



édité par les Musée et Jardins
botaniques cantonaux, Lausanne
14 bis, av. de Cour
1007 Lausanne
www.botanique.vd.ch

Évâud

MUSÉE & JARDINS
BOTANQUES

Graphisme : etcdesign.ch

DurArbrilité Des arbres et des humains face aux changements globaux et leur avenir vers la durabilité

DurArbrilité

*Des arbres et des humains face
aux changements globaux*

MUSÉE & JARDINS
BOTANQUES
CANTONNAUX LAUSANNE PONT-DE-NANT



Sommaire

<i>Des arbres... et des humains</i>	3
<i>Le point de départ</i>	6
<i>Des arbres à travers l'histoire et les territoires</i>	8
<i>Émotions, sensations ou seulement perceptions ? Les arbres dans leur environnement</i>	46
<i>Voici venir le temps des arbres et des forêts</i>	60
<i>Voici venir le temps des humains</i>	94
<i>Le rôle des arbres et l'impact de l'Homme dans les grands cycles biogéochimiques</i>	110
<i>Des arbres et des humains à l'Anthropocène</i>	122
<i>Vers un pacte entre nature et humains pour lutter contre les changements globaux ?</i>	132





☉ Arbres sous un ciel étoilé, Goille aux Cerfs, Vaud, Suisse. Photo : K. Sidi-Ali.

Des Arbres... *et des humains*

Aujourd'hui, seulement un tiers de la Suisse est recouverte de forêts. Cependant, sans aucune influence humaine, la surface forestière pourrait être deux fois plus étendue qu'actuellement. Dans notre pays, l'Homme a donc profondément modifié l'étendue et la composition des forêts, et ceci depuis plus de 7000 ans.

Malgré des rapports ancestraux, parfois complexes, entre les humains et les arbres, quelques individus de ces derniers ont certainement vu se tisser le début de ces relations : l'âge du plus vieil arbre connu, Mathusalem, un pin Bristlecone (*Pinus longaeva*) des White Mountains en Californie, a été estimé à plus de 4790 ans. Plus près de chez nous, les arolles d'Aletsch et de Zermatt atteignent 1000 ans d'âge et l'if de Crémine dans le Jura a plus de 1500 ans.

Ces arbres ont déjà vécu des changements importants de leur environnement, en particulier des périodes de réchauffement ou de refroidissement du climat. Quand la graine de l'arbre Mathusalem a germé, l'Homme entrait dans sa Protohistoire, en pleine révolution du Néolithique, et adoptait un modèle de subsistance basé sur l'agriculture, l'élevage... et le défrichement des forêts.

5000 ans plus tard, les fusées américaines en direction de la Lune ont certainement illuminé le ciel pur des White Mountains.

Ces arbres nous rappellent que le temps de l'Homme n'est plus forcément celui de la nature: depuis la Première révolution industrielle à la fin du 18^e siècle, l'Homme a une influence globale sur le système Terre. A tel point que l'on propose désormais que l'époque géologique dans laquelle nous vivons porte son nom, l'Anthropocène ou Ère de l'Homme.

Comment faire sentir que la rapidité des bouleversements engendrés par l'Homme sous l'appellation de changements globaux est effectivement sans pareil à l'échelle des temps géologiques? Comment sensibiliser les fameux Millénials et la Génération Z qui les suit aux atteintes à l'environnement? Ce sont désormais ces jeunes générations qui ont besoin des outils pour comprendre et gérer la crise écologique globale sans précédent que nous vivons actuellement.

Dans cette exposition, l'arbre est utilisé comme un vecteur puissant, à la fois victime, moteur et solution aux changements globaux, pour appréhender l'impact de l'Homme sur le fonctionnement du système Terre.

Les rapports entre arbres et humains à travers l'histoire et les territoires permettent de réaliser que les pratiques culturelles, culturelles et agricoles de ces derniers sont intimement liées aux premiers depuis des millénaires. Les modes de perceptions des arbres doivent nous faire comprendre que nos actions sur l'environnement naturel ne sont jamais anodines. Le fonctionnement des grands cycles biogéochimiques apporte une vision systémique de l'impact de l'Homme sur le système Terre. Finalement, ces connaissances permettent d'imaginer un nouveau pacte entre les humains et la nature.





Le point **de départ**

Les Millénials et la Génération Z face aux défis des changements globaux

Ce projet d'exposition est né d'une initiative d'enseignants des gymnases vaudois. Ils font le constat que les étudiants du secondaire supérieur n'ont pas les connaissances nécessaires pour appréhender les changements globaux et situer leur vélocité ainsi que leurs impacts dans le contexte de la grande et longue histoire de la Terre. De plus, le matériel pédagogique actuel en biologie, sciences de la terre ou géographie ne comble pas ces lacunes et n'offre pas de vision systémique et transversale à cette vaste problématique.

L'objectif de l'exposition DurArbrilité et des activités qui l'accompagnent est de servir de base pour générer un futur matériel pédagogique traitant de l'impact de l'Homme et des changements globaux sur le système Terre.

Nous pensons que l'encouragement au changement de comportement par la diffusion de connaissances scientifiques solides et factuelles dans l'éducation est un aspect fondamental pour l'adaptation aux effets des changements globaux.



🕒 Une classe de jeunes élèves de Chamonix observant le développement printanier des feuilles d'un frêne dans le cadre du programme de science participative Phenoclim. Ce programme sensibilise à l'impact du changement climatique sur le développement de la faune et de la flore. Photo : Centre de Recherche sur les Écosystèmes d'Altitude (CREA), Chamonix. www.phenoclim.org.

🕒 Fromager (*Ceiba pentandra*), Costa Rica. Cet arbre domine le paysage environnant et abrite de nombreux épiphytes (orchidées, broméliacées, lichens, mousses, hépatiques et fougères). Un écosystème à lui tout seul. Photo : J. Magnin-Gonze.

L'ÉDUCATION DOIT ELLE AUSSI S'ADAPTER AUX IMPACTS DES CHANGEMENTS GLOBAUX

La capacité à faire face aux impacts des changements globaux par l'adaptation et l'atténuation est de plus en plus intégrée dans la réponse des politiques publiques face à ces changements. Dans ce contexte, l'éducation est considérée comme un outil précieux pour sensibiliser la société dans son ensemble aux changements globaux et induire des changements de comportements individuels.

L'éducation et la diffusion des connaissances sur les bouleversements environnementaux à l'échelle planétaire ont constitué pendant longtemps une faible priorité au niveau mondial. Plus récemment, l'adaptation par la sensibilisation et l'éducation est devenue cruciale dans le contexte plus large du développement durable.

Dans ce contexte, l'article 6 de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques appelle les pays à promouvoir et à faciliter l'éducation et la sensibilisation du public au changement climatique.

Cependant, les études actuelles axées sur la sensibilisation des jeunes générations au changement climatique ont montré une variété de résultats: ils indiquent notamment une grande confusion quant aux concepts d'effet de serre et de réchauffement de la planète, entre les causes et les impacts du changement climatique, ainsi que les méthodes par lesquelles l'atténuation et l'adaptation à ce changement peuvent se produire. Il est donc impératif d'accroître la sensibilisation actuelle aux changements globaux et de mettre à jour les programmes scolaires pour former les enseignants et *in fine* les étudiants des jeunes générations.





Des arbres

à travers l'histoire et les territoires



Évolution de la symbolique des arbres et des forêts dans le temps

Poumon de la Terre, source de matériaux de construction renouvelables, en énergie, en nourriture ou sanctuaires forestiers, la forêt devient de plus en plus à la fois un territoire de refuge et un lieu de détente et de loisirs dans les pays développés. Avant de devenir fonctionnelle, la forêt a également hébergé et produit de nombreux mythes. Cette multiplicité de fonctions des arbres et de la forêt pour l'Homme, rarement exclusives et désormais difficiles à concilier, a évolué au fil du temps et n'est pas figée. La forêt, à l'instar de nombreuses autres composantes de l'environnement, est un élément pour lequel nous pouvons retracer ses origines et son évolution.

● Est-ce l'arbre de Josué (*Yucca brevifolia*) qui a servi de modèle pour ces pétroglyphes à Red Rock Canyon National Conservation Area dans le Nevada ? Les Amérindiens (*Anasazi*, *Patayan* et *Paiute*) ont occupé ce site entre -10'000 ans et les temps modernes. L'arbre de Josué est une espèce de la famille des *Asparagacées* que l'on rencontre uniquement en Amérique du Nord dans les États de Californie, Arizona, Utah et Nevada.
Photos : K. Sidi-Ali, C. Randin.



● *Acacia isolé. Lake Nakuru National Park, Kenya. Photo : K. Sidi-Ali.*

En raison peut-être de leur grande taille et de leur longévité, les arbres et les forêts ont profondément affecté l'imaginaire des sociétés préhistoriques: les arbres étaient vivants comme les êtres humains et les animaux mais ne se déplaçaient pas, comme les montagnes et les pierres.

Au fil du temps, aux forêts et aux essences individuelles ont été attribués différents concepts dans l'imagination des populations vivant dans divers lieux géographiques. L'abondance des arbres, mais également, par opposition, leur rareté d'un lieu à l'autre ont influencé la façon dont on les percevait.

Les forêts décidues et leurs cycles saisonniers de chute et de croissance des feuilles ont peut-être également incité les populations à considérer les arbres comme des symboles d'une force de vie éternelle. Les arbres et les forêts ont donc endossé des caractéristiques symboliques divines. En contact avec le sol par les racines et avec le ciel par les branches, ils étaient les moyens de communication entre les mondes et permettaient une connexion entre les humains et les dieux.



📍 Un hêtre (*Fagus sylvatica*) au début de l'automne.
Photo : K. Sidi-Ali.

La tradition de la forêt sacrée, souvent associée au secret et aux rites d'initiation, était répandue dans de nombreuses cultures. On considérait des groupes d'arbres, ou des portions de forêt naturelle ou artificielle, comme séparés des autres et intouchables.

Les arbres symboles sont devenus des enjeux lors de guerres et de révolutions, à l'image de l'*Irmingsul*, la « Colonne d'Irmin » en vieux saxon. Il s'agirait d'un frêne ou d'un chêne, selon les sources, dédié à une divinité de la guerre et abattu à Eresburg en 772 par Charlemagne lors de ses guerres avec les Saxons.

Nous avons porté notre regard sur certaines significations symboliques, acquises par les arbres et les forêts durant les derniers dix millénaires de l'existence de l'Homme. Il consiste en quelques éclairages d'un vaste thème, qu'il ne fait qu'effleurer, sans prétendre être exhaustif, sur les plans historique ou géographique.



📍 Pétroglyphes en forme d'arbre, lac Winnemucca, Nevada, États-Unis.
Photo : Dr L.V. Benson, Museum of Natural History, University of Colorado.

DES ARBRES DE PIERRE À L'EXTINCTION DES GRANDS MAMMIFÈRES

Sur les berges du lac Winnemucca, dans le nord-ouest de l'État du Nevada (États-Unis), on peut apercevoir des pérogllyphes profondément sculptés sur des blocs de tuf effondrés.

Parmi ces éléments se trouvent des « formes d'arbre » comprenant des séries de branches uniformément espacées et parallèles, parfois arquées et coupées en deux par une ligne verticale.

L'âge maximal estimé de ces dessins est de 14'000 ans et ils ont probablement été gravés par des Amérindiens, après leur arrivée à l'est des Rocheuses. Vers -40'000 ans, des groupes d'*Homo sapiens* viennent, depuis l'Afrique,

concurrencer les Néandertaliens installés en Europe. La Sibérie est atteinte par *H. sapiens* vers -30'000 ans. Profitant de l'abaissement du niveau des mers à la fin de la dernière période glaciaire du Wisconsinien en Amérique du Nord, des groupes d'individus passent le détroit de Behring alors asséché et amorcent la colonisation des Amériques. La technique lithique très perfectionnée de ces chasseurs en font de redoutables prédateurs. En quelques milliers d'années, la majorité de la grande faune est exterminée (mammouths, chevaux, chameaux, antilopes). Ainsi, environ 60 grands mammifères

👉 *Portrait d'Auguste du type de Prima Porta.*
Marbre, 1^{er} siècle ap. J.-C. Musée du Louvre.
Photo : M.- L. Nguyen. License CC BY 2.5.

ont disparu en Amérique du Nord il y a 12'000 ans, probablement en raison de la combinaison de la surchasse et de changements climatiques. Suite à ces extinctions, les fossiles ont montré non seulement un changement dans les communautés végétales et une augmentation de la fréquence des incendies, mais également une diminution de la diversité des petits mammifères. En effet, lorsque les grands mammifères, qui sont de véritables « ingénieurs des écosystèmes », se sont éteints, des forêts décidues plus denses sont apparues, augmentant le volume de combustible et la fréquence des incendies. La perte de la mosaïque d'habitats plus ou moins ouverts dans l'ouest de l'Amérique du Nord a entraîné à son tour une diminution des habitats favorables aux petits mammifères.

LE CHÊNE DU DIEU TONNERRE

Les chênes (espèces du genre *Quercus*) apparaissent de manière récurrente dans différentes mythologies européennes. Le chêne est en général associé au dieu du tonnerre, qui parfois porte directement son nom.

Dans la Grèce hellénique, il existait un bois de chêne à Dodone en Épire, où Zeus et Dioné, sa parèdre locale (une divinité souvent inférieure en prérogative, habituellement associée à une divinité plus influente) rendaient des oracles. Dans la Rome antique, le chêne était associé à Jupiter capitolin.

La couronne civique (*corona civica* en latin) était une distinction accordée dans l'Antiquité romaine à celui qui a sauvé la vie d'un citoyen romain en tuant son agresseur. Elle était composée de feuilles de chêne. Dans la hiérarchie



🕒 Reconstitution de l'arbre cultuel en or de l'oppidum de Manching, 3^e siècle av. J.-C., Keltenmuseum Manching.
Photo: Mößbauer. License CC BY 3.0.



des récompenses militaires, elle occupait le deuxième rang, le premier étant dévolu à la couronne obsidionale qui se composait de végétaux issus du champ de bataille: graminées, fleurs et céréales, en particulier le blé. Plusieurs empereurs romains, parmi lesquels Auguste (27 av. J.-C. à 14 ap. J.-C.), sont représentés coiffés de la couronne civique. Les liens directs entre le dieu et l'arbre se retrouvent tant chez les Grecs que chez les Romains, et le culte du chêne passa de la Grèce à l'Italie par la Sicile.

On retrouve le culte du chêne chez les Germains, les Slaves, les Baltes et les peuples nordiques, où il fut consacré aux dieux Wotan et Thor. Chez les Baltes et les Slaves, le dieu du tonnerre *Perkūnas* ou *Perun* porte un nom dérivé de celui de l'arbre **perku-* (indo-européen **perku-us*), cognat du latin *quercus*.

Depuis l'Antiquité romaine, on a même longtemps pensé que le mot « druide » était directement associé au chêne (en grec: δρυς, drus). Toujours dans le monde celtique, on peut encore citer l'exemple remarquable de l'oppidum (ville fortifiée gauloise) de Manching en Allemagne qui a livré un trésor d'orfèvrerie en bronze et or et qui représente des branches avec des feuilles et des baies: elles sont actuellement interprétées comme étant du lierre poussant sur des branches de chêne.

Plus tard, c'est encore sous un chêne, dans la forêt de Vincennes, que Louis IX, roi de France et communément appelé Saint Louis (1226 à 1270 ap. J.-C.), écoutait les doléances de ses sujets et rendait justice.

QUELLE ESPÈCE POUR L'ARBRE COSMIQUE ?

L'arbre de vie, ou arbre cosmique, est un motif récurrent dans l'art européen. De telles représentations d'arbres existent au moins depuis l'âge de Bronze, comme par exemple des pétroglyphes du sud de la Scandinavie où des silhouettes d'arbre, parfois très stylisées et associées à des bateaux. Il s'agit d'un archétype renvoyant, au sein de plusieurs mythologies, à un arbre reliant les différentes parties de l'Univers, généralement les mondes céleste, terrestre et souterrain.

À proximité du temple d'Uppsala en Suède, un centre religieux à l'époque médiévale et pour le paganisme nordique, se trouvait un if sacré. La présence de cet arbre questionne sur l'origine exacte des représentations de l'arbre cosmique nordique, germanique, mais aussi celtique (ou tout du moins irlandais). En effet,



❶ Gravure sur bois représentant le temple d'Uppsala et l'arbre sacré. O. Magnus (1555) *Historia de Gentibus Septentrionalibus*.
Photo : The History Collection / Alamy Stock Photo.

il semble y avoir une confusion entre trois espèces: le chêne, l'if et le frêne. Tous trois semblent avoir été des arbres sacrés dans le nord de l'Europe.

L'*Eó Mughna*, un arbre mythique d'Irlande, est décrit comme étant un chêne, mais *Eó* correspond au nom de l'if (*iuos* en gaulois). *Yggdrasil*, l'Arbre cosmique dans la mythologie nordique, est représenté comme un immense if ou frêne. Le nom *Yggdrasil* signifie Monture d'Yggr ou Monture d'Odin. Il sert d'axe et de soutien au monde, avec trois racines reliant les trois royaumes (*Ásgard* pour les dieux, *Midgard* pour les humains et *Utgard* pour les géants). C'est à une des branches d'*Yggdrasil* qu'Odin est resté pendu neuf jours, percé d'une lance, pour acquérir le savoir. Dans ce cas, l'if d'Uppsala a pu être une représentation vivante de cet arbre cosmique nordique. L'importance de l'if dans la mythologie nordique peut aussi être vue dans *Ydalir*, le « Val des ifs » et la demeure du dieu *Ullr*, associé au ski, à l'arc et à la chasse. L'if est aussi un dispensateur de mort, par l'intermé-

diaire de l'arc taillé dans son bois (ce qui serait sous-entendu dans le nom des Ebuovices, « qui vainc par l'if », un peuple gaulois de l'Eure.

Plus largement, l'arbre a un lien très fort avec les humains dans la mythologie nordique. *Askr* et *Embla*, respectivement le premier homme et la première femme créés par les dieux, sont nés de bois flotté animé par Odin et ses frères. *Askr*, l'homme, porte un nom signifiant « frêne ».



❷ L'if de Llangeryw, au Pays de Galles. On estime qu'il aurait germé il y a 4000 environ, ce qui en fait un contemporain du fameux ensemble mégalithique de Stonehenge. Il mesure 13 m de haut et 10 m de circonférence.
Photo : Emgaol. License CC BY 3.0.

⊕ *Le jugement de Paris. Mosaïque d'Antioche, Turquie. 186 x 186 cm 115-150 ap. J.-C. Musée du Louvre, Paris. Photo: Nguyen. License CC BY 3.0.*

LE POMMIER ET L'AU-DELÀ

Dans plusieurs mythologies et légendes européennes, la pomme et le pommier sont en lien avec un monde dépourvu de vieillesse. La version la plus connue, *Avalon* ou *Avallon*, provient des différentes versions du mythe arthurien, un ensemble de textes écrits au Moyen Âge autour du roi Arthur et de son entourage. Les textes, probablement composés durant le Haut Moyen Âge et compilés par des moines, ont subi parfois des traductions du gallois ou du breton vers le français médiéval, puis vers le français moderne, ce qui a pu par conséquent altérer certains aspects de la symbolique. Les versions les plus anciennes en gallois nous parlent d'*ynys Afallach*, « l'île d'*Avallach* ». Dans la légende, cette île est décrite comme le lieu où le corps du roi est en attente du jour où son peuple aurait à nouveau besoin de lui. Elle est aussi, dans certaines versions, la demeure de femmes dotées de

pouvoirs, dont Morgane qui, après avoir longtemps lutté contre son demi-frère, veille sur lui. On retrouve un équivalent irlandais dans le récit *Le voyage de Bran (Immrán Brain maic Febail)*. Dans la mythologie celtique irlandaise, Bran Mac Febail est un personnage attiré par une *bansidh*, une créature féminine surnaturelle, qui lui promet un séjour dans l'Autre Monde. Ce texte parle d'une navigation vers *Emain Ablach*, île du dieu de la mer et de l'Autre-Monde *Mannán Mac Lir*. Cette île est liée au *Tír na nÓg*, « pays des jeunes ou de la jeunesse » et au *Tír na mBan*, « le pays des femmes (fées) ». Le jeune prince visite ces terres en quête de la *bansidh* qui l'a appelé et qui lui offre alors une branche de pommier magique. Les deux versions, galloises et irlandaises, présentent des similitudes. Il s'agit d'îles ou d'archipels, hors du monde réel, et peuplés de divinités (*Mannán Mac Lir* en



Irlande, peut-être *Afallach* au Pays de Galles) et de fées ou femmes magiciennes (*bansidh / banshee* ou *Morgan*, «née de la Mer») et où les héros viennent passer des siècles sans vieillir ou reposer en paix.

Ces légendes médiévales ne sont pas sans rappeler un lieu mythique des textes classiques: le jardin des Hespérides. Il s'agit d'un archipel occidental où se trouvaient les pommes d'or et qui était un lieu de séjour potentiel des héros de l'Antiquité grecque, à l'image des champs Élysée, et où régnaient Atlas et les Hespérides. Les pommes d'or des Hespérides sont un cadeau de Gaia à Hera pour son mariage. Elles sont égale-

ment apparues dans plusieurs légendes comme la course d'Atalante ou les travaux d'Héraclès. Le récit le plus connu est sans doute celui de la Pomme de la discorde, jetée comme un prix de beauté *pour la plus belle* par Éris (*Discorde* en latin et chez les Romains), déesse de la guerre, furieuse de ne pas être invitée au mariage de Pélée et Téthys. Trois déesses revendiquent alors le fruit, Héra, Athéna et Aphrodite. Afin de mettre un terme à la dispute, Zeus ordonne à Hermès d'emmener les déesses sur le mont Ida, afin que Pâris y désigne la gagnante. Le jeune homme accorde finalement la pomme à Aphrodite, ce qui provoqua la Guerre de Troie.



📍 Un pommier, Hunnenberg, Suède.
Photo : C. Randin.

On peut encore mentionner le lien avec la déesse scandinave *Iðunn*. Cette dernière ne réside pas dans une île occidentale, mais dans un bosquet en *Ásgard*, qui est aussi le paradis des héros et des dieux, où elle distribuait les pommes d'or, qui leur assuraient force et jeunesse.

D'une façon générale, le pommier est donc associé dans les mythologies celtiques, gréco-romaines et germaniques à un au-delà qui est le séjour de héros élus pour côtoyer les dieux. La pomme est source de nourriture perpétuelle, de jeunesse et de force. Le pommier, peut-être par sa faculté à se bouturer ou à repousser après avoir été coupé, est probablement associé à la mort et à la renaissance.

L'ARBRE DE LA LIBERTÉ

L'arbre de la liberté est devenu un symbole depuis la période de la Révolution française de 1789 et s'est ensuite transformé au cours du 19^e siècle en l'une des icônes de la République française, avec Marianne ou la Semeuse. Ainsi, l'usage fut introduit en France, après la Révolution française, de planter un jeune arbre lors d'une cérémonie. Le peuplier a été rapidement préféré au chêne dès l'instauration des cérémonies en 1792, dans les villes de Lille et d'Auxerre. Cette tradition s'inspirait certainement de ce qui s'était fait aux États-Unis avec les poteaux de la Liberté *Liberty Pole*, à la suite de la guerre de l'indépendance de 1775 à 1783. En quelques mois, plus de soixante mille peupliers s'élevèrent dans toutes les communes de France.



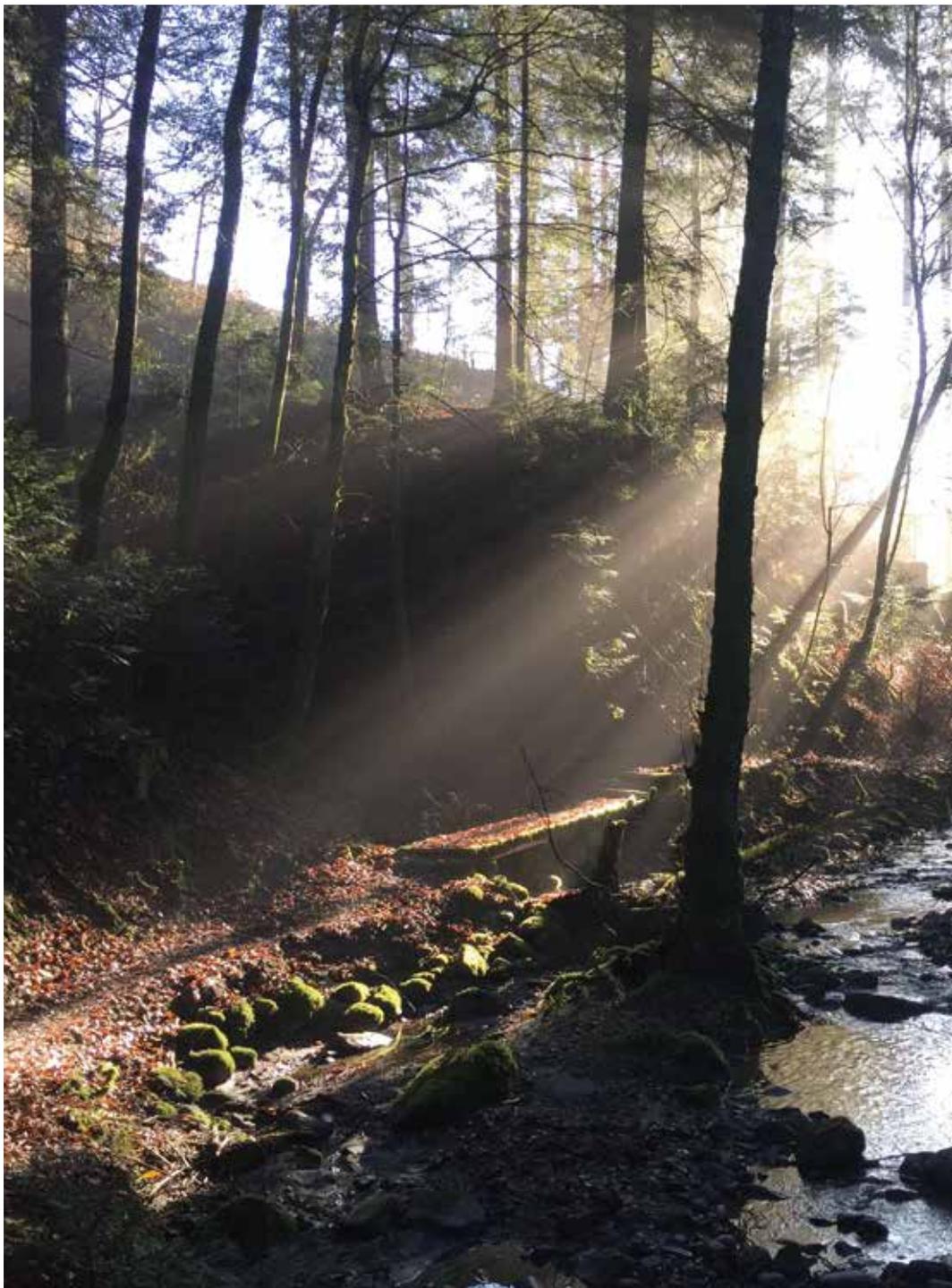
☉ L'Arbre étoilé créé par Joaquin Jimenez pour les pièces de 1 € et 2 € françaises.

Photo : Aimablement réalisée par le Musée monétaire cantonal, Lausanne.

Plantés en général dans l'endroit le plus fréquenté ou le plus visible d'une localité, comme signe de joie et symbole d'affranchissement, ces arbres devaient grandir avec les institutions nouvelles de la Révolution française. Cependant, la France, également en guerre contre l'Autriche, était saisie d'un élan patriotique et la défense de la patrie se confondait avec celle des progrès sociaux de la Révolution. Beaucoup d'arbres furent détruits par les contre-révolutionnaires, qui les sciaient ou arrosaient leurs racines de vitriol pendant la nuit. Des condamnations à mort furent même prononcées pour ces actes. Lors du retour au pouvoir

des Bourbons en 1814, il existait encore un grand nombre d'arbres de la liberté dans toute la France, qui étaient appelés arbres Napoléon sous l'Empire. Le gouvernement de Louis XVIII donna des ordres rigoureux pour déraciner ces derniers emblèmes de la Révolution.

L'arbre de la liberté, dit modèle de l'Arbre étoilé, est désormais le dessin de l'avvers des pièces de 1 € et 2 € françaises, créé par Joaquin Jimenez en 1999. L'arbre, dont les branches, les racines et le tronc (enserré par les initiales R et F) rayonnent à travers un hexagone, représente le territoire français.





☉ Forêt d'épicéas (*Picea abies*), Vallon de la Chandelar, Montblesson, Vaud. C. Randin.

LA FORÊT: SAUVAGERIE, DANGER ET MAGIE

Les anciens n'ont pas forcément eu une image paisible de la forêt. Elle pouvait aussi être une zone de marge entre le monde civilisé et l'Autre-Monde et, de ce fait, un territoire sauvage qui échappe aux règles. Pour certaines cultures, c'était dans la forêt que pouvait se loger les dangers réels, avec les brigands et les animaux prédateurs, mais aussi parfois imaginaires avec des dieux et des esprits de la nature.

Chez les Grecs, les bois sont peuplés de *dryades* et *hamadryades*, des esprits des arbres, mais aussi d'autres nymphes, comme les nymphes méliennes (« du frêne »). On trouve aussi des satyres et des centaures, créatures associées à des divinités comme Pan ou Artémis, qui parcourent la forêt pour chasser. Dionysos en particulier est associé à cet aspect sauvage de la forêt. Il n'est pas que le dieu de la vigne et de l'ivresse, il est aussi un dieu des marges et paradoxe, mortel et immortel, il naît et renaît. Chez les Latins, il est aussi *Liber*, le dieu qui délivre. C'est dans la forêt qu'il laisse libre cours aux excès, hors de la cité. Il entraîne les femmes qui deviennent ménades ou bacchantes et le suivent, en compagnie des bêtes sauvages, des satyres et des nymphes.

📍 Représentation de la déesse Artio devant un ours et un arbre, groupe de statuettes en bronze trouvé en 1832 à Muri (BE) et datant de l'époque gallo-romaine (2^e siècle ap. J.-C.). Musée historique de Berne.
Photo : Sandstein.
Licence CC BY 3.0.

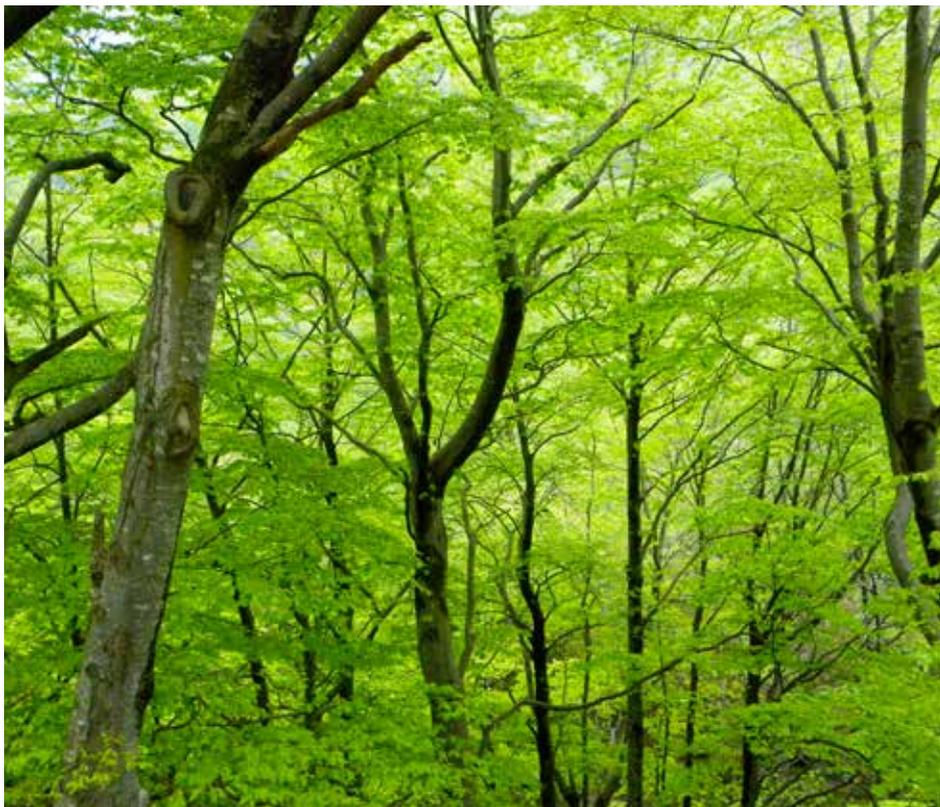


C'est aussi dans la forêt que se produisent des métamorphoses: les nymphes fuient les satyres et les dieux et se changent en arbre comme Daphné, ou en roseau comme Syrinx. La forêt est un lieu sauvage où les transgressions des plus folâtres aux plus violentes sont commises. En plus du panthéon gréco-romain, les Romains disposent d'un dieu supplémentaire, Silvain (*Silvanus*), parèdre de Diane. Ils vont aussi contribuer à ajouter un aspect terrible et barbare aux peuples du nord, Ligures, Celtes et Germains, et à leurs forêts, suite aux terribles défaites qu'ils vont subir. Les plus connues sont la bataille de la Silva Litana contre les Boïens d'Italie qui sapèrent la forêt pour tendre une embuscade, et la bataille de Teutoburg face à Arminius où Varus et ses légions furent massacrés et où la forêt germanique gagna une réputation sauvage.

Chez les Celtes, nous disposons de peu d'informations pour comprendre la vision que ceux-ci avaient de la forêt durant l'Antiquité. Les sources latines nous livrent des dédicaces à Silvain et

Diane. Cette dernière semble avoir également été une déesse vénérée par les Helvètes sous le nom d'*Artio*. En effet, une statue en bronze trouvée à Muri (BE) la montre face à un ours et un arbre.

La mythologie et la perception indienne nous livrent également des parallèles intéressants avec les cultures occidentales. Elle est aussi peuplée d'esprits de la nature qui sont, selon le contexte, bénéfiques ou malveillants. On retrouve parmi eux le *yakṣa* et la *yakṣiṇī*, génies des forêts, similaires à nos fées et lutins. Plus largement, en Inde, la forêt est le lieu de retraite des ascètes, *sādhu*, et joue un rôle majeur dans l'émergence des principaux courants religieux indiens (hindouisme, bouddhisme, jaïnisme) avec la formation de communautés (*aśrama* ou *saṃgha*) en marge de la société civile. La légende de la naissance de Bouddha le fait naître dans un parc de plaisance planté d'arbres à Lumbini au Népal. L'iconographie de sa naissance représente sa mère sous une forme proche d'une *yakṣiṇī*, renforçant son lien avec le monde forestier.



L'ARBRE ET L'ÉCRITURE

L'arbre partage un lien étroit avec l'écriture, bien avant l'apparition du papyrus ou du papier. Il y a un lien étymologique étroit en latin, le mot *libër* signifiant à la fois le liber, tissu situé sous l'écorce de l'arbre, et le livre.

Dans les différentes langues germaniques, les noms du hêtre et du livre sont intimement liés. En norrois *bóc* et en vieux saxon *bōc* ont le double sens de « hêtre » et de « livre ». La deuxième langue va conserver le sens de livre, book, et utiliser une version dérivée, *bēce*, qui donne beech pour le hêtre. La situation est similaire en allemand où la forme moyen-allemande buoch donne Buch « livre » et Buche « hêtre ». Le lien entre les deux sens repose peut-être sur une utilisation du bois de hêtre pour graver des runes, soit à but magique, soit à but divinatoire (Buchenstäbe en allemand).

📌 *Les hêtraies représentent l'écosystème forestier dominant en Europe. Les Germains ont utilisé des bâtonnets en bois de hêtre (Fagus sylvatica) pour écrire des textes basés sur des runes. Les runes composent un alphabet qui possédait initialement 24 signes et était utilisé pour l'écriture de langues germaniques par des peuples parlant ces langues, tels les Scandinaves, les Frisons et les Anglo-Saxons. Photo : K. Sidi-Ali.*



L'ARBRE DANS LE FOLKLORE, LE NÉOPAGANISME ET LA CULTURE POP

Dès le 17^e siècle, les contes populaires commencent à être couchés par écrit par Charles Perrault. La forêt se nimbe de ténèbres et se peuple d'ogres, de nains, de sorcières cannibales et de loups anthropophages. Ces histoires vont ancrer la peur du loup dans l'inconscient populaire. En effet, qui n'a pas tremblé pour le petit chaperon rouge ?

Dans la seconde moitié du 19^e siècle, l'image populaire d'une forêt sombre et hostile se transforme progressivement en un lieu paisible. En Allemagne, la publication de contes d'inspiration populaire par les frères Grimm et, aux États-

Unis, la publication en 1826 du roman *Le dernier des Mohicans* de James Fenimore Cooper ont contribué à l'émergence de la vision de la forêt romantique. Un peu plus tard, Henry David Thoreau, philosophe, naturaliste et poète américain, publie en 1854 *Walden ou la Vie dans les bois*. Ce récit est certainement l'ouvrage fondateur du genre littéraire du *nature writing*. La pensée écologiste moderne voit également en *Walden* le roman du retour à la nature et de la conscience environnementale. Thoreau a partiellement adhéré au transcendantalisme, un mouvement philosophique et littéraire d'inspiration romantique européenne.



- 📍 Les grandes forêts d'Amérique du Nord ont influencé des récits d'auteurs comme James Fenimore ou Henry David Thoreau au 19^e siècle. Virgin River, Zion National Park, Utah, États-Unis.
Photo : C. Randin
- 📍 Atmosphère inquiétante dans une pessière du Jura vaudois.
Photo : C. Randin.

Les frères Grimm et Goethe transmettent une vision germanique de la forêt. C'est aussi entre le 18^e et le 19^e siècle que commence à émerger des mouvements mystiques comme le néodruidisme. Ce mouvement se veut l'héritier des druides des textes antiques par la pratique des cultes initiatiques, une tendance encore très en vogue actuellement en Europe. Il va contribuer à réadapter les panthéons et mythes celtiques à la modernité. Il est lié à un mouvement apparu au début du 20^e siècle, la Wicca. Ce courant a beaucoup contribué à populariser des personnages et des légendes en particulier avec la vague New-Age, qui voit des figures issues du monde natif américain rejoindre le fond culturel occidental.

La Wicca va imprégner la culture populaire avec l'émergence de films dans les années 1990 où la magie et la forêt sont basées sur ses préceptes ainsi que sur ceux de la sorcellerie. On peut citer comme œuvres d'horreur *le Projet Blair Witch* qui donne un rôle mauvais et dangereux à la magie et à la forêt, mais aussi de séries comme *Buffy contre les vampires* ou *Charmed* qui remettent la magie blanche et la nature (et son « surnaturel ») au-devant de la scène. Plus tard, on peut citer d'autres séries comme *Supernatural* où la forêt est présente et dans laquelle se trouve des figures sauvages comme le *wendigo* qui hantent et attaquent des humains. Dans la littérature, on ne peut éviter les œuvres de Tolkien. L'auteur donne une grande place à



④ La forêt Shiratani, Yakushima, Kagoshima, Japon. Photo : 64. Licence CC BY 3.0.

⑤ Hayao Miyazaki s'est directement inspiré de la Forêt Shiratani Unsuikyo pour dessiner les paysages de *Princesse Mononoké*. Cette forêt est située sur l'île de Yaku au nord d'Okinawa dans la préfecture de Kagoshima. L'île de Yaku est inscrite au patrimoine mondial de l'UNESCO.

Photo : H. Miyazaki. *Mononoke Hime / Princess Mononoke* (1997) Studio Ghibli.

la nature et à la forêt, tantôt accueillante tantôt dangereuse. Avec la vague manga, on peut désormais compter sur la sensibilité japonaise à la forêt, qui percole désormais en Occident. Le célèbre film d'animation *Princesse Mononoké* de Hayao Miyazaki de 1997 est une magnifique légende moderne parlant d'écologie. La culture japonaise est fortement liée au monde naturel et la religion traditionnelle japonaise, le Shinto, animiste, est lui-même centré sur des esprits, les Kami. Les arbres y tiennent une importance symbolique et reçoivent même un culte. On

dénombre une quinzaine d'espèces d'arbres sacrés pour le shinto et le bouddhisme.

Le climat humide en été au Japon favorise une flore luxuriante et des arbres reliques comme le cèdre du Japon (*Cryptomeria japonica*) ou sugi en japonais. Cet arbre, qui peuple la forêt du site de Shiratani Unsuikyo, une forêt primitive à feuilles persistantes sur l'île de Yaku, a marqué Miyazaki et servi de modèle à la forêt du film.

Le prince Ashitaka, protagoniste principal du film, appartient au peuple aujourd'hui disparu des *Emishi*. En effet, le Japon historique était



composé de quatre peuples, les *Yamato*, ancêtres des Japonais modernes, les habitants des *Ryūkyū*, issus d'un métissage entre aborigènes et *Yamato*, les *Ainu*, aborigènes d'Hokkaido, pratiquement disparus aujourd'hui, et les *Emishi*, aborigènes du nord d'Honshu. Dans le film de Miyazaki, les *Emishi* sont présentés comme des aborigènes vivant dans la forêt. Si le film prend racine au Japon, on peut toutefois noter que les personnages sont universels et qu'ils ont leurs répondants dans le folklore et l'imaginaire occidental. Le Gardien de la forêt ou *Shishi Gami* (dieu cerf) ressemble beaucoup à des divinités comme *Cernunnos*, mi-homme mi-cerf et figure majeure du panthéon celtique.

📍 Le *yakusugi* est une variété de cèdre du Japon (*Cryptomeria japonica*) de l'île de *Yaku*. Alors que le *sugi* ordinaire a une espérance de vie d'environ cinq cents ans, le *yakusugi* vit en moyenne deux mille ans. Certains spécimens dépassent même largement cette espérance tel le *jōmon sugi* (縄文杉) dont l'âge est estimé entre 2300 et 7200 ans. Seuls les spécimens ayant plus de mille ans sont reconnus comme étant des *yakusugi*.
Photo : Chris 73. License CC BY 3.0.



© Premier de couverture de « The End ». Zep (2018).
Ed. Rue de Sèvres. Photo : Aimablement offerte par l'auteur.

Plus récemment, en 2018, Zep, le créateur de Titeuf, s'interroge avec la bande dessinée écologique « The End » sur la place de l'Homme sur Terre, son utilité et surtout son avenir. S'inspirant des travaux du botaniste Francis Hallé et de la mystérieuse disparition des koudous de Limpopo en Afrique du Sud, le dessinateur a créé dans ce thriller botanique une intrigue post-apocalyptique. Dans la réalité, il semble de plus en plus probable que l'impact de la météorite de Chicxulub dans la péninsule du Yucatán au Mexique ait provoqué la 5^e extinction de masse il y a 66 millions d'années. Elle aurait causé la disparition de 75 % des espèces et en particulier celle des dinosaures. Dans la bande dessinée, ce sont les arbres qui se débarrassent des dinosaures... puis des hommes. Tout au long de l'ouvrage, forêts et arbres emblématiques des Pyrénées à la Suède sont mis en valeur grâce à de nombreuses années d'observation et de dessins d'après nature.



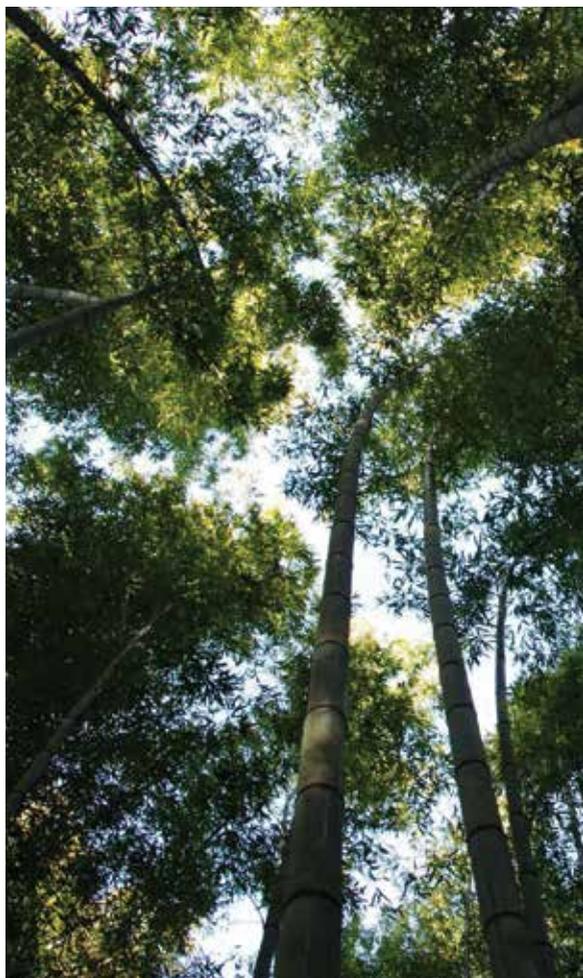
Variations géographiques

de la perception des arbres et des forêts par les humains

La forêt possède une diversité biologique exceptionnelle. A l'échelle du globe, elle recouvre 31 % de la superficie totale des terres et abrite 70 % des plantes et des animaux connus. Les forêts vierges (primaires) jouent un rôle prépondérant dans la conservation de cette biodiversité, puisqu'une forêt secondaire, qui pousse après la destruction d'une forêt primaire, comporte cinq fois moins d'espèces végétales. Aujourd'hui, les forêts primaires ne représentent plus que 36 % des surfaces forestières mondiales.

Il y a plus de 400'000 ans, les premiers hommes exploitaient déjà les arbres. Ils en tiraient du combustible et des matériaux pour des abris, puis des vêtements, des clôtures et des lances. Actuellement, plus de 400 millions de personnes vivent et dépendent des 64 % des forêts façonnées par l'Homme. Les arbres restent, à notre époque, une source indispensable de matières premières, d'aliments et de médicaments. En Afrique, l'essentiel de l'alimentation d'origine animale provient encore de la forêt et 65 % de l'énergie primaire produite sur ce continent est fournie par la biomasse solide (bois de chauffage et charbon de bois notamment).

Il est banal de dire que l'arbre et la forêt jouent un rôle important dans le sacré et le mystère de nombreuses cultures. Cependant, on peut affirmer que l'origine du sacré et du pouvoir mystique attribuée à une espèce d'arbre





provient toujours d'une intime observation par l'humain, basée sur les caractéristiques de l'arbre et de ses rapports avec son environnement. De ces ressentis émergent les facultés présumées d'un arbre: pouvoir, inspiration ou forces occultes.

Les arbres et forêts sacrés existent partout mais jouent des rôles différents. Leurs origines sont également variables: halte de l'ancêtre fondateur, disparition d'un patriarche ou habitat des animaux totems. L'arbre individuel sacré est le plus souvent un arbre remarquable, qui frappe par ses formes ou ses dimensions, ou qui est lié à un événement légendaire ou historique.

Bien que la vénération de certains arbres ou bois persiste dans les traditions locales, l'adoration de l'arbre a, dans une large mesure, disparu du monde moderne. Cependant, les symboles qui restent dans le langage, les légendes et la culture servent à rappeler le rapport étroit qui existait entre la pensée humaine et le monde forestier. L'intérêt moderne à protéger les forêts n'est peut-être qu'une extension naturelle de la logique des anciens rites forestiers. Le bois sacré d'hier est aujourd'hui une réserve de biosphère, le site d'un patrimoine naturel ou une aire protégée. En creusant dans le règne du symbole, on peut très souvent découvrir les liens qui existent entre les anciens systèmes de valeurs et les pratiques modernes. Tour d'horizon sur quatre continents.



📍 Une mosaïque de pâturages et forêts dans le Parc naturel régional Gruyère Pays-d'Enhaut. Photo: C. Randin.

DE LA SUREXPLOITATION À LA DÉPRISE AGRICOLE

Les relations actuelles avec les forêts des pays occidentaux et développés ont émergé quelque part entre le 18^e et le 19^e siècle, en faisant de la forêt un lieu de quête touristique qui a également transformé notre relation avec les montagnes et le littoral. En Suisse, et parallèlement au développement du tourisme, la surexploitation, motivée par les besoins de la première révolution industrielle, se produisait dans les forêts. Dans la première moitié du 19^e siècle, des recherches ont donc été menées sur les liens entre la déforestation en montagne et les inondations, de plus en plus perçues comme une menace. Le Conseil fédéral a commandé un rapport sur les forêts de montagne et les ruisseaux de montagne, menant à l'article 24 de la Constitution fédérale de 1874, et attribuant à la

Confédération le contrôle des forêts. Le principal objectif de cette loi fédérale était la conservation et l'extension des forêts de protection et la garantie de leur exploitation à long terme. Alors que la couverture forestière n'a pratiquement pas changé sur le Jura et le Plateau depuis 1985, elle a augmenté de 8 à 28% dans les Alpes et les Alpes du Sud, selon le dernier inventaire forestier national. L'abandon des terres agricoles en montagne et, dans une moindre mesure, le réchauffement climatique sont les principaux moteurs de cette augmentation. Dans ce contexte, cette expansion pourrait entraîner d'importants changements dans la perception des paysages alpins, tant par les habitants que par les visiteurs, la valeur esthétique du paysage étant considérée comme un atout touristique.



📍 S'ozzastru (l'oléastre en langue sarde) est le nom donné au plus ancien olivier (*Olea europaea*) parmi d'autres tous millénaires, situés à Santu Baltòlu di Karana sur le territoire de la commune italienne de Luras, dans la Province de Sassari en Sardaigne. Une estimation lui attribue un âge de 3000 à 4000 ans, ce qui en ferait un des plus anciens arbres d'Italie.
Photo : J. Magnin-Gonze.

DU SYMBOLE ANTIQUE À L'ÉCONOMIE MÉDITERRANÉENNE

L'olivier (*Olea europaea*) a laissé une trace dans toutes les civilisations du bassin méditerranéen, ainsi que dans une multitude de textes et de pratiques religieuses. Il est un symbole de paix, de victoire et d'éternité dans la mythologie gréco-romaine. Un mythe grec explique comment l'olivier est devenu sacré pour cette civilisation antique. Le roi Cécrops voulait attribuer la protection de sa cité et se retrouva face à deux prétendants, Athéna, déesse des arts et de la guerre, et Poséidon, dieu des mers, des chevaux et des séismes. Chacun dut faire un cadeau à la ville. Poséidon frappa le sol de son trident et fit jaillir sur l'acropole de la ville une source d'eau salée. À son tour, Athéna fit pousser le premier olivier, arbre particulièrement utile et qui devint vite un des fondements de l'agriculture méditer-

ranéenne. Le roi choisit l'arbre comme cadeau et nomma sa ville Athènes, d'après la déesse.

L'olivier appartient également à la « triade méditerranéenne » de l'alimentation des Grecs antiques, avec le blé et la vigne. Il occupe encore une place centrale dans les régions issues des anciennes civilisations pour la multitude de « services » qu'il rend. Le bois d'olivier est utilisé aujourd'hui dans le cadre d'activités artisanales et son fruit, l'olive, pour produire de l'huile alimentaire. L'huile est aussi utilisée traditionnellement dans le bassin méditerranéen comme cosmétique pour les soins de la peau et la fabrication d'onguents ou de savons, dont le savon d'Alep et de Marseille. Jadis, le bois d'olivier servait au chauffage et à la construction tandis que son huile était non seulement utilisée pour cuisiner, mais aussi pour la confection de parfums et comme combustible pour l'éclairage.

Les Crétois sont les premiers européens à avoir cultivé l'olivier durant l'époque minoenne, entre 3000 et 1450 av. J.-C. Cette pratique s'est ensuite répandue à travers la Grèce, puis en Égypte.

Les Espagnols ont introduit l'olivier dans leurs colonies des Amériques à partir du 16^e siècle. La superficie des oliveraies a globalement diminué au cours du 20^e siècle, mais les gains de productivité ont permis un quintuplement de la production mondiale pour cette même période. Aujourd'hui, l'Espagne est le plus grand cultivateur d'olives du bassin méditerranéen. Les olives vertes et les olives noires sont cueillies à des degrés de maturation différents. Les olives vertes, récoltées avant maturité, sont destinées uniquement à la table, alors que les olives noires servent également à la production d'huile alimentaire.

La bactérie *Xylella fastidiosa* a été introduite en Europe en octobre 2013 via des caféiers infectés en provenance du Costa Rica. Elle décime depuis lors les oliviers de la région des Pouilles, en Italie. Elle obstrue le xylème (le constituant des tissus végétaux qui transporte la sève des racines jusqu'aux feuilles). Une attaque fatale car les feuilles brûlent et se dessèchent, provoquant la mort de l'arbre. On parle alors du *complexe du dessèchement rapide de l'olivier* (CoDIRO en italien). Bien qu'elle ne soit toujours pas arrêtée, cette épidémie aura peut-être servi de leçon pour la gestion des autres espèces invasives qui pourraient arriver accidentellement dans nos territoires.

📍 Culture d'oliviers (*Olea europaea*) en Toscane.
Photo : C. Randin.



LES ARBRES À PALABRES MILLÉNAIRES FACE AU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

Le baobab (*Adansonia digitata*) est l'arbre typique de l'Afrique tropicale sèche. Il est l'unique représentant du genre *Adansonia* sur le continent alors que l'on en compte sept espèces à Madagascar. Les huit espèces sont toutefois communément appelées « baobab ».

Le baobab est représenté sur les armoiries de la République centrafricaine depuis 1963 et sur celles du Sénégal depuis 1965. Les fromagers (*Bombax ceiba* et *Ceiba pentandra*) appartiennent à la même famille que les baobabs, celle des Malvacées, et fournissent une fibre végétale, le *kapok*. Un fromager est représenté sur les armoiries de la Guinée équatoriale depuis 1968. Enfin, c'est sur un baobab du Botswana, qui était jusqu'en 2016 l'un des trois plus larges arbres d'Afrique, que David Livingstone (1813-1873) grava ses initiales. Le baobab fait l'objet de nombreux usages traditionnels : les jeunes plants possèdent une racine pivot qui est consommée comme une carotte ou une asperge. La feuille de baobab, riche en protéines et minéraux, se consomme en bouillie. Au Sénégal, le *lalo* est une poudre de feuilles séchées de baobab que l'on incorpore aux céréales ou

📍 *Un baobab africain (Adansonia digitata) émergeant au-dessus de la savane arbustive. Kruger National Park, Afrique du Sud. Photo : C. Randin*



☉ *L'une des sept espèces de baobab de Madagascar (Adansonia rubrostipa). Celle-ci est typique des forêts sèches. Photo : L. Gautier, Conservatoire et Jardin botaniques de la Ville de Genève.*

aux sauces, notamment lors de la préparation du couscous de mil. La pulpe du fruit du baobab est comestible : séchée ou fraîche et mêlée à de l'eau, elle fournit une boisson rafraîchissante appelée jus de *bouye*.

La présence d'un grand baobab est souvent le signe d'une nappe phréatique atteignable par un puits à proximité. Historiquement, les villages de l'Afrique tropicale se sont donc souvent créés autour des grands baobabs. Sacré pour plusieurs cultures africaines, le baobab est aussi un arbre à palabres qu'il est malvenu ou sacrilège de couper. L'arbre à palabres est un lieu traditionnel de rassemblement, à l'ombre duquel on s'exprime sur la vie en société, les problèmes du village, la politique. C'est aussi un lieu où les enfants viennent écouter des histoires contées par un ancien du village.

Capables de stocker plus de 140'000 litres d'eau pour la saison sèche et très résistants aux chaleurs intenses, les grands baobabs d'Afrique ont pourtant commencé à mourir au cours de la seconde moitié du 19^e siècle. Depuis 10 ou 15 ans, leur disparition a rapidement augmenté à cause de températures de plus en plus élevées et des sécheresses croissantes. Parmi les victimes, l'arbre *Panke*, originaire du Zimbabwe, le plus vieux baobab d'Afrique, avec 2450 ans au compteur.





DES FEUILLES BLEUES... PARFOIS PARÉES D'OR

Les eucalyptus sont de toutes formes et de toutes tailles et dominent 95 % des forêts en Australie, des régions de montagnes aux forêts tropicales, de la brousse jusqu'aux trottoirs des villes. L'arbre *Centurion* en Tasmanie est même la plus grande plante à fleurs au monde, avec 99 m de hauteur.

Les eucalyptus comprennent environ 900 espèces, regroupées en trois genres: *Eucalyptus*, qui comprend la majorité des espèces, *Corymbia*, que l'on trouve principalement dans le nord de l'Australie, et *Angophora*, originaire de l'est de l'Australie. Il existe également quelques espèces en Nouvelle-Guinée et même une espèce, la gomme arc-en-ciel (*Eucalyptus deglupta*), sur l'île philippine de Mindanao.

Le terme *eucalypt* signifie bien (*eu*) couvert (*calyptos*) en grec et a été utilisé pour la première fois par le botaniste français Charles Louis L'Héritier de Brutelle en 1788 pour décrire des spécimens collectés lors du troisième voyage de James Cook.

Les feuilles d'eucalyptus, souvent teintées de reflets bleutés, sont remplies de glandes à huile produisant des phénols, des composés aromatiques qui donnent leur parfum distinctif. Ces phénols aident à protéger l'arbre des attaques des parasites. Seul le koala arrive à consommer plus d'un kilogramme de feuilles par jour. S'il arrive à manger de l'eucalyptus, il passe toutefois 90 % de son temps à dormir, ceci afin de digérer les toxines.

L'environnement extrême des milieux naturels des eucalyptus en Australie (sécheresse et feux) a sélectionné des capacités de survie et de croissance exceptionnelles. L'eucalyptus est avant tout recherché pour la fabrication de la pâte à papier (rendements supérieurs à ceux des autres feuillus), mais aussi pour être valorisé comme combustible (pouvoir calorifique élevé) et pour les huiles essentielles des feuilles de certaines de ses espèces. Les eucalyptus ont ainsi été introduits dans les deux sous-continentes américains, en Afrique et même sur les îles de la Réunion et de Madagascar. Pourtant, seule une trentaine d'espèces sont exploitées, dont quatre occupent la moitié des plantations.

Des études récentes ont montré que les eucalyptus peuvent puiser de l'or dans les sous-sols, et que celui-ci est finalement stocké dans les feuilles. Plutôt que d'avoir recours à des forages prospectifs, coûteux d'un point de vue économique et environnemental, les exploitants miniers pourraient dans le futur localiser simplement des gisements d'or en prélevant des feuilles pour les analyser en laboratoire. Toutefois cette méthode ne fonctionne qu'à une seule condition : que l'or soit situé à des profondeurs atteignables par les racines des végétaux. Dans le cas des eucalyptus vivant en région aride, cette technique serait donc opérante jusqu'à 40 m de profondeur.



UNE FEUILLE DEVENUE SYMBOLE NATIONAL ET UNE ÉCONOMIE AU DÉFI DE LA DIGITALISATION

Il existe plus de 100 espèces d'érable dans le monde. Dix sont indigènes au Canada, dont l'érable à sucre ou érable franc (*Acer saccharum*). Les couleurs de ses feuilles en automne sont souvent spectaculaires, virant du jaune vif au rouge-orange. Sa feuille apparaît sur le drapeau du Canada, surnommé l'Unifolié ou *The Maple Leaf Flag* en anglais, littéralement « le drapeau à la feuille d'érable ». Adopté en 1965, il est le premier drapeau national officiel qui a remplacé le pavillon rouge représentant l'union royale du Royaume-Uni. C'est un drapeau rouge portant dans un carré blanc une feuille rouge d'érable à onze pointes. Des versions stylisées de la feuille se trouvent aussi sur des billets de banque, des insignes militaires... et même sur le drapeau personnel de la reine Élisabeth II en tant que reine du Canada.

Près de 30% de la surface du Canada est couverte par la forêt boréale, ce qui lui permet d'être le plus grand exportateur de bois et de ses dérivés ainsi qu'un des plus grands producteurs de papier au monde.

© Érable à sucre ou érable franc (*Acer saccharum*). Indiana, États-Unis.
Photo: P. Rothrock.



☉ *L'érable rouge (Acer rubrum) est l'une des autres espèces d'érable présente au Canada et dans l'est de l'Amérique du Nord. Cette espèce est l'arbre-emblème de Rhode Island, le plus petit état des Etats-Unis. Cet érable est parfois appelé l'érable de Virginie en France et il est largement cultivé comme arbre d'ornement. Photo : C. Randin*

Bien que les industries du bois et du papier représentent une part importante de l'économie au Canada, moins de 1% du territoire forestier commercial est exploité chaque année.

L'économie des quatre provinces de l'Atlantique (Nouveau-Brunswick, la Nouvelle-Écosse, l'Île-du-Prince-Édouard et Terre-Neuve-et-Labrador) dépend principalement de la production du bois et de ses dérivés depuis le début du 20^e siècle.

A l'instar de la Suisse, où 2% des personnes occupées travaillent dans des secteurs liés au bois, la production de l'industrie de la cellulose, du papier et du carton diminue depuis le début des années 2000 au Canada, en raison de la forte concurrence internationale et de la croissance des médias électroniques.

En réaction à ces difficultés, l'industrie forestière, tant au Canada qu'en Suisse, a commencé à se transformer grâce à la production de produits, matériaux et services nouveaux et innovateurs pour la construction, les biocarburants (qui peuvent remplacer les combustibles fossiles), les produits biochimiques et les plastiques biodégradables.





*Paysage typique de la forêt boréale canadienne.
Parc national du Mont-Tremblant, Québec, Canada. Photo : C. Randin.*



DES ARBRES À LA PLACE DES TEMPLES

Les arbres ont un profond sens religieux et apparaissent régulièrement dans les traditions et l'art bouddhiques. C'est dans le bois d'*asoka* (*Saraca asoca*) de Lumbini (nom moderne: Rummindei), au Népal près de la frontière avec l'Inde qu'aurait accouché Maya, la mère de Bouddha.

Plus tard, après avoir longtemps médité sous des jambus ou jamalacs (*Syzygium samarangense*), le Bouddha aurait atteint l'illumination sous un pipal (*Ficus religiosa*) à Bodhgaya (ville indienne du nord-est de l'Inde, actuellement dans l'État du Bihar). Cet arbre, qui prit le nom de *Bodhi*, *Bodhimanda* ou *Bo* en singhalais, occupe une place particulièrement importante dans la mythologie bouddhiste. Ses feuilles sont devenues un motif iconographique ainsi qu'un porte-bonheur.

En Inde, l'arbre et le bosquet jouent un rôle majeur dans la pratique cultuelle. Il est encore courant de voir des arbres, en particulier le banyan (*Ficus benghalensis*) et le pipal, recevoir des offrandes (la *pūjā*) et être cultivés en pot. Leur présence au sein des sanctuaires est parfois littérale. Les arbres sont laissés libres de pousser même si cela entraîne la destruction du temple. Peut-être cela est-il à mettre en lien avec le développement d'une philosophie de l'impermanence dans le bouddhisme, pour laquelle tout est destiné à disparaître. On peut aussi voir ce phénomène au Cambodge avec les monuments hindous ou bouddhistes mahayanistes en pierre qui sont laissés à l'abandon.

Le bouddhisme originel ne connaît pas d'architecture, les moines (*bhikṣu*) et moniales (*bhikṣuṇī*) se réunissaient dans la forêt, méditaient et dormaient sous les arbres... à l'image de Bouddha, qui médita jusqu'à l'éveil sous un pipal.



Émotions, sensations

ou seulement perceptions ?

Les arbres dans leur environnement





DANS L'ÉCORCE D'UN ARBRE

De nombreux ouvrages récents et destinés au grand public assimilent la perception des arbres de leur environnement à de l'intelligence et des émotions. Il est cependant possible pour un organisme vivant de recevoir des informations de son environnement et d'y réagir sans aucune forme d'intelligence ou d'émotion.

Les arbres collectent tout de même beaucoup d'informations grâce à une série de « capteurs », parfois au-delà de simples automatismes : température ambiante, lumière, détection d'un voisin et communication avec celui-ci. Voici une revue des perceptions d'un arbre, avec entêtes anthropocentristes assumées.

La vie d'un arbre débute sous la forme d'une graine, tombée sur le sol en automne sous nos latitudes. En dormance, elle attend les conditions d'humidité, de température et de lumière favorables : c'est à ce moment que commence les premières perceptions de l'arbre en devenir, afin d'ajuster au mieux sa germination.

Une jeune pousse doit ensuite trouver son équilibre et apprivoiser la gravité : elle développe ses racines vers le bas et sa tige vers le haut : c'est le gravitropisme.

Après avoir utilisé les réserves contenues dans la graine, la pousse devenue plantule va pourvoir elle-même à son alimentation, qui provient de la photosynthèse du saccharose, effectuée d'abord dans les pré-feuilles ou cotylédons, puis dans les feuilles. Elle va donc partir en quête de lumière : c'est le phototropisme, contrôlant la direction de la croissance grâce à une multitude d'hormones.

Les années suivantes, les bourgeons végétatifs formés à la fin de l'été s'endurcissent, hivernent pour finalement se gonfler et laisser sortir les feuilles dès la fin de l'hiver. A nouveau, la date de déploiement des feuilles est ajustée pour éviter le gel tardif, létal pour les feuilles, tout en maximisant la longueur de la saison de croissance par la perception de la température et de la lumière.

Bien que pouvant s'ajuster à son environnement par la plasticité de sa croissance, un arbre reste limité dans son mouvement. Il va donc multiplier les alliances « à domicile » avec d'autres organismes pour augmenter sa survie. Ces associations l'aident à se défendre contre ses prédateurs, à acquérir certains nutriments qui lui sont inaccessibles, ou encore à se reproduire.



SE REPÉRER SANS GOOGLE MAP

La graine contient l'embryon d'un arbre en devenir. Une fois la graine tombée par terre, elle va entrer dans état dit de dormance qui peut durer plus ou moins longtemps selon les espèces. Cet état va permettre à la graine de ne germer que dans des conditions de luminosité, de température et d'humidité optimales. La molécule, qui agit comme une hormone et qui est en grande partie responsable de cet état, est l'acide abscissique. Son rôle est de stopper la croissance chez les plantes. À l'inverse, les gibbérellines sont des hormones de croissance.

La germination

Le premier contact d'un arbre avec le monde extérieur a lieu lors de la germination : la plantule sort de la graine et s'oriente dans la bonne direction pour pousser grâce au gravitropisme et au phototropisme, contrôlés par une multitude d'hormones végétales.

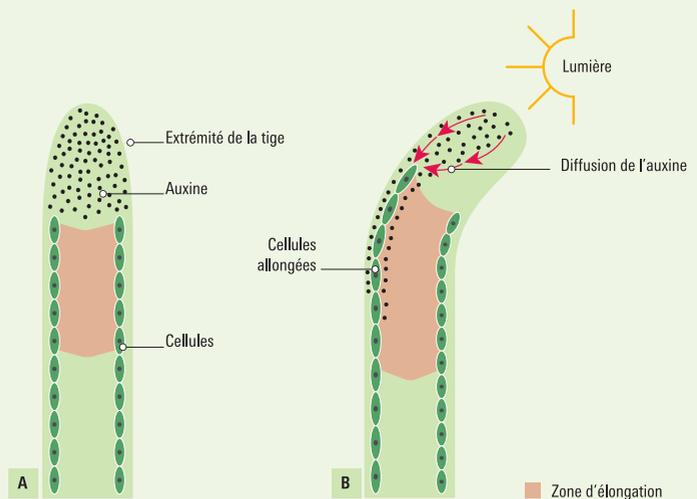
D'une manière générale, le tropisme est une action d'orientation vers un stimulus physique ou chimique. Le phototropisme est l'action d'un végétal de s'orienter vers une source lumineuse.

Le gravitropisme va donc permettre à la plantule de s'orienter en fonction de la gravité. Les

Phototropisme d'une pousse

Le phototropisme est un mécanisme qui permet aux jeunes pousses et aux branches des arbres de grandir dans la direction de la lumière. Il est régi par l'auxine qui régule cette croissance de façon à optimiser la disposition des feuilles et garantir une photosynthèse optimale.

Illustration : M. Ruffati & Etc Design.



racines vont pousser vers le bas et la tige vers le haut. Lorsque la graine germe sous terre dans l'obscurité, le gravitropisme lui permet de savoir dans quelle direction pousser pour trouver la lumière.

De la plantule à l'arbre

La croissance d'un arbre est indéfinie car celui-ci produit un tissu de «cellules souches» ou cellules indifférenciées tout au long de sa vie. Ces cellules, appelées méristème, vont permettre de produire des nouvelles cellules qui vont pouvoir se différencier et s'allonger. Il existe deux types d'allongement: la croissance primaire et secondaire. La croissance primaire est initiée par les méristèmes apicaux, situés au bout des tiges et des racines ainsi que dans les bourgeons axillaires, qui fournissent les cellules pour la croissance en longueur. C'est ce qui va permettre aux racines de s'étendre pour trouver de l'eau et aux tiges de se diriger vers la lumière. La croissance secondaire est une croissance en largeur afin de pouvoir supporter l'accroissement de la plante due à la croissance primaire. Les méristèmes latéraux, appelés cambium et phellogène, sont responsables de cet épaississement. Ils créent les éléments solides qui forment les troncs des arbres.

Les gibbérellines sont des hormones qui aident à la croissance des feuilles, de la tige et des racines, ainsi qu'à la formation des fruits. Elles sont déjà présentes dans la graine et initient la germination.

L'hormone «La Poste»

La croissance des plantes est, comme pour nous, régie en grande partie par des hormones. L'auxine est responsable de l'élongation des cellules des plantes. Elle va donc allonger les cellules créées par les méristèmes apicaux. Elle est synthétisée à l'extrémité des pousses et apporte des informations pour contrôler la taille et la croissance des branches et les ajuster à l'environnement adjacent. Ce flux va donc commander la mise en place des plans de ramification.

L'enquiquineur nécessaire

Au contraire, l'acide abscissique agit comme ralentisseur de croissance. Le rapport de concentration entre l'acide abscissique et les hormones de croissance va déterminer quelle réaction physiologique l'arbre doit entreprendre. Dès les débuts de la vie d'un arbre, cet acide va notamment permettre aux graines d'entrer en dormance et de s'y maintenir.

L'hormone du stress

L'éthylène est sécrété par les arbres en réponse à des stress comme les sécheresses, les inondations, les pressions externes exercées par un liquide ou un solide, les blessures ou les infections. L'éthylène est responsable de la manœuvre de croissance appelée «la triple réponse». Elle a lieu lorsqu'un arbre rencontre un obstacle et doit le contourner. Les trois spécialités de cette triple réponse sont le ralentissement de l'allongement de la tige, son épaississement pour la rendre plus forte et sa courbure qui la fait grandir de façon horizontale.

DE L'EMPATHIE POUR NE PLUS EN PÂTIR ?

Les arbres acquièrent les ressources dont ils ont besoin dans deux espaces différents: le domaine aérien, où leurs feuilles captent la lumière du soleil et le CO₂, et le domaine souterrain, où leurs racines absorbent l'eau et les minéraux.

La structure des arbres est composée en majorité de molécules carbonées. Les arbres ont besoin par conséquent d'une source de carbone importante afin de pouvoir créer leurs composés structurels.

La photosynthèse a lieu majoritairement dans les feuilles des arbres et leur permet de transformer le CO₂ et l'eau en un composé carboné, un sucre appelé saccharose, grâce à l'énergie lumineuse. Cette caractéristique de transformation du CO₂, spécifique aux végétaux, algues et certaines bactéries, font de ces groupes des autotrophes. Au contraire, les animaux sont dits hétérotrophes, car ils ne peuvent pas synthétiser de sucres et se les procurent par l'alimentation. Avec le carbone, huit autres éléments sont les composants majeurs de la structure d'un arbre, et sont appelés macronutriments: l'oxygène, l'hydrogène, l'azote, le phosphore, le soufre, le potassium, le calcium et le magnésium.

L'azote est l'élément minéral qui contribue le plus à la croissance des végétaux. Il permet la synthèse des protéines, qui sont essentielles au bon fonctionnement des cellules.

L'azote et le magnésium, en particulier, sont aussi essentiels à la formation de la chlorophylle, qui permet aux arbres d'intercepter l'énergie lumineuse et de réaliser la photosynthèse. Les arbres transforment ensuite le saccharose en glucose pour l'oxyder et en tirer de l'énergie lors du processus de respiration cellulaire, commun aux plantes et aux animaux. La respiration est la dégradation complète des sucres ou autres molécules organiques en dioxyde de carbone (CO₂) et en eau (H₂O). Le but de cette dégradation est de fournir de l'énergie pour faire fonctionner la machinerie interne des organismes qui utilisent la respiration. Sans minéraux, pas de photosynthèse, sans photosynthèse, pas de respiration et d'énergie et, *in fine*, pas de vie.

Que se passe-t-il si la disponibilité des minéraux diminue dans le sol? En cas de manque de minéraux, la sélection naturelle favorise fortement les jeunes pousses d'arbre qui présentent des stratégies de collaboration. Parmi elles, les plus répandues sont des associations avec des bactéries fixatrices d'azote et des champignons mycorhiziens, qui fournissent respectivement de l'azote et du phosphore aux arbres.

Les arbres vont donc chercher à collaborer avec des microorganismes si le sol est pauvre en minéraux et vont au contraire rejeter la collaboration si la disponibilité en minéraux est

suffisante. Plus de 90 % des arbres bénéficient d'une association mycorhizienne. Ceci est dû à la grande taille des arbres et à un besoin élevé en minéraux, il s'agit donc de nécessité plus que d'empathie.

Cette association mutualiste avec un champignon, presque universelle à toutes les plantes, a lieu entre les racines d'un arbre et le mycélium des champignons. Il est probable que cette association remonte à très longtemps et qu'elle soit une adaptation évolutive qui a permis aux végétaux de coloniser la terre ferme. On a retrouvé des fossiles de mycorhizes datant de 460 millions d'années.

La mycorhize augmente la surface d'absorption des racines pour l'eau et capture sélectivement le phosphate et autres minéraux du sol pour les transmettre directement à l'arbre. De plus, elle sécrète des facteurs de croissance pour augmenter les ramifications des racines et des antibiotiques qui la protège elle-même et la plante hôte contre les agents pathogènes. En échange, l'arbre fournit au champignon des sucres créés lors de la photosynthèse. Les hyphes des champignons et les racines se lient physiquement entre eux.



📷 *Nodules sur des racines de robinier faux-acacia (Robinia pseudoacacia).*
Photo : Ninjatacoshell. License CC BY SA 3.0.

Lorsqu'un arbre sent une carence en azote, il attire des bactéries fixatrices d'azote et se laisse infecter au niveau de ses racines. Il crée ensuite une excroissance appelé « nodule » dans laquelle les bactéries se retrouvent emprisonnées. C'est dans ces nodules que les échanges entre les bactéries et l'arbre ont lieu : l'arbre fournit les sucres, c'est-à-dire les substances carbonées, et les bactéries les substances azotées synthétisées à partir de l'azote atmosphérique. Celui-ci est fixé grâce à l'enzyme nitrogénase, présente chez certaines bactéries, et dont les plantes eucaryotes sont dépourvues.

TROUVER UN PARTENAIRE SANS TINDER

Les arbres sont des organismes un peu casaniers. Ainsi, les arbres utilisent l'intermédiaire du vent (anémogamie) ou des animaux (zoogamie) pour augmenter la probabilité qu'un grain de pollen atteigne et féconde un ovule. Alors sans Tinder... ou presque. Beaucoup d'espèces d'arbres dominantes sont anémogames, comme le hêtre, les pins et les sapins, mais la zoogamie reste le mode de transport le plus répandu chez les végétaux, en particulier par les insectes. Pour que ce vecteur fonctionne, les plantes offrent souvent à leurs pollinisateurs une récompense sous forme de nectar ou de pollen riche en énergie.

Certaines fleurs, chez les arbres fruitiers notamment, sont pollinisées par plusieurs espèces animales alors que d'autres ont un pollinisateur spécifique. L'évolution qui conduit à cette spécialisation est appelée coévolution et a lieu lorsque les deux espèces évoluent simultanément. Chacune des espèces protagonistes s'adaptent à une pression de sélection que l'autre lui impose. La sélection naturelle favorise la modification de la morphologie des deux espèces afin d'améliorer leur succès de reproduction.

LA MOBILITÉ SANS UBER

Les arbres sont des organismes bien enracinés dans leur terroir : difficile donc de déménager si l'environnement devient défavorable. Après la pollinisation et la fécondation de l'ovule, la maturation de l'embryon, enfermé dans la graine, commence. Le fruit ainsi que la ou les graines qu'il contient se développent. La graine est créée pour protéger, nourrir et aider l'embryon. La dispersion des fruits ou des graines fait appel à des intermédiaires similaires à ceux utilisés lors de la pollinisation.

La capacité de dispersion des graines chez les arbres n'est pas équitable. Ainsi, les chênes dont les glands sont appréciés des sangliers, ont recolonisé la totalité de leurs habitats favorables en Europe après la dernière grande glaciation, terminée il y a 10'000 ans. En revanche, le hêtre, dont la quasi-totalité des faînes sont mangées au pied des arbres par les rongeurs, est toujours en train de recoloniser une partie de la Suède et de la Norvège.



☉ Palmiers, Koh Ngai, Thaïlande.
Photo : C. Randin.

Les cocotiers ont développé des graines capables de flotter sur l'eau. Effectivement, les noix de coco sont équipées d'un tissu épais et fibreux contenant énormément d'espaces aériques, recouvert par un épiderme imperméable. Ces particularités assurent à la noix de coco une flottabilité exceptionnelle et lui permet de dériver sur des milliers de kilomètres et de se disperser sur tous les rivages tropicaux.

ANTI-STRESS NATUREL ?

Les arbres, et d'une manière plus générale les végétaux, doivent faire face à deux grands types de stress : d'une part, les stress abiotiques, causés par un changement de l'environnement comme une carence en azote ou le manque d'eau, d'autre part, les stress biotiques, générés par les interactions avec d'autres organismes comme les attaques d'herbivores et les infections par des agents pathogènes. Les arbres ne peuvent pas se déplacer comme certains animaux. Ainsi, lorsque le niveau de stress devient trop élevé, ils doivent trouver des stratégies pour y faire face.

Chez les arbres, le stress hydrique se manifeste à différents degrés. Dans un premier temps, l'arbre économise de l'eau en fermant ses stomates (les ouvertures sur l'épiderme des feuilles qui assurent l'assimilation du CO₂), et assimile donc moins de carbone. La fermeture des stomates est maintenue en cas de sécheresse par une hormone : l'acide abscissique. Cette réponse est bénéfique pour la rétention d'eau mais diminue la photosynthèse.

Dans une deuxième phase, l'arbre stoppe sa croissance et, si la sécheresse persiste, les feuilles

tombent. Dans des cas extrêmes, des branches entières peuvent tomber chez les chênes ou le hêtre et chez les conifères, des individus entiers peuvent sécher.

Une température trop élevée peut affaiblir ou tuer un végétal, en détruisant ses protéines et en perturbant son métabolisme. Lors de fortes chaleurs, les arbres peuvent se refroidir grâce à la transpiration. De ce fait, la température d'une feuille peut être de 3 à 10 degrés inférieurs à la température de l'air ambiant. Dans les villes où le microclimat peut générer des températures élevées, la transpiration journalière d'un arbre peut varier de 30 à 80 litres par jour suivant l'espèce et les conditions. Ainsi, si la fermeture des stomates permet aux arbres de garder leur eau lors d'un temps chaud et sec, celle-ci empêche en retour la perte de chaleur.

Cependant, trop d'eau peut aussi être néfaste pour les arbres. En effet, lorsque les racines se retrouvent complètement immergées dans l'eau, elles n'ont plus accès aux « trous d'air » dans lesquels elles captent l'oxygène pour leur respiration cellulaire : elles vont alors « suffoquer ».



☉ Mangrove sur les bords de la Mer Rouge. Egypte.
Photo : Kevin Schaefer

Certaines espèces se sont adaptées pour pouvoir vivre « les pieds dans l'eau ». C'est le cas des palétuviers qui vivent dans les mangroves. Ce groupe d'arbres ou arbustes tropicaux, appartenant à diverses espèces d'angiospermes, est capable de se développer dans les systèmes intertidaux, la zone de balancement des marées. Les palétuviers possèdent des racines submergées qui communiquent avec des racines aériennes, qui leur fournissent de l'oxygène. Ces racines sont appelées pneumatophores et fonctionnent un peu comme des tubas pour les racines submergées, ce qui permet aux palétuviers d'effectuer les échanges gazeux à marée haute.



Au sein des zones où il existe un contraste climatique fort entre été et hiver, comme par exemple dans les zones tempérées et boréales, les arbres ont développé une résistance hivernale par l'intermédiaire de différents mécanismes qui leur permettent d'éviter l'exposition des organes sensibles au gel. À l'approche de la saison défavorable, l'arrêt de croissance est un prérequis indispensable à l'entrée en dormance et à l'endurcissement chez la majorité des espèces ligneuses. La sénescence foliaire et une entrée en dormance des bourgeons sont les deux autres adaptations pour se protéger du gel avant l'arrivée de l'hiver.

La répartition géographique des arbres est donc en majorité conditionnée par la combinaison de différents stress environnementaux, abiotiques et biotiques, et modulée parfois par la dispersion des graines.

❖ *Épicéa (Picea abies) couvert de glace sur les crêtes du Jura.*
Photo : C. Randin.

SELF-DÉFENSE OU LE KRAV-MAGA DES ARBRES

Les arbres transforment le gaz carbonique CO₂ en matière organique, assimilable par la suite par les animaux. Ils sont donc à la base de nombreuses chaînes alimentaires. Leurs feuilles, tendres et riches en azote, sont les mets de prédilection des herbivores. Les arbres sont également exposés à des infections causées par des pathogènes comme des virus, des bactéries ou des champignons qui détruisent leurs tissus et peuvent même les mener jusqu'à la mort. Différents moyens de défense contre les herbivores et les agents pathogènes ont donc été sélectionnés par les arbres au cours du temps.

Certains arbres et autres végétaux ont développé des défenses physiques, comme les épines ou les trichomes (des sortes de poils), ou des défenses chimiques telle que l'élaboration de

composés désagréables au goût ou toxiques pour éloigner les herbivores.

Le même principe de défense est appliqué contre les pathogènes. Les tissus de revêtement comme l'écorce ou la cuticule des feuilles constituent une barrière physique. Cependant, une réponse chimique est déclenchée lorsque des pathogènes arrivent à passer au travers de ces barrières. Cette riposte a pour but de tuer le pathogène ou de limiter le site d'infection. Le chêne a par exemple développé du tannin dans son écorce, ses feuilles et ses fruits afin de lutter contre divers pathogènes.

Ces défenses fonctionnent plutôt bien chez les arbres, la preuve en est leur longévité: des individus peuvent vivre un ou plusieurs milliers d'année, comme certains ifs en Suisse.

❖ Photo : A. Maeder.



La résine des épicéas (*Picea abies*), et des conifères en général, est riche en métabolites secondaires qui ont des propriétés antimicrobiennes. L'équipe du Prof. M. Chapuisat de l'Université de Lausanne a montré que la fourmi rousse des bois (*Formica paralugubris*) récolte la résine d'épicéa et l'améliore en y incorporant de l'acide formique afin de créer un agent antifongique performant. Elles vont ensuite l'épandre dans leur fourmière pour protéger leurs œufs et larves des attaques de champignons. Certains animaux peuvent donc tirer profit des défenses des arbres.

LE RÉVEIL DE LA FORCE

Comment les arbres savent-ils que le printemps est là et qu'il est temps de faire de nouvelles feuilles et de fleurir ?

À la fin de l'été, lorsque les rameaux de l'année ont terminé leur croissance, apparaissent à l'aisselle des feuilles et aux extrémités des bourgeons à écaillés. Ces bourgeons renferment déjà en miniature les rameaux qui vont croître au printemps suivant. Ces bourgeons doivent dormir pendant tout l'hiver, et attendre patiemment le printemps: on dit qu'ils sont dormants. En effet, quel intérêt y aurait-il pour de jeunes et belles feuilles d'essayer de photosynthétiser quand il fait froid et sombre ? Aucun, d'autant qu'elles risqueraient en outre à coup sûr de mourir au premier coup de gel.

Pour faire dormir ses bourgeons, il semblerait que l'arbre isole ses cellules, en bouchant littéralement des petits canaux appelés plasmodesmes qui relient les cellules entre elles. Ces petits canaux permettent aux bourgeons d'échanger un certain nombre de molécules (eau, sucre et hormones) nécessaires à la machinerie cellulaire. Pour remettre en route les cellules des bourgeons, il est donc nécessaire de détruire la substance, appelée callose, qui bouche pendant tout l'hiver les canaux de communication entre les cellules. Et il s'agit de le faire au bon moment, ni trop tôt, ni trop tard.

Nous savons que le froid (température entre 0 et 10°C), s'il perdure suffisamment longtemps (entre 15 jours et 3 mois environ selon les espèces d'arbre), permet de détruire la callose, mais nous ne savons pas très bien comment. Nous savons aussi que pour certaines espèces comme le hêtre, les jours longs (de plus de 11h) vont aussi permettre de détruire la callose si le froid a manqué pendant l'hiver. Mais comment l'arbre connaît-il la durée du jour ?

Les cellules des plantes possèdent des pigments photorécepteurs appelés phytochromes. Ce sont des molécules dont la configuration change lorsqu'elles reçoivent les rayonnements rouge et proche infrarouge. La lumière rouge fait passer le phytochrome de la forme biologiquement inactive à sa forme active et inversement avec la lumière proche infrarouge. La perception du jour par les phytochromes permet aux plantes d'entretenir, comme pour les animaux, une horloge interne, appelée horloge circadienne, dont le système de régulation est très complexe, et qui est impliquée dans de très nombreux processus biologiques.



🕒 **Phases de débournement d'un bourgeon de frêne (*Fraxinus excelsior*) au printemps.**

Photo : Centre de Recherche sur les Ecosystèmes d'Altitude CREA, Chamonix. Phenoclim.org.



Phénologie des arbres et réchauffement climatique : et si les bourgeons ne se réveillaient plus ?

La phénologie est la science qui étudie les phénomènes périodiques des organismes comme le débournement des bourgeons chez les arbres. Cette phase de débournement des bourgeons est un évènement majeur pour les arbres à feuilles caduques, et plus généralement pour les végétaux. Cependant, de nombreuses études et observations scientifiques montrent une nette avancée du débournement des bourgeons vers des dates de plus en plus précoces sous l'effet du réchauffement climatique en cours. Ce décalage permet l'allongement de la phase de croissance des arbres à feuilles caduques, mais s'accompagne aussi d'une augmentation de la production et d'un stockage plus important du carbone atmosphérique. Les phases phénologiques comme le débournement sont donc des traits des arbres décisifs pour une adaptation rapide aux effets du changement climatique.

Paradoxalement, la levée de la dormance d'un bourgeon en hiver doit être provoquée par une exposition à des températures froides, afin que ce bourgeon puisse réagir aux températures plus chaudes du printemps. La capacité de réaction du bourgeon au réchauffement climatique est donc liée à la quantité de froid reçue en hiver. Or, il a été montré récemment que le décalage phénologique des dates de débournement des feuilles au printemps a tendance à ralentir, voire même à se produire aussi tardivement lors d'années chaudes que lors d'années froides en basse altitude. Il semblerait donc que certaines forêts du sud de l'Europe, ou situées en basse altitude en Suisse, ne bénéficient plus de températures suffisamment basses en hiver pour lever la dormance. Cette réaction paradoxale empêcherait donc les arbres à feuilles caduques de réagir positivement au réchauffement climatique. A terme et dans certaines régions d'Europe, ce mécanisme pourrait mener à une absence de production des feuilles au printemps, comme cela a déjà observé pour le hêtre au printemps 2007 sur les versants du Mont Ventoux.







***Voici venir le
temps des arbres***

et des forêts



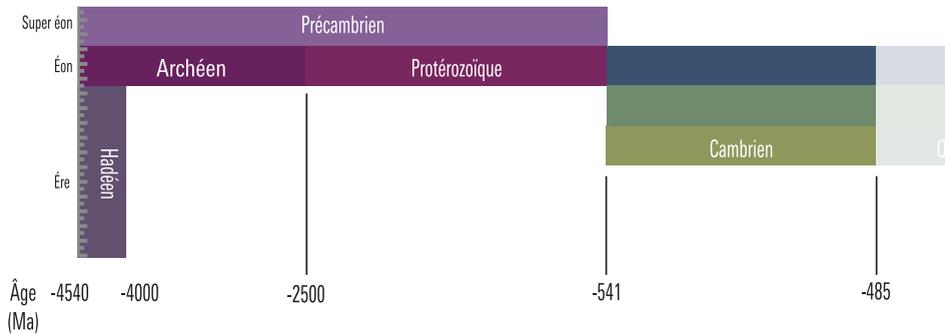
L'histoire de la Terre a pu être reconstituée grâce à la découverte de certaines roches et d'éléments emprisonnés lors de leurs formations. Le zircon, par exemple, est un minéral très résistant à l'altération et permet la datation isotopique des roches dans lesquelles il se trouve. De cette manière, on connaît la forme et la position des continents tout au long des âges géologiques. De même, la reconstitution du développement de la végétation terrestre s'est faite à travers les découvertes de fossiles - graines, feuilles, parties végétales ou végétaux entiers - préservés dans une matrice de roches ou bien minéralisés. La connaissance de l'histoire de la Terre et de ses végétaux dépend des recherches réalisées mais également de la qualité des vestiges. En effet, les conditions de fossilisation sont particulières et les bassins fossilifères sont rares. Beaucoup de groupes d'organismes vivants n'ont d'ailleurs jamais été fossilisés.

Dès l'apparition des végétaux sur la Terre, ces derniers ont influencé le climat par différents processus, en particulier par la photosynthèse retirant du CO₂ de l'atmosphère et diminuant ainsi la température globale de la planète. En retour, la position des continents, la disponibilité en eau et le climat ont influencé le développement de la végétation et sa dispersion.

Les arbres se sont développés à partir d'innovations qui ont commencé dès la conquête des terres ou terrestrialisation par les végétaux issus de la *lignée verte*. Ces innovations se sont poursuivies sur près de 500 millions d'années pour aboutir aux arbres tels qu'on les connaît.

Cette longue histoire de 4,5 milliards d'années, durant laquelle climat et végétation ont interagi, nous permet de mieux comprendre et anticiper les impacts globaux que les hommes génèrent sur le système Terre.

📍 *Salamandre rouge (Pseudotriton ruber) dans une forêt de l'État de Washington (Mt Baker, États-Unis). Au Trias, il y a 230 millions d'années, à l'époque des premiers dinosaures, les rôles étaient inversés et ce sont des amphibiens géants qui dominaient, alors que les conifères modernes faisaient leur apparition. Photo : K. Sidi-Ali.*



📍 *Eon : Pré-cambrien*
Archéen : -4 à 2,5 Ga
Protérozoïque : -2,5 Ga à -541 Ma
Cambrien : -541 à -485 Ma

L'ÉMERGENCE DE LA LIGNÉE VERTE

La formation de la Terre, amorcée il y a 4,5 milliards d'années (Ma), marque le début de l'éon Hadéen qui durera jusqu'à -4,1 Ma. Son nom vient du dieu grec Hadès car la Terre ressemblait à un véritable enfer: il faisait des températures excessivement chaudes, causées par un magmatisme et un volcanisme permanent. Il faut attendre la fin de l'Hadéen pour que la croûte terrestre se refroidisse et se solidifie en roches. Ce refroidissement permet à l'eau sous forme gazeuse de précipiter et d'inonder la surface de la Terre. En moins d'un million d'années les océans se forment.

Les mécanismes expliquant l'apparition des premières formes de vie sont encore peu connus. Ce qui est en revanche plus certain, c'est le passage de ces formes par différents modes de métabolismes, en commençant par utiliser le processus de fermentation pour obte-

nir de l'énergie en dégradant des molécules organiques présentes dans l'environnement. En effet, la fermentation se réalise sans oxygène, celui-ci étant absent de l'atmosphère terrestre. Les sources de carbone spontanément créées dans le milieu se sont raréfiées et la vie a dû trouver un moyen de créer elle-même sa source de carbone afin d'obtenir de l'énergie. La photosynthèse est apparue ensuite grâce à l'apparition de pigments capables d'absorber l'énergie des ondes lumineuses et l'utilisation de molécules sommaires et abondantes comme le gaz carbonique et l'eau. Ce phénomène est à mettre au crédit des cyanobactéries.

Celles-ci ont créé des structures laminaires appelées stromatolithes lors de leur croissance, des sortes de dômes sédimentaires, existant principalement sous forme fossile. Le plus vieux a 3,42 milliards d'années (Ga) mais d'autres continuent encore de se former actuellement.



❶ Fossile de stromatolithes, unité sédimentaire du Groupe d'Atar, Protérozoïque (-1200 Ma). Musée cantonal de géologie, Lausanne. Photo: F. Schwendener.



❷ Stromatolithes en formation à Shark Bay, Australie. Photo: P. Harrison. License GFDL.

L'apparition de la photosynthèse à partir du gaz carbonique (CO_2) a conduit au dégagement d'oxygène dans un milieu qui en était dépourvu jusqu'ici. L'oxygène produit va alors changer la composition de l'atmosphère et être dissout dans les océans. L'enrichissement en oxygène se fait graduellement, et provoque la Grande oxydation il y a 2,4 Ga, responsable d'une crise écologique: l'oxygène nouvellement présent dans l'atmosphère est toxique pour les organismes anaérobiques de l'époque. Les concentrations en oxygène sont alors stables pendant plus d'un milliard d'années, la production d'oxygène étant absorbée par les océans. En effet, le fer, attaqué par l'oxygène, se retrouve sous deux formes chimiques dont l'une va se dissoudre dans l'eau et l'autre précipiter et se déposer au fond des océans. C'est seulement il y a 800 Ma que ce processus prend fin, avec l'épuisement du fer ferreux. La concentration en oxygène dans l'atmosphère augmente alors à nouveau. Cette étape

a permis l'apparition de la respiration aérobie chez certaines bactéries, qui utiliseront l'oxygène pour dégrader des molécules organiques et obtenir plus d'énergie. C'est ce mode de production d'énergie, la respiration, que plantes et animaux utilisent encore principalement.

Les premières grandes glaciations se produisent durant le Précambrien, avec celle de l'Huronien (2,4 - 2,2 Ga) et la glaciation Varanger, durant laquelle la Terre est entièrement recouverte par la glace, et les océans sont gelés sur plusieurs kilomètres d'épaisseur. On l'appelle la «Terre boule de neige».

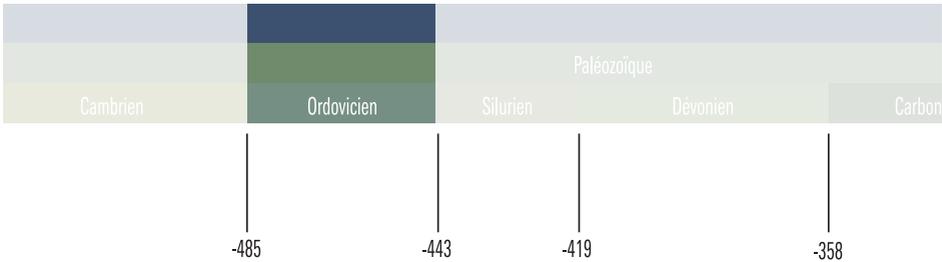
Une grande étape de l'évolution de la structure cellulaire concerne la structure du noyau. Dans les cellules primitives des procaryotes, l'ADN, qui renferme l'information génétique, est dispersé dans le cytoplasme. En revanche chez les eucaryotes qui sont plus évolués, il est stocké en majorité dans le noyau, un organite délimité du cytoplasme par une double membrane.



☉ Fossile d'algue, Cambrien, Barrage d'Eupen, Belgique. Musée cantonal de géologie, Lausanne.
Photo : F. Schwendener.

Les eucaryotes possèdent des composantes d'origine procaryotes, dont les mitochondries (jouant un rôle prépondérant dans la respiration cellulaire) et les chloroplastes (qui contiennent les pigments chlorophylliens nécessaires pour effectuer la photosynthèse). Selon la théorie de l'endosymbiose, un ancêtre très éloigné des cellules eucaryotes a « gobé » sans digérer une cellule procaryote non photosynthétique et aérobie, qui, au fil du temps, s'est adaptée à la cellule hôte. La cellule procaryote devient alors un endosymbionte: une cellule vivant à l'intérieur d'une autre. Avec le temps, cette relation a évolué, l'endosymbionte et la cellule hôte ont fusionné pour devenir une cellule eucaryote avec mitochondrie. Par la suite, ce nouveau type de cellule a effectué le même processus en phagocytant un procaryote photosynthétique, probablement une cyanobactérie. Le résultat de cette deuxième fusion a donné naissance à l'ancêtre des cellules eucaryotes possédant des chloroplastes. Toutes les cellules eucaryotes renferment des mitochondries, mais qu'une partie d'entre elles possèdent des chloroplastes.

Les cellules eucaryotes vont alors commencer à s'agréger et s'organiser en tissus et en organes. Grâce à cette organisation, les organismes multicellulaires apparaissent. On a retrouvé des fossiles d'organismes pluricellulaires à Guizhou en Chine datant d'entre -580 et -570 Ma. D'autres fossiles montrant des organismes multicellulaires ont été trouvés en Australie dans les collines d'Ediacara qui eux datent d'environ -560 Ma.



☉ Eon : Phanérozoïque, Ère : Paléozoïque
 Ordovicien : -485 à -443 Ma

Quand les premières forêts sont des animaux sous-marins

Les coraux forment des récifs vivant dans les mers chaudes du globe. Ces véritables forêts sous-marines sont des écosystèmes majeurs qui hébergent au moins 25% des espèces marines connues. Contrairement à ce qu'on pourrait penser, les coraux ne sont pas des plantes mais des animaux de l'embranchement des cnidaires, proches des méduses, et qui peuvent vivre en colonies atteignant plusieurs mètres de hauteur. Cependant, la photosynthèse n'est jamais bien loin : en effet, la plupart des coraux vivent en symbiose avec des algues unicellulaires appelées zooxanthelles. Ceci explique pourquoi beaucoup de récifs coralliens croissent à faible profondeur, dans des eaux claires.



☉ *Gorgones* (Cnidaire) balayées par les courants et illuminées par le soleil, Sainte Lucie, Caraïbes. Photo : K. Schaefer

Jusqu'au Cambrien, la faune et la flore sont exclusivement marines. Les végétaux sont représentés par des algues uni- et multicellulaires qui servent de base aux réseaux trophiques. L'explosion cambrienne consiste en une énorme et soudaine diversification des espèces animales entre -541 et -530 millions d'années.

LA CONQUÊTE DES TERRES ÉMERGÉES

L'Ordovicien est une période durant laquelle le climat est chaud, avec des continents très dispersés, favorisant une grande diversité des environnements et des habitats.

C'est pendant cette période qu'on retrouve les premières traces de végétaux terrestres : ce sont des microfossiles, plus précisément des spores, appelées cryptospores, car elles n'ont pu être attribuées à aucune espèce (crypto signifiant « caché »). Cependant, toutes ces spores pourraient avoir été produites par des plantes terrestres primitives, appartenant à des mousses ou à des hépatiques, ainsi qu'à des plantes embryophytes ayant conservé le plus grand nombre de caractères ancestraux. Les embryophytes regroupent l'ensemble des

🔍 *Cryptospore organisée en monade*
Photo: PhilSteeem. License CC BY 4.0.



plantes terrestres. Ces premiers végétaux terrestres sont des pionniers qui colonisent peu à peu les terres émergées. Les plus anciennes cytopores connues datent de -465 Ma. Elles deviennent abondantes lors de l'Ordovicien supérieur, puis au Silurien. Elles se font de plus en plus rares pendant le Dévonien, puis finissent par disparaître presque complètement.

D'après des analyses génétiques, les embryophytes auraient un ancêtre commun avec un groupe d'algues vertes, les charophytes, qui existent toujours actuellement. Tous deux possèdent des chlorophylles leur permettant de réaliser la photosynthèse.

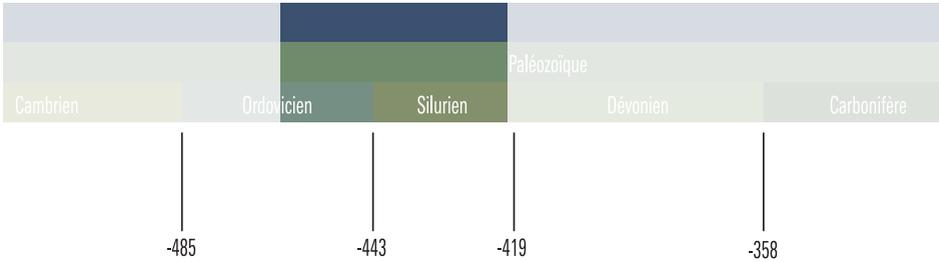
A l'Ordovicien supérieur, certaines cryptospores se différencient par une marque en forme de Y (trace des trois autres spores de la tétrade originelle): ce sont des spores trilètes (-450 Ma). Or, de telles spores pourraient être produites par des plantes vasculaires, mais elles peuvent également provenir de bryophytes. Ainsi, les spores prouvent que les bryophytes existent depuis l'Ordovicien moyen, mais il n'y a pas encore de preuve de la présence de plantes vasculaires pendant cette période. En parallèle, dans le milieu aquatique, des formes pluricellulaires d'algues vertes et d'algues rouges se diversifient.

Quand les forêts sont des algues

Les algues sont des organismes photosynthétiques dont les origines sont multiples dans l'évolution. Leur principale classification est surtout basée sur leurs pigments. On en distingue trois groupes principaux : les algues vertes, brunes et rouges. Les algues sont fréquentes en milieu marin et peuvent être abondantes dans la zone de battement des marées (zone intertidale) et les milieux proches de la surface. Cependant, on peut en trouver jusqu'à 200 mètres de profondeur. Les plus grandes algues sont les algues brunes. Le kelp géant, *Macrocystis pyrifera*, peut dépasser 45 m de long. Dans les mers tempérées et froides comme par exemple sur la côte californienne, les algues brunes peuvent former d'immenses forêts sous-marines. Ces forêts stratifiées sont habitées par des herbivores (oursins et gastéropodes), des carnivores de différentes tailles (poissons et phoques) et sont parfois visitées par des grands prédateurs (requins et orques).



🔍 *Algues vertes dans un lagon corallien, Seychelles. La croissance de ces algues a été favorisée par l'afflux d'eau chaude de l'épisode El Niño de 1998 qui a aussi décimé les coraux. Photo: K. Schaefer*



● *Ordovicien et Silurien : -450 à 419 Ma.*

Cette apparition de la végétation terrestre n'est pas sans conséquence pour la Terre et son climat. En effet, à la fin de l'Ordovicien se produit une glaciation amorcée en premier lieu par la position du super-continent Gondwana à de très hautes latitudes dans l'hémisphère sud. Celui-ci se couvre alors d'une calotte polaire, entourée d'une banquise très étendue. L'expansion des végétaux terrestres accélère en même temps le processus d'altération des roches sur les continents, un processus très gourmand en CO₂. La concentration de CO₂ diminuant dans l'atmosphère, les températures se refroidissent également, le CO₂ étant un gaz à effet de serre important. Ceci entraîne la poursuite du développement des calottes polaires. Cette glaciation commence de façon progressive vers -450 Ma, et culmine vers -445 Ma.

Les conséquences de cette glaciation sont multiples, tant au niveau physique qu'au niveau biologique. En effet, elle entraîne une baisse importante du niveau de la mer, réduisant leur surface qui couvrait jusqu'alors les plateaux continentaux. Les bassins océaniques sont isolés, les circulations océaniques limitées, les eaux s'appauvrissent en oxygène, créant des zones

d'anoxie, impropre à la vie. Paradoxalement, les teneurs en CO₂ sont importantes: en effet, les continents sont recouverts de glace, l'altération ne peut plus se faire, provoquant donc l'augmentation du CO₂ atmosphérique. Cette augmentation amorcera le début de la déglaciation avec l'augmentation des températures.

Au niveau biologique se produit une phase d'extinction massive, la première de l'histoire de la Terre. Une extinction massive est un événement relativement bref à l'échelle des temps géologiques et pendant lequel 75 % au moins des espèces, animales et végétales disparaissent au niveau mondial, à la fois sur la terre et dans les océans. Cette extinction se nomme *Extinction de l'Ordovicien-Silurien*. Elle a provoqué la disparition de 85 % des espèces (27 % des familles et 57 % des genres des animaux marins). Elle est la deuxième des cinq plus importantes extinctions massives que la Terre ait connues.

C'est à la fin du Silurien (-425 Ma) que se fait l'apparition des plantes vasculaires. Elles possèdent des vaisseaux conducteurs de sève (trachéïdes, protoxylème) et donc de la tige. Ces plantes sont appelées actuellement Trachéophytes. Il s'agit d'une des premières



🕒 *Cooksonia* est un genre éteint de plantes terrestres. Il pourrait peut-être représenter le plus ancien type de plante vasculaire.
Reconstruction : Matteo De Stefano/MUSE.
License : CC BY SA 3.0.

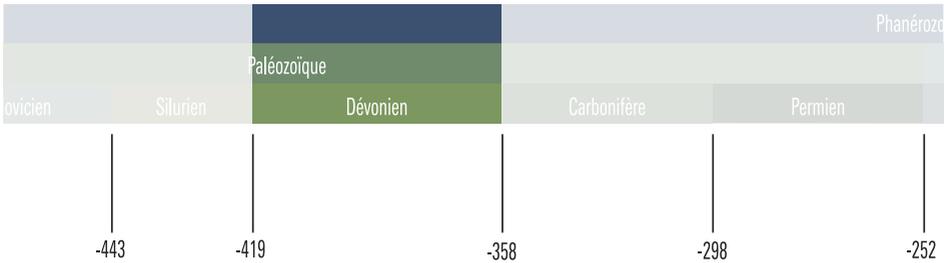
grandes innovations du monde végétal. Cette vascularisation permet la circulation de l'eau et des éléments nutritifs dans l'ensemble de la plante, qui s'accompagne de leur rigidification. Les plantes peuvent alors commencer à gagner de la hauteur. Les Trachéophytes se distinguent également des autres végétaux plus primitifs par d'autres innovations, comme le développement d'un système racinaire, la présence de cuticule et de stomates, permettant de limiter l'évaporation de l'eau et d'échanger des gaz avec l'atmosphère, ainsi que la production et la dispersion de spores résistantes à la dessiccation. Ces adaptations vont également permettre aux plantes d'affirmer progressivement leur indépendance par rapport au milieu aquatique.

Une des plus anciennes lignées de Trachéophytes, celle des Rhyniophytes, est représentée par les genres *Cooksonia* et *Rhynia*, découvertes dans des couches géologiques datant du Silurien supérieur au Dévonien inférieur (-420 Ma). Ces plantes présentent une tige avec une structure organisée, les trachéides, permettant de transporter et d'alimenter les cellules en eau et en nutriments, un épiderme pourvu d'une cuticule et de stomates, et des organes contenant les spores,

appelés sporanges. Elles formaient apparemment des tapis de quelques dizaines de millimètres de haut, sur les marges littorales des continents. Ce sont les premières végétations rampantes. Elles sont les précurseurs de deux grandes lignées dont des descendants sont toujours représentés de nos jours: les Lycopodiophytes et les Ptéridophytes.

En comparaison des plantes vasculaires actuelles, ces végétaux désormais éteints possédaient un système vasculaire relativement simple, avec des trachéides et un phloème, sous la forme de petits axes plus ou moins ramifiés, mais n'avaient pas encore de feuilles.

La colonisation des continents au Silurien s'accompagne ainsi d'une diversification relativement importante des végétaux, avec l'apparition de formes déjà avancées d'adaptation à un environnement aérien. Dès le début de cette évolution, les plantes ont une distribution mondiale et on en retrouve sur la plupart des continents actuels. A l'époque, il n'existait qu'un super-continent, le Gondwana, les barrières géographiques étaient alors inexistantes. Ceci expliquerait cette large distribution auquel s'ajoute le grand potentiel de dispersion des spores et l'absence de compétition.



🕒 **Dévonien** : -419 à -358 Ma

LES PREMIERS ARBRES

Au début du Dévonien, la végétation reste limitée aux zones humides, près des fleuves ou des lagunes, et est constituée de plantes terrestres primitives. Par la suite, la végétation va se développer rapidement, elle se diversifie à partir notamment des Rhyniophytes, qui vont disparaître peu à peu (-380 Ma) pour laisser place à de nouveaux groupes de plantes.

La première grande diversification des plantes terrestres se produit au Dévonien inférieur, avec des innovations morphologiques et anatomiques qui se succèdent et qui vont permettre aux plantes vasculaires de conquérir le milieu terrestre avec plus d'efficacité. En premier apparaissent les microphylls, des feuilles archaïques, souvent très petites, présentes chez les Lycopodiophytes (Lycopodes), qui sont apparus au Dévonien inférieur.

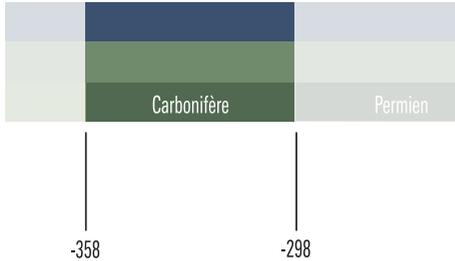
Les vraies feuilles (mégaphylles) sont également apparues à cette époque (Dévonien moyen), chez les premières fougères primitives, les Ptéridophytes, ce qui a permis d'améliorer le rendement de la photosynthèse.

Apparaît ensuite une innovation essentielle pour le développement d'un arbre: le cambium, un tissu à l'origine du bois (xylème secondaire) et du liber (phloème secondaire), responsable de la croissance radiale. Le cambium permet

l'apparition des premières plantes possédant un véritable tronc, il y environ 380 Ma. Des formes ligneuses se développent, et la hauteur de la végétation augmente.

Ces premiers arbres sont appelés Progymnospermes, car ils ressemblent au Gymnospermes par leur morphologie mais se reproduisent encore par des spores. Ils sont répartis en deux lignées principales: les Aneurophytales, plantes de petite taille se reproduisant par homosporie (un seul type de spores) et les Archéoptéridales, plantes de plus grande taille (jusqu'à 30-40 m de haut) se reproduisant par hétérosporie (microspores et macrospores). Les Progymnospermes n'ont subsisté qu'au Dévonien et au Carbonifère inférieur.

Cette époque voit ainsi apparaître les premières forêts: les fougères arborescentes possédant de vrais troncs avec un cambium primitif, contrairement aux formes arborescentes actuelles qui possèdent un stipe ou faux tronc, se développent et atteignent jusqu'à 5 m de haut. On retrouve également à la fin du Dévonien des forêts à *Archaeopteris* de 10 à 30 m de haut, qui couvrent une grande partie des continents, en particulier dans les régions les plus humides.



🕒 Carbonifère : - 358 à -298 Ma

DES ARBRES ET DES GRAINES

La fin du Dévonien marque la plus grande innovation pour la reproduction : l'apparition de la graine. Cette structure élaborée consiste en un embryon, des substances de réserve et une enveloppe. Sa germination est souvent retardée (dormance), ce qui lui permet de se disperser, puis d'attendre des conditions favorables pour germer. La graine a permis aux plantes de s'affranchir de la présence d'eau lors de la fertilisation et par conséquent, favorisé l'occupation d'habitats variés.

Les spermatophytes (plantes à graines) descendent des progymnospermes. La première plante à graines est une plante appartenant au groupe des ptéridospermes ou fougères à graines. Il s'agit d'un groupe artificiel de gymnospermes primitifs caractérisés par de larges feuilles composées similaires à celles des fougères, mais qui se reproduisaient par graines. Les frondes isolées des ptéridospermes sont difficiles à distinguer de celles des fougères. D'ailleurs, de nombreux fossiles de plantes du Dévonien identifiés comme fougères se sont révélés appartenir en fait aux ptéridospermes. Toutes les différentes lignées d'arbres actuels sont issues de ces spermatophytes. L'embranchement des spermatophytes est divisé actuellement en deux grandes lignées: les gymnos-

permes (graines nues) et les angiospermes (graines enfermées dans un fruit).

Les plantes prospèrent à cette époque grâce à l'absence presque totale d'herbivores. La plupart des arthropodes, apparus au Silurien, sont des prédateurs (consommateurs secondaires) ou des détritivores, et ceux qui se nourrissent de plantes vivantes ne consomment que les spores, plus nutritives et dépourvues de toxines. La végétation a donc pu coloniser facilement les terres émergées.

Comme à la fin de l'Ordovicien, la prolifération de la végétation terrestre provoque des changements importants au niveau global en augmentant l'altération chimique et la dégradation des roches et en permettant la formation de sols. L'excès de nutriments causé par l'altération est transporté dans les eaux, puis dans les océans, augmentant leur productivité et amenant à terme à des conditions anoxiques (phénomène d'eutrophisation). La composition de l'atmosphère se modifie également: la végétation absorbe une grande quantité de CO_2 , tout comme le processus d'altération, et permet l'enrichissement de l'atmosphère en oxygène (O_2). La diminution du CO_2 atmosphérique entraîne un refroidissement (moins de gaz à effet de serre dans l'atmosphère). Une nouvelle glaciation commence alors, qui affecte profondément les écosystèmes. Cette extinction majeure, la deuxième de l'histoire de la Terre, provoque la disparition de 19% des familles et de 75% des espèces.

Suite à cette extinction, ce sont les végétaux qui vont permettre de produire de l'oxygène et de stabiliser les températures. La végétation est alors présente partout sur Terre, et les températures sont tropicales.

LES FORÊTS DE L'ÂGE DU CHARBON

Au Carbonifère, les plaques continentales qui comprenaient l'Europe et l'Amérique du Nord sont situées plus près de l'équateur. Les continents commencent à se rapprocher pour former au Permien le super-continent Pangée. Les journées ne durent que 22 heures et le climat plus chaud et plus riche en oxygène permet le développement de forêts humides, riches en inverté-

brés. Ces forêts ont été fossilisées sous forme de charbon. Carbonifère signifie d'ailleurs « âge du charbon ». Les importants dépôts de charbon en Europe de l'Ouest, Amérique du Nord et Chine datent de cette période. En Suisse, on trouve des roches du Carbonifère dans les nappes alpines, notamment à Dorénaz en Valais.



© Oswald Heer : Die Urwelt der Schweiz. Friedrich Schulthess, Zürich, 1865.

Quand les forêts sont des fougères

Au Carbonifère, une grande partie de l'hémisphère nord (Amérique du Nord, Europe et Asie de l'Est) était couverte de forêts marécageuses. Ces forêts étaient dominées par les ptéridophytes : on y trouvait des lycopodes géants pouvant atteindre 40 m de haut, des prêles de 10 m de haut et des fougères arborescentes. L'énorme quantité de matière organique produite, en se fossilisant, a permis la formation d'importants dépôts de charbon. Ce charbon a joué un rôle important comme combustible pendant la 1^{re} révolution industrielle du 19^e siècle et continue d'être utilisé de nos jours. Actuellement, les fougères occupent une place importante dans l'écosystème des forêts tropicales humides : elles sont représentées par des formes terrestres, des épiphytes, ainsi que des formes arborescentes pouvant atteindre plusieurs mètres de haut.



🕒 *Huperzia selago*, Suisse. Photo : J. Magnin-Gonze



🕒 Fossile d'un tronc de prêles, *Calamites suckowi*, Carbonifère supérieur (Westphalien), Taninges, Auvergne-Rhône-Alpes, France. Musée cantonal de géologie, Lausanne. Photo : F. Schwendener.

LES PLANTES DU CHARBON

Les lycopodes apparaissent au Dévonien et descendent d'un groupe de plantes primitives qu'on ne trouve qu'à cette époque: les zosterophylles. Les premiers lycopodes étaient des espèces herbacées semblables à *Huperzia selago* que l'on trouve en Suisse. Vers la fin du Dévonien, on assiste à l'apparition de formes arborescentes, comme celles appartenant au genre *Cyclostigma* qui pouvait atteindre 8 m de haut et 30 cm de large. Au cours du Carbonifère, les lycopodes arborescents deviennent les plantes dominantes des marais. On estime qu'il pouvait y avoir 1500 à 2000 lycopodes par hectare, c'est-à-dire une densité d'arbres bien supérieure à celle que l'on trouve dans les forêts actuelles. Ces lycopodes mesuraient plusieurs mètres de haut. Les espèces du genre *Lepidodendron* pouvait atteindre 50 m de haut, avec des troncs de 1,3 m de diamètre et un système racinaire de 9 m. Une telle hauteur était possible grâce au

renforcement des cellules externes du tronc, formant alors du bois secondaire. Visuellement, ces géants ressemblaient à des poteaux couverts de feuilles et divisés plusieurs fois sur la cime.

Les prêles apparaissent au Dévonien. Elles dérivent de fougères primitives et se diversifient au Carbonifère avec des formes herbacées et d'autres arborescentes. Les prêles les plus grandes et les plus diversifiées du Carbonifère étaient les *Calamostachyaceae* et les formes les plus connues appartenaient aux genres fossiles *Calamites* et *Annularia*. Elles pouvaient mesurer jusqu'à 18 m de hauteur, dimension rendue possible comme pour les lycopodes grâce à la formation de bois secondaire dans les tiges. Ces géantes étaient abondantes dans les zones humides au bord des lacs et leur croissance rapide leur permettait d'émerger lorsque les terrains qu'elles occupaient étaient recouverts de sédiments apportés par des inondations.



❖ *Cycas sp.*, Îles Grenadines. Photo : K. Schaefer



❖ *Araucaria du Chili* (*Araucaria araucana*), Chili. Photo : K. Sidi-Ali.

Les fougères apparaissent à la fin du Dévonien. Elles descendent d'un petit groupe de plantes restreint à cette période et appelés trimérophytes. Un genre fréquent à cette époque était *Cyathocarpus*: il s'agit d'une fougère arborescente avec un tronc de 10 m de haut pour un mètre de large, avec des frondes mesurant 3 mètres de long ou plus. Ces fougères étaient d'abord restreintes aux zones les plus sèches des marais comme les levées de rivières. Puis, vers la fin du Carbonifère, elles ont remplacé les lycopodes géants comme espèces dominantes en Europe et en Amérique du Nord.

Parmi les spermatophytes, les premiers arbres sont des gymnospermes qui apparaissent il y a environ 350 Ma. Ils sont caractérisés par un ovule dit nu. Les gymnospermes ont évolué à partir des progymnospermes, un type de plantes qu'on ne trouve qu'au Dévonien, descendant comme les fougères des trimérophytes. Les gymnospermes commencent à se diversifier au Carbonifère. Parmi les fossiles les plus présents, on trouve les ptéridospermes. Les ptéridospermes étaient bien représentés dans les forêts tropicales du Carbonifère et montraient une grande diversité morphologique: certains

genres comme *Alethopteris* formaient des arbres avec des frondes pouvant mesurer jusqu'à 7 m de long tandis que d'autres comme *Mariopteris* étaient de petites plantes qui s'enroulaient autour des troncs d'arbres, à la manière des lianes actuelles.

Les Cycadales constituent la première lignée majeure des gymnospermes. Les plus anciens fossiles de Cycadales datent du Permien. Toutefois, on a trouvé du pollen qui date du Carbonifère supérieur (-300 Ma). On pense que, à l'instar des conifères, cette rareté en fossiles s'explique par le fait que les cycas croissaient dans des zones moins favorables à la fossilisation en amont des marais.

Les premiers conifères primitifs, les Voltziales, sont apparus au Carbonifère. Ils ressemblaient probablement au genre actuel *Araucaria*. Les Voltziales développaient déjà des cônes. On a trouvé du pollen et plusieurs petits fragments de conifères datant du Carbonifère, mais peu de spécimens importants. Cette absence de vestiges fossiles majeurs s'expliquerait elle aussi par une croissance en dehors des bassins marécageux, dans des zones plus sèches et moins favorables à la fossilisation.

LA VÉGÉTATION ET LE CLIMAT DU CHARBON

Au Carbonifère, la végétation aux hautes latitudes était peu diversifiée et était dominée par des lycopodiophytes et des progymnospermes. Ceci était notamment dû à la présence d'importantes calottes glaciaires continentales dans l'hémisphère sud. En revanche, la séquestration d'une grande quantité d'eau dans ces glaciers a provoqué une baisse du niveau marin. Dans les zones tropicales humides, elle a provoqué l'émergence de zones marécageuses favorables à la formation de forêts houillères. Leurs parties centrales humides étaient dominées par les lycopodes géants. Dans les zones plus élevées des marais, comme les bancs de sable ou les levées de rivières, on trouvait une flore plus diversifiée constituée de fougères arborescentes, de prêles géantes et de ptéridospermes. Des forêts de conifères étaient probablement présentes en dehors de ces zones humides, toutefois leurs restes sont fragmentaires. Les lycopodes géants du Carbonifère étant de bons absorbeurs de carbone, le taux d'oxygène dans l'atmosphère était plus élevé à l'époque: 35% contre 21% actuellement. Ce fort taux d'oxygène a favorisé l'apparition d'invertébrés terrestres géants. Parmi les stars de cette époque

on trouve : *Meganeura*, une libellule de 75 cm de diamètre, *Pulmonoscorpius*, un scorpion de 70 cm de long et *Arthropleura*, un mille-pattes pouvant atteindre 2,6 m de long.

Vers la fin du Carbonifère, la formation de chaînes de montagnes en Europe et en Amérique du Nord a provoqué une augmentation de la sédimentation dans les zones marécageuses. Les lycopodes géants, qui étaient adaptés à des milieux très humides à substrat doux et acide, ont disparu de ces régions. A la fin du Carbonifère, la flore en Europe et en Amérique du Nord était constituée de conifères, de cycas et d'autres plantes à graines, de quelques fougères ainsi que de lycopodes et de prêles herbacées. Comme ces plantes n'étaient pas d'aussi bons absorbeurs de carbone que les lycopodes géants, le taux de CO₂ dans l'atmosphère a augmenté, ce qui a provoqué une hausse des températures.



🍷 *Lycopodium annotinum*, Suisse. Photo: J. Magnin-Ganze.



🍷 *Selaginella flabellata*, Ste Lucie. Photo: K. Schaefer

QUE SONT DEVENUES AUJOURD'HUI LES ESPÈCES DES FORÊTS DU CARBONIFÈRE

Presque 300 millions d'années plus tard, que sont devenues les espèces du Carbonifère ? Les lycopodes sont des plantes de petite taille qui descendent de formes herbacées et dont certaines datent du Carbonifère. Il existe actuellement deux familles majeures dans ce groupe: les *Lycopodiaceae* et les *Selaginellaceae*. Les gymnospermes comptent plus de 400 espèces et ont une répartition mondiale. En Suisse, on en trouve sept espèces, qui sont surtout présentes en altitude. Quant aux *Selaginellaceae*, il en existe au moins 700 espèces de par le monde. Elles appartiennent toutes au genre *Selaginella* et on les trouve surtout dans les zones tropicales. Deux espèces sont présentes en Suisse.

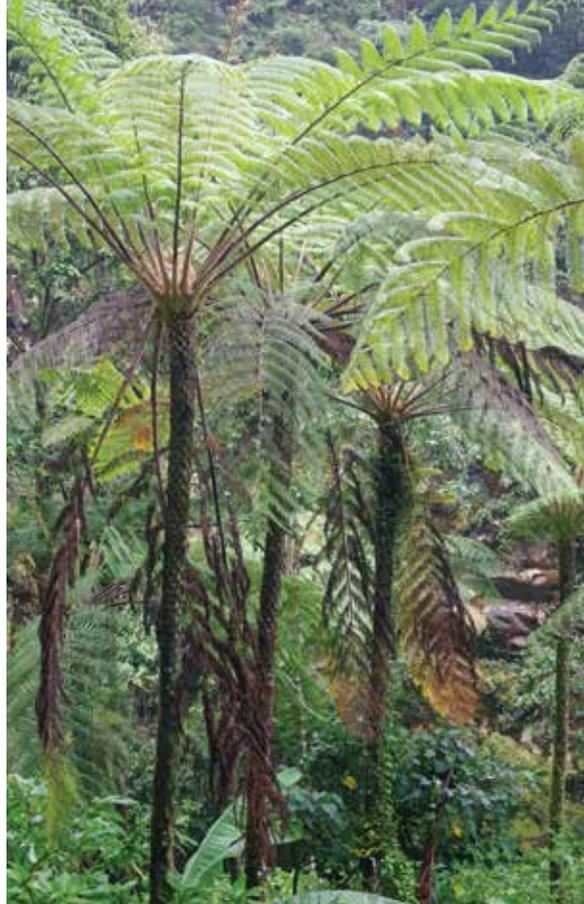
Les prêles actuelles ont une distribution mondiale. Elles appartiennent toutes au genre *Equisetum*, un genre qui est apparu durant le Cénozoïque. Il existe une quinzaine d'espèces dont neuf sont présentes en Suisse. On les trouve sur l'ensemble du territoire et elles peuvent former de grandes colonies. En Suisse, les prêles

peuvent approcher voire dépasser un mètre de haut. Deux espèces américaines, *Equisetum giganteum* et *E. myriochaetum* peuvent cependant atteindre une dizaine de mètres de haut, mais ces géantes ont besoin de s'appuyer sur les autres plantes environnantes pour croître aussi haut.

La plupart des familles et genres de fougères actuelles se sont différenciées pendant le Crétacé (-145 à -66 Ma), c'est-à-dire pendant ou après la diversification des angiospermes, les plantes à fleurs. Une hypothèse qui prévaut actuellement est que la diversification des *Angiospermes* a formé de nouveaux écosystèmes qui ont été exploités par les fougères: sous-bois humides pour les formes terrestres et canopée des arbres pour les épiphytes. Avec plus de 10'000 espèces, les fougères actuelles constituent le plus important groupe de plantes terrestres après les angiospermes. Elles sont toujours particulièrement abondantes dans les régions tropicales humides où leur diversité y est



Des rôles inversés depuis le Carbonifère : une colonie d'Equisetum sp. de quelques dizaines de centimètres devant des séquoias géants (Sequoiadendron giganteum), une espèce de conifère qui atteint habituellement 50 à 85 m de hauteur. Elle est endémique des montagnes de la Sierra Nevada en Californie. Mariposa Grove, Yosemite National Park, Californie, États-Unis. Photo : C. Randin

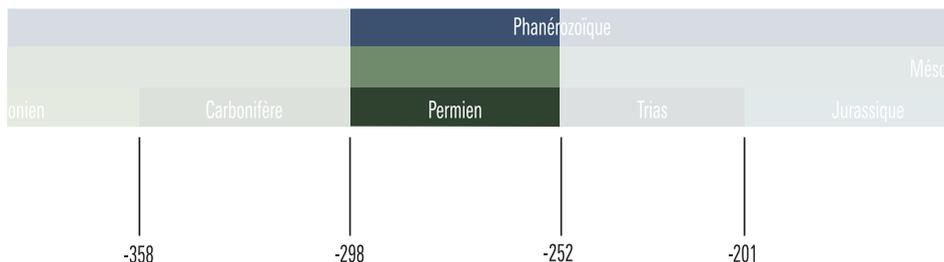


📍 Fougères, gorges du Chauderon. Photo : K. Sidi-Ali

📍 Fougère arborescente (*Cyathea* sp.), Java. Photo : J. Magnin-Gonze

maximale: on peut trouver plus de cent espèces différentes sur une superficie de quelques hectares. Dans les forêts humides d'altitude on peut encore observer des fougères arborescentes qui peuvent atteindre vingt mètres de haut. La majorité des espèces actuelles appartiennent à la famille des Cyatheaceae et sont apparues au Crétacé inférieur. En Suisse, il existe plus de cinquante espèces de fougères, elles sont répandues sur l'ensemble du territoire. On peut souvent en observer dans les milieux frais comme des sous-bois ombragés ou des bords de rivière dans des vallons encaissés.

Si les ptéridospermes sont actuellement éteints, les cycas sont toujours représentés par plus de 300 espèces originaires des régions tropicales et subtropicales. Toutefois, les formes actuelles résultent d'une radiation ayant eu lieu il y a 12 Ma. Les conifères restent bien présents sous nos latitudes et constituent un élément important de nos forêts. Cependant, cette diversité actuelle est trompeuse. Tout d'abord, il n'existe qu'à peine plus de 1000 espèces de gymnospermes, dont environ 600 espèces de conifères. Ce chiffre est à comparer avec les angiospermes (plus de 295'000 espèces décrites) et même avec les fougères (plus de 10'000 espèces décrites).



● Permien : -252 Ma

L'HEURE DE GLOIRE DES GYMNOSPERMES

Une grande phase de glaciation s'étend de la fin du Carbonifère à une grande partie du Permien: elle dure environ 60 Ma (de -320 à -260 Ma), avec deux grands maxima. L'un se situe à la limite Carbonifère-Permien et l'autre au milieu du Permien. Les raisons de cette glaciation seraient liées d'une part à une phase d'orogénèse intense (formations de chaînes de montagnes) pendant le Carbonifère, associée à une altération importante, et d'autre part à une végétation continentale luxuriante et à un dépôt important de charbon. Tous ces processus sont des pièges à CO₂, le retirant de l'atmosphère et provoquant ainsi une diminution importante des températures, puis finalement une glaciation. De plus, la formation de la Pangée, un supercontinent, ferme certains océans, perturbe la circulation océanique et entraîne également un refroidissement.

Ce climat sec et froid du Permien va permettre aux gymnospermes de progressivement supplanter les lycopodiophytes et les ptéridophytes, dominants au Carbonifère. Ces conditions climatiques favorisent en effet l'expansion et la radiation des plantes à graines, notamment par le fait que la reproduction n'est plus dépendante d'un milieu aqueux.

Les *Ginkgoales*, deuxième lignée des gymnospermes, sont des arbres de grande taille possédant un tronc ramifié (branches) avec des feuilles simples. Leur apparition et leur positionnement par rapport aux *Cycadales* prêtent encore à discussion, mais leur apogée se fait au Permien inférieur (-275 Ma). Tout comme les *Cycadales* décrits ci-dessus, les *Ginkgoales* ont un cycle de reproduction comparable aux conifères (*Pinales*), mais ils possèdent un mécanisme de fécondation plus archaïque qui reste

dépendant du milieu aqueux et ne forme pas de véritables graines. Ce sont des ovules qui germent rapidement et ne se conservent pas. Ainsi, certains auteurs considèrent les *Cycadales* et les *Ginkgoales* comme des préspermatophytes. Ce groupe est dit panchronique, car il est encore présent actuellement et ressemble morphologiquement aux fossiles identifiés. Les feuilles des ginkgos en particulier n'ont presque pas changé. Cependant, les *Ginkgoales* ont quasiment disparu, et il n'est représenté désormais que par une seule espèce, *Ginkgo biloba*.

La troisième lignée et la plus importante pour les gymnospermes est celle des *Pinales*. Ce sont des arbres ou arbustes dont les feuilles se sont transformées en aiguilles ou écailles. Ce groupe est apparu et s'est développé au milieu du Permien (-260 Ma), favorisé eux aussi par le climat. Les *Pinales* se reproduisent au moyen de cônes unisexués. Les cônes mâles contiennent les sacs polliniques (le pollen) et les cônes femelles, plus complexes, sont composés d'écailles fertiles portant deux ovules à leur surface. Les *Pinales* sont le plus grand groupe des gymnospermes. Ils représentent les conifères (sapins, pins, mélèzes,...) avec aujourd'hui environ 550 espèces réparties en 50 genres et sept familles.

Vers la fin de la glaciation du Carbonifère-Permien, la végétation s'est étendue aux hautes latitudes des hémisphères nord et sud. D'importants dépôts de tourbe ont ainsi été créés, et ont produit certaines des plus grandes réserves de charbon connues (Sibérie, Afrique du Sud, Inde, Australie).

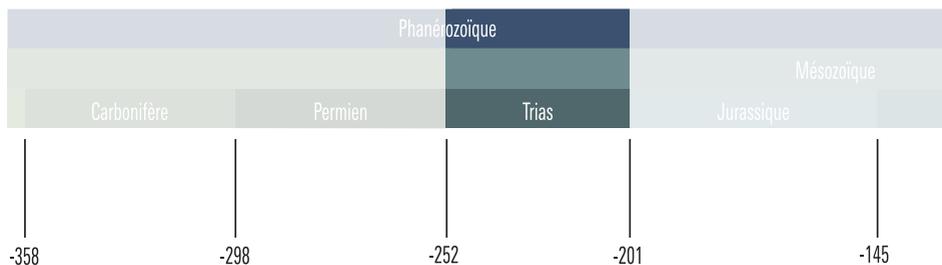
La croissance de la végétation étant ralentie et les incendies favorisés par le niveau élevé d'oxygène, le CO₂ augmente à nouveau dans l'atmosphère et génère un réchauffement grâce à l'effet de serre. Ensuite, plusieurs autres réactions s'enchaînent et provoquent une augmentation importante de la température. De plus, la configuration des terres émergées en supercontinent implique des conditions climatiques particulières, avec de grandes variations de températures et de précipitations (diurnes et saisonnières). Le centre subit des conditions arides, avec des températures élevées et peu de précipitations. Il subsiste une calotte glaciaire au sud.

Du fait de la variation d'environnements et la répartition des différentes forêts et plantes, le Permien est également la période du Paléozoïque présentant la diversité biogéographique floristique la plus grande.

A la fin du Permien, à la limite Permien-Trias (env. -250 Ma), se produit un nouvel événement d'extinction de masse: il s'agit de la troisième et plus grande crise de l'histoire terrestre. On estime à 95 % le nombre d'espèces disparues (contre 60 à 75 % pour les quatre autres crises). Des 22 familles de plantes connues au Permien, seulement 9 vont subsister pendant le Trias. Les forêts marécageuses tropicales, déjà en déclin, disparaissent avec leurs plantes dominantes, les Lycopodiophytes arborescentes.

Malgré l'importance de cette extinction, les raisons qui ont mené à cette crise ne sont pas encore totalement claires. La formation de la Pangée s'est traduite par une régression marine importante et par un climat très sec et à forte saisonnalité sur le continent. De plus, cette configuration ne permet pas une bonne circulation océanique, ce qui aurait amené à une anoxie partielle de l'océan. Elle aurait aussi réduit la surface des plateaux continentaux, sur lesquels prolifère la vie marine. On n'a retrouvé aucune preuve d'impacts d'astéroïdes ou de comètes (contrairement à la limite Crétacé-Tertiaire). Cependant, le volcanisme a été actif, daté à -248 Ma, en Sibérie. On parle des Trapps de Sibérie, qui sont constituées d'une épaisseur de

3700 m de laves, déposées en moins d'un million d'années, et cela sur une superficie de 350'000 km². Ce volcanisme a éjecté des cendres dans l'atmosphère, réduisant donc la température et provoquant des conditions anoxiques, de l'obscurité et des pluies acides, amenant ainsi à une diminution de la photosynthèse et donc à un effondrement de la productivité des végétaux. Ce volcanisme n'est pas suffisant pour expliquer à lui seul l'entier d'une extinction de cette ampleur. Ce sont l'ensemble des causes (régression marine, anoxie, volcanisme) qui sont probablement responsables de cette troisième extinction.



🕒 *Trias: -252 à -201 Ma*

Au début du Trias, les continents sont toujours rassemblés en un super-continent, la Pangée. Sa grande taille génère un climat continental en son centre, accentué et chaud durant toute cette période. Les zones arides et sèches sont très étendues. Des dépôts évaporitiques sont datés de cette période: l'eau, en s'évaporant sous l'effet de la chaleur, précipitent les sels qu'elle contient. La Suisse est également une zone de dépôts évaporitiques.

Suite à cette 3^e extinction de masse, le Trias inférieur est marqué par une diversification des espèces lente et difficile. L'environnement est encore instable, et a pu amener également à d'autres petites extinctions durant cette période. La végétation peine à se rétablir, et reste réduite au début du Trias. Très peu de dépôts de charbon ont été retrouvés pour cette période.



🕒 *Mines de sel de Bex, Vaud. Les importants dépôts de sel que l'on trouve en Suisse attestent des conditions arides du Trias. Photo: Souvaroff. License CC BY-SA 4.0.*



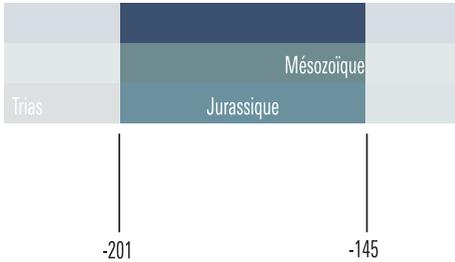
◆ Bois pétrifié de gymnosperme, Trias, Clover Creek, Idaho, Etats-Unis. Musée cantonal de géologie, Lausanne. Photo : F. Schwendener.

Durant le Trias moyen, les conditions sont à nouveau stables, et permettent le retour d'écosystèmes complexes. La diversité de la végétation augmente à nouveau avec l'apparition de beaucoup de familles modernes des conifères, ainsi que certaines fougères. La végétation qui a survécu à l'extinction, tels les ginkgos et les *Cycadales*, est remplacée peu à peu par les Conifères. L'évolution et la radiation des conifères prend place entre -248 et -206 Ma. Ceux-ci constituent alors l'essentiel du couvert végétal, en particulier dans l'hémisphère nord. Sept familles de conifères qui sont apparues à cette époque ont encore aujourd'hui une étendue mondiale. La différenciation biogéographique est relativement faible pendant le Trias, probablement du fait d'un climat uniforme et sans gel.

Les mammifères font leur première apparition, de manière discrète. Les archosaures connaissent une phase de radiation, et donnent naissance aux crocodiles et aux dinosaures, au Trias supérieur.

Pendant cette période, une succession de petites crises se produit, et chacune touche une communauté différente, avec la faune benthique, la flore terrestre ou encore les dinosaures. Ces crises vont amener à la grande crise de la limite Trias-Jurassique, la 4^e grande extinction, provoquée principalement par une phase de volcanisme intense. Les effets sur la végétation terrestre sont importants, en particulier pour les gymnospermes: 23 des 48 familles retrouvées au Trias disparaissent à la fin de cette période. Les conifères sont cependant relativement épargnés.

Ainsi, de manière générale, la vie au Trias peut être regroupée en trois grandes catégories: les survivants de l'extinction Permien-Trias, des groupes importants qui se diversifient mais qui ont une durée de vie très limitée, et de nouveaux groupes qui vont dominer tout le Mésozoïque (Trias, Jurassique, Crétacé).



🕒 *Jurassique* : -201 à -145 Ma



🕒 *Fronde de cycas (Zamites feneonis) Jurassique supérieur, Chanay, Auvergne-Rhône-Alpes, France. Musée cantonal de géologie, Lausanne. Photo : F. Schwendener.*

Le super-continent de la Pangée se divise peu à peu, avec la création de l’océan Atlantique Nord. Le niveau de la mer est élevé, et la plus grande partie du continent est submergée. De nombreuses mers tropicales peu profondes sont ainsi présentes, qui favorisent le développement de la faune et de la flore marines. La Suisse fait partie d’un ensemble de petites îles. Le climat est chaud, mais l’aridité du Trias disparaît peu à peu pour laisser place à un climat plus humide.

Ce climat permet ainsi le développement de jungles luxuriantes, couvrant une grande partie des terres. La végétation est donc dense, et toujours dominée par les conifères (gymnospermes). Leur groupe est très diversifié. On retrouve des groupes qui existent toujours de nos jours, avec notamment des Pinacées (sapins *Abies*, épicéas *Picea* et pins *Pinus* actuels), des Taxacées (avec les ifs du genre *Taxus* actuels), des Taxodiacées (avec les séquoias *Sequoiadendron*, *Sequoia* et *Metasequoia*), mais également des groupes qui sont maintenant éteints, comme les *Cheirolepidiaceae*.

Les ginkgos, les cycadophytes (ordre des *Cycadales*) et les fougères sont également présents. Ces fougères appartiennent à des familles qui subsistent encore aujourd’hui. Les charbons de cette période sont souvent associés aux fougères et aux conifères. Les dinosaures dominent quant à eux la vie animale.

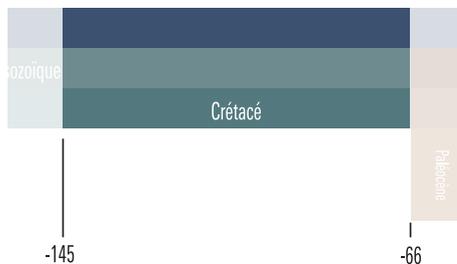
DES ARBRES ET DES FLEURS

Le Jurassique annonce l’aube des plantes à fleurs. Des groupes comme les *Bennetitales* et les *Pentoxylales* sont des précurseurs des angiospermes et sont à l’origine de deux innovations essentielles : l’apparition de la double fécondation et le développement d’une enveloppe enfermant l’ovule appelée carpelle. Ces innovations vont s’accompagner de l’apparition d’une nouvelle structure très importante : la fleur. Celle-ci est composée d’un périanthe (feuilles transformées en sépales et pétales) qui entoure et protège les organes reproducteurs (pistil et étamines).

La Pangée finit de se séparer, et forme les continents actuels, avec des positions qui vont



❶ Fossile de conifère, *Protocupressinoxylon purbeckensis*, famille des *Cheirolepidiaceae*. Jurassique supérieur (-152 Ma), Plateau de Courtedoux, Jura, Suisse. Photo : Jurassica Museum



❷ Crétacé : -145 à -66 Ma

encore évoluer jusqu'à nos jours. Le niveau des mers reste élevé, avec de nombreuses mers peu profondes recouvrant toujours les continents. Les températures, plus froides au début du Crétacé, augmentent pour ensuite rester stable, principalement à cause de l'activité volcanique, mais également par la circulation océanique rétablie par la connexion des différents océans. Le climat est ainsi globalement chaud. Les régions polaires ne sont recouvertes que ponctuellement par de la glace.

Au début du Crétacé, la composition et la distribution de la végétation est très semblable à celle du Jurassique, dans sa composition et dans sa distribution. Les latitudes basses sont dominées par des conditions arides et désertiques, et on y retrouve principalement des conifères et des fougères. La végétation en Europe et en Amérique du Nord est plus diverse, avec des fougères, des *Cycadales*, des conifères et des ginkgos. Plus au nord, la diversité diminue à nouveau fortement.

Les premières traces de fossiles et de pollen d'angiospermes sont datées du Crétacé inférieur,

mais leur origine pourrait être antérieure. La découverte récente en Chine d'un fossile d'une plante aquatique (*l'Archeofructus*), daté d'il y a environ -127 Ma, pourrait être la plus vieille angiosperme et pourrait représenter l'archétype de la fleur. Ces lignées sont appelées les angiospermes basales et vont très vite se diversifier. Il y a environ -110 Ma, elles se divisent en deux grandes lignées couramment appelées monocotylédones et dicotylédones. En Suisse, les angiospermes ligneuses appartiennent toutes aux dicotylédones.



❸ Fossile d'angiosperme, *Hymenaea dakotana*, Crétacé, Kansas, Etats-Unis. Musée cantonal de géologie, Lausanne. Photo : Florence Schwendener.

☛ Les angiospermes créent de nouvelles niches écologiques, qui permettent aux fougères de se diversifier, en particulier dans les sous-bois humides et sur les troncs des arbres (épiphytes). La plupart des formes actuelles des fougères sont apparues pendant le Crétacé.

Photo : K. Schaefer



Contrairement aux dicotylédones, les monocotylédones ne possèdent pas de cambium permettant une croissance radiale à l'origine des troncs des arbres. Il n'y a donc aucun arbre chez les monocotylédones mais uniquement des plantes dites herbacées. Cette lignée comprend principalement les graminées, les liliiflores, les yuccas, les bananiers et les palmiers. Bien que ces derniers aient l'apparence d'arbres, ils n'en sont en réalité pas. Il s'agit de plantes dites arborescentes. La tige n'est pas un tronc mais un stipe, composé d'un emboîtement de gaines foliaires coriaces comme chez certaines ptéridophytes actuelles.

D'abord seulement cantonnées à quelques petites niches écologiques, les angiospermes vont très vite se diversifier pour devenir les végétaux dominants. Ceci serait principalement dû à leur système végétatif et reproducteur performant leur conférant un fort potentiel de diversification, ainsi qu'au raccourcissement du cycle de reproduction, surtout chez les formes herbacées.

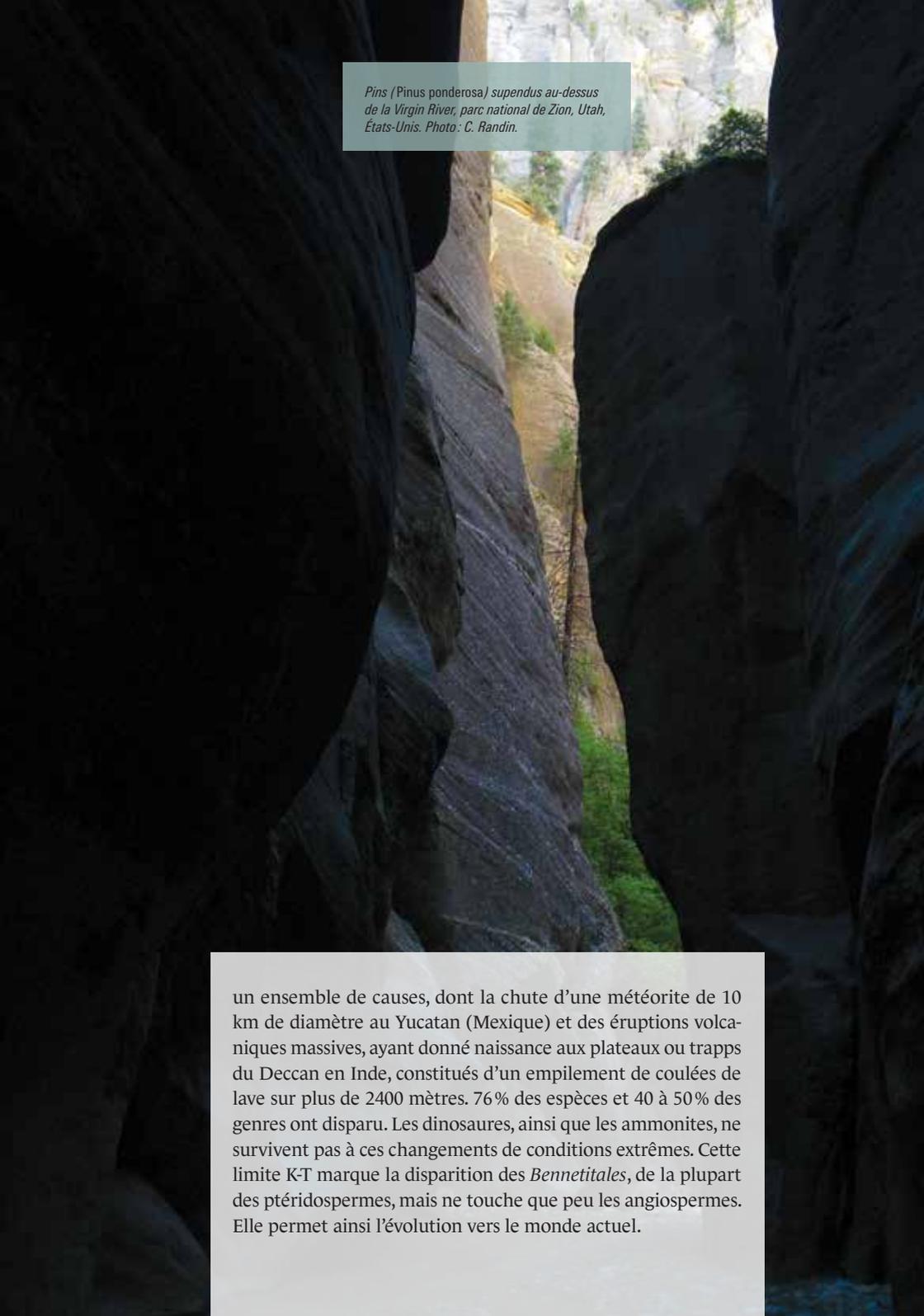
C'est durant ces dernières 100 millions d'années que vont apparaître toutes les familles de plantes à fleurs présentes aujourd'hui, dont les

arbres (dicotylédones) composant nos forêts comme les chênes (*Quercus*), le hêtre (*Fagus*) et aussi des arbres fruitiers du genre *Prunus* (abricotier, amandier, cerisier, pêcher, prunier) ou *Malus* (pommier) qui seront plus tard domestiqués par l'Homme.

Face au développement des angiospermes, les gymnospermes, qui possèdent un cycle de vie plus lent et une phase végétative très longue par rapport à leur phase reproductive, déclinent dès la fin du Crétacé, du fait de leur pouvoir colonisateur plus faible.

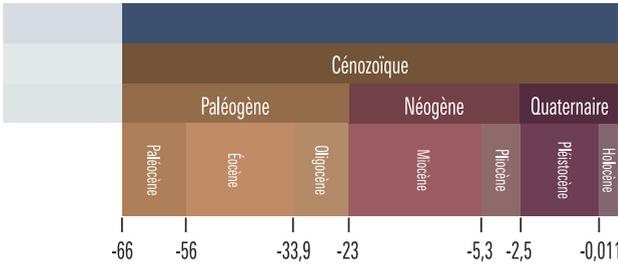
Depuis, les angiospermes dominent les écosystèmes terrestres. Elles constituent une grande variété de formes, rassemblées dans plus de 400 familles. Elles vont de petites plantes flottantes jusqu'aux grands arbres, et vivent dans des environnements bien plus variés que n'importe quel autre groupe de plantes. Quant à la faune, les dinosaures dominent toujours pour le moment les continents, et la taille des mammifères augmentent petit à petit.

A la fin du Crétacé se produit une nouvelle extinction de masse, la cinquième et dernière de l'histoire de la Terre. Elle est provoquée par

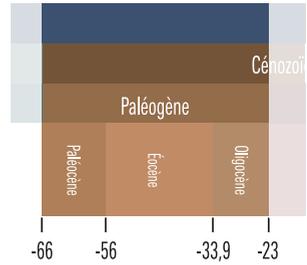


Pins (Pinus ponderosa) suspendus au-dessus de la Virgin River, parc national de Zion, Utah, États-Unis. Photo : C. Randin.

un ensemble de causes, dont la chute d'une météorite de 10 km de diamètre au Yucatan (Mexique) et des éruptions volcaniques massives, ayant donné naissance aux plateaux ou trapps du Deccan en Inde, constitués d'un empilement de coulées de lave sur plus de 2400 mètres. 76 % des espèces et 40 à 50 % des genres ont disparu. Les dinosaures, ainsi que les ammonites, ne survivent pas à ces changements de conditions extrêmes. Cette limite K-T marque la disparition des *Bennettiales*, de la plupart des ptéridospermes, mais ne touche que peu les angiospermes. Elle permet ainsi l'évolution vers le monde actuel.



⌚ Ère : Cénozoïque



⌚ Période : Paléogène
Paléocène : -66 à -56 Ma

DERNIERS PAS EN DIRECTION DU MONDE TEL QU'ON LE CONNAÎT

C'est durant cette période que les plaques continentales finissent de s'assembler pour donner les continents actuels, avec la création d'importantes chaînes de montagne, tels que l'Himalaya, les Alpes, les Carpates ou le Caucase.

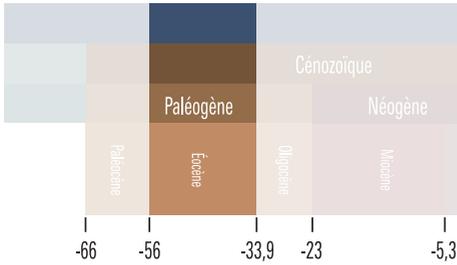
Le climat est chaud mais il se refroidit progressivement, avec la formation de calottes aux pôles (pôle sud: dès -35 Ma; pôle Nord: dès -3 Ma), et devient aride. Avec ces changements environnementaux, la composition et la distribution de la végétation changent considérablement. Les angiospermes continuent de se diversifier et de se moderniser pendant tout le Cénozoïque.

La végétation est dominée par des plantes adaptées à ce climat chaud et humide, ce sont en particulier les angiospermes qui se développent dans des écosystèmes majoritairement forestiers. De la fin du Paléocène et au début de l'Eocène, la couverture forestière tropicale est la plus étendue de l'histoire de la Terre. Les angiospermes connaissent une diversification et une modernisation dans ces biomes de forêt tropicale humide. Il s'agit en particulier d'an-

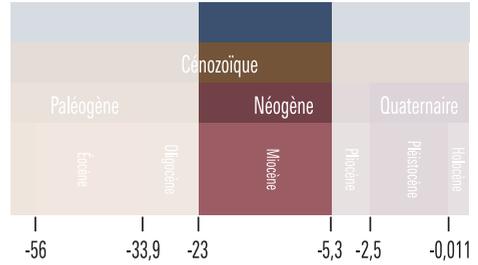
giospermes sempervirentes à larges feuilles, indicateurs de conditions chaudes et humides, sans période froide et/ou sèche. Les palmiers y sont variés et abondants, et se sont différenciés depuis le Crétacé. Au contraire, les conifères et les ginkgos sont présents mais rares.



⌚ Feuille fossile de ginkgo, *Ginkgo adiantoides*, Cénozoïque. Musée cantonal de géologie, Lausanne. Photo : F. Schwendener.



🕒 **Éocène** : -56 à -33,9 Ma



🕒 **Période** : Néogène
Miocène : 23-5,3 Ma

Durant l'Éocène, le climat reste chaud et humide, propice aux forêts. Celles-ci s'étendent d'ailleurs d'un pôle à l'autre et sont dominantes. Des fossiles de palmiers ont été retrouvés en Alaska et en Europe du Nord. Ils deviendront à nouveau moins abondants, puis absents, dans ces régions lorsque la température commence à diminuer.

Puis, à l'Éocène moyen, le climat se refroidit, et c'est un climat continental plus sec qui s'installe. Les forêts s'éclaircissent. Ce refroidissement conduit à l'expansion des arbres à feuilles caduques, qui sont plus résistants aux changements de température. La perte de leurs feuilles se fait pendant les saisons froides ou sèches, afin de limiter la perte d'eau ou d'éviter le gel. Ces derniers prennent la place des arbres sempervirents.

À la fin de l'Éocène, les forêts décidues couvrent de grandes parties des continents. En Antarctique, la calotte s'installe (environ -35 Ma). La flore tropicale disparaît et c'est la toundra qui s'y développe pendant l'Oligocène.

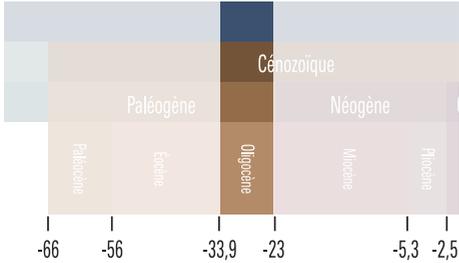
Au moins 32 des familles qui existent encore aujourd'hui et qui possèdent un ou plusieurs taxons adaptés à des climats ou à des habitats présentant de l'aridité saisonnière ou extrême ont évolué entre l'Éocène et le Pliocène (56 - 5 Ma).

Quand les forêts ont les pieds dans l'eau

Les mangroves sont des forêts semi-inondées situées dans les zones côtières tropicales et subtropicales. Elles ne se développent que dans la zone de balancement des marées (systèmes tidaux). Les espèces qui composent ces forêts sont surtout des dicotylédones du genre *Avicennia* et *Rhizophora*. Ce deuxième genre s'est probablement adapté aux zones côtières semi-inondées et ensuite diversifié il y a environ -50 Ma. Ces plantes supportent un environnement salin et, afin de pouvoir respirer lors des périodes d'immersion à marée haute, elles ont développé des racines émergées nommées pneumatophores. Actuellement, les mangroves sont importantes pour les populations côtières car elles protègent les sols contre l'érosion marine et diminuent la force des vagues lors de tempêtes. Au niveau écologique, les mangroves forment deux écosystèmes. La partie émergée est une forêt riche en faune et une zone de nidification importante pour de nombreux oiseaux côtiers. La partie immergée sert de pouponnières, notamment pour de nombreuses espèces de poissons des récifs coralliens.



🕒 **Mangrove de *Rhizophora* sp. hébergeant des macaques, Krabi, Thaïlande. Photo : C. Randin.**



🕒 **Oligocène : 33,9-23 Ma**

Le climat se refroidit encore, et l'aridité croît, ce qui amène au développement des habitats ouverts comme la savane. Les milieux forestiers diminuent.

De nombreuses forêts tropicales et intertropicales sont remplacées par des forêts tempérées d'arbres à feuilles caduques. Les graminées s'étendent de plus en plus, mais ne forment pas encore des savanes. Les plaines ouvertes et les déserts sont plus fréquents.

L'aridité et le faible taux de CO₂ oblige les plantes à trouver de nouvelles voies biochimiques. C'est le développement de nouvelles formes de photosynthèses, appelées C4 et CAM.

Quand les forêts sont des herbes géantes

A l'époque de la molasse, de l'Oligocène au Miocène, le climat en Suisse était bien plus chaud et humide que durant les derniers six millions d'années, après le refroidissement du Néogène. La végétation était luxuriante avec des forêts tropicales qui comprenaient des palmiers.

A partir du 19^e siècle, l'agrandissement de la ville de Lausanne et le développement des infrastructures nécessiteront des travaux urbanistiques de grande ampleur. Ces importants chantiers fourniront de belles récoltes de fossiles dans les roches molassiques vaudoises et permettront de constituer la collection actuelle du Musée cantonal de géologie.

Contrairement aux apparences, les palmiers ne sont pas des arbres mais des herbes qui peuvent croître en hauteur, grâce à leur tige lignifiée. Actuellement on trouve encore des forêts tropicales où les palmiers constituent un élément important de la végétation, notamment dans le Yucatan au Mexique.

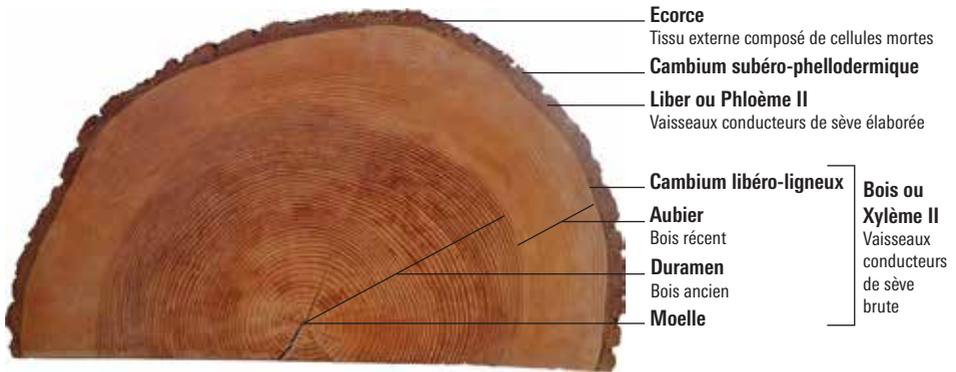
🌴 *Palmier Sabal sp., Mexique. Photo : K. Schaefer*



🌴 *Fossile d'Acer trilobatum, Miocène, Musée cantonal de géologie, Lausanne. Photo : F. Schwendener.*

A la fin du Miocène, le climat se refroidit et la saisonnalité augmente. Le gradient thermique entre les pôles et l'équateur augmente. La calotte est déjà bien établie au pôle Sud et commence à se former au pôle Nord. Dix principaux biomes ont été identifiés cette période, et encore existants aujourd'hui: forêt tropicale humide, forêt à été humide, désert subtropical/à été chaud (savane boisée et herbacée; désert), biomes à hiver pluvieux, biome tempéré chaud, biome tempéré frais, steppe, biome tempéré froid, biome arctique.





📍 Coupe transversale de gymnosperme (Cèdre de l'Atlas; *Cedrus atlantica*)

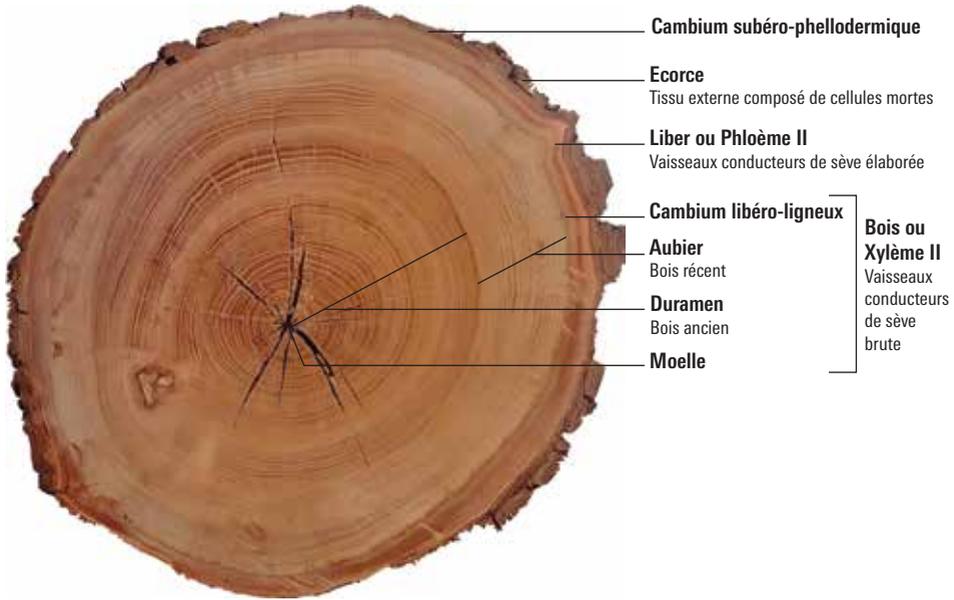
MAIS QUELLES SONT DONC LES PARTICULARITÉS DE L'ARBRE QUE L'ON CONNAÎT ACTUELLEMENT ?

La définition d'un arbre n'est pas exclusive: elle peut s'envisager sous les perspectives scientifiques de la taxonomie et de la biologie ou même d'une perception plus subjective par l'humain. Pour commencer, les arbres ne forment pas un groupe taxonomique à part entière, mais sont représentés par des espèces réparties en deux grandes divisions: les gymnospermes (uniquement des arbres) et les angiospermes dicotylédones (arbres et plantes herbacées à fleurs). Ils ont évolué indépendamment des autres plantes dites herbacées (certaines dicotylédones et les monocotylédones) en formant une tige ligneuse (bois) soutenant des branches appelée un tronc.

Afin d'appréhender ce qui va différencier un arbre des autres végétaux, il faut en premier lieu aborder les notions de formations primaires et secondaires. Les formations primaires des végétaux sont des tissus de cellules indifférenciées

appelés méristèmes primaires. Ils assurent la croissance en longueur au niveau de la tige, des feuilles et des racines et sont à l'origine de structures primaires comme les tissus de revêtement (épiderme), les tissus de soutien ou encore des tissus conducteurs tel que le xylème (transport de la sève brute depuis les racines) et le phloème (transport de sève élaborée et chargée en sucres depuis les feuilles).

Au Dévonien (-375 Ma), un caractère indispensable à la formation d'un arbre apparaît: les cambiums. Il s'agit de méristèmes secondaires, à l'origine des structures dites également secondaires, et responsables de la croissance en épaisseur des végétaux dans les racines, le tronc ou la tige, les branches et les rameaux. Le cambium est le tissu responsable de la formation du bois, saisonnière en climat froid et tempéré, et plus régulière en zone équatoriale. La croissance du cambium est bifaciale, ce qui donne de



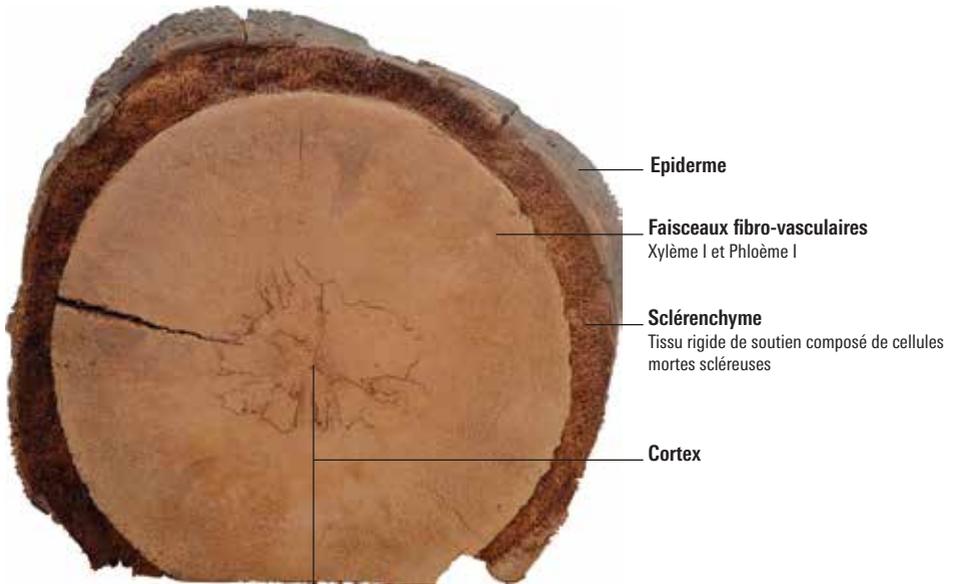
● Coupe transversale d'angiosperme dicotylédone (*Orme champêtre*; *Ulmus minor*).

grandes possibilités d'adaptation de la structure. Le cambium monofacial, ne produisant que du xylème et encore présent chez les fougères arborescentes, permet moins d'adaptation de forme.

Le cambium libéro-ligneux produit le xylème secondaire, constituant le bois par une croissance vers l'intérieur d'un tronc, et le phloème secondaire, formant le liber vers l'extérieur et constitué de files de cellules permettant la circulation de la sève élaborée. Le cambium subéro-phellodermique, absent chez les plantes herbacées, est à l'origine de différentes couches de l'écorce tel que le liège (*suber*) et le phelloderme (tissus de l'écorce).

Ces structures secondaires, uniquement présentes chez les gymnospermes et certaines angiospermes dicotylédones, vont remplacer les structures primaires au cours du développement de la plante et ainsi former un véritable tronc.

Ces nouvelles structures vont permettre à certaines espèces de pouvoir atteindre de grandes tailles: 115 m pour le séquoia à feuilles d'if (*Sequoia sempervirens*). Cependant, la taille ne fait pas un arbre: le saule rampant (*Salix repens*), une angiosperme dicotylédone, ne dépasse pas 50 cm en hauteur, alors que des fougères arborescentes et des monocotylédones comme les yuccas et les palmiers, atteignent plus d'une dizaine de mètres. Ces espèces ont donc l'apparence d'arbre mais n'en sont en réalité pas. Ce sont des plantes herbacées dite arborescentes. La rigidité et l'augmentation du diamètre de leur tige ne sont pas assurées par des formations secondaires (cambiums) comme chez les « véritables » arbres, mais par la multiplication des structures primaires de xylème et de phloème en cercles concentriques, ainsi que par l'accroissement progressif de la circon-



🕒 Coupe transversale d'angiosperme monocotylédone (palmier).

férence d'un unique méristème primaire apical. Il ne s'agit donc pas d'un tronc mais d'un stipe.

De plus, contrairement aux troncs, les stipes ne se ramifient généralement pas latéralement avec des branches, ce qui explique qu'il n'y ait pas de formes arbustives ou buissonnantes chez les monocotylédones et les fougères arborescentes.

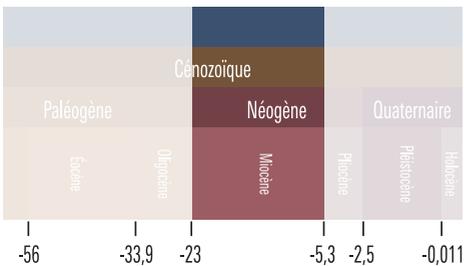
Ainsi l'arbre peut donc être défini comme étant une plante vivace qui, grâce à l'action des cambiums, possède une croissance secondaire radiale menant à une tige ligneuse ramifiée latéralement, appelée un tronc.



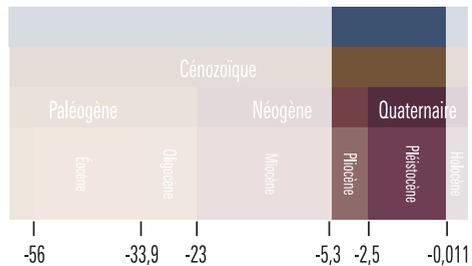


Et voici venir le temps
des humains





🕒 Période : Néogène
Miocène : -23 à -5,3 Ma



🕒 Période : Néogène
Pliocène : -5,3 à -2,5 Ma
Pleistocène : -2,5 à -0,011 Ma

On date de la fin du Miocène (-7,2 Ma) la séparation entre les hominidés, les ancêtres du genre *Homo*, et ceux du genre *Pan* (chimpanzé et bonobo). Cette époque est marquée par une diminution des températures à l'échelle du globe, on parle du refroidissement du Néogène. La région occupée par l'actuel Sahara a commencé à devenir aride dès la formation de la mer Méditerranée (-13,6 à -11,6 Ma), lorsque l'ancien océan Téthys s'est retiré, mais la genèse du Sahara débute vraiment avec ce refroidissement. L'expansion de ce désert s'accompagne d'une rétraction importante des forêts tropicales en Afrique. Alors que le massif forestier reste conséquent en Afrique de l'Ouest (Bassin du Congo), il disparaît presque complètement à l'Est, à l'exception des forêts galeries et riveraines, subsistant dans les dépressions du grand Rift africain.

C'est dans cet environnement de forêt tropicale sèche et fragmentée que le genre *Australopithecus* (famille des Hominidés) évolue à partir des premiers hominidés au Pliocène (dès -5 Ma). Les australopithecus développent la bipédie. L'émergence de l'Homme est donc le produit d'un bouleversement climatique qui a contraint des grands singes à s'adapter à de nouveaux écosystèmes forestiers.

A la fin du Pliocène (-2 Ma), le refroidissement amorcé au Miocène se fait plus marqué et le climat du Pléistocène qui suit est caractérisé par des cycles de glaciation pendant lesquels des glaciers continentaux sont descendus jusqu'au 40° parallèle. C'est dans ce contexte qu'une radiation évolutive au sein des hominidés amène l'apparition de deux stratégies écologiques bien distinctes. Le genre *Paranthropus* évolue vers un mode alimentaire basé sur les



🕒 C'est dans un paysage de forêt tropicale sèche tel que celui-ci actuellement que les premiers hominés ont développé la bipédie. Afrique du Sud. Photo : C. Randin.

racines et les tubercules. Les derniers représentants de ce genre disparaissent vers -1 Ma. En parallèle, les fossiles d'*Homo habilis* (le premier représentant du genre *Homo*) sont associés à la première industrie lithique, constituée essentiellement de galets grossièrement taillés et d'ossements de mammifères. *H. habilis* a une activité de charognard et complète probablement son régime avec la cueillette et la capture d'invertébrés. *Homo erectus* au sens large apparaît en Afrique (*Homo ergaster*) vers -1.9 Ma et en Asie (*Homo erectus*) vers -1 Ma. Il perfectionne son outillage lithique avec de grands bifaces qui lui permettent une activité de véritable chasseur. Ces innovations et ce changement de mode alimentaire conduit à une première expansion des *Homo erectus* hors d'Afrique (*Out of Africa*) vers -1,8 Ma (*Homo georgicus*) jusqu'en Chine et Asie du Sud-Est. Elle est probablement suivie de

plusieurs autres expansions. Vers -650'000 ans, la présence d'*Homo heidelbergensis* est attestée en Europe. Il pourrait descendre d'*Homo antecessor*, dont les fossiles trouvés en Espagne datent de -850'000 ans. *H. heidelbergensis* a probablement évolué il y a environ -450'000 ans pour donner progressivement naissance aux Néanderthals (*Homo neanderthalensis*). Ceux-ci auraient vécu en Europe, au Moyen-Orient et en Asie centrale, jusqu'à environ -30'000 ans. Les techniques lithiques dite moustérienne du Paléolithique moyen des Néanderthals leur permettent de chasser le gros gibier dans les toundras d'Europe et du Proche-Orient entre -100'000 ans et -30'000 ans. Les outils des industries moustériennes lithiques sont dominés par différentes formes de racloirs, des pointes ou des grattoirs et les éclats nécessaires transformés par retouche sont produits par des méthodes de débitage complexes.



🕒 Les sites archéologiques livrent des accumulations impressionnantes d'ossements de grands mammifères comme le bison. Elles sont interprétées comme le résultat de chasses saisonnières par les Néanderthals. Le paléoenvironnement de ces chasseurs devait ressembler à cette photo.

Photo : K. Sidi-Ali. Yellowstone National Park, Wyoming, USA.

Homo sapiens apparaît en Afrique il y a 300'000 ans, où il développe une industrie lithique plus élaborée. Des *H. sapiens* découverts en Israël en 2002 donnent un âge compris entre -194'000 et -177'000 ans. C'est donc armé de nouvelles technologies lithiques que certains *H. sapiens* quittent l'Afrique de l'Est pour le Proche-Orient, puis l'Asie du Sud-Est. L'Australie est atteinte vers -50'000 ans, ce qui implique l'usage de bateaux, puisque ce continent est resté isolé de l'Eurasie, même au plus froid des glaciations. Vers -40'000 ans des groupes d'*H. sapiens* viennent concurrencer les Néanderthals en Europe. Ces derniers disparaissent vers -30'000 ans. La Sibérie est atteinte par *H. sapiens* à la même période. Profitant de l'abaissement du niveau des mers à la fin de la dernière période glaciaire, des individus passent à multiples reprises le détroit de Behring alors

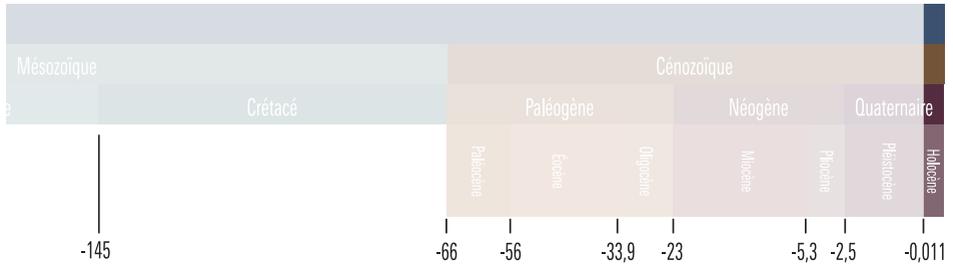
asséché et colonisent les Amériques probablement avant -15'000 ans (voir aussi chapitre 2 – section *Des arbres de pierre à l'extinction des grands mammifères*).

LES VARIATIONS CLIMATIQUES DE L'Holocène, MOTEUR DE L'EXPANSION DE LA FORÊT ET DES HOMMES

Lors des oscillations climatiques de l'Holocène qui ont suivi la dernière période glaciaire du Würm dans l'arc alpin il y a 10'000 ans, des périodes plus chaudes ont favorisé l'expansion des hommes et le développement de l'agriculture sur le Plateau suisse mais aussi rapidement dans les Alpes. Mais avant la colonisation de ces espaces par l'Homme, ce sont d'abord les forêts qui ont repris possession du territoire derrière les glaciers.



📍 Tronc de pin (*Pinus sp.*) compressé par la glace. Musée cantonal de géologie, Lausanne. Photo : F. Schwendener.



📍 Période : Néogène
Holocène : -0.011 Ma – 1784 ap. J.-C.

LA RECONQUÊTE DU TERRITOIRE PAR LES ARBRES ET LES FORÊTS APRÈS UNE GLACIATION

Les forêts dans lesquelles nous nous promenons aujourd'hui sont le résultat d'une longue évolution liée aux variations du climat. Elles ont même totalement disparu à plusieurs reprises de notre territoire lors des précédentes glaciations. Lors du retrait des glaciers, elles ont à chaque fois colonisé à nouveau les espaces libérés par les glaces suivant un schéma similaire. Après les steppes s'installent des forêts claires de bouleaux, puis de pins et de bouleaux. Lorsque les températures augmentent encore, les feuillus tempérés réfugiés dans des zones plus clémentes comme les Balkans, la Méditerranée et la péninsule ibérique, réapparaissent plus ou moins rapidement suivant le chemin qu'ils ont à parcourir. Survient ensuite une

phase régressive de péjoration climatique qui est la cause naturelle de l'expansion du hêtre, du sapin, et de l'épicéa. Au cours de l'interglaciaire actuel, ce cycle naturel a très tôt, dès le Néolithique, été perturbé par les activités humaines.

Au maximum de la dernière glaciation du Würm, il y a 22'000 ans, le glacier du Rhône atteint la région de Lyon. Un à deux kilomètres de glace recouvre alors le Plateau suisse.

L'interglaciaire actuel se divise en deux phases: le Tardiglaciaire de -19'000 à -11'700 ans et l'Holocène ou Postglaciaire, de -11'700 ans à nos jours.

Au Tardiglaciaire dans notre région, dès le retrait du dernier glacier würmien, dès -19'000 ans probablement, a lieu une recolonisation végétale; les sols bruts à peine abandonnés par les glaces sont envahis par une végétation pionnière d'herbacées et de buissons. Le paysage



sans arbres se compose de steppes arides, de pelouses et de landes. Les premières essences arboréennes arrivent beaucoup plus tardivement, il y a 14'600 ans environ, au cours de l'épisode du Bölling; une véritable phase de reforestation a lieu à la faveur d'une hausse rapide et importante des températures, de 3 à 5°C, puisqu'on estime qu'elles atteignent des valeurs proches des températures actuelles. La végétation qui s'installe alors sur tout le territoire est constituée de forêts claires de bouleaux avec en sous-bois des buissons de genévrier, de saule et d'argousier. Lors de la période suivante nommée Allerod, le pin immigré dans les forêts claires de bouleau qui finalement se transforment en forêts plus denses de pin et de bouleaux. Puis au cours du Dryas récent il y a 12'700 ans, un refroidissement drastique provoque un éclaircissement des forêts et une baisse de leur limite altitudinale.

Durant l'Holocène, il y a 11'700 ans, les forêts tempérées s'installent, le paysage change complètement. Une nouvelle et forte hausse des températures, au cours du Préboréal permet l'apparition des premiers feuillus plus thermophiles; noisetier, orme, chêne, tilleul et peuplier s'implantent progressivement. Environ 500 à 1000 ans plus tard, au cours du Boréal, les forêts de feuillus remplacent celles de pin et de bouleau. Le frêne et l'érable immigré également à cette époque, ils sont accompagnés par le lierre et le gui. Les premiers sapins blancs colonisent les pentes du Jura. Au cours de l'Atlantique ancien, de -8800 à -6600 ans, à la faveur d'un optimum climatique (2°C de plus que de nos jours) les forêts de feuillus atteignent leur développement maximal. Le frêne ainsi que l'aune s'étendent. Puis le sapin blanc s'installe également sur le Plateau, alors que l'orme marque un premier recul. Finalement, alors que le sapin

blanc se déploie, le hêtre immigré lui aussi et s'établit rapidement.

A l'Atlantique récent, de -6600 à -5300 ans, la transformation du paysage est une nouvelle fois spectaculaire, puisque la hêtraie-sapinière remplace les forêts mixtes de feuillus. L'orme, le tilleul et le frêne déclinent progressivement, le lierre et le gui se raréfient. Le chêne se maintient. L'if s'étend. L'épicéa se manifeste en traces. Les expansions du bouleau, de l'aulne et du noisetier, espèces pionnières colonisatrices de zones défrichées coïncident maintenant avec l'extension des herbacées indicatrices de milieux ouverts et signalent un impact anthropique plus important. Il correspond à l'occupation du Néolithique moyen (Cortailod). Au Subboréal, de -5300 à -2700 ans, la hêtraie-sapinière demeure la formation forestière principale. L'impact humain dans le paysage est grandissant, zones défrichées par le feu, cultures de céréales et pâturages boisés ménagent des ouvertures de plus en plus importantes dans la forêt. Du point de vue de l'archéologie, les civilisations suivantes se succèdent: Cortailod de type Port-Conty, Horgen, Lüscherz, Auvernier-Cordé, Campaniforme, Bronze ancien, moyen et final. Dès le Horgen un essor démographique important est postulé. Le rôle des feux allumés par l'homme devient primordial dans le changement de la composition des forêts puisqu'il favorise ou défavorise certaines espèces. Les

phases de déforestation sont indiquées par des déclinés du hêtre, du chêne et du sapin, alors que le bouleau, le noisetier, le genévrier, l'if, le tilleul et l'orme profite de l'ouverture de la canopée. Au Subatlantique ancien, de -2700 à -1000 ans, la hêtraie-sapinière et les chênaies se maintiennent. Le charme et le noyer s'implantent. Cette période englobe l'âge du fer, l'époque romaine et le Haut Moyen Âge. Le développement du chêne et du hêtre est le reflet de l'exploitation de forêts aménagées par l'homme. Ils sont favorisés pour la production de glands et de fâines. Le charme est exploité en forêt de taillis. Les cultures s'intensifient. Le seigle et le chanvre sont maintenant aussi cultivés. Les premières plantations de noyer datent également de cette période. Les pâturages boisés sont toujours attestés par l'expansion des genévriers. Au Subatlantique récent de 1000 ans à nos jours, le changement de la végétation est profond. Cette période englobe le Moyen Âge et les Temps Modernes. L'Homme a transformé le paysage végétal dominé par les forêts en une mosaïque de champs cultivés, de pâturages et de forêts exploitées. Le recul impressionnant de la hêtraie-sapinière peut être imputé à une pression démographique croissante. L'ouverture du paysage est maximale. Les chênaies par contre sont toujours favorisées. Les plantations de noyer, de châtaignier s'accroissent.

➤ Forêt de mélèzes
(*Larix decidua*),
Zermatt, Valais,
Suisse.
Photo : C. Randin.

LES PREMIERS PASTEURS-AGRICULTEURS: DÉVELOPPEMENT DE L'AGRICULTURE, DU PASTORALISME ET PREMIERS IMPACTS DE L'HOMME SUR LA NATURE DANS LES ALPES

A l'arrivée des premiers paysans dans les Alpes, il y a 7500 ans, les forêts se sont déjà largement déployées sur tout le territoire et elles vont atteindre au début de l'optimum climatique une limite altitudinale plus élevée qu'à l'heure actuelle. A cette même époque, les chasseurs-cueilleurs nomades du Mésolithique exploitent les ressources naturelles de leur environnement; ils pratiquent essentiellement une économie de prédation sans incidences notables sur l'environnement. Les premières communautés agropastorales, arrivées de l'Italie du Nord, amènent avec elles une économie de production (agriculture, chèvres, moutons, céramique) et elles vont se sédentariser. Les premiers impacts anthropiques sur le paysage se rattachent à cette période. Ces premiers paysans s'installent dans les zones de moyenne altitude et sur les collines qui bordent la plaine du Rhône encore marécageuse, ainsi que sur les cônes d'alluvions au débouché des vallées latérales. Ils défrichent par le feu des clairières dans une forêt primaire dense composée principalement de chêne, de tilleul, de noisetier, mais aussi de sapin blanc, et plus en altitude d'épicéa, puis de mélèze et d'arolle. Ils pratiquent l'agriculture en forêt. Les diverses céréales sont

cultivées jusqu'à épuisement des sols. Grâce au feu, les cendres fertilisent le sol, ce qui leur permet d'exploiter leur terroir pendant plusieurs cycles de culture. Cependant la dégradation des sols provoque le déplacement périodique des villages. Sur les versants de la vallée du Rhône plus en altitude, de vastes étendues de pelouses alpines sont également disponibles. Plusieurs indices témoignent de mouvements saisonniers et de déplacements en altitude, par exemple la remontée en altitude de l'aulne vert, essence pionnière des sols érodés qui signale la présence de pâturages à la limite supérieure de la forêt. Ces pratiques de pastoralisme (transhumance, remuage ou estivage), initiées probablement dès le Néolithique moyen vont perdurer jusqu'à nos jours.

Au cours de l'âge du Bronze, les chênaies pures remplacent progressivement les forêts plus diversifiées de feuillus. L'épicéa colonise massivement les versants nord et sud aux dépens du pin sylvestre, du mélèze et de l'arolle qui eux se retrouvent cantonnés à la limite supérieure de la forêt. L'optimum climatique de l'âge du Bronze entre -3500 et -3000 ans favorise probablement l'essor démographique de la population. Les pâturages d'altitude se généralisent dans



l'ensemble de la région alpine et la pratique de l'estive prend de l'ampleur; elle induit un déboisement à la limite supérieure de la forêt et un changement dans la composition floristique des pelouses alpines. La limite de la forêt a été abaissée de plus de 200m à cette période sous l'influence de l'homme en Valais. Elle reste de nos jours encore majoritairement artificielle. Pâturages et défrichements par le feu en altitude semblent avoir favorisé l'expansion de l'épicéa et de l'aulne vert, mais des causes climatiques entrent certainement elles aussi en jeu.

Le passage de l'âge du Bronze à l'âge du Fer correspond à une détérioration climatique qui va durer une centaine d'années environ. De nombreuses oscillations climatiques se succèdent ensuite, huit phases chaudes ont été repérées entre le Premier âge du Fer ou

Hallstatt B, C et D le Second âge du Fer ou époque de La Tène. Durant l'âge du Fer en général de -2800 à -1960 ans, les brûlis atteignent leur plus vaste amplitude dans tout l'arc alpin. L'emprise humaine sur la végétation est plus forte qu'aux époques précédentes avec plus de défrichements, plus de surfaces ouvertes dédiées à l'espace agricole (cultures, champs, prairies et pâturages). Dans les vallées des Alpes centrales, les cultures en terrasses de céréales et de lin sont attestées jusqu'à l'étage subalpin. Les pâturages boisés soit de mélèzes, soit d'arolles et de buissons feuillus, suivant les régions se développent également à cette époque. Les traces des premières prairies de fauche ont également été retrouvées dans les Grisons à cette période, ce qui coïncide avec l'apparition de la stabulation à Gamsen-Waldmatten près de Brigue.

DES GAULOIS, DES ROMAINS ET DES FORÊTS

L'optimum climatique romain, de 200 av. J.-C. à 200 apr. J.-C. a peut-être stimulé l'économie dynamique en Italie du Nord et en Gaule.

L'accroissement des plantations de noyer et de châtaigniers dès l'époque romaine révèlent un changement des pratiques agro-forestières, par exemple les défrichements par le feu vont diminuer d'importance. Les forêts sont de plus en plus aménagées par et pour l'homme.

Durant cet optimum climatique se produit également la première grosse chute du couvert forestier avec un impact régional sur le climat, l'hydrologie et le cycle du carbone. La forêt entre dans un cercle vicieux d'utilisation: le climat favorable augmente la productivité agricole, en particulier en Gaule, ce qui provoque elle-même une hausse de la démographie. Plus d'espaces et plus de production de l'artisanat et de l'agriculture sont alors nécessaires pour accueillir et nourrir cette nouvelle population. Il faut également plus de matériaux de construction. Cette triple nécessité met alors les surfaces forestières non défrichées ou exploitées sous pression. Ainsi, la forêt qui couvre encore environ 50% de sa surface potentielle à l'Âge de Bronze, chute à 18% en Suisse.

Les raisons du déclin de l'Empire romain à partir du V^e siècle ap. J.-C. ne sont que partiellement identifiées mais quelques scénarios sont avancés. Parmi eux, la combinaison des germes et du climat. Deux éruptions de volcans probablement islandais en 536 et 541 ap. J.-C provoquent une phase de refroidissement climatique. En 541 ap. J.-C., la peste bubonique frappe pendant deux siècles. Ainsi, Rome passe d'un million d'habi-

tants à 20'000. Les germes ont été bien plus mortels que les Germains et l'ampleur des pertes humaines surpasse la peste noire de 1349, la grippe espagnole de 1918 et l'holocauste de la deuxième guerre mondiale.

L'INDUSTRIE RURALE AU MOYEN ÂGE

Après la péjoration climatique de la Basse Antiquité, l'Europe rentre à nouveau dans une phase climatique favorable appelée optimum climatique du Moyen Âge de 900 à 1300 apr. J.-C. Cette période permet des saisons de récoltes plus longues, et la fin des raids vikings favorise une plus grande stabilité politique. Simultanément, certaines innovations technologiques médiévales comme le moulin, la charrue, le haut fourneau et le métier à tisser horizontal stimulent le développement de l'activité agricole et les défrichements. Il faut du bois pour les hauts fourneaux. Les terres sont plus faciles à travailler et les rendements augmentent. Les textiles deviennent aussi plus faciles à produire. Il faut donc plus de surface pour le lin, le chanvre et la pâture des moutons.

Les campagnes se mettent alors à produire des surplus agricoles (vin et céréales) et artisanaux (textiles), et les villes deviennent des foyers de demande et d'échanges très actifs. Cette croissance démographique et l'essor du commerce provoquent l'extension géographique des villes.

En Suisse, la surface forestière ne représente par endroit plus que 5% de sa surface potentielle juste avant la grande épidémie de peste médiévale de 1350 apr. J.-C.

ANTHROPOCÈNE

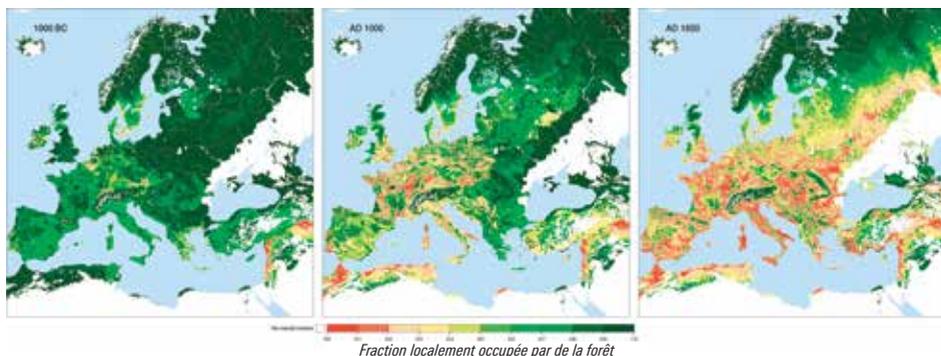
☉ Période : Néogène
Anthropocène : 1784 ap. J.-C. – ?

Invention de la
machine à vapeur

1^{re} révolution
industrielle

0

(correspondant à l'année 2000)



🕒 Évolution de la surface potentielle de la forêt à la fin de l'âge du Bronze (~1000 av. J.-C.), à l'An Mille au Moyen Âge et durant la 1^{re} révolution industrielle en 1850. En Suisse, les proportions de la surface potentielle occupée effectivement par la forêt représentaient respectivement pour ces quatre périodes 42, 5 et 1,3%. Source : Kaplan JO et al. (2009) *The prehistoric and preindustrial deforestation of Europe*. *Quaternary Science Reviews*.

LA I^{RE} ET II^E RÉVOLUTION INDUSTRIELLE GRÂCE AUX FORÊTS DU PASSÉ

Durant la première révolution industrielle, l'invention de la machine à vapeur et l'extraction massive du charbon favorise le développement ferroviaire des années 1840. Le chemin de fer devient alors le mode de transport terrestre dominant pendant près d'un siècle. Il permet des déplacements rapides et sûrs entre les centres urbains et garantit l'acheminement du minerai de charbon, source d'énergie et moteur de la croissance économique jusque dans les années 1930.

Le développement industriel des villes favorise les premières banlieues et le mitage du territoire. Les surfaces sont prises sur les vergers, les champs et les forêts. En Suisse, la construction des lignes de chemin de fer au 19^e et au début du 20^e siècles a également englouti

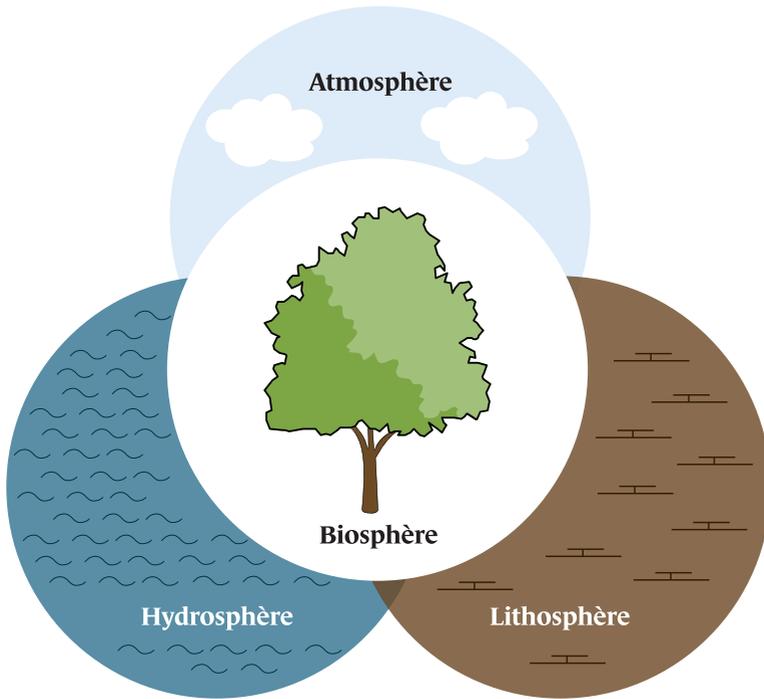
d'énormes quantités de bois de chêne et provoqué une surexploitation de la chênaie. Les forêts n'occupent plus que localement 1,3% de leur surface potentielle en 1850. Afin de stopper la déforestation qui favorise glissements de terrain, avalanches et inondations, la forêt helvétique est mise sous protection par une loi en 1876. Elle est actuellement en expansion et reconquiert des terres agricoles et des alpages qui ne sont aujourd'hui plus exploités alors que la forêt amazonienne perd l'équivalent de la moitié de la Suisse en surface chaque année. Pendant ce temps, les forêts du passé, lentement transformées en charbon depuis le Carbonifère il y a 300 millions d'années, sont brûlées dans les centrales thermiques en émettant du CO₂. Le développement des activités humaines, favorisé par le climat dans le passé, devient le moteur du dérèglement climatique à l'Anthropocène.



Le rôle des arbres

*et l'impact de l'Homme dans les grands
cycles biogéochimiques*





L'arbre est en interaction constante avec son environnement: les conditions locales et globales vont influencer sa distribution. En retour, l'arbre influence son environnement à différentes échelles spatiales et temporelles. L'arbre prélève des ressources essentielles à sa survie, son développement ou sa reproduction et rejette ces éléments transformés dans son milieu, lors de réactions chimiques comme la respiration, lors de la chute de ses feuilles et finalement lors de sa mort.

CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES:

Un cycle biogéochimique correspond à l'ensemble des flux de matière et d'énergie circulant entre les grands réservoirs terrestres que sont l'atmosphère, l'hydrosphère, la lithosphère, et la biosphère. Il existe de nombreux cycles biogéochimiques, et ceux-ci sont liés de manière étroite. Les cycles de l'eau, du carbone, et de l'azote sont les plus importants pour les arbres et la biosphère en général. Ces cycles regroupent des processus biologiques qui se déroulent sur le court terme (de la seconde au siècle) et des processus géologiques qui se mettent en place sur le long terme (des milliers aux millions d'années).

Du fait de l'importance de la couverture forestière mondiale, qui représente 30 % de la surface de la Terre, les forêts ont une influence conséquente sur l'environnement global et donc sur les cycles biogéochimiques et le climat. Ces cycles touchent les processus de transport et de transformation de l'énergie, de l'eau, et d'autres éléments chimiques, comme le carbone et l'azote. Ils se produisent dans un système fermé, la Terre, avec comme seul apport externe l'énergie provenant du Soleil. Matière et énergie circulent à travers quatre grands réservoirs terrestres :

L'atmosphère

L'atmosphère est essentiellement composée d'azote (78 %) et d'oxygène (21 %). Dans la couche de l'atmosphère nommée stratopause se trouve la couche d'ozone, un bouclier indispensable pour protéger les êtres vivants du rayonnement ultraviolet. Un changement de composition de l'atmosphère induit des changements climatiques qui vont se manifester sur le temps long. C'est le cas de la modification de la composition de l'air par les êtres vivants au cours des temps géologiques: en réalisant la photosynthèse, ils ont contribué à appauvrir l'atmosphère en CO₂, ce qui a amené, en contrepartie, à son enrichissement en oxygène. Il existe également des crises ayant mené à des extinctions massives, des événements relativement brefs à l'échelle des temps géologiques, dont la cause est en lien avec un changement d'atmosphère.

La lithosphère

La lithosphère correspond à l'enveloppe superficielle rigide de la Terre, d'une épaisseur moyenne de 120 km. Elle comprend la croûte terrestre, qui constitue les plaques tectoniques, et une partie du manteau supérieur, couche intermédiaire entre le noyau terrestre et la

croûte. Les sols constituent la partie supérieure de la lithosphère, et sont sous l'influence également de l'hydrosphère et de la biosphère.

L'hydrosphère

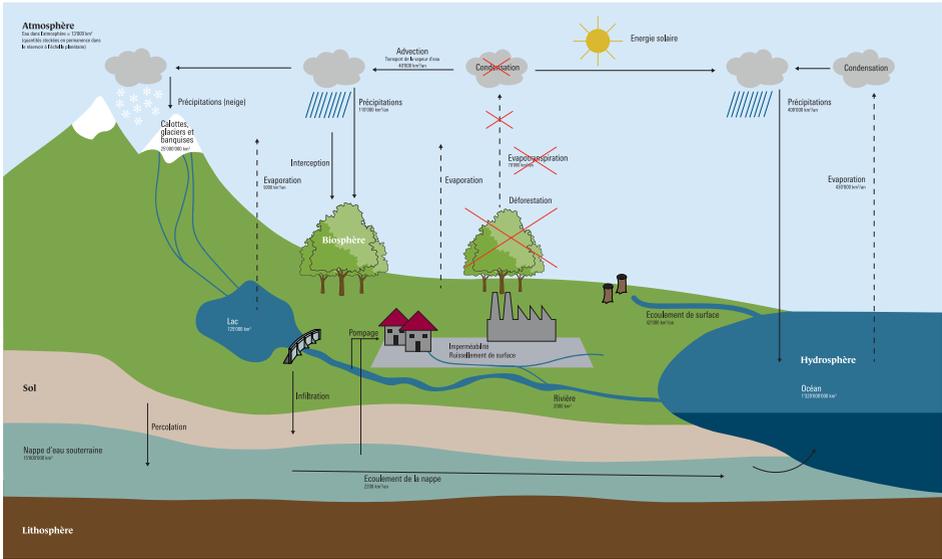
L'hydrosphère correspond à la totalité des eaux de la Terre sous leurs trois formes: liquide, solide, gazeuse. L'ensemble des eaux continentales, océaniques et atmosphériques équivaut à un volume de 1'405'996'000 km³. Cette hydrosphère joue un rôle capital dans le fonctionnement du climat de la Terre. Les océans couvrent 70,8 % de la surface. L'hydrosphère est très inégalement répartie: elle est composée à 97,2 % d'eau salée, et 2,79 % d'eau douce, qui sont stockés pour les trois quarts, sous forme solide (calottes glaciaires), et le quart restant est constitué par l'eau souterraine profonde. Ainsi, les eaux de surface (sol, cours d'eau, lac) et l'eau atmosphérique ne représentent que 0,02 % de l'eau douce.

La biosphère

Le concept de biosphère réunit l'ensemble des écosystèmes où la vie est possible en permanence. Vladimir Vernadski, un géochimiste russe, est à l'origine de cette notion (1926), et il est également l'un des fondateurs de la biogéochimie (étude des cycles terrestres).

La masse de la biosphère peut paraître insignifiante par rapport aux autres réservoirs (300 fois plus petite que celle de l'atmosphère, 70'000 fois plus petite que celle de l'hydrosphère, 1000 milliards de fois plus petite que celle du monde abiotique), mais c'est grâce à la vie que notre planète est si particulière.

L'arbre, comme la biosphère, se trouve à l'interface entre hydrosphère, lithosphère et atmosphère. Il est au carrefour des différentes interactions et à son importance dans chaque cycle ayant une composante liée à la vie.



Le cycle de l'eau H_2O

SANS PLUIE, PAS D'ARBRES ET VICE VERSA

Depuis plus de 4 milliards d'années, la quantité d'eau sur la Terre n'a pas changé. L'eau change d'état, se combine avec d'autres atomes ou molécules et se déplace entre les différents réservoirs pour former le cycle de l'eau. 72 % de la surface du globe est recouverte d'eau.

La phase initiale est l'évaporation sous forme gazeuse de l'eau des lacs, des mers et des océans, sous l'action du rayonnement solaire. L'air va se refroidir sous l'effet des ascendances, c'est-à-dire du déplacement vers une altitude plus élevée de l'air, qui peut se faire soit thermodynamiquement: l'air plus chaud que son environnement monte, soit mécaniquement: un obstacle, tel une montagne, peut forcer l'air à remonter, c'est l'effet orographique. Ce refroidissement de l'air va provoquer la formation des nuages.

L'eau compte pour 0,5-4 % de la composition de l'atmosphère. L'eau des précipitations, sous forme de pluie, de neige ou de grêle, arrive sur le sol, les lacs, la végétation, l'océan, et peut même s'infiltrer dans le sol pour alimenter des nappes d'eau souterraines, par percolation. Et le cycle continue ainsi indéfiniment.

Le temps de résidence moyen d'une molécule d'eau dans l'atmosphère est de 10 jours, il est de 2 semaines dans les rivières, de 10-100 ans dans les lacs, de 15'000 ans dans les glaciers et jusqu'à des centaines et des millions d'années pour les eaux souterraines. En ce qui concerne les océans, le temps de résidence diffère entre les eaux de surface (100-150 ans) et les eaux profondes (30'000-40'000 ans), mais une moyenne mondiale de 3000 ans est établie.

Les forêts et le cycle de l'eau

Les arbres ont besoin de beaucoup d'eau pour se développer, en particulier pour produire des feuilles. Un chêne peut extraire du sol jusqu'à 200 litres d'eau par jour. Les forêts ont un rôle important dans ce cycle hydrologique à travers les processus d'interception et d'évapotranspiration. L'interception correspond à la partie des précipitations qui est retenue, puis captée par la végétation, et qui n'atteindra donc pas le sol. Au contraire, lors de l'évapotranspiration, la végétation restitue à l'atmosphère une partie de cette eau reçue, sous forme de vapeur d'eau. Cette vapeur d'eau va se condenser et permettre la formation de nuages, qui vont libérer à leur tour des précipitations. L'évapotranspiration permet ainsi de refroidir le climat par l'action à la fois des nuages et des précipitations. L'évapotranspiration est une variable clé du climat, qui relie à la fois le cycle de l'eau (par l'évaporation), le cycle de l'énergie (flux de chaleur latent) et le cycle du carbone (échange transpiration-photosynthèse). L'arbre et ses racines contribuent aussi à filtrer l'eau des sols, enlevant leur pollution et impuretés, mais permettent également de la stocker, telle une éponge.

Influence de l'Homme

Les activités humaines ont grandement modifié la circulation naturelle de l'eau, sa disponibilité et sa qualité. Le tracé des rivières ainsi que leur débit ont été remaniés en profondeur par des barrages ou des endiguements. De nombreux revêtement sur le sol, tel que le béton ou le bitume, sont imperméables et vont alors perturber l'écoulement des eaux de surface en empêchant l'eau de s'infiltrer dans les sols. L'Homme puise également l'eau, importante tant pour les activités industrielles, agricoles que domestiques, à partir de lacs, de rivières ou de nappes souterraines, ce qui mène parfois à l'épuisement de cette ressource au niveau régional.

Avec la déforestation, l'Homme diminue l'évapotranspiration des arbres et change ainsi le climat à l'échelle régionale, par la modification de l'humidité de l'air, des turbulences, de la formation de nuage et de la convection. Cette action se fait ressentir de manière importante dans la forêt tropicale humide. En effet, dans un système naturel, les forêts tropicales maintiennent de haut taux d'évapotranspiration, diminue la température de l'air de surface et augmentent les précipitations, comparés à des

pâturages. Or, en Amazonie, une baisse des précipitations a été mesurée suite à la déforestation massive des arbres, ainsi que la présence d'un climat plus chaud. Ce changement de régime des précipitations va également influencer l'agriculture locale et le débit des rivières.

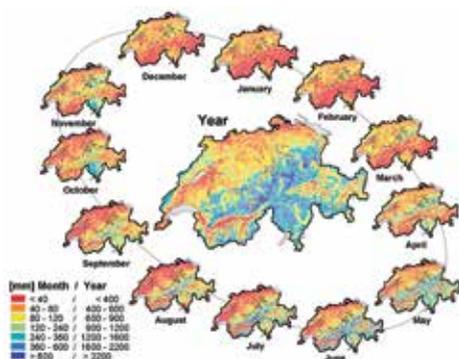
Le réchauffement climatique accélère le cycle hydrologique et provoque une augmentation de la teneur en eau de l'atmosphère. Ceci se traduit par une augmentation des précipitations et de l'évaporation globale.

La Suisse

Les effets du réchauffement sur le cycle hydrologique en Suisse sont particuliers du fait de sa topographie. Elle est/sera plus concernée par la fonte des glaciers, le dégel du pergélisol et la diminution des chutes de neige.

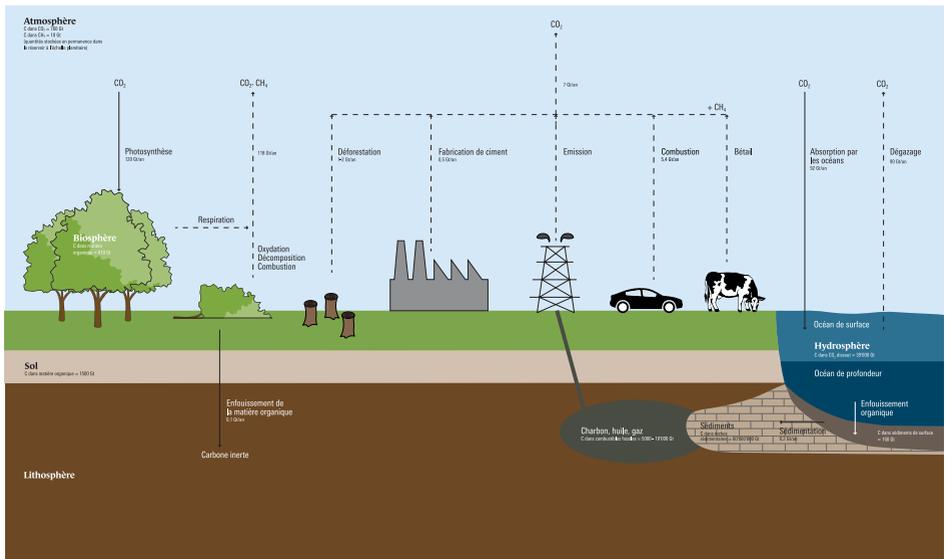
Les forêts suisses, en particulier les forêts de hêtres et d'épicéas, sont menacées par le stress hydrique. L'épicéa est en effet très sensible au manque d'eau, ses racines étant peu profondes. Les épicéas seront donc fragilisés, d'autant plus qu'ils vont subir les attaques des bostryches (coléoptère creusant des galeries sous l'écorce), dont la survie est favorisée par les hautes tem-

pératures. La mortalité des forêts d'épicéa sera importante, et va provoquer en retour la libération de CO₂ dans l'atmosphère. Dans le cas du hêtre, celui-ci régule moins vite sa transpiration, ses stomates restent ouverts plus longtemps, ce qui augmente donc la tension dans les vaisseaux de conduction de l'eau, et les endommage.



© Bilan hydrique de la Suisse, mensuel moyen et annuel moyen, sur la période 1981-2000.

M. Pfundler (2006) Office fédéral de l'environnement.



Le cycle court du carbone C

LES FORÊTS, DES PUIXS DE CO₂ ?

Dans le cosmos, les éléments les plus abondants sont l'hydrogène, l'hélium, l'oxygène et le carbone. Sur Terre, le carbone est seulement le 14^e élément. Cependant, le carbone est l'élément à la base du vivant, il est la charpente des molécules organiques composant les organismes vivants, en association avec d'autres éléments (oxygène, azote, phosphate, hydrogène, etc.). Le cycle du carbone est donc très important pour la biosphère. Le carbone est aussi le constituant majeur du dioxyde de carbone CO₂ et du méthane CH₄, deux gaz à effet de serre. Sans eux, la vie ne serait pas possible sur Terre, à cause d'une température de surface trop froide.

Le plus grand réservoir de carbone est constitué par les roches sédimentaires (50'000'000 Gt de carbone). L'océan est un deuxième grand réservoir, dans lequel le carbone se trouve sous forme de CO₂ dissout dans l'eau (39'000 Gt de carbone). Ainsi, la biosphère et l'atmosphère contiennent en comparaison peu de carbone: 610 Gt dans le premier cas, et 750 Gt dans le deuxième. Cependant, l'influence du carbone de surface est extrêmement importante tant

pour la vie que pour le climat (avec un couplage entre les deux).

Les temps de résidence du carbone dans les différents réservoirs sont extrêmement variables. Il est de 4 ans dans l'atmosphère, de 11 ans dans la biosphère, de 385 ans dans l'hydrosphère de surface (de 0 à 100 m), de plus de 100 milliers d'années dans l'océan profond (plus de 100 m) et de quelques 200 millions d'années dans la lithosphère.

Le cycle global du carbone implique à la fois des processus biologiques, physiques et géologiques. On distingue un cycle biologique, rapide (cycle court), et un cycle géologique, plus lent (cycle long). Le cycle court se boucle sur moins d'un siècle sous nos latitudes. Le processus le plus important pour le recyclage du carbone sur le court terme est le couple photosynthèse-respiration, qui correspond à la conversion du carbone inorganique provenant du CO₂ atmosphérique en carbone organique par la photosynthèse, puis par la conversion du carbone organique contenu dans la matière organique en carbone inorganique par la respiration (voir

partie II pour plus de détails). La matière organique morte se fait ensuite décomposer par l'action de microorganismes, ce qui va libérer du CO_2 en présence d'oxygène et du CH_4 dans les milieux anoxiques, sans oxygène (processus de fermentation). Le méthane est un gaz à effet de serre 20 fois plus efficace que le CO_2 . Son temps de résidence dans l'atmosphère n'est que de 12 ans, mais son oxydation le transforme ensuite en CO_2 (temps de résidence de 100 ans dans l'atmosphère).

Ce sont les processus géologiques qui sont importants pour le cycle long du carbone organique: l'échelle de temps devient alors des milliers et des millions d'années. L'enfouissement des matières organiques dans les sédiments et les roches sédimentaires, leur transformation en combustibles fossiles (charbon, gaz, huile) et leur altération constituent ces processus géologiques. Les réservoirs correspondants sont considérables. Les flux de carbone entre ces réservoirs sont faibles, mais se font sur de longues périodes de temps. Le remplissage du réservoir des roches sédimentaires a connu deux accélérations importantes, liées à la vie: 1) lors de l'explosion de la vie métazoaire il y a quelques 600 Ma (organismes pluricellulaires; Faune d'Ediacara; Protérozoïque), 2) lors de l'explosion des forêts au Carbonifère (environ 360 Ma).

Il y a 360 millions d'années, la végétation apparaît sur les continents. Depuis ce moment, la teneur en CO_2 de l'atmosphère varie. Elle était au départ très élevée et a peu à peu diminué, grâce à la photosynthèse des arbres.

En plus du cycle du carbone organique existe un cycle du carbone inorganique. Ce carbone inorganique se trouve dans les réservoirs de l'atmosphère (CO_2), des océans et des sédiments et roches carbonatées (calcaires CaCO_3 et dolomies $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). L'altération chimique des

roches sédimentaires continentales affleurantes (érosion et dissolution) convertit le CO_2 dissout dans les eaux de pluie en bicarbonates (HCO_3^-), transporté ensuite par ruissellement vers les océans. Une fois dans l'océan, le bicarbonate réagit avec le calcium dissout dans l'eau pour former du calcaire CaCO_3 , qui précipite, et du CO_2 qui retourne vers l'atmosphère. La dissolution des roches calcaires est neutre en termes de bilan, tandis que celle des roches silicatées soustrait du CO_2 de l'atmosphère (pour 2 molécules de CO_2 soutirées, une seule retourne à l'atmosphère). Ce sont les microorganismes planctoniques qui participent le plus à ces réactions dans l'océan, en sécrétant des coquilles en carbonates. Une partie de ce CaCO_3 se dissout dans la colonne d'eau en profondeur (température plus froide qui augmente la solubilité du CO_2) et l'autre partie s'accumule sur les fonds océaniques et peut être enfouie pour former des roches sédimentaires carbonatées. Les mouvements tectoniques ramènent ces roches à la surface (sur des millions d'années), et une partie est retournée sous forme de CO_2 par les volcans (dégazage du manteau).

L'océan est donc aussi un puits de carbone. Cependant, la dissolution du CO_2 dans l'eau de mer est proportionnelle à la concentration du CO_2 dans l'atmosphère, et elle dépend également de la température et du pH de l'eau. Or, l'océan se réchauffe et s'acidifie, diminuant ainsi petit à petit son pouvoir de dissolution du CO_2 .

Les forêts et le carbone

Les forêts stockent près de 45 % du carbone terrestre, ce qui correspond à 296 Gt de carbone. Elles retiennent le carbone dans la biomasse vivante au-dessus et dans le sol, mais aussi dans les matières organiques en décomposition, dans la litière et dans les sols. La circulation naturelle du carbone entre la forêt et l'atmosphère se fait à travers une série de processus, la pho-

tosynthèse, la respiration, la décomposition, ou la combustion, qui permettent aux forêts de recycler le carbone, d'où leur importance dans ce cycle.

Actuellement, les forêts constituent un puits de carbone, car elles absorbent plus de carbone qu'elles n'en rejettent. Elles séquestrent environ 33% du carbone anthropique, le piégeant de manière plus ou moins durable dans la matière organique. Un tel puits de carbone permet de diminuer la quantité du CO₂ atmosphérique et influence donc sur le climat à l'échelle mondiale.

Mais le climat, et les changements dans le cycle de l'eau, influencent également la capacité des forêts à être un puits ou une source de carbone. En effet, des sécheresses particulièrement intenses dans le bassin de l'Amazone (2005, 2010, 2015) ont modifié le puits de carbone à long terme de cette forêt en une source. On remarque donc l'importance des relations entre les cycles, et l'influence de et sur la végétation.

Influence de l'Homme

La teneur en carbone, et de manière plus générale la composition chimique de l'atmosphère, a subi une évolution sans précédent depuis le début de l'ère industrielle (1750). La teneur en CO₂ a oscillé entre 180 et 280 ppm durant les 400'000 dernières années (en fonction des variations climatiques et des glaciations) et n'a guère varié entre 1200 et 1800, année pendant laquelle elle s'élevait à 281 ppm. A partir du milieu du 19^e siècle, on observe une croissance exponentielle: 315 ppm en 1958 et 367 ppm en 2002. La teneur moyenne de l'atmosphère en CO₂ a atteint le seuil symbolique, mais aussi significatif des 400 ppm en 2015. De plus, le taux d'accroissement du CO₂ entre les années 2014 et 2015 était plus élevé qu'entre 2013 et 2014 et que la moyenne des dix années précédentes. En 2017, ce taux a atteint 405,5 ppm. Ainsi, le

taux de CO₂ atmosphérique est 43% plus élevé aujourd'hui qu'à l'époque préindustrielle. De même, le méthane atmosphérique a atteint un pic en 2015, avec 1845 ppm, ce qui correspond à une augmentation de 156% du niveau qu'il avait à l'époque préindustrielle (720 ppm en 1750).

Les activités humaines émettent actuellement 7 milliards de tonnes (Gt) de CO₂ par an: 2,3 Gt restent dans l'atmosphère et augmentent l'effet de serre, mais plus de la moitié serait absorbée par les deux autres réservoirs que sont la biosphère continentale (biomasse et sol) et les océans. D'où l'importance de préserver ces deux réservoirs et leurs propriétés chimiques et physiques. D'autant plus que cette absorption est sensible au climat, ainsi qu'aux concentrations de CO₂ atmosphérique, créant ainsi une boucle de rétroaction.

Les émissions de CO₂ anthropiques sont de 700 Gt en 100 ans, ce qui correspond à la biomasse terrestre existante si celle-ci était entièrement détruite.

Le temps de résidence du carbone dans le réservoir des combustibles fossiles est de l'ordre de 200 Ma. Cependant, l'extraction et l'utilisation par l'Homme du pétrole, du charbon et du gaz modifie ce temps de résidence, et transforme ce cycle long en un cycle court.

Effet de serre

L'effet de serre anthropique est dominé par les émissions de gaz à effet de serre provenant des combustibles et carburants fossiles (49%), par les pollutions industrielles (24%), par la déforestation (14%) et par l'agriculture intensive (13%). Le CO₂ contribue à hauteur de 65% au forçage radiatif induit par les gaz à effet de serre persistants. Le méthane est le deuxième plus important gaz à effet de serre persistant. Il contribue à hauteur d'environ 17% au forçage radiatif. Les rejets de CH₄ d'origine naturelle

(zones humides, termites, etc.) représentent environ 40 %, tandis que les rejets d'origine humaine (élevage de bétail, production de combustibles fossiles, combustion de biomasse, riziculture, etc.) s'élèvent à 60 %. Le N_2O contribue à hauteur de 6 %, et les hydrofluorocarbures de 2 %. L'effet par molécule de ces gaz est plus élevé que celui du CO_2 , mais leur quantité dans l'atmosphère est bien moindre.

Impacts de ces changements sur la forêt

La déforestation et les changements d'utilisation des sols par l'Homme comptent pour 18 % des émissions de CO_2 (1-2 Gt/an). Au cours des 25 dernières années, les stocks de carbone dans les forêts ont diminué de près de 11 Gt, principalement à cause de la conversion des terres (déforestation), mais aussi par la dégradation des forêts. Les forêts ont continué à fonctionner comme un puits net de carbone, avec un retrait de -2,2 Gt de CO_2 par an, entre 2001-2010, et de -2,1 Gt de CO_2 par an, entre 2011 et 2015. Cependant, le puits global net a diminué, car il était entre 1991 et 2001 de -2,99 Gt CO_2 /an. Des calculs montrent que la biosphère terrestre continue à agir comme un puits de carbone jusqu'en 2050 environ, mais se transforme en source par la suite.

On a longtemps pensé que l'augmentation du taux de CO_2 atmosphérique était bénéfique pour la croissance des plantes, avec une productivité améliorée, étant donné que le CO_2 est l'un des facteurs limitants de la photosynthèse. Des études d'enrichissement en CO_2 ont trouvé qu'une augmentation de CO_2 atmosphérique de 50 % permettait une augmentation de la productivité des plantes de 23 %. Mais les consé-

quences à long terme sont encore mal connues, d'autant plus si on prend en considération la disponibilité en azote. Et les réponses diffèrent selon les espèces, avec notamment des allocations de carbone à différents endroits. Certaines espèces vont augmenter leur croissance au-dessus du sol, tandis que d'autres n'auront aucune réponse. De plus, une augmentation des flux de CO_2 depuis le sol ont montré que l'amélioration de l'assimilation du carbone était partiellement contrebalancée par de plus grandes pertes par la respiration. De plus, des récentes études d'enrichissement, mais à large échelle et sur le long terme, montrent qu'il est nécessaire de nuancer ces propos. En effet, les effets fertilisants du CO_2 ne s'expriment que lorsque la disponibilité en azote est suffisante. Le carbone n'est en effet que l'une des ressources nécessaires pour les plantes pour leur croissance, leur reproduction et leur persistance. Et la croissance des plantes dans un environnement naturel n'est pas limitée en premier par le carbone. C'est en effet la disponibilité en azote qui limite la réponse de la plante à un taux de CO_2 élevé.

En plus de cette productivité des plantes qui n'est pas forcément améliorée, l'augmentation du CO_2 atmosphérique diminue la conductance stomatique (l'ouverture des stomates), afin de limiter les concentrations de CO_2 intercellulaire, ce qui réduit l'évapotranspiration et renforce encore le réchauffement.

Albédo

Une des solutions proposées afin de réduire les émissions de CO_2 atmosphérique et donc de limiter le forçage radiatif du changement climatique est d'augmenter la surface forestière pour

piéger le carbone. Mais la forêt va également agir sur le climat par l'intermédiaire d'autres effets, notamment celui de l'albédo, correspondant au pouvoir réfléchissant d'une surface. Une surface noire absorbe toutes les longueurs d'onde et n'en réfléchit aucune, et a donc un albédo de 0. Au contraire, une surface blanche, comme la neige, a un albédo élevé, et réfléchit donc beaucoup le rayonnement solaire et en absorbe moins. Il en résulte un refroidissement de la surface. L'albédo des forêts est généralement plus bas que l'albédo de terrains cultivés. Cela est d'autant plus vrai quand il y a présence de neige, masquée par la forêt, mais visible sur les champs. Cette diminution d'albédo exerce un forçage radiatif positif sur la Terre.

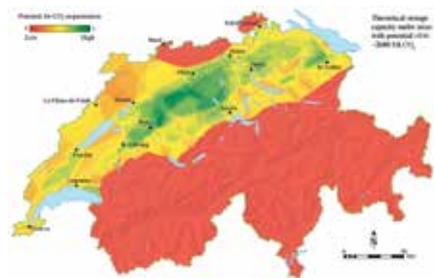
La Suisse

La Suisse émet environ 6 tonnes de CO₂ par personne et par an sur son territoire ou 14 tonnes en comptant les émissions occasionnées à l'étranger par les marchandises importées en Suisse. La Suisse se situe ainsi dans la moyenne mondiale, mais au-dessous du Qatar (40 t/personne/an) et bien au-dessus de l'Inde (2 t/personne/an).

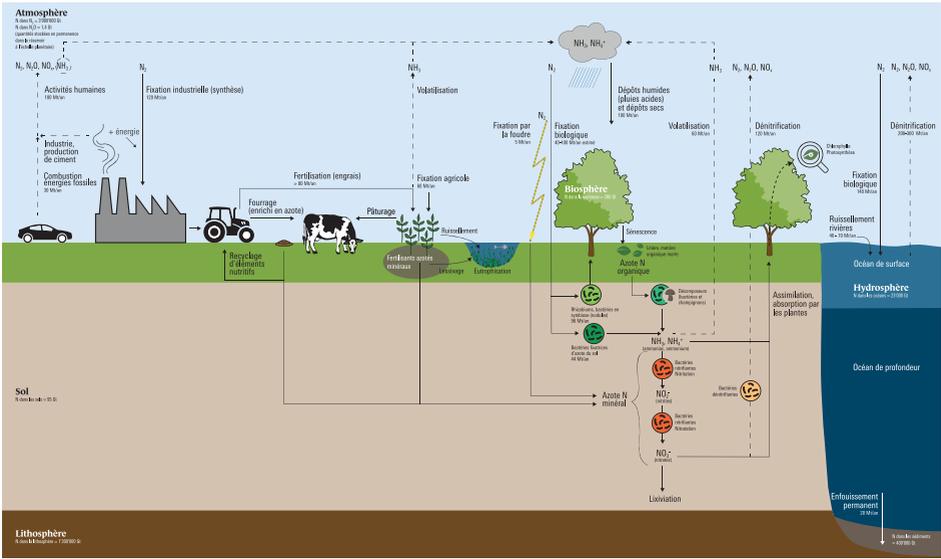
Chaque année en Suisse ce sont 50 millions de tonnes de gaz à effet de serre qui sont émis. 75 % de ces émissions proviennent de l'utilisation de combustibles fossiles (essence, mazout, gaz naturel). Ces émissions de gaz à effet de serre sont également réparties par secteur: 33 % pour la circulation routière, 24 % pour le chauffage des bâtiments, 15 % pour le secteur industriel, 14 % pour l'agriculture, 8 % pour la conversion d'énergie, 4 % pour l'utilisation de gaz fluorés et 2 % pour la gestion des déchets.

En Suisse, depuis 1990, la forêt est un puits de carbone net, avec une exception en 2000 due aux effets de la tempête Lothar. En 2015, ce sont 2500 milliers de tonnes de CO₂ qui sont estimés pour le stockage net (puits net de la forêt et du bois).

Afin d'atténuer le changement climatique, il est nécessaire de réduire les émissions de CO₂ anthropogéniques. Une étude en Suisse porte sur le captage des déchets de CO₂ provenant de sources industrielles et leur injection dans des formations géologiques profondes et poreuses. Ceci permettrait de stocker d'énormes quantités de CO₂ sur des millénaires. La carte représente ce potentiel de stockage géologique de CO₂ en Suisse.



Ⓒ Potentiel de séquestration géologique du CO₂ en Suisse. L.W. Diamond (2010) Office fédéral de l'énergie.



Le cycle de l'azote N

PAS DE PHOTOSYNTÈSE SANS AZOTE

Le cycle de l'azote global est central pour la biogéochimie de la Terre, avec des flux naturels importants d'azote depuis l'atmosphère jusque dans les écosystèmes terrestres et océaniques. Le cycle de l'azote est court, avec des processus majoritairement biologiques. L'azote est un facteur limitant dans de nombreux écosystèmes.

Le diazote N_2 est le principal gaz de l'atmosphère (78%), où il se trouve sous forme d'un gaz peu réactif et très stable, et non assimilable par la végétation et les animaux. L'azote est donc un facteur limitant de beaucoup d'environnements, terrestres et marins. Ainsi, lorsqu'il se trouve en faible concentration, la croissance des plantes est limitée.

Afin de rendre l'azote atmosphérique disponible pour les organismes, différents processus appelés fixation de l'azote se produisent.

Avant l'apparition de la vie sur Terre, la foudre a permis de fixer l'azote de façon inorganique, car elle possède l'énergie nécessaire pour casser les liaisons du diazote, et recombinaison les

atomes avec de l'oxygène en créant de nouvelles molécules contenant de l'azote et assimilable par les plantes. La conversion de N_2 en NH_3 par ce processus était probablement extrêmement lent. Actuellement les orages continuent à fournir une partie de l'azote assimilable, mais seulement à hauteur de 3 Mt/an.

Certaines bactéries vivant dans les sols ont la capacité de réduire le diazote N_2 en ammonium NH_4^+ ou ammoniac (NH_3), afin de produire des substances protéiques, ce qui rend l'azote alors disponible et assimilable par les végétaux et les animaux. On parle de la fixation biologique de l'azote. Ces bactéries responsables de la minéralisation de l'azote ont besoin d'oxygène pour réaliser ce processus. D'autres bactéries, appelés rhizobiums, vivent en symbiose avec le système racinaire de plantes, en particulier les légumineuses (famille des Fabacées; pois, haricots, soja). Elles créent des nodules sur les racines, dans lesquelles se produit une activité symbiotique, avec la plante qui fournit des sucres et

de l'énergie à la bactérie et la plante qui reçoit en retour les acides aminés qui y sont produits. Au niveau mondial, la culture des légumineuses entraîne la fixation d'une quantité d'azote équivalente à 25 % de l'azote des engrais.

Dans les océans, ce sont les cyanobactéries qui fixent l'azote. La fixation biologique du N_2 est le second plus important processus biologique sur Terre, après la photosynthèse.

À la mort des plantes (sénescence) et des autres organismes vivants, l'azote contenu dans leurs tissus retourne à l'environnement sous forme d'ammoniac NH_3 . En présence d'oxygène, des bactéries et des archées vont alors l'oxyder en nitrate, dans une succession d'étapes qui s'appellent la nitrification. Lors de la première étape, l'ammoniac est oxydé en nitrite NO_2^- , c'est la nitritation. Ensuite, lors de la deuxième étape, le nitrite est oxydé en nitrate NO_3^- , c'est la nitratisation. La transformation de l'ammonium en nitrates peut durer de quelques jours à quelques semaines. Les nitrates sont aussi assimilables par les plantes.

Un excès d'eau peut faire migrer le nitrate hors de portées des racines. Il y a donc lixiviation du nitrate en profondeur par l'eau du sol. Une fertilisation ajustée contribue à prévenir le risque de lixiviation.

En présence d'un milieu anaérobie, du fait par exemple de la stagnation de l'eau et du compactage du sol, les bactéries dénitrifiantes vont réduire, lors de leur respiration (respiration anaérobie), les nitrates en azote gazeux N_2 , afin de produire de l'énergie. Elles restituent ainsi une partie de l'azote présent dans les sols à l'atmosphère par ce processus de dénitrification. Le cycle peut alors recommencer.

Les forêts et l'azote

L'azote est le cinquième élément le plus abondant dans notre système solaire. L'azote est, avec le phosphore P, quantitativement et fonctionnellement le plus important nutriment: quantitativement, ces deux éléments sont parmi les 6 éléments majeurs qui constituent la biomasse (C-carbone, H-hydrogène, N-azote, O-oxygène, P-phosphore, S-soufre); fonctionnellement, ils sont fondamentaux pour l'activité métabolique, la croissance et le développement de nombreuses molécules nécessaires à la vie, dont les protéines et les acides nucléiques (ADN et ARN). L'azote est l'un des éléments nécessaires pour la biosynthèse des protéines et des molécules de chlorophylle. La chlorophylle se trouve dans les feuilles de l'arbre, et est le principal pigment permettant la photosynthèse. Elle intercepte l'énergie lumineuse, ce qui va permettre par la suite de la transformer en énergie chimique. Un déficit d'azote assimilable dans les sols va donc affecter directement la production de chlorophylle, ce qui va diminuer le taux de photosynthèse, voire l'empêcher totalement. Sans photosynthèse, l'arbre ne peut plus synthétiser de matière organique.

Influence de l'Homme

Dès le 20^e siècle, l'Homme a fortement perturbé le cycle global de l'azote par le développement de procédés industriels pour la production d'azote assimilable, par la mise en œuvre de nouvelles pratiques agricoles augmentant les rendements des récoltes et par l'utilisation de combustibles fossiles. Mis ensemble, ces sources anthropogéniques ont doublé le taux naturel de fixation de l'azote terrestre, et elles produisent

environ 45 % de l'azote fixé total produit chaque année sur Terre. De plus, les apports anthropogéniques ajoutent autant d'azote aux écosystèmes terrestres que le font toutes les sources naturelles combinées (210 Tg produits par l'activité humaine, 413 Tg de fixation d'azote global).

C'est le procédé Haber-Bosch qui permet de fixer industriellement l'azote par un processus chimique inorganique et complètement anthropique. Il consiste à synthétiser de l'ammoniac NH_3 par l'hydrogénation du diazote gazeux N_2 par le dihydrogène H_2 . Ce procédé demande beaucoup d'énergie. La production d'engrais agricoles est passée de moins de 10 millions de tonnes d'azote en 1950 à 156 millions de tonnes en 1995, et 187 millions de tonnes en 2005. L'utilisation massive de ces engrais contribue à augmenter l'azote atmosphérique. En effet, pour la plupart des cultures, l'azote utilisé par les plantes est de moins de 40%. Cela signifie que la plus grande partie des engrais est lessivé ou perdu dans l'atmosphère par la dénitrification ou la volatilisation, avant d'avoir pu être assimilé par la biomasse végétale.

Cependant, il ne faut pas oublier que sans la disponibilité des engrais azotés produits par ce procédé Haber-Bosch, l'importante augmentation de la production de nourriture depuis le siècle passée, qui a en retour soutenu l'accroissement de la population, n'aurait pas été possible. Il a d'ailleurs été estimé qu'environ la moitié de la population dépendait des engrais azotés pour leur nourriture au début du 21^e siècle.

L'engrais azoté le plus utilisé mondialement est sous forme de NH_4^+ , qui peut être facilement converti par les bactéries en NO_3^- , un composé très mobile. Celui-ci peut donc être lessivé dans les lacs, les rivières, les aquifères, ou accumulé

dans les sols, ce qui provoque une perte d'azote pour les environnements terrestres et conduit à une eutrophisation des eaux et des sols. L'eutrophisation correspond à une augmentation des concentrations d'azote et de phosphore dans un milieu donné, augmentant ainsi la disponibilité en nutriments. Les plantes et les algues vont profiter de cet apport et vont croître de manière excessive et proliférer. Lors de la mort de ces organismes, une grande quantité d'oxygène va être absorbée pour leur décomposition. Privé d'oxygène, le milieu devient anoxique, ce qui mène à l'appauvrissement, puis à la mort de l'écosystème.

De plus, les dépôts azotés contribuent, en plus d'une eutrophisation, à l'acidification des sols et des eaux. Cet effet acidifiant est dû en partie aux processus qui régissent l'absorption et la transformation des composés azotés par la végétation et les microorganismes du sol et en autre partie aux dépôts et pluies acides (apport de protons de l'acide nitrique lors de précipitations). L'acidification des sols favorise le lessivage des cations basiques au profit de protons, le sol perd donc des minéraux précieux.

L'utilisation de combustibles fossiles correspond à des émissions de plus de 20 millions de tonnes d'azote dans l'atmosphère, dont une partie retourne à la surface terrestre ou des océans par l'intermédiaire des dépôts humides ou secs, altérant la structure et la fonction des écosystèmes terrestres et marins. La combustion d'énergies fossiles produit des oxydes d'azote (NO , NO_2) qui sont directement émis dans l'atmosphère.

En plus de l'utilisation de NH_3 pour les engrais, il est également utilisé pour traiter le foin, afin d'améliorer sa teneur en azote et faciliter sa conservation.

Outre la production naturelle de N_2O atmosphérique (60%), il est estimé que 40% du N_2O est d'origine anthropique: engrais azotés, combustion de biomasse et combustibles fossiles, processus industriels. Sa concentration dans l'atmosphère est de 328 ppb en 2015, ce qui correspond à une augmentation de plus de 20% par rapport au niveau préindustriel (270 ppb). Ce gaz à effet de serre est 300 fois plus puissant que le CO_2 . Il contribue à hauteur de 6% au forçage radiatif induit par les gaz à effet de serre persistants. De plus, il réagit avec l'ozone et le détruit dans la stratosphère, menant à la dégradation de la couche d'ozone.

Les changements apportés au cycle de l'azote ont donc des conséquences fortement négatives par le fait de contribuer directement au réchauffement du climat, de réduire la biodiversité à l'échelle régionale et d'atteindre à la santé des hommes du fait de la production d'aérosols et d'ozone.

Impact de l'augmentation de l'azote sur les forêts

La progression des forêts en Europe est due à la déprise agricole mais aussi à l'augmentation de la concentration de CO_2 , à l'augmentation des températures, et à des dépôts élevés d'azote. L'azote stimule la croissance des parties aériennes de la plante, au détriment de l'enracinement en profondeur. En effet, l'augmentation de l'azote dans les sols provoque une acidification qui diminue la vitalité des racines. Les arbres sont alors plus sensibles à la sécheresse, les racines se trouvant principalement dans les couches superficielles du sol, et sont également plus susceptibles d'être renversés par le vent.

La Suisse

En Suisse, la principale source d'émissions d'oxydes d'azote NO_2 est le transport routier (58%), et la principale source pour les émissions d'ammoniac est l'agriculture (93%). Les dépôts azotés sont présents sur tout le territoire suisse. Les dépôts les plus élevés se trouvent sur le Plateau et le sud des Alpes, avec 30 à plus de 40 kg/ha/an d'azote. Le Plateau est la zone d'agriculture par excellence de la Suisse, et le réseau routier y est également important. La Plaine du Pô, en Italie, est une zone industrielle très développée, dont la pollution est transportée par les vents jusqu'au Tessin. On retrouve encore tout de même des régions en montagne avec des dépôts de moins de 3 kg/ha/an, ce qui correspond à des valeurs naturelles. Les conséquences de ces dépôts sont un enrichissement en azote comme fertilisant des pelouses alpines et des forêts. Certaines plantes très compétitrices sont favorisées, ce qui diminue la diversité végétale de ces milieux.



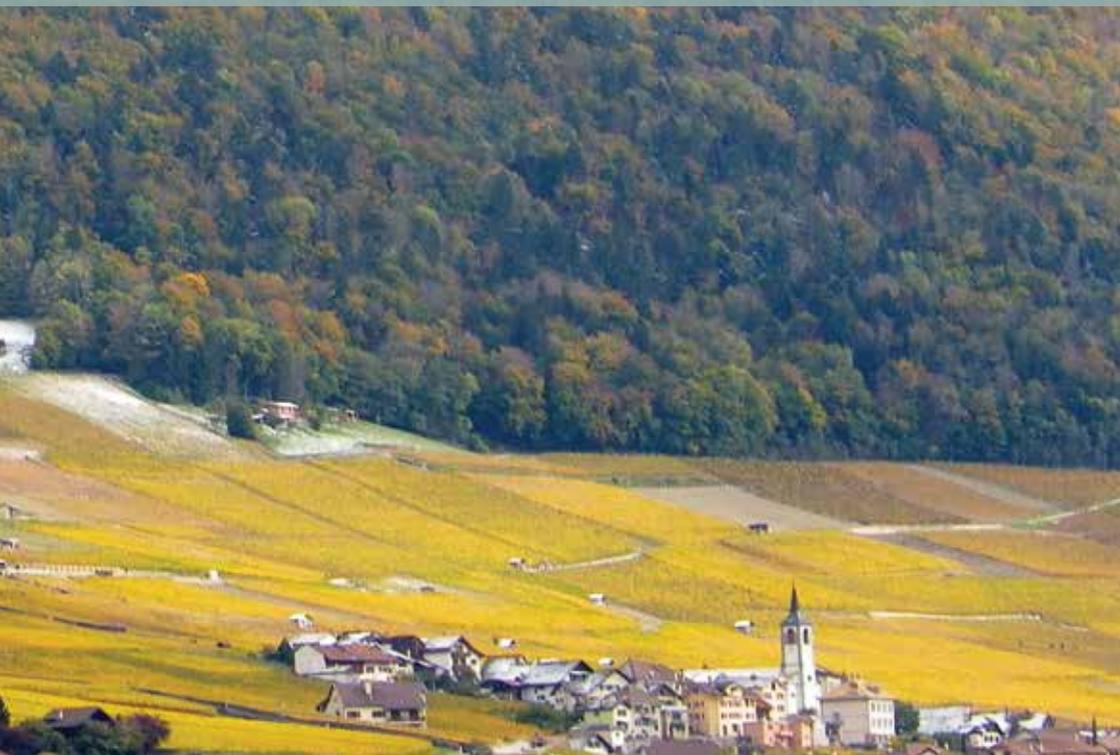
● Modélisation des dépôts azotés.
R. Meier (2015) Office fédéral de l'environnement.

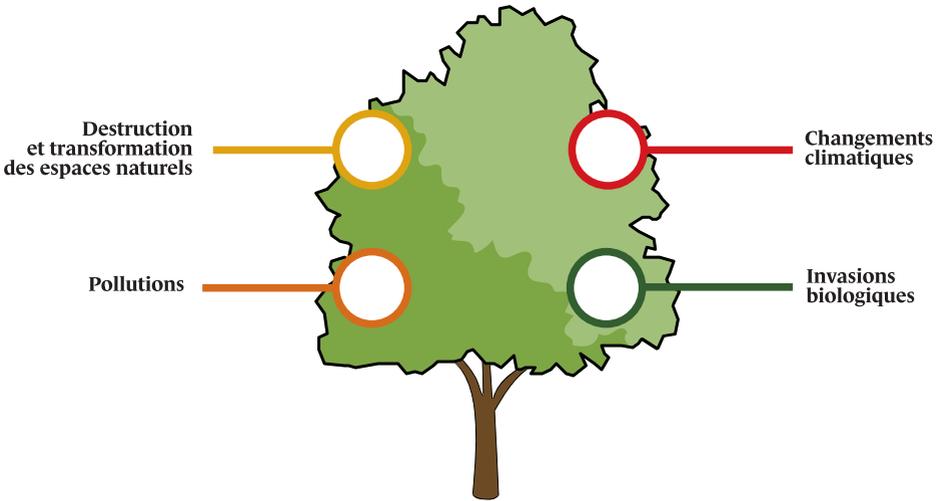




Des arbres et des humains

à l'Anthropocène





L'Anthropocène (du grec *ánthrôpos*, être humain) est une période géologique caractérisée par l'impact global des activités humaines sur la Terre et ses écosystèmes. Sur les devants de la scène actuellement, le réchauffement climatique n'est pourtant qu'un des éléments de ce qu'il est convenu d'appeler «changements globaux», qui se déclinent en une série de composantes. Les plus importantes, jusqu'à présent, sont la destruction et la transformation des espaces naturels par une multitude de facteurs, parmi lesquels la déforestation et la fragmentation des habitats. On estime qu'entre un tiers et la moitié de la surface de la planète a été transformée d'une manière ou d'une autre par l'action humaine.

Les pollutions industrielles et l'utilisation massive d'engrais chimiques pour l'agriculture figurent aussi parmi les composantes dont l'impact est le plus étendu, puisque désormais même les régions polaires sont touchées par les rejets atmosphériques de ces deux secteurs.

Les invasions biologiques sont de plus en plus considérées comme un facteur de destruction et d'homogénéisation de la biodiversité, car elles cassent les barrières biogéographiques qui contiennent les espèces dans leurs enveloppes naturelles de distribution.

Finalement, les dérèglements climatiques constituent peut-être la plus grande menace à venir, avec des effets multiples sur les organismes et un impact en synergie avec les autres composantes des changements globaux: ils modifient les aires de distribution des espèces en les obligeant à migrer pour suivre et retrouver des habitats favorables. Cette migration n'est possible que s'il existe une continuité de milieux propices, ce qui est de plus en plus problématique dans des paysages fragmentés par les multiples usages de l'espace par l'Homme. Les déplacements des espèces en latitude et en altitude ne sont possibles que pour celles qui ont un pouvoir de dispersion performant, ce qui n'est pas le cas de tous les végétaux.



📍 Pâturage d'altitude. Moiry, Valais, 2375 m.

DES ARBRES À LA PLACE DES VACHES?

Le défrichage par l'Homme des forêts aux étages de végétation montagnard et subalpin, au-dessus de 1000 m, débute, dans les Alpes suisses, il y a environ 6600 ans, au Néolithique moyen. Ces premiers paysans de montagne y pratiquent l'estivage, un séjour avec des animaux d'élevage dans des pâturages. Ceux-ci n'existent donc que suite à un déboisement et à un entretien régulier, ayant sélectionné au fil des siècles certaines espèces végétales mieux adaptées à la fauche et à la pâture. Les prairies et pâturages sont souvent d'une grande richesse floristique, avec des espèces présentes uniquement dans ces milieux.

La déprise agricole dans les régions de montagne correspond à l'abandon ou à la diminution de l'activité agricole (culture, pâturage, élevage). Ce phénomène s'est accentué pendant le 20^e siècle, sous l'effet du passage à une agriculture plus intensive en plaine et de l'exode rural. En Suisse, l'arc alpin subit cette déprise,

et plus de 60% des surfaces agricoles qui sont laissées à l'abandon se trouvent dans les zones de pâturage.

L'abandon de ces surfaces conduit à un embroussaillage, suivi d'un reboisement. L'embroussaillage est caractérisé par la colonisation de la lande subalpine, qui correspond aussi à une zone de transition entre les prairies et la forêt. La végétation y est buissonnante et sempervirente. Les zones difficiles d'accès et celles ne se prêtant guère à la pâture ou à la fauche sont les premières touchées.

Dans un deuxième temps, si rien ne vient perturber le reboisement naturel, les arbres reprennent leurs droits. Ainsi, actuellement, en Suisse, l'étendue de la forêt augmente, à la limite supérieure de la forêt, du fait de l'abandon de l'estivage. Cette augmentation est la conséquence de la déprise agricole, mais aussi partiellement du réchauffement climatique. L'expansion de la forêt touche près de 90% des Alpes.

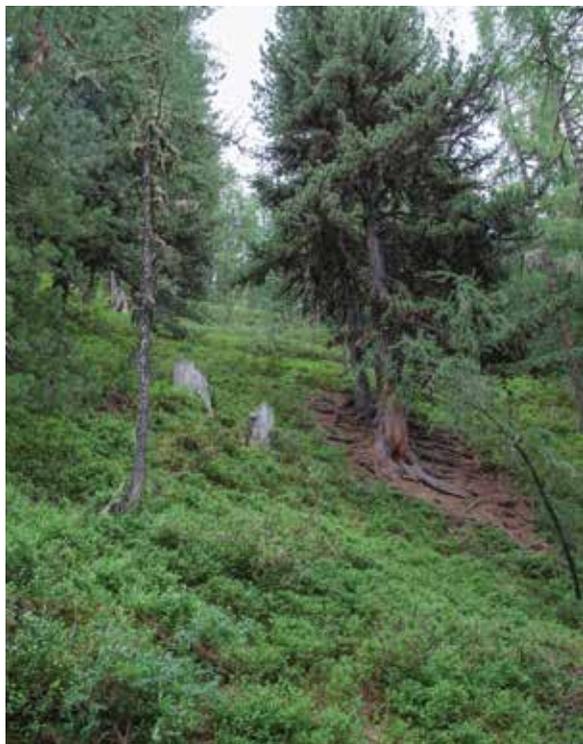


📍 *Lande subalpine à genévriers (Juniperus communis) colonisant le pâturage des Faches. Valais, 2305 m.*

📍 *Forêt subalpine de mélèzes (Larix decidua) et d'arolles (Pinus cembra). Valais, 2140 m. Photos: F. Schwendener.*

Cette évolution des paysages de montagne peut être à la fois positive et négative. Elle est en partie négative, car elle pose un problème majeur quant à la conservation d'espèces typiques, de surfaces à haute valeur écologique et à grande diversité végétale (pâturages), mais également quant à la conservation d'un patrimoine culturel et traditionnel.

Cependant, l'expansion de la forêt a également de nombreux avantages. En effet, la forêt est passée du statut de «forêt d'exploitation» à celui de «forêt de protection». Elle a aujourd'hui le rôle de protéger contre les dangers naturels (éboulements et avalanches). De plus, elle capte une partie du CO₂ et stocke l'eau souterraine.





☉ Palmiers chanvres (*Trachycarpus fortunei*) et lauriers-cerises (*Prunus laurocerasus*) dans une forêt de feuillus du Tessin en hiver.
Photo: M. Conedera, WSL.

INVASION VÉGÉTALE DANS LES FORÊTS DU TESSIN

Les plantes invasives sont des plantes exotiques qui ont été introduites sur un territoire par l'Homme après l'an 1500 et la découverte des Amériques par les Européens. Ce sont des espèces qui se répandent rapidement en l'absence des pathogènes et de la compétition de leur aire d'origine. Elles s'installent dans des écosystèmes naturels, modifient les communautés en place, provoquent la disparition d'espèces indigènes, moins compétitives, et diminuent la diversité régionale. Elles représentent la deuxième menace la plus importante pour la biodiversité, après la modification et la destruction des habitats par l'Homme.

Le nombre de ces espèces exotiques a fortement augmenté pendant les deux derniers siècles, en raison d'une part des actions des hommes (modifications des habitats, échanges commerciaux, agriculture, lutttes biologiques, introductions accidentelles) et d'autre part les changements climatiques.

Le Tessin est particulièrement touché par des plantes introduites devenues rapidement invasives. La combinaison du climat insubrien, des hivers plus doux et plus chauds de ces dernières années et de la diminution du nombre de jours de gel favorise des espèces sempervirentes et thermophiles. Elles sont le profil type des plantes invasives du Tessin: laurier-cerise (*Prunus laurocerasus*), palmier chanvre (*Trachycarpus fortunei*) ou encore camphrier (*Cinnamomum camphora*).

Ces espèces ont pour la plupart été introduites dès le 18^e siècle comme plantes d'ornement dans les jardins et en sont sorties, par l'action tout d'abord des oiseaux qui ont disséminé les graines, puis récemment du réchauffement climatique. Désormais, ces plantes empêchent le rajeunissement de la forêt, par des peuplements denses, par l'effet d'ombrage de leurs feuilles persistantes en hiver et, au printemps, par un fort taux de germination.



● Champignons dans une hêtraie des Préalpes vaudoises. Photo : K. Sidi-Ali.

COMMENT LES ENGRAIS CHIMIQUES FERTILISENT AUSSI LES FORÊTS SUISSES

A l'instar des humains, les arbres sont touchés par les pollutions. Les pollutions atmosphériques par des composés azotés et soufrés sont les plus fréquentes. Près de 95 % des émissions d'ammoniac (NH_3) en Suisse proviennent de l'agriculture, mais d'autres composés sont également issus des processus de combustion de l'industrie. Ces composés peuvent se déplacer sur de vastes étendues, ce qui rend leur contrôle et leur gestion difficile.

Au contact de l'eau, les oxydes d'azote, l'ammonium et le dioxyde de soufre se transforment en acide nitrique et en acide sulfurique, et provoquent alors des pluies acides, qui endommagent la surface des feuilles ou les aiguilles dans la canopée des arbres. L'augmentation de l'acidité dans les sols diminue, par le lessivage, la disponibilité des nutriments pour les arbres, et affaiblit leurs racines.

Les dépôts d'azote atmosphérique entraînent aussi la modification des communautés de champignons. Or ces organismes constituent un maillon essentiel de l'écosystème forestier. En Suisse,

presque toutes les racines des arbres sont mycorhizées par des champignons. Ceux-ci jouent un rôle clé dans la nutrition des arbres en leur fournissant des éléments essentiels tels que le phosphore et l'azote. Lors de pollutions azotées, certaines espèces de champignons sont favorisées et il semblerait qu'elles soient moins efficaces pour la nutrition des arbres.

Sous l'action du rayonnement solaire, les oxydes d'azote et les composés organiques volatils (COV) réagissent ensemble et forment, dans les basses couches de l'atmosphère, de l'ozone troposphérique (O_3). Lorsque les plantes réalisent la photosynthèse, les stomates s'ouvrent pour laisser passer le CO_2 , ce qui va également permettre le passage de l'ozone. Une fois à l'intérieur des arbres, l'ozone va endommager gravement les cellules des feuilles: des taches apparaissent sur les feuilles ou les aiguilles, jaunes chez les conifères, brunes chez les feuillus. Au final, l'ozone va perturber de nombreux processus biochimiques et physiologiques des plantes, y compris la photosynthèse. Le dioxyde de soufre entre également par les stomates et va former un acide au contact de l'eau présente dans les cellules des feuilles.



🍃 Feuilles de viorne lantane (*Viburnum lantana*) présentant des dommages causés par l'ozone. Photo: M. Schaub, WSL

L'effet de ces pollutions sur les arbres peut être rapide, chronique ou caché. Ils se développent alors moins rapidement, sont plus vulnérables aux maladies, aux pathogènes, ainsi qu'aux conditions climatiques plus extrêmes, comme le froid ou la sécheresse. Ces effets ont également un impact sur l'économie et les filières du bois.

LES FORÊTS, UN METS DE CHOIX POUR LES RAVAGEURS ET LES PATHOGÈNES

De nombreux ravageurs et pathogènes présents dans les forêts s'attaquent aux arbres. Les insectes et les champignons en sont respectivement les principaux représentants dans les forêts, mais certaines bactéries peuvent également provoquer des dommages importants. En Suisse, les insectes sont la deuxième cause des dégâts en forêt, après le vent, à hauteur de 25 % d'entre eux.

Le bostryche typographe (*Ips typographus*) est un insecte ravageur qui provoque de graves dégâts dans les forêts suisses, en s'attaquant presque exclusivement aux épicéas (*Picea abies*). Des températures élevées sont favorables au bostryche: elles lui permettent de

se multiplier en nombre et de se développer rapidement, et donc d'infester une grande quantité d'arbres. En même temps, la chaleur et la sécheresse fragilisent les épicéas et leur résistance diminue: ils sont alors plus sujets aux infestations.

En Suisse, ces infestations ont été observées lorsque les températures ont été chaudes en combinaison avec des périodes de sécheresse, comme ce fut le cas lors de l'été 2003. On remarque également une recrudescence du bostryche après des tempêtes, comme celle de Lothar en 1999.

L'infestation affecte également la fonction protectrice des forêts, en particulier en Valais. En effet, dans la région du Val de Bagnes, la forêt ne peut plus remplir entièrement son rôle protecteur. Les arbres infestés y sont laissés sur place, car leur présence est une meilleure sécurité contre les dangers naturels que des pentes nues. En contrepartie, le bostryche peut continuer à se propager.

Ce qui se passe actuellement dans les États du Colorado et du Wyoming aux États-Unis nous permet d'imaginer ce qui pourrait arriver prochainement en Suisse à très grande échelle



📍 Le *bostryche typographe* (*Ips typographus*) est le scolyte le plus redouté en Suisse. Photo : B. Wermelinger, WSL.



📍 *Pins torvus* (*Pinus contorta*) endommagés par le dendroctone du pin ponderosa (*Dendroctonus ponderosae*). Rabbit Ears' Pass, Routt County, Colorado, USA. Photo : W. Cranshaw, Colorado State University, Bugwood.org sous license CC 3.

avec une augmentation des températures et des périodes de sécheresse plus longues et plus intenses. En effet, le dendroctone du pin ponderosa (*Dendroctonus ponderosae*, littéralement le « tueur d'arbre », Pine beetle en anglais), un autre insecte ravageur, a déjà détruit 12'000 km² de forêt au Colorado, soit un quart de la surface de la Suisse. Ce coléoptère a profité des fortes températures et de plusieurs sécheresses consécutives qui ont affaibli les pins. Les arbres morts servent ensuite de combustible pour les feux de forêt, dont l'occurrence et la sévérité augmente en proportion. Les forêts émettent alors du carbone dans l'atmosphère au lieu de le stocker.

Différents champignons pathogènes sévissent en Suisse. *Chalara fraxinea* est responsable de la maladie de la chalarose qui provoque le dépérissement des pousses du frêne (*Fraxinus excelsior*). Ce champignon a étendu sa distribution à toute la Suisse en l'espace de huit ans. Des

simulations ont montré que le réchauffement climatique déplace le frêne et ce champignon vers le nord, mais l'aire de répartition du frêne va augmenter grâce à sa plus grande résistance au réchauffement climatique, alors que celle du champignon, physiologiquement intolérant aux températures élevées, va diminuer. Leurs interactions vont donc se modifier, et à terme, le frêne pourrait être moins touché par la maladie.

Les effets des ravageurs et des pathogènes se combinent avec les dérèglements climatiques. Le réchauffement climatique les influence positivement ou négativement. A long terme, la séquestration du carbone par les forêts et les grands cycles biogéochimiques seront eux aussi touchés par ces interactions et le réchauffement climatique pourrait être amplifié par ces modifications.



📍 Mélèzes (*Larix decidua*), épicéas (*Picea abies*) et arolles (*Pinus cembra*) à l'assaut des sommets. Massif du Mont Blanc. Photo : K. Sidi-Ali.



📍 Débourrement d'un bourgeon d'aiguilles de mélèze (*Larix decidua*). Photos : CREA Mont-Blanc

DÉRÈGLEMENT CLIMATIQUE

Les changements prévus de la température et des précipitations peuvent avoir de graves conséquences économiques. Selon les différentes réalisations de trois scénarios climatiques d'ici à 2100, entre 21 et 60% des terres forestières européennes ne conviendront que pour un type de forêt de chênes méditerranéens à faible rentabilité économique pour les propriétaires forestiers et l'industrie du bois et une séquestration réduite du carbone.

On s'attend à ce que les changements climatiques affectent fortement la distribution des essences dans les forêts. Les changements de gamme sont déjà visibles et la position du pic d'abondance des espèces d'arbres s'est déplacée de 70 m en amont en Europe et en Suisse ces dernières années. En Suisse, une augmentation significative de la couverture forestière a été détectée entre 1650 et 2450 m dans l'écotone entre la forêt et la végétation alpine. Cependant, seuls 4% des changements ont été identifiés comme dépassant la limite climatique potentielle de la forêt, indiquant un effet du réchauffe-

ment climatique. Ainsi, l'abandon des terres est actuellement le principal moteur de la création de nouvelles zones forestières, même au niveau de l'écotone entre forêts et pelouses subalpines.

Il a été montré que, depuis les années 1970, la phénologie des arbres au printemps intervient plus tôt en réponse au réchauffement. Par exemple, la réponse du déploiement des feuilles à la température, c'est à dire le décalage vers des dates plus précoces au printemps, était de -3,4 jours par 1° C de réchauffement entre 1980 et 2013. Cette réponse pourrait aider à atténuer les changements climatiques, car une saison de croissance plus longue augmente la séquestration du carbone. Cela fournirait une rétroaction négative sur les concentrations croissantes de CO₂ dans l'atmosphère en augmentant le puits de carbone terrestre. Cependant, cette tendance des phases phénologiques printanières des essences forestières a ralenti d'environ 40% au cours de la dernière décennie. L'une des hypothèses les plus susceptibles d'expliquer ce ralentissement est le réchauffement des hivers.



Vers un pacte

*entre nature et humains pour lutter
contre les changements globaux ?*





☛ *Danseurs de tango profitant de la protection offerte par la canopée des arbres, Argentine. Photo: K. Sidi-Ali.*

L'Assemblée générale des Nations Unies décide en 2006 de déclarer 2010 Année internationale de la biodiversité. Cette année correspond à la date butoir des objectifs biodiversité fixés en 2002 au Sommet de Johannesburg. Ces objectifs devaient assurer une forte réduction du rythme de perte de biodiversité au niveau mondial, mais ils n'ont pas été atteints, y compris en Suisse, malgré les progrès enregistrés dans les forêts et les zones agricoles: en 2010, 2% des fougères et des plantes à fleurs avaient déjà disparu et 32% étaient menacées.

Cependant, une Stratégie Biodiversité Suisse est élaborée en 2009, puis adoptée par le Conseil fédéral en 2012 afin de coordonner au niveau national le maintien durable de la biodiversité. Le plan d'action qui en découle fournit, pour une première phase de mise en œuvre de 2017 à 2023, un catalogue détaillé de mesures pour la biodiversité en forêt.

L'ONU a ensuite proclamé 2011 *Année internationale des forêts*. Cette initiative reflète combien les forêts sont devenues l'objet de l'attention du monde entier, et pas seulement des pays qui les exploitent ou qui abritent de grandes réserves forestières.

En Suisse, la biodiversité des forêts est dans un bon état comparativement aux autres écosystèmes. Depuis les années 1980, la régénération naturelle des forêts, favorisant les essences

adaptées localement, est en augmentation. Le *Monitoring de la biodiversité en Suisse* montre une évolution stable, voire positive, des espèces fréquentes et répandues et des espèces forestières d'oiseaux.

La forêt suisse se trouve majoritairement dans des phases intermédiaires de son évolution naturelle. Il manque donc actuellement des surfaces forestières en phases pionnières ou tardives car bon nombre d'espèces sont tributaires de forêts claires, d'arbres sénescents ou de bois mort. En outre, certains milieux forestiers ont subi plus que d'autres les effets néfastes des activités humaines. Tel est le cas des forêts alluviales et marécageuses disparues lors des grands travaux d'endiguement des rivières et d'assainissement des plaines marécageuses.

A l'ère de l'Anthropocène, la forêt est une victime collatérale des interactions entre l'Homme et le climat et de la surexploitation des ressources naturelles. Elle est aussi une composante importante dans les stratégies d'atténuation et d'adaptation, ce qui en fait l'objet d'enjeux considérables pour les nations.

Le rôle des forêts à l'échelle du globe est en effet essentiel dans la régulation du climat et des grands cycles biogéochimiques, en particulier le stockage du carbone. À des échelles plus locales, elles participent à l'atténuation des impacts du changement climatique.



Les nouvelles mesures de gestion des forêts doivent donc permettre d'augmenter leur résilience, de fournir des services écosystémiques permettant l'atténuation des impacts des changements globaux et finalement d'utiliser le bois pour des produits durables dans le cadre d'une économie circulaire.

Toutefois, comprendre et réagir à l'impact des changements globaux et aux situations de vulnérabilité qui en découlent, constitue une tâche complexe. Elle nécessite de solides connaissances scientifiques, et des politiques publiques adaptées, en particulier dans le secteur de l'éducation.

POUR NE PLUS FERTILISER LA FORÊT AVEC LES ENGRAIS DE L'AGRICULTURE

Conclue à Genève en 1979, la Convention CEE-ONU sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance (CLRTAP) est entrée en vigueur en 1983. Elle comprend huit protocoles visant à réduire les polluants atmosphériques, tous ratifiés par la Suisse.

Les résultats des suivis scientifiques confirment une tendance générale d'amélioration de l'état des sols forestiers suite à la mise en

œuvre de ces protocoles, en particulier contre les pluies acides. La dégradation de certains sols a diminué, en partie grâce à la réduction des émissions de soufre. Cependant, les phénomènes d'acidification des sols forestiers dus à la pollution atmosphérique peuvent perdurer avec plusieurs années d'inertie: il y a donc toujours localement trop de pollution azotée et l'appauvrissement des sols se poursuit.

📌 Un enfouisseur en action.
Photo: N. Mykura. Licence CC BY SA 2.0.





🕒 Une chercheuse mesure l'accumulation de litière sur une placette du projet LWF au Beatenberg (canton de Berne).
Photos: E. Meiser, WSL.

🕒 Les 6000 placettes d'observation du programme PIC-Forêts sur une grille systématique de 16 x 16 km à travers l'Europe. Ces placettes permettent de mieux comprendre les variations géographiques et temporelles de l'état de la forêt.
Figure: E. Meiser, WSL.

Agir à la source

Lors de l'épandage d'engrais azotés, seule une petite partie de l'azote parvient aux racines des plantes. Le reste est perdu, soit sous forme d'émissions d'azote dans l'air (ammoniac (NH_3) ou d'oxydes d'azote), soit lessivé dans les sols sous forme d'azote minéral. 50 % de l'azote soluble, censé nourrir les plantations, est perdu dans l'atmosphère lors de l'épandage classique à l'aide d'une citerne à pression, par volatilisation directe. C'est cet ammoniac que l'on peut sentir au mois de mars à proximité de terres cultivées. Il contribue à la formation des pluies acides, dévastatrices pour la nature et les sols, également en dehors de la zone d'épandage.

Il existe différentes solutions pour limiter ces émissions d'azote dans l'air. L'une d'elles consiste à utiliser un enfouisseur, une machine agricole, pour épandre les engrais. À la place d'asperger les champs, l'enfouisseur injecte l'azote directement dans la terre et permet ainsi de réduire les rejets d'ammoniac dans l'air de plus de 50 %, et évite également le ruissellement. En plus de diminuer l'impact environnemental, cette technique est plus économique: en limitant les pertes atmosphériques, l'épandage a un meilleur rendement, réduisant ainsi les besoins en engrais.

Le monitoring de l'environnement, essentiel pour évaluer les mesures correctives

Le Programme International Coopératif sur l'évaluation et la surveillance des effets de la pollution atmosphérique sur les forêts (PIC-Forêts) est l'un des réseaux de surveillance des écosystèmes les plus étendus sur la planète. Dans toute l'Europe, chaque pays suit les mêmes procédures à long terme pour collecter et analyser des échantillons, ce qui permet notamment aux scientifiques d'observer les effets de la pollution de l'air sur tout le continent et d'informer les administrations publiques de l'état des forêts. Avec le programme de Recherches à long terme sur les écosystèmes forestiers (LWF), dont les missions sont inscrites dans la loi, la Suisse participe à des programmes de recherche internationaux comme le PIC-Forêts ou le réseau LTER-Europe (Long-Term Ecosystem Research in Europe).



📍 Une serre confinée du laboratoire phytosanitaire du WSL à Birmensdorf. Photo: WSL.

IDENTIFIER ET ANTICIPER LES IMPACTS DES RAVAGEURS ET DES PATHOGÈNES

La *Convention internationale pour la protection des végétaux*, en vigueur en Suisse depuis 1996, engage la Confédération dans une action commune avec les pays signataires contre la diffusion et l'introduction des ennemis des végétaux. Le terme « ennemis » désigne dans cette convention toute forme de vie, végétale ou animale, ainsi que tout agent pathogène, nuisible ou potentiellement nuisible aux végétaux ou aux produits végétaux.

Dans le cadre de cette action, ravageurs et pathogènes, comprenant insectes, bactéries, champignons, virus et nématodes, sont étudiés dans le laboratoire phytosanitaire de l'Institut fédéral de recherche sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), inauguré en 2014. Ces orga-

nismes sont répartis en plusieurs groupes de risques, d'organismes répandus naturellement dans toute la Suisse aux organismes exotiques potentiellement invasifs qui ne sont pas encore présents en Suisse, ou seulement localement. Des exemples dangereux sont le capricorne asiatique, le cynips du châtaignier ou le champignon responsable du flétrissement du frêne.

Les infrastructures du WSL accueillent des diagnostics et une recherche approfondie. Celle-ci permet de développer des méthodes de lutte contre les organismes nuisibles. Sur le terrain, la Protection de la forêt suisse (WSS) est un autre service spécialisé du WSL qui surveille les attaques de ravageurs et de pathogènes.



● *Capricorne asiatique (Anoplophora glabripennis).*
Photo : K T Ramirez. Licence CC BY 3.0.

Le capricorne asiatique (*Anoplophora glabripennis*) est un insecte qualifié de particulièrement dangereux selon l'ordonnance sur la protection des végétaux. Il a été repéré dans le canton de Fribourg en 2011 à Brünisried et en 2014 à Marly, et a pu être éradiqué avec succès après plusieurs années de lutte. Les mesures pour lutter contre cet insecte sont drastiques, avec l'abattage et la destruction des arbres infestés mais également des arbres sains se trouvant dans un rayon de 100 mètres au maximum. De plus, afin d'éviter la propagation, un périmètre de quarantaine est établi autour du foyer d'infestation.

DES CHÈVRES À LA RESCousse DES PÂTURAGES MAIGRES

En Suisse, la déprise agricole provoque le reboisement et la perte des alpages et des pâturages, riches en espèces des régions de montagne. Afin de protéger ces surfaces, un cadre légal a été créé au niveau fédéral. Ainsi, l'*Ordonnance sur la protection des prairies et pâturages secs d'importance*

nationale (OPPS), entrée en vigueur en 2010, a permis en partie d'éviter le reboisement, du fait de l'obligation de contrats d'exploitation. Cette protection est nécessaire, tant pour préserver la biodiversité de ces surfaces que pour garantir la valeur paysagère et patrimoniale des pâturages subalpins et des alpages.

Des initiatives locales ont été également mises en œuvre. Dans plusieurs parcs de Suisse, dont le Parc naturel régional Gruyère Pays-d'Enhaut, un moyen naturel de lutte contre le reboisement des prairies et pâturages a été testé: des troupeaux de chèvres «de service» sont introduits dans les pâturages menacés. Ces chèvres de races rustiques ne sont pas traitées et leur production de viande est marginale, leur rôle principal est un service: en broutant les jeunes pousses d'arbres et de buissons, ou en les écorçant, elles permettent de limiter l'emboisement et le reboisement. L'efficacité de l'abroustissement des chèvres est variable, car elles ne s'attaquent qu'aux jeunes pousses des épineux. Elles sont



📍 Un troupeau de chèvres de service utilisé pour stopper la croissance des buissons sur les zones de prairies et pâturages des Préalpes. Photo : Parc naturel régional Gruyère Pays-d'Enhaut.



📍 Le bois d'œuvre est un bon moyen de piéger du carbone : il reste stocké durant toute la vie de la construction. Photo : K. Sidi-Ali.

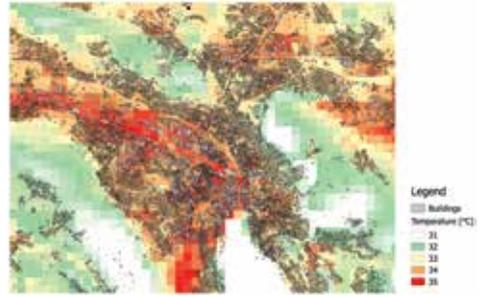
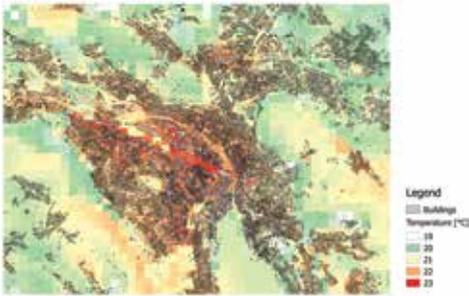
cependant bien utiles pour maintenir ouvertes les parcelles de grande richesse biologique. Elles allègent le travail de lutte par l'homme contre la fermeture de prairies maigres vouées à l'abandon par l'évolution de l'agriculture, et appliquent une pression au sol très faible par rapport à des moyens mécaniques motorisés là où ceux-ci seraient applicables. Alors que dans de nombreuses régions arides ou montagneuses la surpâturation des caprins peut être un facteur de désertification, dans les Alpes les chèvres débroussailluses peuvent être de véritables auxiliaires de la préservation de la biodiversité.

Il est néanmoins nécessaire de préserver la forêt dans les zones de montagne, notamment pour lui permettre d'assurer sa fonction de protection. Il s'agit donc de trouver un équilibre entre la préservation des pâturages et des alpages et l'expansion de la forêt.

DU BOIS À LA PLACE DU CHARBON, DU PÉTROLE ET DU BÉTON

Une gestion responsable des forêts participe à la sauvegarde du climat par le maintien des puits de carbone. Cette gestion passe notamment par l'utilisation durable du bois des arbres.

En effet, l'utilisation du bois comme matière première permet au carbone, stocké dans le bois, d'être séquestré à plus long terme, c'est-à-dire durant toute la vie de la construction. De plus, le bois est une ressource naturelle neutre en termes de CO_2 : l'arbre en consomme autant pour sa croissance que ce qu'il relâche en respirant et lorsqu'il est brûlé. Ainsi, la production de bois de construction relâche moins de gaz carbonique que d'autres matériaux comme le béton, le verre, les briques ou l'acier. La fabrication de ces matériaux requiert en effet une grande quantité d'énergie, émettrice de CO_2 .



📍 *A gauche: Température de l'air simulée à 2 m du sol le 22 juin 2017 à 6h dans la ville de Zürich durant la vague de chaleur du 18 au 22 juin 2017.*

A droite: Température de l'air simulée à 2 m du sol le 22 juin 2017 à 16h. Ces simulations réalisées par le Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche montrent des températures plus chaudes de 4°C dans le centre-ville en comparaison des zones rurales périphériques. Le 21 juin est la journée la plus chaude jamais enregistrée pour un mois de juin en France. L'année 2017 a eu le 2^e mois de juin le plus chaud depuis 1864 derrière 2003.

Source: EMPA : Prof J. Carmeliet, Dr D. Brunner & G. Mussetti.

DES OASIS DANS LA VILLE

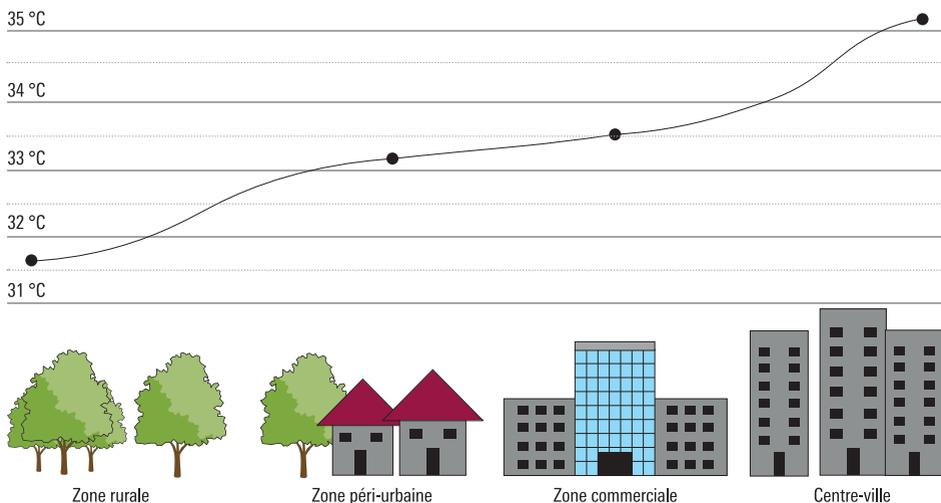
Le bois peut aussi être utilisé comme agent énergétique. Pour ce faire, il est brûlé et dégage de la chaleur, mais aussi du CO₂. C'est à ce niveau que l'utilisation des forêts de manière durable entre en jeu. Si elles sont effectivement exploitées de façon respectueuse, ce CO₂ libéré dans l'atmosphère est réabsorbé par les arbres en croissance dans les forêts de production. La quantité de dioxyde de carbone atmosphérique reste stable, le cycle est bouclé. Par ailleurs, ce bilan de CO₂ peut encore être optimisé par l'utilisation du bois d'abord en tant que matériau de construction, puis en tant qu'agent énergétique. Il s'agit par exemple de déchets de bois ou du vieux bois résultant de la fabrication et de l'utilisation de produits dérivés, à l'exemple des pellets.

Cette gestion des forêts contribuant à la protection du climat profite également à l'économie forestière et à la filière du bois. En effet, c'est la maximisation de la croissance annuelle du bois exploitable qui obtient le meilleur bilan CO₂. Cependant, il faut veiller à ne pas les surexploiter, ce qui engendrait des effets néfastes, comme la réduction des puits de CO₂. Il est aussi important de maintenir une forte diversité biologique, ce qui inclut la richesse des espèces, des milieux et des classes d'âge de chaque espèce d'arbre.

Les îlots de chaleur urbains constituent un phénomène de réchauffement thermique: les villes et leur centre densément construits présentent des températures plus élevées que les zones péri-urbaines et rurales. En effet, les villes occidentales sont construites avec des matériaux de couleurs sombres, qui absorbent, sous forme de chaleur, une plus grande quantité de rayons infrarouges provenant du soleil; leur albédo est par conséquent faible. Ainsi, bâtiments et routes emmagasinent de la chaleur pendant la journée pour la relâcher pendant la nuit. Ce phénomène s'accroît durant les vagues de chaleur dont la fréquence est en augmentation avec les dérèglements climatiques.

Pendant la nuit du 22 juin 2017, une différence de 4 degrés a été mesurée entre la ville de Zürich et les zones rurales environnantes. Ces îlots de chaleur sont des phénomènes communs à beaucoup de villes dans le monde, et le confort ainsi que la santé des résidents de ces villes sont mis en danger. En Suisse et en Europe, durant les puissantes vagues de chaleur des étés 2003 et 2015, le taux de mortalité a drastiquement augmenté.

Courbe des températures en fin d'après-midi de canicule



➊ Plus on se rapproche du centre-ville et des zones à faible albédo, plus la température de l'air augmente lors de vagues de chaleur. F. Schwendener, adapté de EMPA : Prof. J. Carmeliet, Dr D. Brunner & G. Mussetti.

Il existe des mesures qui permettent de réduire la température à l'intérieur des villes. En premier lieu, il est possible d'augmenter l'albédo des surfaces construites, et donc de réfléchir davantage les infrarouges au lieu de les absorber, en favorisant le blanc ou les couleurs claires pour les murs et les bâtiments.

Insérer des points d'eau dans les villes permet l'apparition de microclimats qui diminuent les fluctuations de température et augmentent l'humidité de l'air.

Finalement, la végétalisation des murs et des toits contribue également à réduire la température grâce à la transpiration des plantes, mais permet également d'augmenter le pouvoir isolant de la toiture et l'albédo. Les arbres participent à l'évapo-transpiration, et créent aussi un effet d'ombrage au sol et limitent la réverbération du rayonnement solaire.



➋ Sous l'ombre protectrice d'un platane à Londres durant la sécheresse de 2011. La ville a connu des écarts de +5°C par rapport à la moyenne 1971-2000 durant cette période. Photo : C. Randin.



📍 Forêt de troncs à Deadvlei, Namibie. Leur origine provient d'un changement climatique survenu il y a près de 900 ans.
Photo : K. Sidi-Ali.

Les forêts précèdent les Hommes, les déserts les suivent.

Francois-René de Chateaubriand

Cette phrase terrible, attribuée François-René de Chateaubriand il y a environ 200 ans, doit-elle raisonner comme une prophétie ? Désormais le temps est compté pour conclure un nouveau pacte avec arbres et forêts pour lutter contre les composantes multiples des changements globaux.

Bibliographie choisie

- Asse D, Chuine I, Vitasse Y, Yoccoz NG, Delpierre N, Badeau V, Delestrade A, and Randin CF. 2018. Warmer winters reduce the advance of tree Spring phenology induced by warmer Springs in the Alps. *Agricultural and Forest Meteorology* 252, 220–30.
- Betts RA. 2000. Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo. *Nature* 408, 187.
- Bonan GB. 2008. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science* 320, 1444-1449.
- Fu YH, Zhao H, Piao S, Peaucelle M, Peng S, Zhou G *et al.* 2015. Declining global warming effects on the phenology of spring leaf unfolding. *Nature* 526, 104–107.
- Gehrig-Fasel J, Guisan A & Zimmermann NE. 2007. Treeline shifts in the Swiss Alps: Climate Change or Land Abandonment? *Journal of Vegetation Science* 18, 571-582.
- Gruber N. & Galloway JN. 2008. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. *Nature* 451, 293.
- Kaplan JO, Krummhardt KM & Zimmermann NE. 2009. The prehistoric and preindustrial deforestation of Europe. *Quaternary Science Reviews* 28, 3016-3034.
- OECD. 2009. Integrating Climate Change Adaptation into Development Co-Operation. OECD Publishing: Paris. Accessed online 15/3/19: www.sourceoecd.org/development/9789264054769
- Quisthoudt K, Adams J, Rajkaran A, Dahdouh-Guebas F, Koedam N and Randin CF. 2013. Disentangling the effects of climate and land-use change on the current and future distribution of mangroves in South Africa? *Biodiversity and Conservation*. 22, 1369-1390.
- Rifkin R. 2014. *La nouvelle société du coût marginal zéro: L'internet des objets, l'émergence des communaux collaboratifs et l'éclipse du capitalisme*. Les liens qui libèrent, Paris. 510 p.
- Vitasse Y, Hoch G, Randin CF, Lenz A, Kollas C and Körner C. 2012. Tree recruitment of European tree species at their current upper elevational limits in the Swiss Alps. *Journal of Biogeography*. 39, 1439-1449.
- Walther GR, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C, Beebee TJC, *et al.* 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416, 389–395.

Bibliographie complète sur:

<http://www.botanique.vd.ch/musee-et-jardins-botaniques-cantonaux/>

Crédits et remerciements

RÉALISATION DU CATALOGUE

Textes:

Christophe Randin, Florence Schwendener, Kévin Schaefer, Ludovic Gesset, Matthieu Rufatti, Anne-Marie Rachoud-Schneider et Edouard Di Maio

Avec les contributions de Sylvain Kreuter, d'Isabelle Chuine, Daphné Asse et François Felber

Relecture:

François Felber, Davnah Payne, Eric Verrecchia, Béatrice Valverde et Joëlle Magnin-Gonze

Photographies et illustration:

Christophe Randin Pages 1, 5, 49, 56

Karin Sidi-Ali Pages 46-47, 60-61, 94-95, 106-107, 122-123 & 132-133

Zep Page 31

MISE À DISPOSITION DE PHOTOGRAPHIES

Dr Carine Raemy Tournelle, Musée monétaire cantonal, Lausanne; Dr Robin Marchant, Musée cantonal de géologie, Lausanne; Prof. Michel Chapuisat, Université de Lausanne; Dr Larry Benson, Museum of Natural History, University of Colorado, États-Unis; Zep; Dr Beat Wermelinger & Dr Marco Conedera, WSL; Centre de Recherches sur les Écosystèmes d'Altitude (CREA), Chamonix, France; Parc naturel régional Gruyère Pays-d'Enhaut.

FINANCEMENT

Service des affaires culturelles de l'Etat de Vaud,

Association des Amis des Musée et Jardin botaniques de Lausanne (AMJB)

REMERCIEMENTS PARTICULIERS

Aux enseignants des gymnases cantonaux et leurs élèves qui ont apporté leurs idées et leur créativité dans cet ouvrage.

Dr Larry Benson, Museum of Natural History, University of Colorado, États-Unis; Zep; Prof. Eric Verrecchia & Prof. Michel Chapuisat, Université de Lausanne; Dr Robin Marchant et Dr Antoine Pictet, Musée cantonal de géologie, Lausanne; Dr Carine Raemy Tournelle, Musée monétaire cantonal, Lausanne; Dr Isabelle Chuine et Dr Daphné Asse, CNRS, Montpellier, France; Centre de Recherche sur les Écosystèmes d'Altitude (CREA), Chamonix, France; Prof. Jed Kaplan, University of Hong Kong; Dr Beat Wermelinger & Dr Marco Conedera, WSL; Dr Davnah Payne; Dr Emilie Neveu; Dr Thomas Dirnböck, Umweltbundesamt, Autriche; Dr Karin Sidi-Ali.

La reproduction même partielle des textes et des images est interdite, sauf autorisation écrite de l'éditeur (Musée et Jardins botaniques cantonaux, Lausanne).

Christophe RANDIN, Florence SCHWENDENER, Kévin SCHAEFER,
Ludovic GESSET, Matthieu RUFATTI, Anne-Marie RACHOUD-SCHNEIDER et
Edouard DI MAIO. Avec les contributions de Sylvain KREUTER, Daphné ASSE,
Isabelle CHUINE et François FELBER