



12 000 ANS
D'INTERACTIONS

ENTRE
LE **CLIMAT**

& L'ESPÈCE
HUMAINE

PATRICK MARTY

ellipses

INTRODUCTION

Les changements climatiques sont devenus une préoccupation récurrente des populations du monde entier, car ils sont la cause de nombreuses catastrophes humaines. Nul ne peut ignorer le changement climatique parce que nous le ressentons dans notre quotidien, qu'il s'agisse d'épisodes de canicules, de sécheresses à répétition accompagnées de difficultés d'approvisionnement en eau potable, de mégafeux ou d'inondations catastrophiques. C'est une évidence que tous ces changements accompagnent le réchauffement climatique, avec des disparités régionales qui s'accroissent entre les zones littorales et continentales. Cela ne nous met pas à l'abri d'hivers rigoureux, accompagnés de tempêtes de neige ou de pluies verglaçantes. Les changements ne sont pas linéaires et ces soubresauts sont normaux, tant les circulations atmosphérique et océanique se trouvent perturbées, au point de nous paraître parfois chaotiques. Le climat ne doit pas être confondu avec les prévisions météorologiques à court terme comme on l'entend parfois chez certains politiciens climatosceptiques.

Le climat d'une région se définit à partir de l'ensemble des relevés météorologiques sur une durée d'au moins trente années, selon l'organisation météorologique mondiale¹. Ces relevés concernent les températures moyennes et extrêmes mesurées, les données pluviométriques, la force des vents, l'humidité atmosphérique, l'insolation, etc.

Puisqu'il s'agit d'une moyenne sur une durée de trente ans, il est donc normal que l'on observe d'importantes variations sur la période climatique étudiée avec des phénomènes extrêmes. Le climat d'une région peut se définir au moyen de divers indices climatiques synthétiques

1. L'organisation météorologique mondiale est une institution de l'ONU qui statue sur les normes utilisées pour les prévisions météorologiques et les prévisions climatiques à long terme, prenant en compte l'ensemble des données disponibles et les phénomènes bien connus comme les épisodes « el Niño ».

prenant en compte plusieurs paramètres, comme l'indice de Martone (Ia) calculé à partir de la pluviométrie (P) et de la température moyenne¹, ou encore, dans la zone méditerranéenne, l'indice d'aridité d'Emberger Q2². Ces divers indices traduisent notamment l'antagonisme entre précipitations et températures et permettent d'évaluer l'évolution climatique actuelle vers plus ou moins d'aridité ou d'humidité.

Si l'on observe une différence significative par rapport à la période climatique précédente de référence, on peut conclure à l'existence d'une tendance au changement climatique. Dans l'exemple ci-dessous, extrait d'un travail personnel, l'utilisation du quotient pluviothermique d'Emberger a permis de constater une évolution se manifestant pour le nord du Maroc, par un adoucissement climatique avec une pluviométrie plus forte et une amplitude thermique plus faible.

Le début du vingtième siècle (période de 1925 à 1949) est marqué par un climat plutôt aride pour l'ensemble des stations étudiées, alors que la période climatique suivante (1961-1981) est nettement plus humide. L'évolution constatée fut particulièrement remarquable pour la région de Casablanca qui appartenait initialement (1929-1945) à l'étage semi-aride et évolua vers l'étage subhumide à hiver chaud. La région étudiée est située à une latitude nord comprise entre 33° et 34° et possède un climat méditerranéen marqué par une importante saison sèche, bénéficiant cependant de l'influence océanique qui lui confère des hivers doux et plus humides.

Une telle évolution climatique avait été observée pour les zones de plus haute latitude comprise entre 35° et 71° de latitude nord, alors que la température marquait déjà une tendance évidente au réchauffement¹. Toutefois, on peut souligner l'existence d'importantes variations interannuelles et l'année 1981 fut une année particulièrement sèche pour le Maroc.

1. $Ia = P/(T+10)$.

2. $Q2 = 2000 P/(M^2 - m^2)$ dépend de la pluviométrie (P) et des températures maximales (M) et minimales (m).

1. Société Géologique De France, Les climats anciens, Sciences de la Terre et de l'Univers, sous la direction de Jean-Yves Daniel, éditions Vuibert.

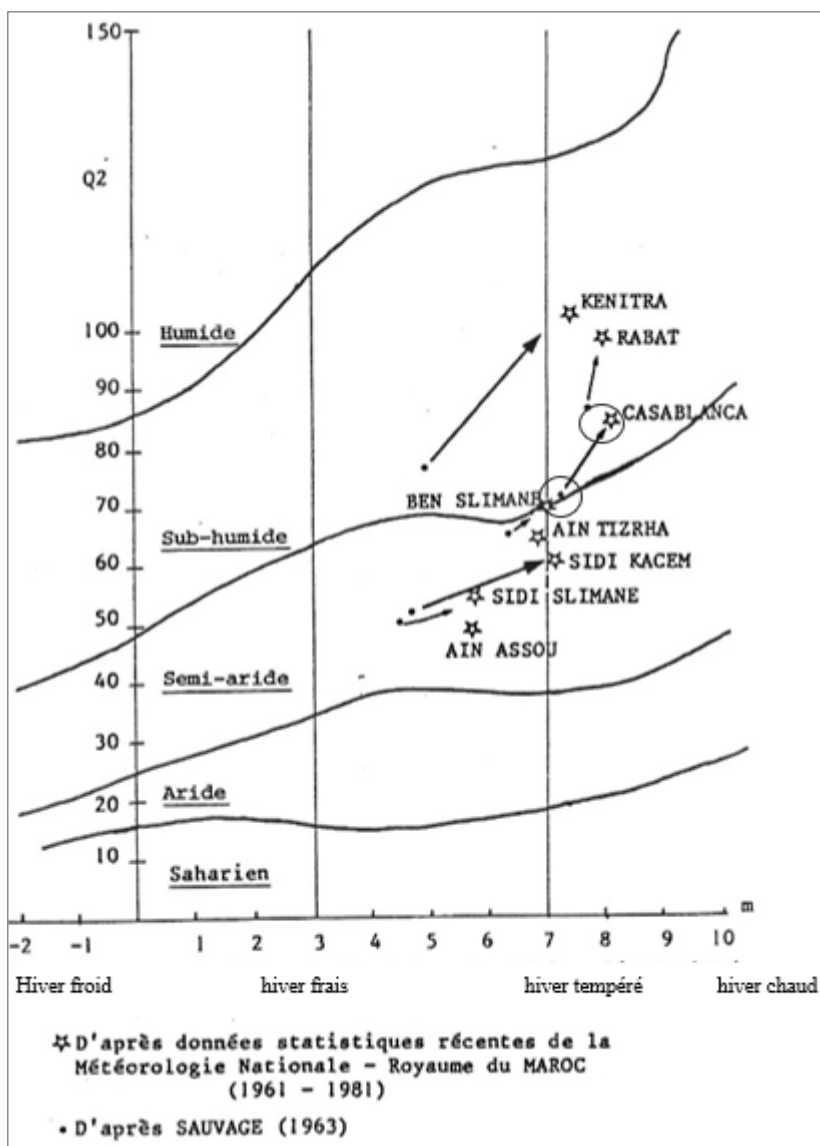
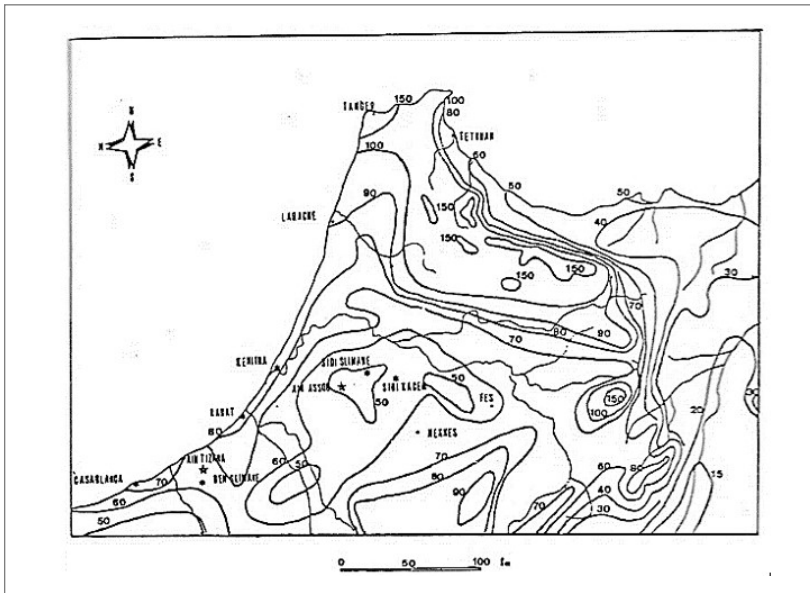


Diagramme pluviothermique (Q2 en fonction des températures minimales en degré Celsius)

Les flèches indiquent les modifications climatiques par rapport aux relevés établis par SAUVAGE (1925-1949). Cf carte des quotients pluviométriques d'Emberger dressée par Sauvage en 1963.



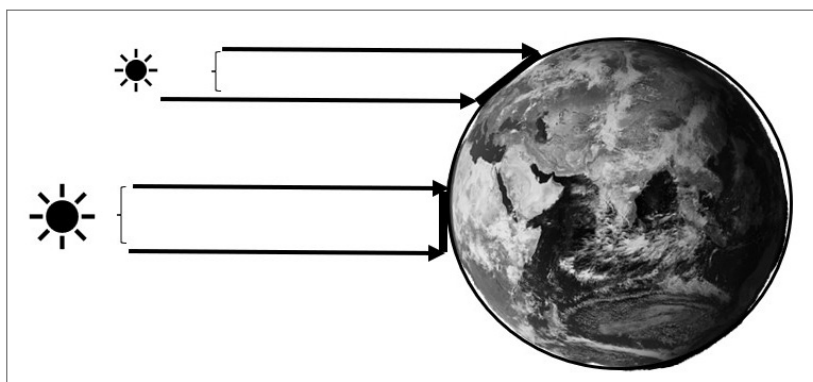
L'évolution climatique récente de cette région montre au contraire une tendance à l'aridité pour la période comprise entre 1976 et 1994, suivie d'une nouvelle période humide à partir de 1995. Les auteurs de cette dernière étude constatent une augmentation significative du nombre d'années humides par rapport au nombre d'années normales jusqu'en 2016¹. Ils concluent également à une tendance au réchauffement climatique concordante avec celles observées pour d'autres régions du globe.

En résumé, le climat est donc susceptible de fluctuations importantes et dépend de la latitude du lieu étudié et de la plus ou moins grande proximité de la mer.

Les différences climatiques latitudinales sont liées à l'obliquité des rayons solaires par rapport à la surface terrestre. Dans les régions polaires, les rayons solaires sont fortement inclinés par rapport à la rotondité de la Terre, si bien que l'énergie apportée est alors dissipée sur une surface très étendue. Dans les régions proches de l'équateur, les rayons solaires se concentrent sur une zone géographique réduite, du fait de leur quasi-verticalité, réchauffent davantage la surface terrestre en proportion de la surface éclairée.

1. Évolution des températures observées et projections futures – région de Casablanca – Settat (Maroc), OUATTAB M, HAMMOUDY W, DAHMAN A, ILMEN R, SALOUI A, HSAINE M, SEBBAR A. Mai 2019.

Cette différence dans la répartition de l'énergie est responsable des mouvements atmosphériques convectifs et contribue aux mécanismes de la circulation océanique. Ces mouvements de convection permettent de redistribuer l'énergie entre les différentes régions du globe et participent à l'équilibre thermique général de notre planète.

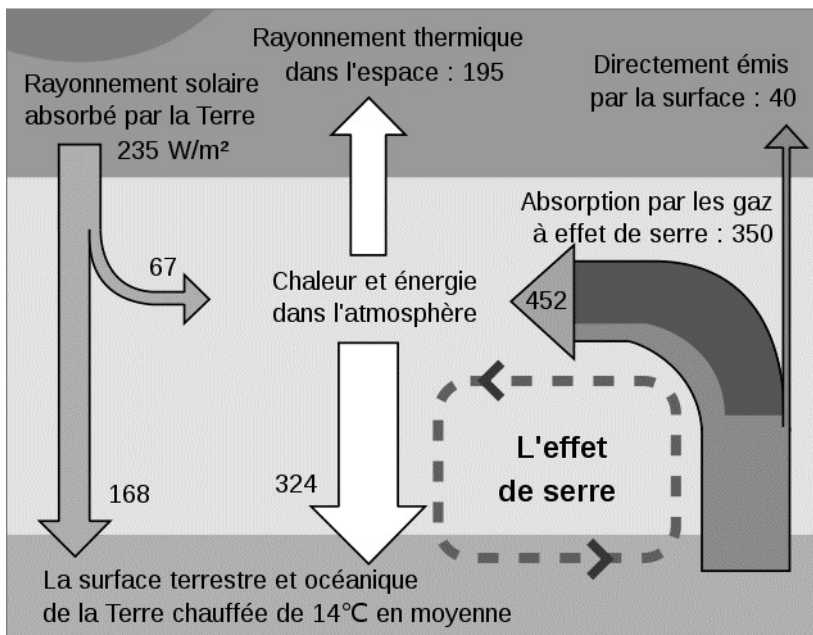


La quantité d'énergie reçue par unité de surface diminue aux hautes latitudes. Elle est maximale quand les rayons solaires arrivent perpendiculairement par rapport à la surface, mais diminue quand la latitude augmente, du fait d'un angle d'incidence des rayons solaires, plus important.

Il faut ajouter à ces considérations le rôle de l'atmosphère qui absorbe une plus ou moins grande quantité de l'énergie reçue. L'épaisseur d'atmosphère traversée varie naturellement avec l'obliquité des rayons solaires. La partie supérieure de notre atmosphère reçoit en moyenne une énergie solaire de 340 W.m^2 , mais celle qui parvient en surface est fortement diminuée du fait de l'absorption par les gaz atmosphériques de 80 W.m^2 et de la réflexion vers l'espace de 100 W.m^2 . La quantité d'énergie solaire parvenant au niveau du sol est seulement de 160 W.m^2 .

Lorsque les rayons solaires traversent une plus grande épaisseur d'atmosphère, davantage de radiations solaires sont absorbées. Cela explique particulièrement la couleur rouge du ciel au coucher ou au lever du Soleil. Les molécules gazeuses de diazote et de dioxygène diffusent préférentiellement les radiations bleues en temps normal ce qui donne sa couleur au ciel. Cependant, lorsque les rayons sont tangentiels par

rapport à la surface terrestre, l'épaisseur d'atmosphère traversée est plus grande et les radiations bleues sont absorbées en grande partie, si bien que ce sont les radiations rouges qui sont principalement diffusées¹.



Bilan énergétique de la surface terrestre

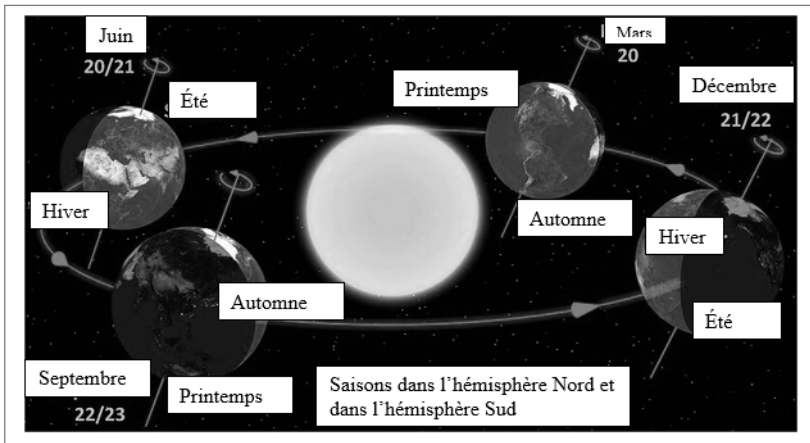
Cette figure est une représentation simplifiée et schématique des flux d'énergie entre l'espace, l'atmosphère et la surface de la Terre, et montre comment ces flux se combinent pour piéger la chaleur près de la surface et créer l'effet de serre. Les échanges d'énergie sont exprimés en watts par mètre carré (W/m^2). Une partie de l'énergie calorifique absorbée par la surface terrestre est réémise vers l'atmosphère mais absorbée par les gaz à effet de serre, contribuant ainsi à réchauffer la surface terrestre et océanique. Remarquez que le bilan thermique de la Terre est équilibré, puisque notre planète émet autant d'énergie vers l'espace qu'elle en reçoit de notre Soleil.

Globalement, le bilan thermique de notre planète est donc équilibré et la Terre reçoit autant d'énergie de notre soleil qu'elle en restitue vers l'espace. Ce bilan thermique peut cependant être modifié au

1. La couleur du ciel dépend principalement de la diffusion préférentielle des radiations de courte longueur d'onde (λ) par les petites molécules gazeuses de l'atmosphère dont la taille est inférieure à λ selon la loi de Rayleigh. Les radiations bleues sont en moyenne six fois plus diffusées que les radiations rouges. Si l'épaisseur de l'atmosphère traversée augmente, les radiations bleues sont extraites au cours de leur traversée de l'atmosphère et la proportion de radiations rouges (grande longueur d'onde) dans la lumière diffusée augmente.

cours des temps géologiques, ce qui peut conduire selon les situations à un réchauffement ou bien à un refroidissement planétaire, comme lors de la dernière glaciation.

Si l'axe de rotation de la Terre était perpendiculaire au plan de révolution de la planète, appelé écliptique, le Soleil culminerait toujours à l'équateur. Mais cet axe étant incliné, par rapport à la normale à l'écliptique, d'un angle qui est actuellement de $23^{\circ} 27'$, il en découle l'existence de saisons différentes. Le jour du solstice d'été (22 juin), le pôle Nord est dirigé vers le Soleil et l'ensoleillement est maximal pour l'hémisphère boréal. La situation est inversée le jour du solstice d'hiver (22 décembre) et ce sont alors les hautes latitudes australes qui reçoivent le plus d'énergie solaire.



Les saisons dans l'hémisphère Nord et Sud

Lorsqu'on travaille sur des périodes géologiques plus longues, il faut également prendre en compte des facteurs astronomiques tels que les variations de l'inclinaison de l'axe terrestre, du plan de l'écliptique ou de la précession des équinoxes.

L'activité solaire varie également fortement au cours du temps. D'autres facteurs d'ordre géologique, tels que l'activité volcanique, les variations de la circulation océanique, la position des continents, doivent être considérés pour reconstituer les paléoclimats des périodes très anciennes.

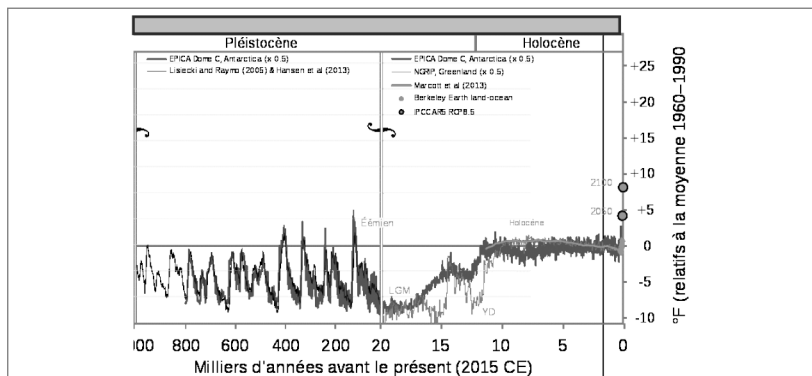
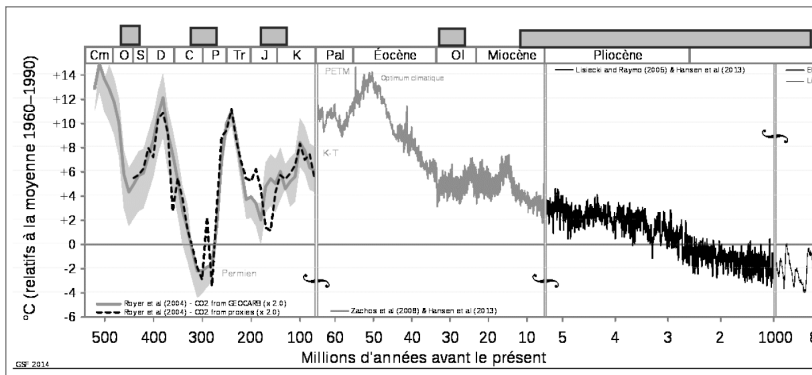
Enfin, les êtres vivants interfèrent également avec le climat en modifiant la teneur en gaz à effet de serre, tels que le gaz carbonique dans l'atmosphère terrestre. La période qui nous intéresse, comprise

entre la fin de la glaciation würmienne et aujourd'hui, est particulièrement sensible aux effets anthropiques liés à une importante croissance démographique de l'humanité.

Cette dernière a modifié les paysages terrestres pour ses différentes activités (agriculture, urbanisation, voies de communication) et s'est livrée plus récemment à une surexploitation des énergies fossiles. La période climatique récente du Quaternaire est donc intéressante de plusieurs points de vue.

Elle est tout d'abord caractérisée par un refroidissement planétaire qui s'est mis en place lentement, tout au long du Cénozoïque, aboutissant à la succession de périodes glaciaires et interglaciaires. Le positionnement de l'Antarctique au niveau du pôle Sud autour de -34 MA^1 (période Oligocène) qui s'est recouvert d'un immense et très épais inlandsis, marque le début de cette période glaciaire. Ce n'est pas, bien entendu, la première fois que notre planète connaît de telles phases de refroidissement, mais la dernière en date est très ancienne et concerne le Paléozoïque entre -354 et -262 MA , lorsque le continent du Gondwana se situait au niveau du pôle Sud. Il n'est pas nécessaire à ce stade de détailler les mécanismes complexes qui contribuent à ce phénomène, mais nous y reviendrons dans le développement.

1. MA : million d'années.



Évolution de la température terrestre en degrés Celsius par rapport à la température moyenne actuelle de la Terre

L'échelle des temps en abscisse est en millions d'années pour les périodes comprises entre le Cambrien et le Pliocène, puis en milliers d'années pour le Pléistocène. L'échelle des temps est modifiée pour chaque secteur de la courbe. Les paléotempératures sont obtenues à partir de différentes méthodes de mesure présentées dans le développement, notamment pour la période Pléistocène et Holocène par l'étude des rapports isotopiques O^{16}/O^{18} dans les glaces de l'Antarctique. Les zones grisées sont des périodes glaciaires.

Depuis deux millions d'années, la Terre a connu sept périodes glaciaires entrecoupées de périodes plus chaudes appelées interglaciaires. Ce refroidissement s'est donc produit lentement du fait des modifications de la disposition des continents, et en particulier du continent Antarctique qui a dérivé progressivement jusqu'à sa position actuelle.

Depuis 400 000 ans, on a dénombré cinq épisodes plus chauds ou interglaciaires, séparés par des périodes plus froides tous les 100 000 ans environ. Nous vivons actuellement le dernier de ces épisodes chauds, nommé Holocène. Ces cycles s'expliquent en partie par des modifications

d'ordre astronomique, de la position de la Terre par rapport au Soleil¹. Milutin Milankovitch fut le premier (1940) à calculer les variations orbitales de la Terre et à proposer une explication globale des variations climatiques et des glaciations.

La planète Terre ne retrouve une même position spatiale qu'au terme d'environ 100 ka². Quand l'insolation diminue, une glaciation commence et inversement pour les périodes interglaciaires.

Les changements climatiques sont accompagnés de variations très nettes de la teneur atmosphérique en CO₂ et en méthane (CH₄) qui sont des gaz à effet de serre bien connus, leur concentration atmosphérique diminuant dans les périodes froides³ et augmentant dans les périodes chaudes. Les variations du taux des gaz à effet de serre semblent globalement entraînées par les cycles glaciaires, plutôt que l'inverse.

Les fluctuations de la teneur en gaz atmosphériques ne feraient que moduler, voire amplifier les variations des températures. Elles peuvent être suivies et mesurées avec précision, notamment en analysant la composition des carottes de glace que l'on peut extraire de l'Antarctique ou du Groenland, celles-ci constituant en quelque sorte une machine à remonter le temps et des archives climatiques très précieuses pour la compréhension du climat actuel.

La dernière glaciation, qualifiée de Würmienne, a débuté il y a 120 000 ans BP⁴ après un épisode interglaciaire connu sous le nom d'Éémien, qui aurait été plus chaud de 2 °C environ que l'épisode actuel Holocène.

La mise en glace fut assez rapide et demanda 8 000 ans, ce qui s'accompagna d'une baisse du niveau marin d'environ 80 m, à une vitesse de 1 cm par an.

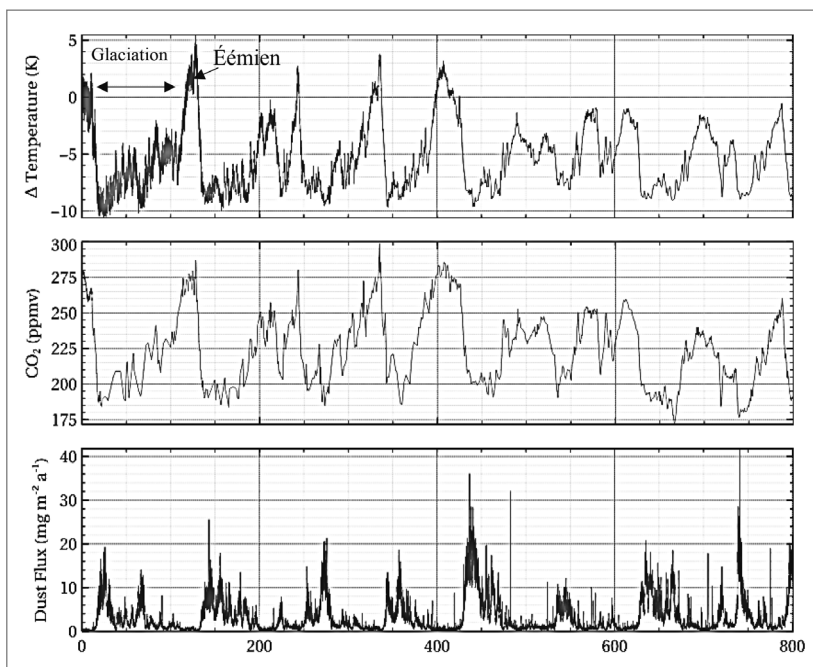
1. Excentricité de l'orbite terrestre, obliquité de l'axe de la Terre et précession des équinoxes combinées font que l'insolation en un point donné de la Terre se modifie lentement. Ces différents points seront abordés dans le développement ; Cf. partie 2, chapitre 2, paragraphe 1.

2. Ka : kiloannée ou mille ans.

3. Le CO₂ se dissout mieux dans les eaux océaniques froides.

4. BP : Before Présent, nombre d'années écoulées par rapport à l'époque actuelle. Par convention la date du « présent » est fixée au 1^{er} janvier 1950 parce qu'elle correspond aux débuts de la datation au carbone 14 qui précède les essais nucléaires perturbant la concentration de carbone 14 dans l'atmosphère. Mais il arrive parfois que l'on se réfère à l'année 2000 pour certaines subdivisions de l'Holocène. Le début du Greenlandien est fixé à 11 700 ans avant 2000, soit 9700 av. J.-C. On utilise parfois l'abréviation Bzk pour éviter une ambiguïté dans les études glaciologiques.

Les conditions climatiques nécessaires pour débiter une ère glaciaire correspondraient à des hivers plus doux et des étés plus frais et pluvieux. Dans cette situation, les précipitations neigeuses sont plus nombreuses en hiver, et la neige accumulée ne fondant pas totalement en été, se sédimenterait sous forme de glace.

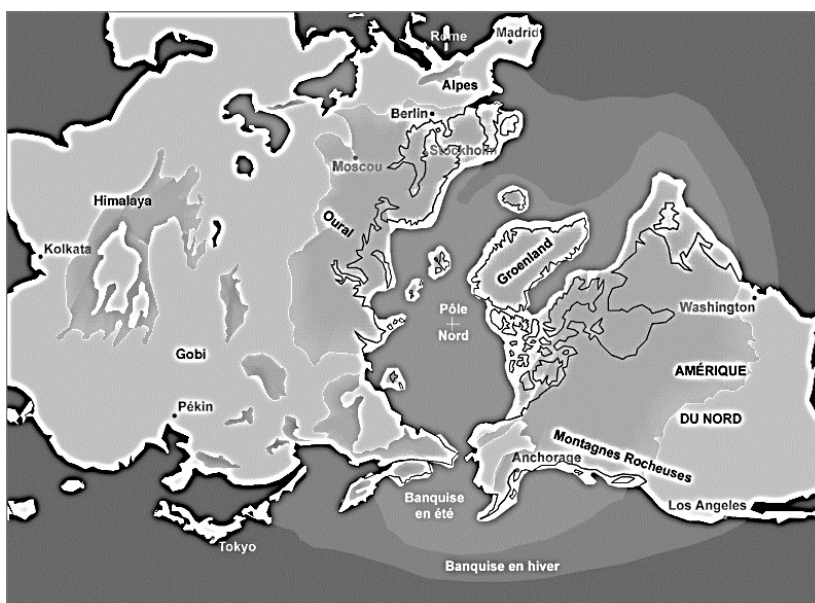


Les variations de température et de concentration du CO_2 des 800 000 dernières années; Température, CO_2 de la carotte de glace EPICA Dôme C

Ainsi, il y a 21 000 ans, deux énormes inlandsis recouvrirent l'hémisphère Nord :

- Le glacier Finno-scandinave qui débordait largement sur les plaines polonaises et russes, le Danemark, l'Angleterre et l'Irlande. Les massifs montagneux (comme les Alpes, les Vosges, le Massif Central et les Pyrénées) étaient aussi recouverts de glaciers.
- Le glacier des Laurentides qui recouvrait l'Amérique du Nord, le Canada et une partie des USA. Son étendue était comparable à celle de l'Antarctique actuellement, et son altitude pouvait atteindre 4 000 mètres contre 2 500 mètres pour l'Europe.

Ne négligeons pas pour autant le glacier de l'Antarctique qui recouvre entièrement ce continent, et dont l'épaisseur actuelle des glaces est en moyenne de 1,6 km, ce qui représente une élévation potentielle de 60 m de la hauteur du niveau marin, si toute cette glace fondait.



La glaciation Würmienne

Détails des zones étudiées autour du cercle polaire arctique. La zone maritime est occupée par une banquise permanente reliant les deux continents. Les glaciers continentaux apparaissent en gris foncé.

Le niveau de la mer était alors au moins 120 mètres en dessous de sa position actuelle, ce qui laisse imaginer à quel point la géographie de l'époque Würmienne était différente de celle de l'époque actuelle. Ainsi, la Manche n'existait pas, le tracé des côtes dans le Golfe du Lion était déplacé de 100 km vers le large et l'entrée de la grotte « Cosquer » qui est aujourd'hui à -47 m sous le niveau de la mer était accessible aux hommes et située en hauteur.

Quand commença la déglaciation, le niveau de la mer remonta. Cette remontée se fit en deux étapes à une vitesse pouvant atteindre 3,7 m par an vers 13 000 ans BP puis 2,5 m par an vers 10 500 BP. L'allure de la courbe de décharge d'eau de fonte glaciaire est atypique et présente deux pics bien marqués lors de ces deux périodes, ce qui signifie que vers 12 000 ans BP, le climat s'est nettement refroidi et le niveau marin a diminué avant de reprendre sa remontée vers 10 500 ans BP¹.

Pourquoi choisir la période interglaciaire actuelle pour situer le cadre de notre réflexion ?

1. C'est cet événement de refroidissement brutal vers 12 000 ans BP qui a duré environ 800 ans, que l'on appelle Dryas récent (Younger Dryas ou YD).

La réponse est simple, la période concernée conjugue un épisode glaciaire dont le déclenchement est lié aux facteurs géologiques et astronomiques, avec la transition du Paléolithique au Néolithique se prolongeant par l'apparition des grandes civilisations. Durant cette période, il ne subsiste plus qu'une seule espèce humaine, *Homo sapiens*, les espèces ou sous espèces *Neandertalensis* et *Denisova* ayant disparu au cours de la dernière période glaciaire.

L'espèce humaine bénéficia de conditions favorables lors de la déglaciation et notamment après l'épisode du Dryas récent. Les premières preuves archéologiques du développement d'une agriculture prédomestique (céréales, légumineuses, lin) sont effectivement datées de 9300 ans av. J.-C. dans des sites aujourd'hui situés en Syrie (Tell Abr, Dja'De) ou en Irak (Choga Gholan). L'espèce *Homo sapiens* n'aura que peu d'influence sur le climat au début de son histoire évolutive. Les conditions climatiques, parfois difficiles auxquelles furent confrontés les premiers sapiens en Afrique, auraient pu conduire cependant à leur extinction il y a 160 000 ans.

Avec la fin de la glaciation wurmienne, les interactions entre humanité et climat furent plus nombreuses et permirent le développement de l'agriculture, puis l'édification de cités et de civilisations complexes.

Dès lors que l'espèce humaine fut en mesure de se sédentariser et de modifier les paysages pour se nourrir (chasse et agriculture), elle devint très sensible aux variations climatiques. En effet, les populations sédentarisées de la période néolithique sont plus étroitement dépendantes pour leur survie de l'agriculture, elle-même très sensible aux variations climatiques.

L'humanité peut agir à son tour sur le climat en modifiant le cycle de l'eau et l'occupation des sols, perturbant parfois de manière négative ou positive, les changements climatiques (sécheresse accentuée, érosion des sols). Les découvertes récentes de l'archéologie démontrent le rôle important du climat dans l'effondrement des civilisations parvenues à leur apogée et cela sur tous les continents.

Aujourd'hui, le changement climatique d'origine anthropique fait consensus, de manière assez paradoxale d'ailleurs, puisque d'un point de vue géologique, notre planète est encore en période glaciaire du fait de l'existence de deux immenses inlandsis recouvrant le continent Antarctique au sud et le Groenland au nord.

Pour bien comprendre comment ont pu fonctionner certaines de ces interactions, nous nous proposons de présenter dans un premier temps les méthodes de reconstitution des paléoclimats, en l'illustrant autant que possible avec des données recueillies durant la période Holocène-Actuel.

Il nous a semblé utile de préciser ensuite certains des mécanismes à l'origine des changements climatiques. Ces mécanismes agissent à diverses échelles de temps, et ceux qui nous intéressent sur la période actuelle, paraissent insignifiants à l'échelle géologique, mais sont néanmoins amplifiés à nos yeux du fait des bouleversements importants pour notre espèce.

Nous aborderons dans la troisième partie quelques exemples de ces événements climatiques et de leurs conséquences sur l'histoire humaine, tantôt positives, tantôt négatives. Nous décrirons également quelques-unes des solutions adoptées par l'humanité pour s'adapter au changement climatique et éventuellement le limiter.

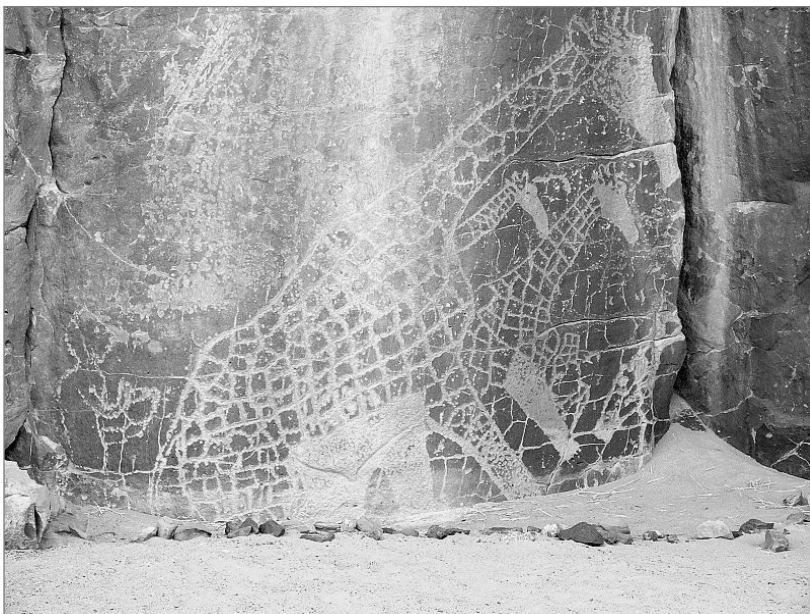
Dans quelle mesure sommes-nous responsables des changements climatiques actuels et de quelle manière pouvons-nous y remédier ?

COMMENT RECONSTITUER LES CLIMATS DU DERNIER MILLION D'ANNÉES ?

Dans le sud de la Libye existe un vaste plateau de grès jaunes, le Tassili n'Ajjer. Sur les parois des gorges qui l'entrecoupent, apparaissent par centaines des gravures et des peintures rupestres qui représentent des animaux et des hommes ; leur âge varie, selon les lieux de 5500 à 4300 BP.

On peut donc en déduire que cette région du Sahara était une savane avec une végétation et une faune abondante, en rapport avec un climat plus humide. Ces pétroglyphes témoignent donc d'un climat différent du climat actuel. Sans le savoir, les chasseurs cueilleurs qui vivaient dans cette région nous ont transmis un témoignage historique précieux permettant de reconstituer les conditions climatiques qui régnaient à l'époque.

Il existe donc, tout un ensemble de documents archéologiques et de textes écrits, pour les périodes les plus récentes, qui sont riches en informations sur les climats anciens.



Gravure rupestre, Tassili n'Ajjer, en Algérie représentant des girafes qui vivent dans un milieu de type savane

La région actuellement désertique présentait donc une végétation abondante avec des arbres dispersés qui constituent la base de l'alimentation des girafes.

LES MÉTHODES DES ARCHÉOLOGUES ET DES HISTORIENS

1. Les informations extraites de l'étude des textes anciens

Des causes climatiques ou écologiques, parfois une dégradation des milieux naturels d'origine anthropique, sont souvent impliquées dans l'extinction de certaines civilisations.

On attribue, au moins partiellement, l'effondrement de l'âge du Bronze récent à des changements climatiques.

Les disparitions de la puissante civilisation des Hittites en Anatolie (Turquie actuelle), de la civilisation mycénienne en Grèce, ainsi que d'autres civilisations de la région du Levant, se sont produites autour de 1177 av.-J.-C.

Éric H. Cline, professeur d'histoire et d'anthropologie de l'Université Georges Washington, dans un ouvrage très bien documenté¹, établit des liens entre différentes sources d'information, prouvant qu'une sécheresse prolongée, a sans doute été une des causes majeures de l'effondrement brutal de ces civilisations orientales, pourtant à l'apogée de leur développement.

Les mécanismes impliqués dans cet effondrement civilisationnel mettent en jeu les invasions des peuples de la mer, des soulèvements sociaux, des sécheresses prolongées accompagnées de disettes, des

1. 1177 avant J.-C. Le jour où la civilisation s'est effondrée.

tremblements de terre. La difficulté, comme l'explique l'auteur, est de démêler cet ensemble de données, afin de reconstituer la cascade d'événements qui a conduit à ce résultat.

L'auteur cite donc de nombreuses sources documentaires, textes écrits sur des tablettes cunéiformes ou autres, qui témoignent de la pénurie de céréales dans la région concernée.

L'Égypte, bien que souvent en conflit avec son rival du nord, commerçait avec l'Empire hittite et les royaumes annexes, les terres fertiles de la vallée du Nil étant alors le grenier à blé de la Méditerranée orientale. Cette situation se reproduira d'ailleurs, 1 200 ans plus tard, alors que l'Empire romain dépendait pour sa survie des exportations égyptiennes de blé.

Une telle famine dans ce royaume est attestée par une lettre écrite par une reine hittite au pharaon Ramsès II au milieu du XIII^e siècle av. J.-C.

«Je n'ai pas de céréales sur mes terres» écrira-t-elle, appelant à l'aide le pharaon Ramsès II pour qu'il lui livre du blé.

Des inscriptions égyptiennes sur les parois des temples, attribuées au temps du pharaon Merneptah, attestent de l'envoi de céréales au Royaume hittite.

«Il a demandé à ce que des céréales soient mises sur des bateaux, pour garder vivante cette terre de Hatti».

D'autres lettres utilisant l'écriture cunéiforme, trouvées à Ougarit, alors sous domination hittite (vers 1350 av. J.-C.), témoignent de l'envoi de céréales dans ce royaume, notamment une cargaison de deux mille unités d'orge, insistant sur le fait que c'est une question de vie ou de mort.

Ces documents historiques très nombreux et associés à des sources différentes (Ougarit, Tyr, Égypte, Royaume hittite) apportent des preuves directes des échanges commerciaux qui existaient entre ces peuples, mais nous informent également sur les troubles consécutifs à l'invasion des peuples de la mer et l'existence de famines.

Comme nous le verrons plus loin, c'est le recoupement de ces informations avec de nombreuses données paléoclimatiques qui permet de conclure à des dérèglements climatiques, affectant le Royaume hittite, mais aussi la région du Levant et l'Égypte elle-même.

La cause de l'effondrement civilisationnel est multifactorielle, les peuples de la mer contribuant à déstabiliser des régions déjà fragilisées par des sécheresses à répétition.

Certains chercheurs croient pouvoir expliquer par de telles sécheresses, les invasions des peuples de la mer, appartenant à différentes ethnies dont l'origine est encore discutée.

Ainsi les textes historiques fournissent des informations de première main pour reconstituer les conditions climatiques qui régnaient lors de tels événements.

D'autres types de documents peuvent être exploités pour évaluer la taille des populations et des surfaces cultivées.

Les géographes Alexander Koch, Chris Brierley, Mark M. Maslin et Simon L. Lewis du « University College of London », au Royaume-Uni ont essayé de recenser la population amérindienne après l'arrivée des premiers colons en Amérique¹ à partir de 120 estimations provenant de 82 études portant sur l'ensemble des territoires du continent américain.

Toutes les données disponibles ont été mises à contribution, les anthropologues et les archéologues estimant l'effectif des populations indigènes en utilisant divers documents comme :

- la taille des armées, le nombre d'hommes adultes,
- les données du recensement et les registres d'hommage,
- le nombre de bâtiments,
- les ratios de dépopulation et les chroniques cléricales historiques, telles que le nombre de baptêmes et le nombre de décès dans une communauté.

Cette vaste étude a permis de démontrer que le petit âge glaciaire qu'a connu le monde du xvi^e siècle au xix^e siècle pourrait être dû, au moins partiellement, à une diminution de l'effet de serre provoquée par l'abandon des terres agricoles par les populations amérindiennes décimées par les épidémies.

Autres documents précieux utilisés par les historiens, divers registres répertoriant les dates des crues du Nil depuis au moins 622 av. J.-C., indiquent le niveau des précipitations aux sources du Nil. Ces documents ont permis notamment de retrouver l'impact de certaines éruptions volcaniques sur le régime des moussons.

D'autres types de registres établissent un lien entre la date des vendanges et les conditions climatiques. En effet, un été ensoleillé est gage de vendanges précoces. Or la date des vendanges, fixée année après année, est répertoriée depuis environ 1 000 ans pour chaque

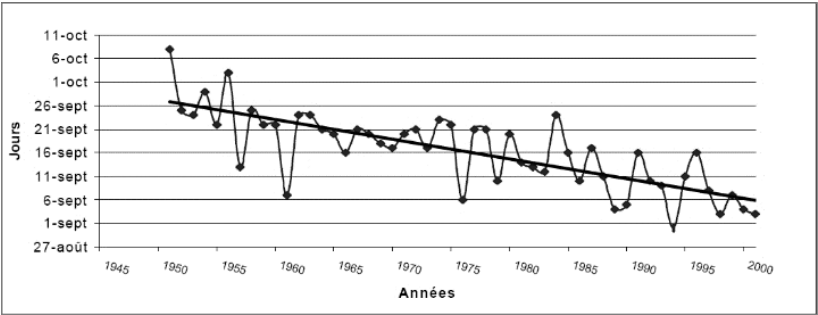
1. Cf. Partie 3, chapitre 3-3b).

région viticole française. Dans un article bien documenté, Valérie Daux¹ s'efforce de démontrer que l'on peut reconstituer les conditions climatiques à partir de telles données, car elles forment des séries de dates observées en continu depuis le Moyen-Âge jusqu'à nos jours.

En particulier, les dates des vendanges en Bourgogne constituent une série composite longue, étalée sur une période de 650 ans (1370-2024). Le développement de la vigne est très dépendant des températures moyennes diurnes, variant selon le type de cépage concerné (température moyenne annuelle comprise entre 10 °C et 20 °C).

Néanmoins, en utilisant des données climatiques récentes concernant les conditions de développement de la vigne, il a été possible d'établir des corrélations linéaires statistiquement significatives entre les températures moyennes diurnes et la date des vendanges, et ainsi d'établir de manière fiable leur chronologie des vendanges.

Le modèle obtenu permet, notamment, de reconstituer la température locale en tenant compte du cépage utilisé, de sa physiologie, et du terroir à 0,72 °C près. Une fois notre courbe étalonnée, il est possible ensuite de déduire la courbe des températures à partir des dates des vendanges connues d'après les anciens registres.



Date du début des vendanges dans la région de Tavel entre 1945 et 2000

La date des vendanges plus précoce en 2000 est à corrélérer avec le réchauffement climatique constaté.

1. La reconstruction climatique à partir des dates de vendanges, Valérie Daux. Dans Revue de la BNF 2010/3 (n° 36), pages 26 à 33.

2. L'étude des cernes des arbres ou dendroclimatologie

Les arbres, dont la croissance accompagne les variations saisonnières sont de précieux auxiliaires pour reconstituer les variations climatiques accompagnant leur développement.

La durée de vie de nombreuses espèces d'arbre peut dépasser le millier d'années. Le record en la matière, est détenu par une espèce de pin californienne, *Pinus longaeva* qui selon diverses estimations peut atteindre les 5 000 ans.

Les premières études de dendrochronologie sont liées aux travaux de l'astronome américain A.E. Douglass qui supposa l'existence d'une corrélation entre les variations de l'épaisseur des cernes des arbres et l'activité solaire à la fin du XIX^e et au début du XX^e siècle. Il fit alors l'hypothèse que l'activité solaire se manifestant par l'apparition des taches solaires, influençait la croissance des arbres.

Comme bien des fois, lors d'études scientifiques comparables, ces travaux sur les bois de villages indiens démontrèrent fortuitement qu'il existait bien des corrélations entre la largeur de certains cernes spécifiques et l'activité solaire, lui permettant d'établir les bases de la datation dendrochronologique (Douglass 1935, 1936).

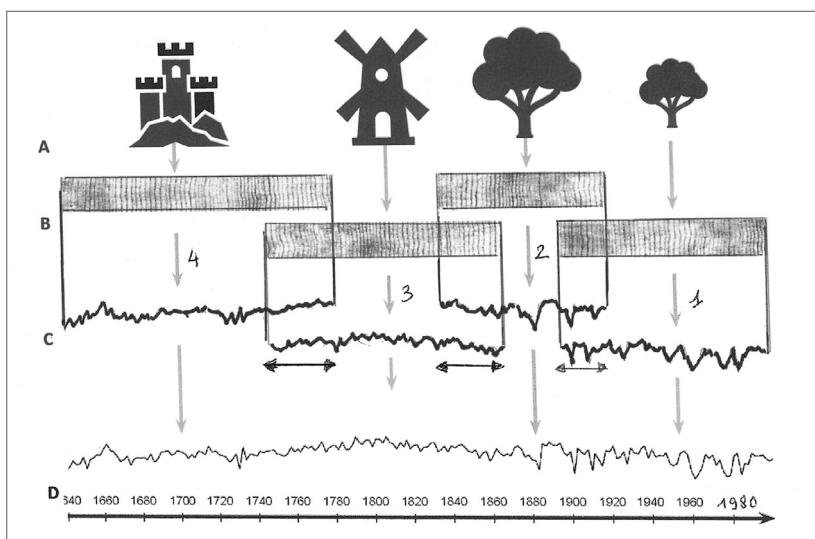
Il n'est cependant pas nécessaire qu'un arbre vive aussi longtemps pour être utilisé pour reconstituer les paléoclimats. Le problème se pose en particulier pour les arbres européens qui vivent tout au plus 300 ou 400 ans et ne couvrent pas d'aussi longues périodes de temps qu'en Amérique. De plus la variété des climats en Europe, nécessite de disposer de références différentes suivant les régions, et bien entendu les essences utilisées.

Ainsi, certains arbres qui ont été utilisés comme bois d'œuvre dans la construction, peuvent échapper parfois à la décomposition ou à la destruction et fournir les informations nécessaires à la reconstitution climatique.

Il fut ainsi possible grâce aux nombreux chantiers de fouille des différentes régions européennes de disposer de bois anciens bien conservés (bois de charpente des cathédrales et autres bâtiments, bois de pilotis utilisés dans les systèmes lacustres suisses, bois de construction fossilisés ou préservés de la décomposition, et parfois même des charbons de bois) pour construire une chronologie absolue précise, essence par essence, région par région.

Pour pouvoir établir ces chronologies, il faut d'abord disposer d'échantillons comprenant au moins 80 cernes et si possible possédant encore le cambium qui permet de situer l'année d'abattage de l'arbre.

L'origine des arbres est parfois connue par les archives historiques, mais on dispose à ce jour de signatures géochimiques bien plus fiables qui permettent d'attester de la même provenance des arbres. En effet, le rapport isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (caractéristique de l'élément strontium) est spécifique du sol et de la géologie régionale. Les arbres qui poussent sur les sols concernés présentent la même signature géochimique, absorbant les deux éléments en conservant le même rapport isotopique.



Établissement d'une chronologie de référence à partir des cernes des arbres

Principe général de la datation croisée. (A) Rechercher des arbres ou du bois vivant dans des endroits tels que les moraines glaciaires, les vieux bâtiments, les aqueducs; (B) le prélèvement d'échantillons sous forme de carottes; (C) mesure de la largeur et datation des anneaux de croissance annuels; et (D) l'établissement d'une chronologie.

POUR ALLER PLUS LOIN

Chaque année, un arbre produit de nouvelles cellules ligneuses et libériennes à partir d'une zone génératrice, appelée cambium, située à la périphérie de son tronc. Le cambium est un méristème, c'est-à-dire une assise génératrice constituée de cellules indifférenciées se multipliant activement pour donner des cellules ligneuses, dont les vaisseaux du bois, vers l'intérieur, et des cellules du liber¹, dont les tubes criblés, vers l'extérieur.

Les anneaux ou cernes formés vers l'intérieur, produisent le bois et en principe il suffit de les compter pour déterminer l'âge d'un arbre.

Un petit prélèvement sous forme de carotte permettra d'accéder aux parties les plus anciennes du tronc, sans blesser l'arbre.

Le bois est formé de cellules appelées vaisseaux, conduisant la sève brute vers le sommet des arbres, ainsi que de cellules fibreuses de soutien et des cellules parenchymateuses formant les rayons ligneux. Les vaisseaux sont des cellules mortes et creuses qui se comportent comme de simples tubes capillaires permettant à la solution aqueuse et saline de s'élever vers la frondaison.

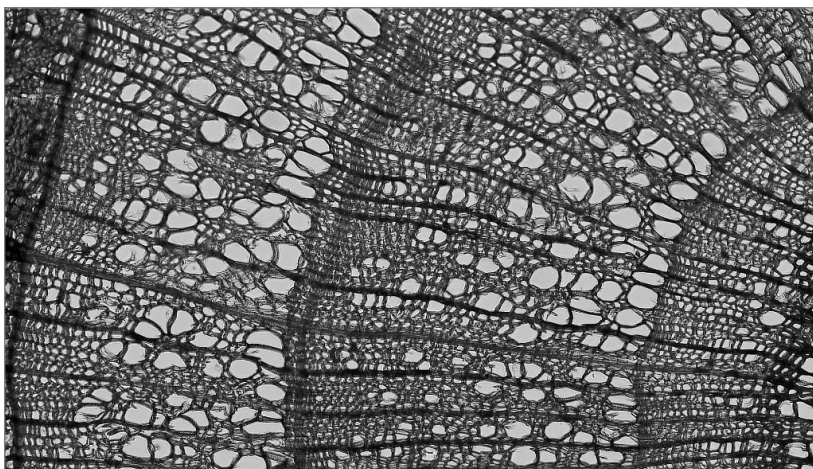
Les vaisseaux produits au printemps sont très larges, et ceux produits plus tardivement durant l'été ou l'automne sont petits.

Cela permet de repérer facilement les limites du cerne, du fait de minimes changements de teinte du bois. Certains vaisseaux du bois sont assez gros pour être visibles à l'œil nu sur du bois poli.

L'épaisseur des cernes est fonction de l'activité du méristème qui elle-même dépend du climat. L'augmentation de la température par exemple, a un effet direct sur le métabolisme cellulaire et stimule les divisions cellulaires et la croissance des cellules du bois. La pluviométrie a également un effet favorable sur la croissance des cernes, et bien entendu la disponibilité de l'eau dans le sol est aussi très importante. La croissance des arbres est donc multifactorielle et peut être perturbée par toutes sortes d'événements climatiques, mais aussi biologiques, tel que l'attaque d'organismes pathogènes ou d'insectes phytophages ou xylophages.

Toutefois les courbes des températures et de l'épaisseur des cernes ne sont pas toujours corrélées, notamment dans des zones d'extrême climatique (taïga, en zone arctique). Dans les conditions modernes de réchauffement climatique (entre 1960 et nos jours), l'analyse des cernes des arbres de la Taïga ne montre pas l'augmentation attendue de largeur. D'autres facteurs, deviennent prédominants, notamment du fait du stress hydrique qui peut survenir, si la pluviométrie et l'humidité des sols n'augmentent pas à la même vitesse que la température.

1. Les cellules du liber situés à la périphérie et protégées par le liège, sont appelées tubes criblés. Elles conduisent la sève élaborée des feuilles vers tout le reste de la plante, c'est-à-dire une solution sucrée riche en nutriments.



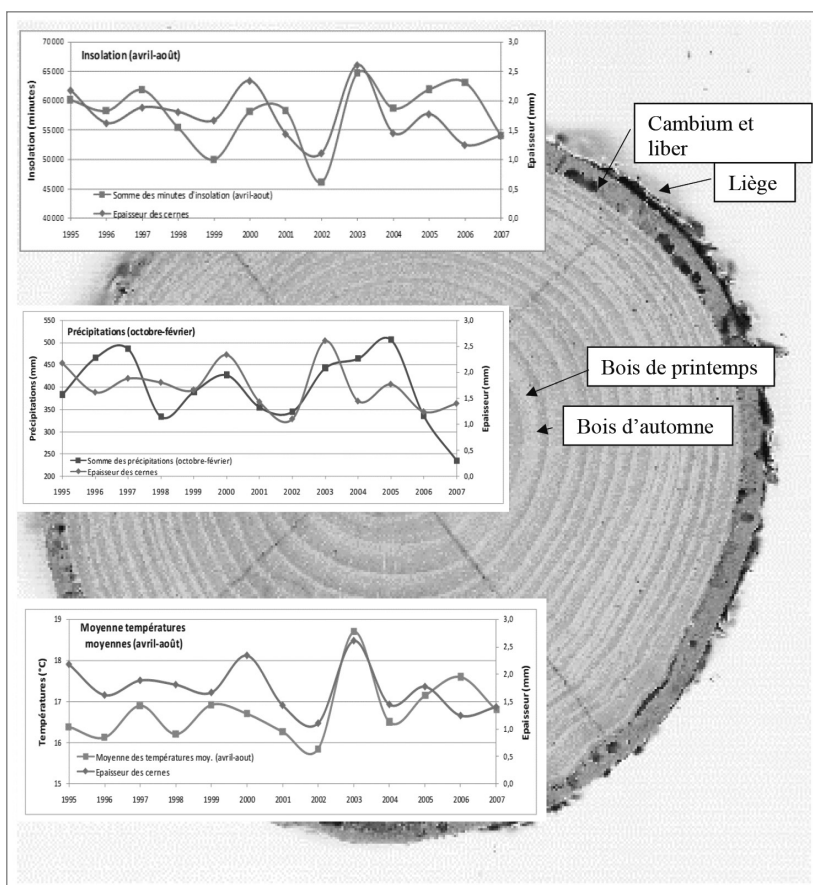
Coupe transversale de Tilleul de trois ans Grossissement : 40x

On observe trois cernes annuels de bois (xylème secondaire) espacés de rayons médullaires. Les gros vaisseaux sont vers l'intérieur et constituent le bois de printemps, alors que le bois d'automne produit en dernier est constitué de vaisseaux de petit calibre.

Le document ci-dessous reproduit quelques courbes de croissance obtenues par un groupe d'étudiants et corrélées à divers paramètres climatiques connus (données météo France). Les mesures sont effectuées sur quatre frênes vivant dans la même zone géographique et selon quatre directions radiales. Il est facile de constater une assez bonne correspondance avec la courbe des températures moyennes.

Les corrélations avec la pluviométrie sont moins évidentes, car elles dépendent de la répartition des précipitations et de la disponibilité de l'eau du sol.

Ce repérage de l'épaisseur des cernes est essentiel pour établir avec précision la période de croissance de l'arbre. Il suffit de disposer d'une loupe binoculaire et d'un ordinateur pour mesurer la largeur des cernes. Les mesures réalisées en grand nombre permettent de se livrer à une étude des corrélations avec les données climatiques.



Frênes communs (*Fraxinus excelsior*) coupés en février 2008, parcelles situées près de Rimont dans le département de l'Ariège (09) à une altitude de 500 m

L'étude de 4 sections d'arbres différents selon plusieurs trajets visualisés par un tracé au crayon. Les courbes ci-dessous, représentent les moyennes sur 16 mesures de l'épaisseur des cernes de 1995 à 2007. L'écart type, non représenté ici, donne un pourcentage d'erreur de 3,7%. On constatera une très bonne corrélation avec les données climatiques concernant l'insolation pour cette espèce héliophile et les températures moyennes.

Pour chaque région étudiée, il a été possible d'établir une échelle chronologique complète s'étendant sur de très longues périodes de temps (millier d'années ou plus) pour chaque espèce végétale. Elle servira de séquence étalon de la croissance des arbres, le chêne étant particulièrement bien documenté. En pratique, il suffira de disposer d'un échantillon de bois représentant une séquence climatique de 80 ans

au minimum pour le comparer à cet étalon chronologique. Quand les séquences visualisées par les courbes de croissance des cernes sont bien corrélées¹, on peut les caler dans le temps à l'année près.

Si la méthode paraît fastidieuse à première vue, et elle l'était très certainement avant l'avènement de l'informatique, on peut aujourd'hui en utilisant des logiciels adaptés obtenir des résultats assez rapidement.

Couramment utilisée par les archéologues, la dendroclimatologie a permis d'apporter de nouveaux éléments pour comprendre la disparition brutale de la civilisation hittite, concurrente de la civilisation égyptienne en 1200 av. J.-C.

Comme indiqué par l'historien Éric H. Cline, directeur du Capitool Archeological Institute à Washington², plusieurs empires importants du Proche-Orient et de la région de la Méditerranée orientale s'effondrent simultanément lors de cette période. Cet événement majeur, désigné par le terme moderne « d'effondrement de l'âge du Bronze » est marqué par la destruction de grandes cités, l'interruption des relations commerciales entre les principales civilisations contemporaines, la disparition de systèmes d'écriture tombés dans l'oubli, et une mortalité à un niveau exceptionnellement élevé et jamais connu auparavant.

Après avoir émis l'hypothèse de pandémies pour expliquer ce phénomène global en Méditerranée orientale, des découvertes nouvelles concernant l'Empire hittite rebâtirent les cartes (Nature le 8 février 2023).

Le vaste Empire hittite était localisé dans la région semi-aride du centre de l'Anatolie, s'étendant sur la Turquie actuelle et certaines parties de la Syrie et de l'Irak modernes. Durant cinq siècles, entre 1650 et 1200 av. J.-C., cet empire a été l'un des plus puissants du monde, comme le démontrent les nombreux vestiges archéologiques retrouvés notamment dans la capitale « Hattusa », et les textes écrits en langage cunéiforme (Akkadien).

Il rivalisait même avec l'Égypte antique (Nouvel Empire) conduisant à l'une des plus grandes batailles de l'histoire entre le roi Muwatalli II et le pharaon Ramsès II, la bataille de Qadesh, dans le sud de l'actuelle Syrie (environ 1274 av. J.-C.).

Pour quelles raisons, cet empire alors à son apogée, s'est-il effondré, de même que des royaumes voisins en Grèce, en Crète et au Moyen-Orient ?

1. La comparaison s'appuie sur des méthodes statistiques. On calcule les coefficients de corrélation linéaire pour chaque possibilité et on choisit la valeur la plus élevée.

2. 1177 avant J.-C., le jour où la civilisation s'est effondrée, éd. La découverte, 2015-2016.

L'hypothèse d'une attaque par les «Peuples de la Mer», originaires d'ethnies diverses, a souvent été évoquée. Cependant les Hittites ont su traverser diverses crises presque aussi importantes et surmonter ce type de difficultés à plusieurs reprises.

L'étude de 2023 a permis de recueillir de nouvelles informations, notamment grâce à des relevés dendrochronologiques. Une structure en bois de genévrier, provenant de la probable chambre funéraire d'un parent du roi de Phrygie, Midas, a été découverte au sud-ouest d'Ankara.

Grâce aux méthodes de datation de la dendrochronologie, il est établi que les genévriers utilisés, poussaient dans la région et que la date de leur abattage et donc de la construction du tombeau, se situe aux alentours de 748 av. J.-C.

Or ces arbres offrent un enregistrement du climat de la période qui nous intéresse, ce qui implique qu'ils avaient plus de 500 ans. Cela n'a rien de surprenant au premier abord puisque des bois de genévrier retrouvés dans le sud de la France dans le département de l'Ardèche, au pied de la falaise du Manteau Royal, montrent une chronologie s'étendant sur près de 1500 ans.

En examinant de manière plus détaillée leurs cernes, on peut constater que dans la période concernée, ceux-ci étaient plus resserrés, ce que l'on peut attribuer à de mauvaises conditions climatiques correspondant à une période de sécheresse particulièrement longue.

L'analyse des rapports isotopiques concernant l'élément carbone, desdits anneaux, montre la réponse du végétal à la disponibilité en eau. Les chercheurs ont ainsi mis en évidence, du XIII^e siècle au XII^e siècle av. J.-C., une transition progressive vers de l'aridité.

Les Hittites auraient été confrontés à trois années consécutives de grave sécheresse, en 1198, 1197 et 1196 avant notre ère, correspondant avec la période de dissolution administrative de l'Empire. Brita Lorentzen, co-auteure de l'étude et professeure d'anthropologie à l'Université de Géorgie (États-Unis) formule l'hypothèse en ces termes :

«Les gens avaient très probablement des magasins d'alimentation qui leur permettraient de traverser une seule année de sécheresse. Mais lorsqu'ils ont été frappés pendant trois années consécutives, il n'y avait plus assez de nourriture pour les sustenter».

Les vestiges archéologiques montrent que cette période fut marquée par des incendies et un abandon de la cité de Hattusa. Il est donc vraisemblable que dans ce contexte particulier de sécheresse prolongée et