait une plante pionnière qui colonise les terrains nus et enrichit le sol en silice.



Restitution de *Calamites*
(Grand'Eury, 1877)

Equisetum hyemale
(source : Kurt Stüber CC BY-SA 3.0 @ wikimedia commons)

Calamondendron, une «calamite à graines primitives », fut également découverte en abondance dans les couches de Saint-Etienne par Grand'Eury. Il s'agirait d'un genre totalement distinct, présentant un aspect comparable à celui des prêles qui induit les chercheurs en erreur. Ces *calamondendrés* sont comparables aux espèces du genre *Ephedra*. Les éphèdres actuelles se présentent sous la forme d'arbustes qui poussent dans les zones arides. Si leur tige ressemble à celle des prêles, elles sont en fait proches génétiquement des conifères et des cycas avec lesquels elles partagent ce système de reproduction par ovules.



Restitution de *Calamodendron*
(Grand'Eury, 1877)

Ephedra torreyana
(source : Stan Shebs CC BY-SA 3.0 @ wikimedia commons)

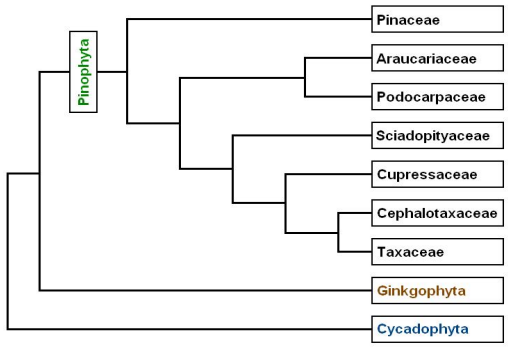
Les conifères (*pinophytes*)

Tous les étages de la série stéphanienne et particulièrement les terrains supérieurs contiennent des quantités importantes d'empreintes de feuillages fossilisés en forme de langues. Ces feuilles furent nommées *Cordaites*[47], en hommage au médecin et botaniste tchèque August Carl Joseph Corda (1809-1849).

Grand'Eury reconstitua l'espèce disparue dont diverses parties avait été classées par parataxinomie :

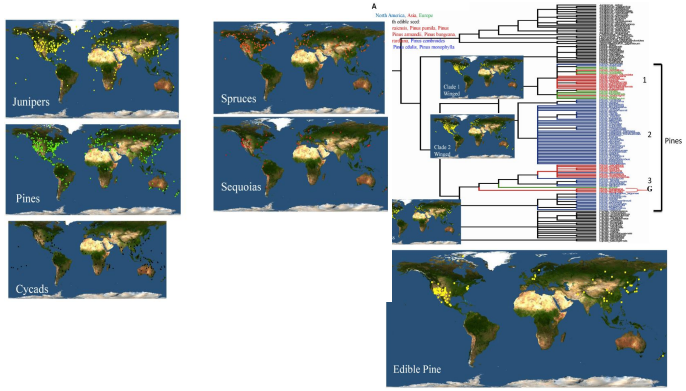
- *Artisia* pour la moelle des tronc ;
- *Daxilodon* pour l'écorce (parfois entourée de fusain témoignant du fait que l'arbre avait probablement brûlé avant d'être enseveli) ;
- *Cordaianthus* pour les inflorescences mâles ;
- *Cordaicarpus* pour les ovules qu'il compare à celles du Ginkgo, de Podocarpus, Taxus et autres conifères.

Il estima que leur taille avait pu atteindre 40 mètres de haut. Suivant les conclusions de Williamson[48], il proposa que le genre *Cordaite* ait été un groupe parent des conifères actuels et les classa comme *subconiferae*.



Classification phylogénétique des conifères
(Source : Farjon 2003, Quinn & Price 2003)

Fossiles de *Cordaïïes*
(Domaine public@ wikimedia commons=



L'étude de distribution mondiale actuelle des conifères révèle la dislocation de la Pangée et du Gondwana
(source :Davis SEONG, Susan SCHOOL)

Un bois similaire, l'implantation des cicatrices foliaires sur les branches, la présence de cônes femelles et de strobiles mâles[49]... c'est bien à même embranchement que ces espèces appartiennent[50,51]. Des larges feuilles en spatule des Cordaïtes aux fines aiguilles des conifères (permettant de limiter le stress hydrique et de résister au gel), traduisent l'environnement dans lequel ces arbres ont évolué et se sont diversifiés.

La fin du Carbonifère et le début du Permien marqua effectivement le début du long règne des conifères qui dura jusqu'au Crétacé. La présence de quelques espèces « relictes », aujourd'hui uniques représentantes de genre quasiment éteints (*Ginkgo, Sciadopitys*), témoigne de la biodiversité passé d'une lignée végétale qui fut prépondérante sur Terre pendant 200 millions d'années.

Ainsi, si il nous est impossible aujourd'hui d'admirer des *Cordaïtes,* les autres membres de leur famille peuvent nous permettre de nous imaginer à quoi ressemblaient les arbres qui dominaient la canopée des forêts équatoriales carbonifères.

---

47 UNGER, 1850.
48 M. WILLIAMSON, *Memoirs of the literary and philosophical Society of Manchester,* 1851, p. 352, fig. 10.
49 D.R. Jr. CHESNUT, « *Ginkgo trees are living cordaites* », 31st Annual Meeting (Mai 2009).
50 http://www.ucmp.berkeley.edu/IB181/VPL/CorCon/CorConTitle.html
51 J. HILTON & R. M. BATEMAN, 2006.

III. Glossaire

Carbonifère : (n.m.) Système géologique du Paléozoïque supérieur, le Carbonifère est la période de l'ère primaire située entre environ – 359 et - 299 millions d'années entre le Dévonien et le Permien.

Charbon : (n.m.) Combustible fossile issu de la matière organique enfouie dans le sol au cours des temps géologiques. Sous l'effet de la pression et de la chaleur, les végétaux ensevelis ont été transformés en matière solide riche en carbone. Synonymes : houille, charbon de terre...

Dévonien : (n.m.) Système du paléozoïque de – 416 millions d'années à – 359 millions d'années. Situé entre le Silurien et le Carbonifère, le système est caractérisé par l'extension des terres émergées et l'apparition de nombreuses espèces végétales.

Fossiles : (n.m.) Débris ou empreinte de plante ou d'animal, ensevelis dans les couches rocheuses antérieures à la période géologique actuelle et qui s'y sont conservés.

Gore : (n.m.) Gore blanc est l'appellation locale pour les paléocynérites, dépôt de cendres volcanique. Les gores verts correspondent également à des tufs volcaniques issus d'émission de rhyolite par d'ancien geysers.

Grès : (n.m.) Roche sédimentaire siliceuse, résultant de la cimentation d'un sable, et où les grains de quartz sont dominants. Leurs couleurs sont généralement blanc, jaune, grisâtre, parfois coloré par des oxydes de fer jaune ou rouge ou vert. Leur degré de cimentation est variable et conditionne leur possibilité d'utilisation.

Gymnosperme : (n.m., du grec *gumnospermos,* « graine nue ») se dit des plantes dont les ovules ne sont pas encloses dans un ovaire.

Hercynien : Cycle orogénique du Paléozoïque supérieur, compris entre le Dévonien et la fin du Permien contemporain du Carbonifère. Il comporte plusieurs phases tectoniques définies en Europe, où la chaîne hercynienne est morcelée en massifs anciens.

Hygrophiles : Se dit d'un organisme qui se développe dans un environnement humide pour son bon développement. Un milieu hygrophile est un milieu humide.

Lignine : (n.f., du latin *lignum* = bois) Constituant fondamental du bois qui imprègne les membranes des cellules dites « lignifiées », tissus de soutien et de conduction de la sève brute.

Paléobotanique : (n.f. du grec *paleo* = ancien *et botanikos* = relatif aux herbes) Branche de la paléontologie qui grâce à l'étude des fossiles retrace l'histoire évolutive des végétaux et permet de reconstituer les environnements du passé.

Paléontologie : (n.f. du grec *paleo* = ancien, *ontos* = étant *et logos* = étude) Discipline scientifique étudiant des restes fossiles des êtres vivant du passé.

Parataxinomie : (n.f.) Classement taxinomique parallèle permettant de classer des restes fossiles isolés qui ne peuvent entrer dans la classification relevant de la nomenclature officielle.

Permien : (n.m.) Dernière période de l'ère Paléozoïque. De – 299 à – 251 millions d'années (d'une durée de 48 millions), suivi par le Trias.

Photosynthèse : (n.f.) **Pr**ocessus biochimique qui permet aux plantes,aux algues et à certaines bactéries de synthétiser de la matière organique en utilisant la lumière du soleil.

Point stratotypique mondial : (n.m) Abrégé PSM en français, GSSP en anglais. Repère reconnu internationalement définissant la limite entre deux périodes géologiques. En pratique, il est matérialisé sur le terrain par un repère artificiel scellé dans le terrain, d'où son surnom de « clou d'or ».

Schiste : (n.m.) Terme ambigu et générique désignant une roche qui a pour particularité d'avoir un aspect feuilleté et de se débiter en plaques fines ou « feuillet rocheux ». Il peut s'agir d'une roche sédimentaire argileuse ou bien d'une roche métamorphique. Les roches désignées sous le terme de « schistes » des bassins houillers sont en fait des argilites.

Stéphanien : (n.m.) Étage géologique de la stratigraphie régionale d'Europe. La série stéphanienne appartient au système du Carbonifère entre environ – 305 et à – 295 millions d'années. Son nom dérive de celui de la ville de Saint-Etienne.

Stratigraphie : (n.f.) Description des strates ou couches de terrain, qui constituent l'écorce terrestre dans le but de reconstituer l'histoire de celle-ci. En s'appuyant sur les principes fondamentaux de continuité et de superposition, elle permet de reconstituer la chronologie relative des événements au cours des temps géologiques.

Mesoxérophile : Une plante est dite mesoxérophile lorsqu'elle peut se développer dans un milieu temporairement sec.

IV. Sources, bibliographie et liens internet

Les travaux anciens

BRONGNIART A., **Notice sur les végétaux traversant les couches du terrain houiller**, Annales des Mines, 1821.

LECLERC BUFFON G-L., *Oeuvres complètes*, Tome 5, 1828, p.398.

DE JUSSIEU A., *Examen des causes des Impressions des Plantes marquées sur certaine Pierres des environs de Saint-Chaumont dans le Lyonnais*, Mém. de l'Acad . des Sciences, 1718.

Le Carbonifère, le cycle du carbone et de l'oxygène

THOMAS P., « *Cycle du carbone et de l'oxygène, conférence donnée à Lyon* », sur le site de l'E.N.S. Lyon, 2000.

THOMAS P., « *Variation du taux de CO_2 dans l'atmophère depuis 4,5 milliard d'années* », sur le site de l'E.N.S. Lyon.

La géologie, le Stéphanien et la paléobotanique du bassin de la Loire

BOUROZ A., « Essai de synthèse tectonique du bassin houiller de Saint-Etienne », in *Revue de l'Industrie minérale*, 1978, p. 493-519.

DOUBINGER J., **VETTER P.**, **LANGIAUX J.**, **GALTIER J.**, **BOUTIN J.**, *La flore fossile du bassin houiller de Saint-Etienne*, Mém. M.N.H.N., n°164, 1995, 355 p.

DOUBINGER J., **ALVAREZ-RAMIS C.**, « ***Sur la présence de deux biotopes à phytocénoses différentes au sommet de la série stéphanienne de Saint-Etienne*** » in *C.R. du 105e congrès national des sociétés savantes*, 1980.

FALCONNET J., *« An evaluation of French amniote diversity through the Pennsylvanian-Cisuralian boundary »*, Annales de Paléontologie, 2014.

GRAND'EURY F-C., « Mémoire sur la formation de la houille » in *Annales des Mines*, Tome 1, 1882.

GRAND'EURY F-C., *Flore carbonifère du département de la Loire et du centre de la France*, Imp. Nationale, 1877, 664 p.

JACQUEMIN H., *«* Le bassin houiller de Rive-de-Gier et Saint-Etienne Histoire d'une migration géologique », in *Bassin Houiller de la Loire Penser un territoire*, Ville de Saint-Etienne, 1997.

MALAVIEILLE J., **GARDIEN V.**, *Collapse of the thickened Variscan crust in the French Massif Central : Mont Pilat extensional shear zone and St. Etienne Late Carboniferous basin*, Tectonophysic, 1990, p.139-149.

VITEL G., *Géologie de la Loire Invitation à la lecture des paysages*, Centre d'Etudes Foreziennes, P.U.S.E., 2001, 163 p.

Le climat au Carbonifère

BECQ-GIRAUDON J-F., *Hercynian high-altitude phenomena in the French Massif Central tectonic implication*, 1996.

FALCON-LANG H-J., *Pensnsylvanian tropical rainforest responded to glacial-interglacial rhythms*, Geology 32, 2004, p. 689-692.

ROSCHER M., SCHNIEIDER J-W., « ***Permo-Carboniferous climate : Early Pennsylvanian to Late Permian climate development of central Europe» in a regional and global context***, 2006.

SOREGHAN S-G., *Reconciling Indicators of Cold and Warmth in Late Palaeozoic Tropical Pangea : High*-magnitude *Glacial-Interglacial Climate Change*, Geol. Soc. Am. Ann. Conv. Abstr. Prog., Tome 38, p. 36.

SOREGHAN S-G., *Upland Glaciation in Tropical Pangea : Geologic Evidence and Implication for Late Paleozoic Climate Modeling*, 2014.

Les paysages du Carbonifère

GIBLING M-R., *Palaeozoic co-evolution of rivers and vegetation : a synthesis of current knowledge*, Proceedings of the Geologist's Association, 2013.

FALCON-LANG H-J., *Earliest mountain forests*, Geology Today, n° 5, 2005.

GIBLING M-R., DAVIES N-S., *Palaeozoic landscapes shaped by plant evolution*, Nature Geoscience, 2012.

LANGLOIS C., *Le développement de la végétation continentale de l'Ordovicien au Dévonien et ses conséquences géologiques*, ENS Lyon, 2012.

L'oxygène au Carbonifère

BELCHER C-M., *Fire Phenomena and Earth System : An Interdisciplinary Guide to Fire*, 2013.

BELCHER C-M., *Baseline intrinsic flammability of Earth's ecosystems estimated from the paleoatmospheric oxygen over the 350 million years*, Comptes rendus de l'Académie des Sciences des États-Unis, 2010.

DUDLY R., *Atmospheric oxygen, giant Paleozoic insect and the evolution of aerial locomotor performance*, The journal of Experimental Biology, n° 201, 1998.

DIMICHELE W-A., **PFEFFERKORN H-W.**, **GASTOLDO R-A**., *Response of Late Carboniferous and Early Permian plant Communities to climate change*, 2001.

FALCON-LANG H., **SCOTT A**., *Upland ecology of some Late Carboniferous cordaitalean trees from Nova Scotia and England*, 2000.

FLOUDAS D., *The Paleozoic Origin of Enzymatic Lignin Decomposition Reconstructed from 31 Fungal Genomes*, Science, n°336, 2012.

HARRISON J-F., *Atmospheric oxygen level and the evolution of insect body size*, Comptes rendus de la Royal Society, 2010.

KLOK C-J., **HARRISON J-F.**, *Atmospheric hypoxia limits selection for large body size in insects,* Plos One, 2009.

SCOTT A., **GLASSPOOL I-J.**, ***The diversification of Paleozoic fire systems and fluctuations in atmospheric oxygen concentration***, Comptes rendus de l'Académie des Sciences des États-Unis, 2006.

TABOR N-J., *Paleoclimate across the Late Pennsylvanian-Early Permian tropical paleolatitude : A review of climate indicators, their distribution, and relation to palaeophysiographic climate factors*, 2008.

La botanique et l'étude du vivant

DC. CHESNUT JR., « *Ginkgo trees are living cordaites* », 31st Annual Meeting, 2009.

HALLE F., *Aux origines des plantes*, Fayard, Tome 1, 2008.

HALLE F., *Un jardin après la pluie*, Armand Colin, 2013.

HALLE F., *Du bon usage des arbres*, Actes Sud, 2011.

PELT J-M., *L'évolution vue par un botaniste*, Fayard, 2011.

STEWARD W-N., **ROTHWELL G-W.**, Paleobotany and the Evolution of Plants, Cambridge University Press, 1993.

Plantes sauvages de la Loire et du Rhône Atlas de la flore vasculaire, Conservatoire Botanique du Massif Central, 2013, 760 p.

Espèce relicte ou « fossile vivant » ? Un concept fascinant mais à manier avec précaution, Communiqué de presse UPMC, E.P.H.E., C.N.R.S. M.N.H.N., 2014.

La climat, l'environnement

BONNEUIL C., **FRESSOZ J-B.**, *L'événement Anthropocène*, Seuil, 2013, 304 p.

LORIUS C., **CARPENTIER L.**, *Voyage dans l'Anthropocène*, Actes Sud, 2010, 197 p.

Les Tourbières, les paléoenvironnements

CUBIZOLLE H., *Paléoenvironnement*, Armand Colin, 2009, 271 p.

Puits Couriot / Parc-Musée de la Mine
3 bd Maréchal Franchet D'Esperey
42 000 Saint-Etienne

Tél. 04 77 43 83 26
Fax 04 77 43 83 29
www.musee-mine.saint-etienne.fr

ville de Saint-Étienne