

LE CLIMAT ET SES VARIATIONS

Par Aimé Bocquet et André Ferhi

La flore et les graines déterminées par les botanistes témoignent d'un climat voisin du nôtre, dans ses grandes lignes, à l'époque d'occupation des rives du lac de Paladru au Néolithique, ce qui concorde avec toutes les études paléoclimatiques des Alpes du Nord mais ne sont valables que pour une vaste région.

Quelques éléments nous permettent pourtant d'apporter des précisions, en particulier pour connaître la cause de la baisse du niveau du lac dont les hommes ont profité pour s'installer sur la rive.

Le bois a enregistré le climat de la fin du Néolithique, à Charavines

Pourquoi les hommes se sont, deux fois en un siècle, installés au bord du lac. La fouille a montré qu'ils avaient profité d'une forte baisse du niveau des eaux pour construire sur le sol de craie lacustre en permanence exondé depuis quelques décennies car pas encore végétalisé ; d'où une question, pourquoi ce phénomène ?

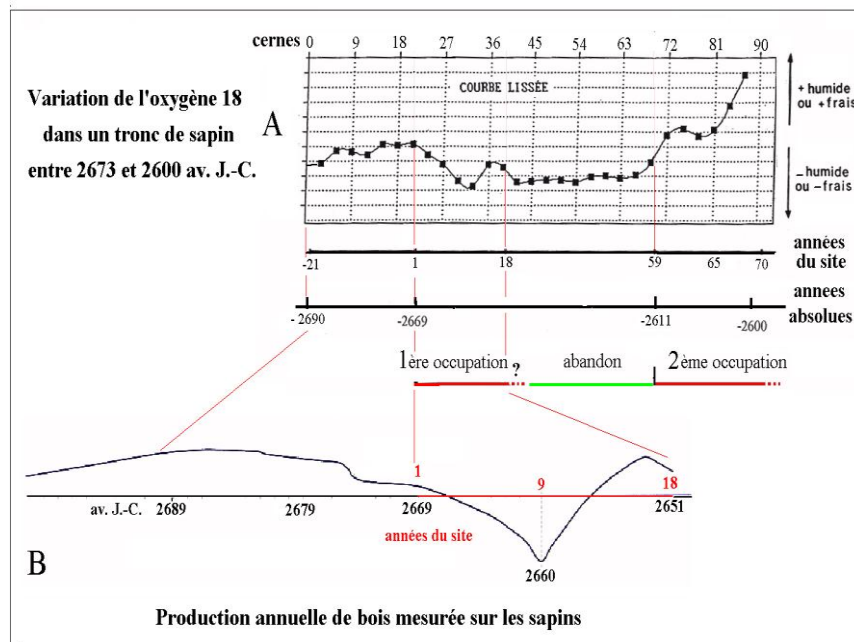
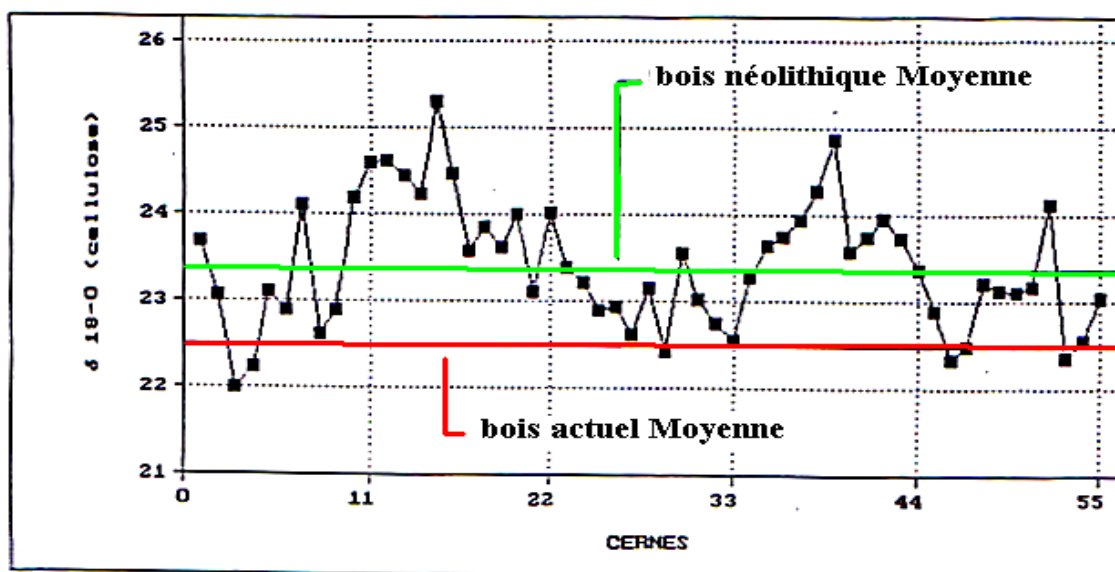


Fig. 1 Courbe lissée des variations du rapport isotopique $^{16}O/^{18}O$ des échantillons de bois pris tous les trois ans et mis en corrélation avec la chronologie des villages.

En dessous, signification climatologique : la première occupation profite d'un temps sec et d'un lac bas mais rapidement la deuxième voit le temps se dégrader.

La ligne orange est la moyenne du rapport isotopique $^{16}O/^{18}O$ du sapin étudié. En dessous la ligne verte est la moyenne du bois de 1990. Ainsi est confirmé qu'il faisait plus chaud et sec à Charavines qu'aujourd'hui.

On suit une amélioration climatique de moins d'un siècle qui a permis l'occupation de la rive. Ce sont les rapports isotopiques $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ du bois d'un sapin qui a livré la solution¹, avec 30 échantillons mesurés pris sur un tronc daté de 2773 à 2600 avant J.-C. par la dendrochronologie.



Commentaires sur les courbes

On sait, par les observations de terrain, qu'avant l'arrivée des hommes le climat avait suffisamment été sec pour faire baisser le niveau du lac et laisser une large bande de plage hors de l'eau de façon permanente. La production de bois est faible et la variation isotopique confirme une ambiance plus sèche qui reste constante.

Ceci est confirmé car le sapin analysé, avec un diamètre de 11 cm pour 90 ans, on a une croissance faible de 1,2 mm par an. Au cours de la première occupation, en l'an 9 du site, la production annuelle du bois est minimale en accord avec l'optimum du climat déterminé par l'analyse isotopique.

Pendant l'abandon, durant une quarantaine d'années, l'ambiance demeure très bonne jusqu'au début du deuxième village. Quand les hommes sont revenus sur le site en l'an 59, le climat était tout à fait semblable à celui de leur départ, 40 ans auparavant. Mais là, rapidement une légère péjoration commence, se stabilise puis se dégrade fortement et sans discontinuer à partir de 64/65. Les analyses prennent fin en l'an 69, soit huit ou dix ans avant le dernier départ. Ce phénomène cataclysmique correspond au maximum de la péjoration climatique de notre courbe, dégradation qui avait commencé une quinzaine d'années plus tôt, en 2613/2612 av. J.-C.

Il est fascinant de pouvoir retracer les aléas du climat avec cette précision, durant une occupation qui a duré moins d'un siècle. Charavines contribue ainsi à prouver l'existence de variations fortes, rapides et très temporaires qui peuvent affecter l'évolution d'un climat qui semblait stable. Nos climatologues ont-ils toujours conscience de ces épisodes fugaces ?

Voici les conclusions de A. Ferhi : " L'étude paléoclimatique met en évidence l'existence, entre 2706 et 2600 av. J.-C., de conditions climatiques qui ne diffèrent pas radicalement de celles que nous connaissons aujourd'hui mais plutôt de pulsations climatiques à plus ou moins long terme. On re-

¹ Analyses de A. Ferhi, 1991, Laboratoire de recherches géodynamiques de Thonon-les-Bains. Se reporter au rapport complet ci-dessous.

marque ainsi des périodes de quelques dizaines d'années marquées par une sécheresse assez considérable suivies de périodes beaucoup plus humides, alternance toujours constatée de nos jours. Ce déficit en eau qui se reflète au niveau de la composition isotopique de la matière organique d'origine végétale, peut découler soit d'une diminution généralisée des précipitations moyennes annuelles, soit d'une augmentation des températures, soit d'une variation conjuguée des deux paramètres. Dans les cycles les plus secs, ce déficit apparaît comme particulièrement marqué par rapport à la moyenne générale de la période considérée et par rapport à l'actuel. "

Autre intérêt des analyses : d'après la moyenne des rapports isotopiques, le climat aurait été légèrement plus chaud dans les années 80 que durant la période d'occupation du site. Ceci explique le siècle plus clément qui a permis l'installation sur la rive. Les différentes observations nous permettent de dire que, dans ses grandes lignes, le climat était voisin du nôtre vers 1980 mais qu'une courte variation séculaire vers le chaud et le sec ayant fait baisser le lac est un accident sans lendemain puisque les eaux ont retrouvé leur niveau primitif et l'ont conservé depuis, ce qui a permis la bonne conservation des vestiges.

Processus de l'évolution climatique

Ces résultats éclairent toutes les constatations de fouilles et confortent nos interprétations.

Ainsi, le niveau du lac a baissé de quelques mètres au cours d'un cycle de sécheresse, sécheresse plus importante et plus longue que celles que nous pouvons connaître actuellement : les hommes ont pu alors coloniser la berge dégagée à la faveur de ce retrait des eaux.

On a vu par l'étude des couches (*voir Volume 2*) que les habitants ont pu y vivre sans problèmes pendant plus de 20 ans sans avoir à subir de montées des eaux autres que, peut-être, des inondations automnales très temporaires. Leur départ sera programmé et se fera dans le calme, sans précipitation : sur place ne reste que le matériel cassé ou inutilisable de la couche B.3. Les analyses confirment nos interprétations de fouille.

Durant l'abandon, la couche archéologique issue de l'occupation a pourri pendant 40 ans, noyée par intermittence par des inondations (*voir l'article de J.-L. Brochier*) avec des vents probablement assez violents pour charrier et mettre en place les sédiments limoneux stériles de la couche B.2.

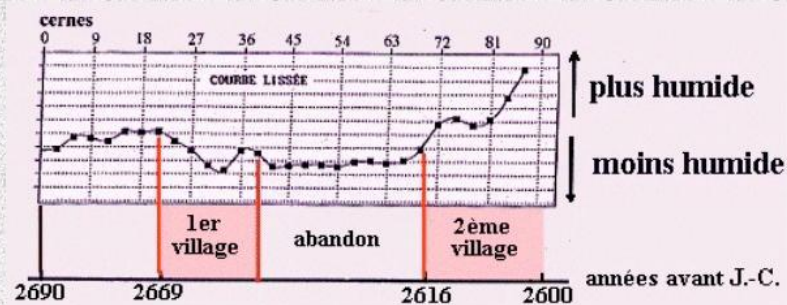
La deuxième occupation bénéficie, à son début, du même climat ; pourtant rapidement le temps se dégrade un peu, apparemment sans conséquences majeures. Mais en l'an 64, les conditions de vie sur le site changent, obligeant à un repli et à construire des maisons au-dessus et au-delà de la palissade, sur la partie la plus élevée du village et à abandonner les maisons les plus près du lac (*Fig. 61 et 63, volume 3*).

La dégradation se poursuivant, un épisode plus violent force à partir " en catastrophe " vers l'an 77 en laissant sur place une grande quantité d'objets et de matériel encore utilisable (cuillères, poignards, manches de hache, vases entiers, etc.). Pour les raisons qu'on a vues plus haut (*Erosion des couches*) le lac ne redescendra pas.

Les habitants de la région ont su profiter d'une longue période de sécheresse : 64 ans auparavant (2743 av. J.-C.), la dendrologie montre une sécheresse cataclysmique que les sapins et les chênes ont mis plusieurs années à surmonter. Les épisodes climatiques dits anormaux, brusques et brefs sont connus à bien des époques de la préhistoire, en dehors des variations climatiques d'amplitude que les séquences de pollens montrent clairement.

Il est fascinant de pouvoir retracer les aléas de la nature et du climat avec cette précision, dans la succession des événements d'une occupation qui a duré moins d'un siècle.

Les deux villages sur la plage...



- Il fait plus chaud et plus sec pendant la première occupation
- le lac ne remonte pas durant l'abandon du site
- la deuxième occupation commence au sec puis le lac remonte au point qu'elle cessera vers 2596, par inondation permanente.

RÉSULTATS D'ANALYSES DE L'OXYGÈNE-18 DANS LES CERNES D'UN TRONC D'ARBRE : IMPLICATIONS CLIMATIQUES

André FERHI

Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon-les-Bains

(1991)

La rondelle de bois transmise pour analyse provient du pieu 7122 (année 127). Il comporte 90 cernes dont l'épaisseur est le plus souvent inférieure au millimètre. A partir d'une réglette découpée suivant un rayon de la rondelle, nous avons prélevé 30 échantillons composés chacun de trois cernes consécutifs.

Chaque échantillon fut ensuite traité pour éliminer les résines et la lignine et ne conserver que la fraction cellulosique. Les teneurs en ^{18}O ont été déterminées sur cette fraction, ce qui garantit l'homogénéité et la pureté des échantillons. Les valeurs sont exprimées suivant la notation internationale, en unité δ définie par la relation :

$$\delta = \frac{R_e - R_s}{R_s} \cdot 10^3$$

R_e et R_s représentent respectivement les rapports des concentrations $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de l'échantillon et du standard international SMOW (Standard Mean Ocean Water).

Les résultats obtenus (tableau 1) couvrent une gamme de valeurs allant de 21.03 ‰ à 24.86 ‰. La moyenne générale s'élève à 23.63 ‰. Cette valeur est du même ordre de grandeur que les valeurs que l'on obtient actuellement sur les arbres de la partie nord du piémont alpin. On peut donc dire d'emblée que le climat général sous lequel cet arbre a vécu n'est pas fondamentalement différent du climat actuel, du moins dans ses grandes lignes.

Cependant, au niveau des fluctuations climatiques à plus ou moins long terme, on peut observer, au cours de cette période, deux coupures majeures marquant un changement des conditions climatiques significatif (fig. 1).

Une première coupure apparaît au niveau du 24ème cerne environ. La période antérieure à ce cerne apparaît comme relativement plus humide et/ou plus fraîche. La valeur moyenne des $\delta^{18}\text{O}$ se situe, durant cette période, autour de 23.4 ‰. La période postérieure qui s'étend jusqu'au cerne 69 environ, apparaît, au contraire, comme relativement plus sèche et/ou plus chaude. Les $\delta^{18}\text{O}$ sont toujours supérieurs à 23.8 ‰ et la valeur moyenne passe à 24.2 ‰.

La courbe de variation des $\delta^{18}\text{O}$ fait apparaître un second changement des conditions climatiques à partir du cerne 72. Les résultats indiquent un retour à des conditions plus humides. Durant une dizaine d'années, du cerne 72 au cerne 81, les valeurs tombent autour de 23.0 ‰. Puis, dans les dernières années avant l'abattage de l'arbre, on assiste à une décroissance très rapide des valeurs qui atteignent un minimum de 21 ‰. Dans la mesure où la série s'arrête là, on ne peut pas savoir s'il s'agit d'un changement durable des conditions climatiques ou d'un simple épisode exceptionnel et de courte durée.

N° Ech.	N° Cerne	18-0	Lissage
1.00	3.00	23.81	23.84
2.00	6.00	23.87	23.50
3.00	9.00	23.13	23.52
4.00	12.00	23.91	23.61
5.00	15.00	23.30	23.33
6.00	18.00	23.35	23.35
7.00	21.00	23.35	23.32
8.00	24.00	23.28	23.61
9.00	27.00	23.93	23.88
10.00	30.00	23.82	24.34
11.00	33.00	24.86	24.48
12.00	36.00	24.10	23.87
13.00	39.00	23.64	23.96
14.00	42.00	24.28	24.34
15.00	45.00	24.41	24.33
16.00	48.00	24.25	24.30
17.00	51.00	24.35	24.29
18.00	54.00	24.23	24.34
19.00	57.00	24.46	24.20
20.00	60.00	23.95	24.19
21.00	63.00	24.43	24.24
22.00	66.00	24.05	24.17
23.00	69.00	24.29	23.82
24.00	72.00	23.36	23.06
25.00	75.00	22.77	22.89
26.00	78.00	23.01	23.09
27.00	81.00	23.18	22.94
28.00	84.00	22.70	22.29
29.00	87.00	21.87	21.45
30.00	90.00	21.03	

Moyenne : 23.63

Tableau 1. Résultats oxygène-18.

1.1. Éléments isotopiques

Rappelons, tout d'abord, que les éléments isotopiques ont des propriétés chimiques identiques et ne diffèrent que par leur masse. Ceci est lié à la constitution nucléaire de l'atome : même nombre de protons donc également d'électrons mais nombre variable de neutrons. Ainsi l'élément oxygène possède trois espèces isotopiques, toutes stables : ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O . Les exposants indiquent le nombre total de nucléons, donc la masse des différents isotopes.

Dans la nature, l'abondance relative des espèces isotopiques est souvent très inégale. Dans le cas de l'oxygène les abondances sont respectivement de 99,76 % pour ^{16}O , 0,04 % pour ^{17}O et 0,20 % pour ^{18}O .

L'inégalité des masses se traduit, naturellement, par des comportements légèrement différents pour toutes les propriétés qui dépendent directement de la masse : densité, point de fusion et d'ébullition, pression de vapeur, vitesse de réaction, etc.

D'un point de vue pratique ceci aboutit à une répartition sélective des éléments isotopiques dans les situations suivantes : réaction chimique, diffusion, changement partiel d'état, échange isotopique sans réaction chimique apparente, etc.

1.2. Expression de la composition isotopique

Différentes unités permettent de représenter la composition isotopique pour un élément donné.

- Le rapport d'abondance isotopique, R, est le plus simple. Il représente le quotient entre la concentration de l'un des isotopes (généralement le plus lourd) et la concentration de l'autre. Par exemple :

$$R = \frac{[^{18}\text{O}]}{[^{16}\text{O}]}$$

- Les variations de ce rapport restent, cependant, très faibles et leur utilisation pratique comme unité de mesure s'avère, de ce fait, peu commode. Comme en géochimie on s'intéresse davantage aux variations plutôt qu'aux valeurs absolues, on peut prendre en compte, non pas les valeurs absolues du rapport isotopique mais leurs déviations par rapport à une valeur fixe prise comme référence. On introduit ainsi une nouvelle unité définie par la relation :

$$\delta = \frac{(R_e - R_s)}{R_s} 10^3$$

dans laquelle R_e et R_s représentent respectivement les rapports d'abondance isotopique de l'échantillon et du standard.

La valeur de δ peut fluctuer, ainsi, autour de zéro. $\delta = 0$ signifie que l'échantillon a la même composition isotopique que le standard. Plus grand ou plus petit que 0 signifie que le rapport isotopique de l'échantillon est supérieur ou inférieur à celui du standard.

1.3. Notion et expression du fractionnement isotopique

Le fractionnement isotopique caractérise la répartition sélective des différents isotopes en présence lors d'une transformation d'origine thermodynamique. Prenons un exemple simple pour illustrer cette notion (fig. 1).

Soit une enceinte close contenant de l'eau pure maintenue à une température constante de 25°C. A l'équilibre, la pression de vapeur au-dessus de l'eau se stabilise à une valeur

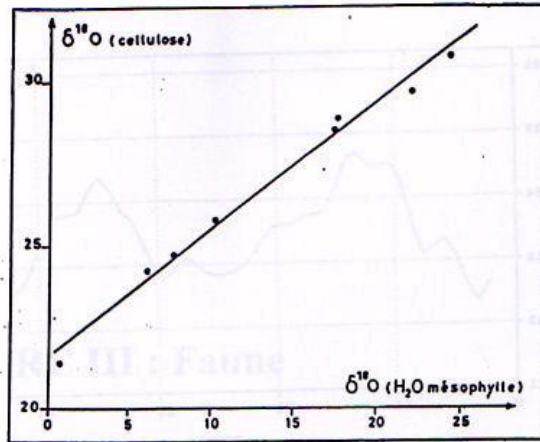


Figure 9. Relation entre la teneur en oxygène-18 de la matière organique et celle de l'eau des tissus mésophylliens.

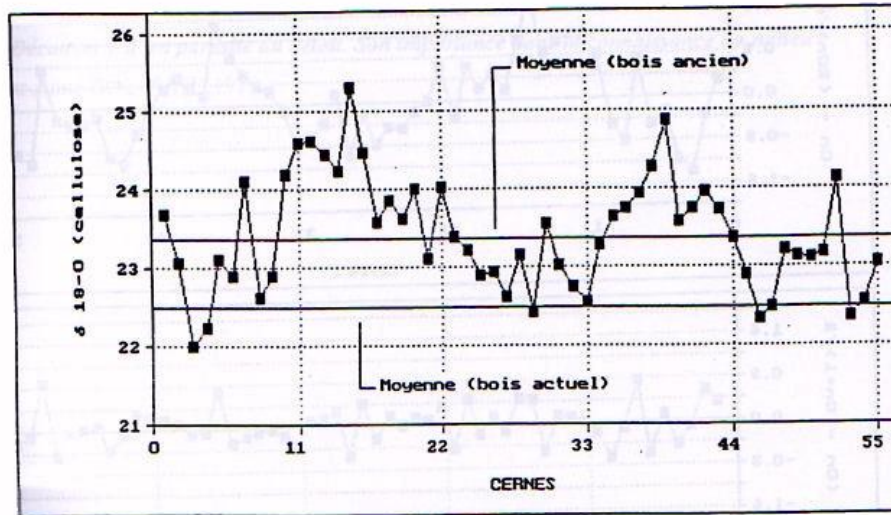


Figure 10. Teneurs en oxygène-18 de la cellulose des cernes pris deux par deux.

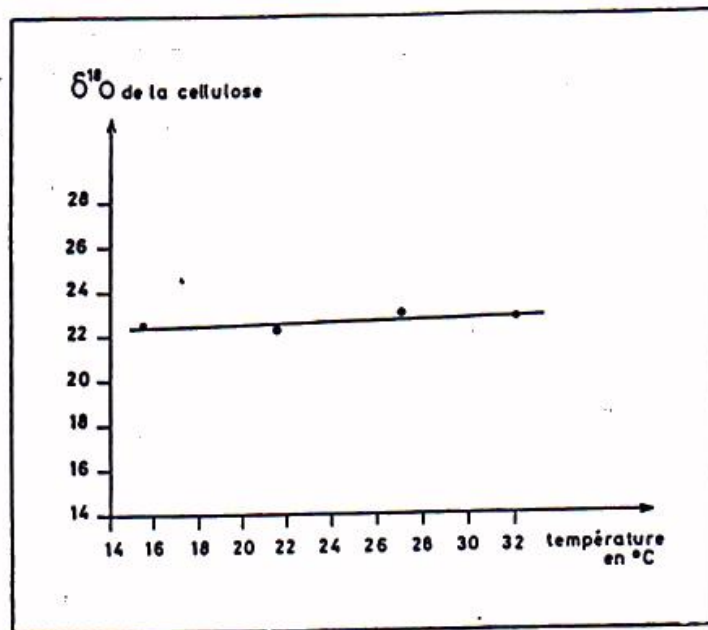


Figure 6. Pour des températures comprises entre 15 et 32 °C, la teneur en oxygène-18 ne varie pas (tous autres paramètres constants).

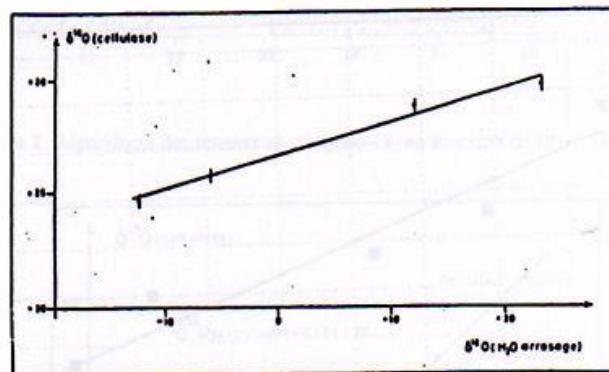


Figure 7. Relation entre les teneurs en oxygène-18 de l'eau d'arrosage et celles des végétaux arrosés (à conditions de milieux identiques).

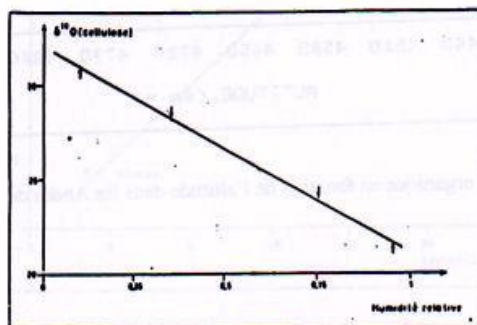


Figure 8. Relation entre l'humidité relative ambiante et les teneurs en oxygène-18 de la matière organique.

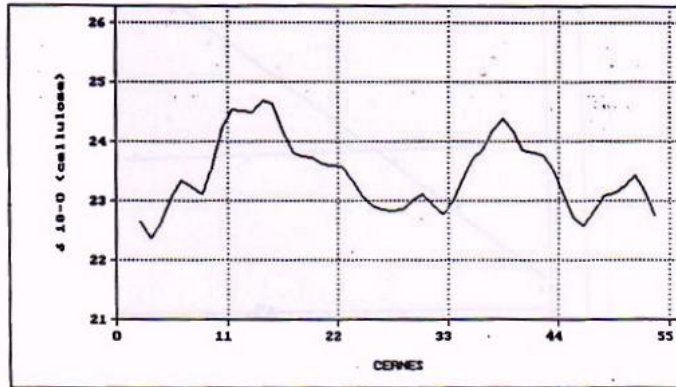


Figure 11. Evolution des teneurs en oxygène-18 avec le temps (courbe lissée).

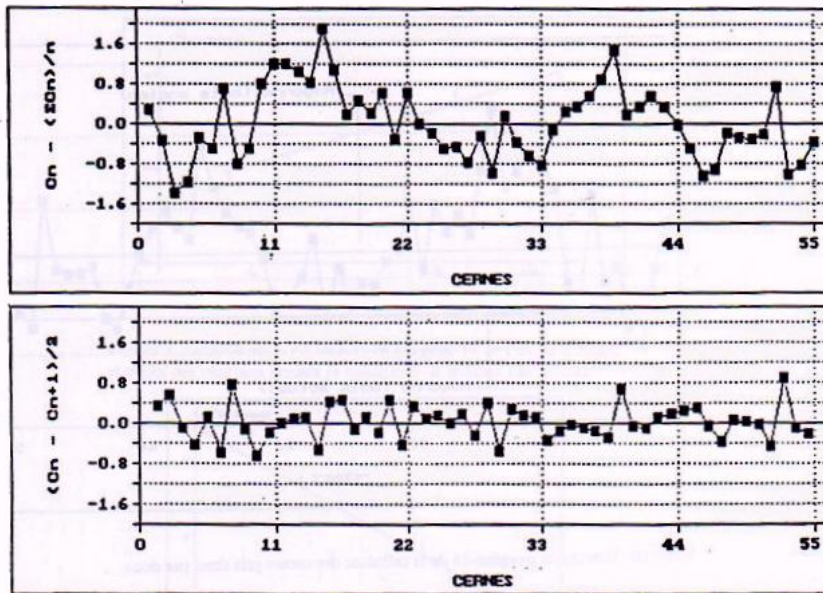


Figure 12. Variations interannuelles des teneurs en isotope 18 de l'oxygène.

constante (pression de vapeur saturante). Si l'on détermine le rapport isotopique de l'oxygène des molécules d'eau dans la phase liquide (Rl) et dans la phase gazeuse (Rv) on n'obtiendra pas des valeurs identiques. Le rapport caractérisant la vapeur sera un peu plus petit. Le rapport Rl/Rv sera donc légèrement différent de 1 et c'est cette différence que l'on appelle fractionnement isotopique. Dans les conditions expérimentales décrites ci-dessus, on obtient la valeur caractéristique suivante :

$$\alpha = Rl/Rv \approx 1,009$$

α est le facteur de fractionnement isotopique à l'équilibre. La différence par rapport à 1, exprimée en parts pour mille, donne le coefficient d'enrichissement isotopique soit :

$$\varepsilon = (\alpha - 1) 10^3$$

Dans cet exemple on a donc $\varepsilon = 9 \text{ ‰}$.

Nous n'avons considéré ici qu'un cas simple pour illustrer cette notion de fractionnement isotopique. Les choses se compliquent, cependant, dès lors que l'on a affaire à des systèmes plus complexes en milieu ouvert et dans lesquels interviennent de multiples processus, généralement non à l'équilibre. Les compositions isotopiques initiales des différentes composantes du système et les effets cinétiques deviennent alors prépondérants pour la compréhension du résultat final.

II. TENEURS EN OXYGÈNE-18 DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DE PLANTES ACTUELLES

Si la matière organique fossile, d'origine végétale, doit porter, au niveau de sa composition isotopique, l'empreinte du climat, cette information est forcément acquise du vivant de la plante. Il est donc naturel d'examiner, en premier lieu, les variations de teneurs en oxygène-18 des plantes actuelles en fonction du climat. De nombreuses études ont été effectuées dans ce sens (BURK, GRAY, FERHI, GEGOUT, GOUZE). La figure 2 montre, à titre d'exemple, la répartition des teneurs en oxygène-18 de diverses plantes en fonction de la latitude (FERHI). Ces plantes ont été récoltées le long d'un transect nord-sud, allant de Kiruna en Suède à Abidjan en Côte-d'Ivoire. Toute une variété de climats est ainsi traversée. Les résultats montrent, tout d'abord, une relation de dépendance manifeste entre le climat et la composition isotopique de l'oxygène organique. Cette relation ne semble, cependant, pas très simple. En allant du nord au sud, donc des climats plus froids aux climats plus chauds, on observe, dans un premier temps, une augmentation progressive des valeurs qui passent de 18-19 ‰ dans les régions circumpolaires à 31-32 ‰ dans les milieux arides du Sahara. Puis, curieusement, les valeurs se mettent à diminuer en abordant les climats tropicaux pour atteindre des valeurs de l'ordre de 24 ‰ au niveau d'Abidjan.

Cette double variation par rapport à un point charnière correspondant au domaine le plus chaud et le plus sec des climats traversés (régions sahariennes) suggère l'influence de facteurs climatiques multiples sur la composition isotopique de la matière organique des plantes.

De fait, on observe une bonne corrélation des teneurs en oxygène-18 avec la température dans les régions septentrionales (fig. 3) et une autre corrélation, cette fois avec la pluviométrie, dans les régions tropicales, à saison sèche plus ou moins marquée (fig. 4).

Des mesures similaires effectuées suivant un gradient altimétrique dans les Andes de Bolivie, montrent également une excellente corrélation entre l'altitude et l'oxygène-18 des plantes (fig. 5).

Il ressort de ces différentes investigations, données en exemple, qu'il existe une relation étroite entre la composition isotopique de la matière organique des plantes et les conditions climatiques. Apparemment deux paramètres, au moins, jouent un rôle prépondérant, la température et la pluviométrie. Pour comprendre le rôle et l'importance de chacun de ces

3.3. Influence de la pression de vapeur d'eau dans l'air

Des plantes croissant sous des humidités relatives différentes font apparaître l'existence d'une relation linéaire décroissante entre l'humidité relative de l'air ambiant et les teneurs en oxygène-18 de la matière organique (fig. 8). Cette nouvelle donnée expérimentale vient compléter la précédente pour l'interprétation climatique de la distribution des compositions isotopiques de la matière organique des plantes.

IV. INTERPRÉTATION DES DONNÉES EXPÉRIMENTALES

Les résultats expérimentaux montrent, à l'évidence, que c'est la composition isotopique de l'eau utilisée au cours de la photosynthèse qui pilote, en priorité, les variations de teneur en oxygène-18 de la matière organique des plantes. Il faut tenir compte naturellement, des caractéristiques isotopiques de l'eau qui se trouve au niveau des feuilles et non au niveau du sol. Des considérations théoriques et expérimentales (BARIAC, FERHI, FÖRSTEL) montrent que dans la feuille, la composition isotopique de l'eau tend vers une valeur d'équilibre en relation avec un certain nombre de facteurs du milieu ambiant dont les principaux sont : la concentration en oxygène-18 de la source d'eau (eau du sol) et celle de la vapeur atmosphérique, la température, l'humidité relative de l'air. Ceci est naturellement lié au phénomène de transpiration qui entraîne des effets isotopiques importants par évaporation de l'eau à travers les orifices stomatiques (fig. 9).

Ainsi, à l'équilibre, la composition isotopique de l'eau au niveau des tissus mésophylliens peut être calculée par la relation :

$$\delta f = (1 - h) \delta s + \epsilon_e + \epsilon_k + h (\delta A - \epsilon_k)$$

dans laquelle δf , δs , δA représentent respectivement les compositions isotopiques de l'eau dans la feuille, de l'eau dans le sol et de la vapeur d'eau atmosphérique, ϵ_k et ϵ_e sont les constantes cinétiques et à l'équilibre du fractionnement isotopique, h est l'humidité relative au-dessus du couvert végétal.

Tous ces paramètres sont, à quelques nuances près, liés à la nature du climat. La matière organique élaborée à partir de cette eau par les processus photosynthétiques conservera donc, d'une certaine manière, la « mémoire » des conditions de milieu dans lesquelles elle s'est formée. On observe en effet que la teneur en oxygène-18 de la matière organique des plantes est liée à celle de l'eau des tissus mésophylliens par la relation :

$$\delta m_o = a \cdot \delta f + b$$

Pour les plantes non aquatiques, les paramètres a et b , déterminés expérimentalement, ont respectivement pour valeur : 0.39 et 21.6.

D'une façon générale, dans un contexte géographique donné, les conditions d'évapotranspiration apparaissent donc comme le facteur déterminant de l'état de la composition isotopique de l'eau au niveau des feuilles et par suite de la matière organique élaborée à partir de cette eau. Cette notion d'évapotranspiration, bien que primordiale en climatologie reste, cependant, difficile à appréhender dans la pratique. Ceci vient du fait que les conditions d'évapotranspiration résultent de la combinaison de plusieurs facteurs climatiques distincts : la température, la pluviométrie, le vent, etc. C'est la raison pour laquelle de nombreux auteurs ont tenté une approche de cette notion par diverses méthodes plus ou moins empiriques : indice pluvio-thermique de De MARTONNE et d'EMBERGER, diagrammes ombro-thermiques de De HAUSSEN, climatogrammes de PEGUY, formules de calcul de l'évapotranspiration potentielle de TURC, de THORNTON, de PENMAN, etc.

paramètres, il convient d'examiner maintenant les processus qui sont à l'origine de ce phénomène.

III. ORIGINE DES VARIATIONS DE TENEURS EN OXYGÈNE-18 DANS LES PLANTES

L'oxygène incorporé dans les substances organiques peut avoir, comme origine, deux sources principales : l'eau et le gaz carbonique. La photorespiration peut également en introduire une petite quantité en provenance directe de l'oxygène de l'air.

Des mesures (KELLING) montrent que les compositions isotopiques de l'oxygène de CO_2 dans l'atmosphère sont très peu variables sur l'ensemble de la planète en raison des brassages continus de l'atmosphère. Cette valeur reste de l'ordre de 41 ‰ environ.

L'eau des précipitations, par contre, varie considérablement en fonction de certains paramètres géographiques et climatiques. Les mesures disponibles (IAEA) montrent, toutes régions du globe confondues, des valeurs moyennes allant de -23 à -3 ‰ environ.

On voit que la composition isotopique de l'oxygène organique ne correspond, en fait, ni à la valeur du CO_2 ni à celle de l'eau mais à une valeur plutôt intermédiaire qui laisse supposer des effets de fractionnement isotopique importants au cours des processus photosynthétiques. Pour essayer de démêler un peu les problèmes, des expériences en enceinte contrôlée où l'on peut faire varier les différents paramètres du milieu indépendamment les uns des autres, ont été mises en oeuvre.

3.1. Influence de la température

Il y a quelques années, il était admis que les variations de teneurs en oxygène-18 chez les plantes étaient liées à la température moyenne de l'air pendant la saison végétative et ceci par le simple fait du fractionnement isotopique qui se produit à l'occasion des réactions métaboliques dont la plante est le siège.

Les résultats expérimentaux n'ont pas confirmé cette idée. On constate, en effet, que la composition isotopique des plantes ne varie pratiquement pas pour des différences de température allant de 15 à 32 °C, lorsque tous les autres paramètres du milieu sont maintenus constants (fig. 6).

Si la température joue un rôle, il est donc probable que ce rôle s'exerce indirectement en agissant notamment, sur d'autres paramètres du milieu qui, eux, exercent une influence directe sur la composition isotopique des produits photosynthétiques.

3.2. Influence de la composition isotopique de l'eau du sol

Lorsqu'on arrose des plantes avec des eaux ayant des teneurs en oxygène-18 différentes, tout en maintenant des conditions de milieu identiques pour toutes les plantes, on observe une nette corrélation entre les compositions isotopiques de l'eau et celles de la matière organique (fig. 7). Compte tenu de la diversité des $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau des sols, diversité qui reste fonction des conditions de milieu et en particulier des conditions climatiques, cette dépendance constitue l'un des éléments importants pour l'interprétation des faits observés en milieu naturel.

3.3. Influence de la pression de vapeur d'eau dans l'air

Des plantes croissant sous des humidités relatives différentes font apparaître l'existence d'une relation linéaire décroissante entre l'humidité relative de l'air ambiant et les teneurs en oxygène-18 de la matière organique (fig. 8). Cette nouvelle donnée expérimentale vient compléter la précédente pour l'interprétation climatique de la distribution des compositions isotopiques de la matière organique des plantes.

IV. INTERPRÉTATION DES DONNÉES EXPÉRIMENTALES

Les résultats expérimentaux montrent, à l'évidence, que c'est la composition isotopique de l'eau utilisée au cours de la photosynthèse qui pilote, en priorité, les variations de teneur en oxygène-18 de la matière organique des plantes. Il faut tenir compte naturellement, des caractéristiques isotopiques de l'eau qui se trouve au niveau des feuilles et non au niveau du sol. Des considérations théoriques et expérimentales (BARIAC, FERHI, FÖRSTEL) montrent que dans la feuille, la composition isotopique de l'eau tend vers une valeur d'équilibre en relation avec un certain nombre de facteurs du milieu ambiant dont les principaux sont : la concentration en oxygène-18 de la source d'eau (eau du sol) et celle de la vapeur atmosphérique, la température, l'humidité relative de l'air. Ceci est naturellement lié au phénomène de transpiration qui entraîne des effets isotopiques importants par évaporation de l'eau à travers les orifices stomatiques (fig. 9). Ainsi, à l'équilibre, la composition isotopique de l'eau au niveau des tissus mésophylliens peut être calculée par la relation :

$$\delta f = (1 - h) \delta s + \epsilon e + \epsilon k + h (\delta A - \epsilon k)$$

dans laquelle δf , δs , δA représentent respectivement les compositions isotopiques de l'eau dans la feuille, de l'eau dans le sol et de la vapeur d'eau atmosphérique, ϵk et ϵe sont les constantes cinétiques et à l'équilibre du fractionnement isotopique, h est l'humidité relative au-dessus du couvert végétal.

Tous ces paramètres sont, à quelques nuances près, liés à la nature du climat. La matière organique élaborée à partir de cette eau par les processus photosynthétiques conservera donc, d'une certaine manière, la « mémoire » des conditions de milieu dans lesquelles elle s'est formée. On observe en effet que la teneur en oxygène-18 de la matière organique des plantes est liée à celle de l'eau des tissus mésophylliens par la relation :

$$\delta m_o = a \cdot \delta f + b$$

Pour les plantes non aquatiques, les paramètres a et b , déterminés expérimentalement, ont respectivement pour valeur : 0.39 et 21.6.

D'une façon générale, dans un contexte géographique donné, les conditions d'évapotranspiration apparaissent donc comme le facteur déterminant de l'état de la composition isotopique de l'eau au niveau des feuilles et par suite de la matière organique élaborée à partir de cette eau. Cette notion d'évapotranspiration, bien que primordiale en climatologie reste, cependant, difficile à appréhender dans la pratique. Ceci vient du fait que les conditions d'évapotranspiration résultent de la combinaison de plusieurs facteurs climatiques distincts : la température, la pluviométrie, le vent, etc. C'est la raison pour laquelle de nombreux auteurs ont tenté une approche de cette notion par diverses méthodes plus ou moins empiriques : indice pluvio-thermique de De MARTONNE et d'EMBERGER, diagrammes ombro-thermiques de De HAUSSEN, climatogrammes de PEGUY, formules de calcul de l'évapotranspiration potentielle de TURC, de THORNTHWAITE, de PENMAN, etc.

En définitive, les variations de composition isotopique enregistrées au niveau de la matière organique des plantes essentiellement rendent compte de la disponibilité ou du stress en eau ressenti au niveau du couvert végétal sans que l'on puisse attribuer ceci, avec certitude, à un effet d'origine purement thermique ou purement pluviométrique ou des deux à la fois.

V. PALÉOCLIMATOLOGIE DE LA RÉGION DU LAC DE PALADRU ENTRE 2706 et 2600 av. J.-C.

Le site archéologique des Baigneurs correspond à un ensemble de bâtiments en bois construits entre 2706 et 2600 av. J.C. sur une plage crayeuse, en bordure du lac de Paladru. Ce site est actuellement immergé sous une tranche d'eau d'environ deux à trois mètres. Ce niveau connaît des fluctuations saisonnières assez considérables et une partie au moins du site émerge au cours de l'hiver. Le problème qui se pose dès lors est de savoir dans quel contexte de milieu l'installation des hommes s'est faite. S'agit-il d'une construction sur terre ferme en bordure du plan d'eau dont le niveau aurait remonté par la suite, submergeant le site?

En fait, plusieurs preuves d'ordre archéologique et sédimentologique démontrent que l'installation humaine s'est faite sur une plage émergée, en bordure du lac dont le niveau était donc plus bas qu'actuellement. Si tel est le cas, deux questions se posent alors au sujet de ces variations :

1) s'il y avait eu abaissement de l'eau par rapport au niveau actuel, à quel moment cet abaissement s'était-il produit ; à partir de quand la remontée vers le niveau actuel a-t-elle eu lieu ?

2) quelles sont les causes de ces fluctuations ? Sont-elles d'origine climatique ou d'origine mécanique (engorgement de l'exutoire) ? Ou encore d'origine anthropique, avec l'intensification des défrichements qui auraient permis la remontée des eaux à leur niveau actuel?

Il est bien difficile de répondre à ces questions, a priori. En tout cas pour exonder complètement cette plate-forme il faudrait un abaissement du niveau actuel du lac de l'ordre de 3 m environ.

Ce qu'il faut savoir par ailleurs, c'est que ce lac fonctionne comme un vrai « pluviomètre », avec un bassin versant peu étendu et sans affluent important. Il est donc très sensible aux variations des conditions climatiques. C'est ainsi que la sécheresse assez exceptionnelle de 1989 s'est traduite par une émergence presque totale du site archéologique. Dans ces conditions il n'est pas aberrant de penser que des fluctuations de nature climatique puissent être à l'origine des variations du niveau du lac.

Afin d'apporter quelques éléments d'information à ce sujet, des investigations fondées sur l'analyse des teneurs en oxygène-18 dans la cellulose des bois utilisés pour la construction des bâtiments, ont été entreprises.

5.1. Matériel et méthode

Le bois étudié est une rondelle découpée sur un tronc de sapin (pieu n°7122) comportant au total 110 cernes. La largeur de ces cernes étant relativement étroite, nous n'avons pas pu les prélever un par un. Nous nous sommes contentés de prélèvements correspondant à peu près à la largeur de deux cernes consécutifs.

Parallèlement à cette analyse et pour une étude comparative, nous avons échantillonné des rondelles de bois actuel le long du versant bordant le lac de Paladru entre 500 et 800 m d'altitude, à raison d'un échantillon tous les 50 m.

Pour s'assurer de la bonne homogénéité des composants organiques analysés, nous avons préféré extraire la cellulose de chaque échantillon plutôt que de prendre le bois dans son ensemble. Ceci a pour effet d'éliminer la lignine et éventuellement les produits de réserve stockés dans le bois.

L'oxygène organique a été obtenu suivant la méthode d'extraction par pyrolyse en présence d'un excès de carbone pur apporté sous forme de poudre de diamant (Hardcastle, Fehri). L'analyse des concentrations en oxygène-18 proprement dite est obtenue par spectrométrie de masse à l'aide d'un appareil de type CH7 de FINNIGAN-MAT.

Tous les résultats sont exprimés en unité définie précédemment. La valeur de référence (ou standard) prise en considération est le SMOW (Standard Mean Ocean Water) qui est le standard international généralement utilisé pour les mesures d'oxygène-18 dans l'eau et dans la matière organique.

5.2. Résultats

La valeur moyenne des 55 échantillons analysés s'établit à + 23.4 ‰ avec une erreur type sur les analyses s'élevant à +/- 0.2. Cette valeur reste très semblable aux valeurs que l'on observe actuellement dans les Alpes du Nord et à cette altitude (vers 500m). Donc, en considérant l'ensemble de la période, les résultats n'indiquent pas un bouleversement spectaculaire des conditions climatiques. Si l'on regarde, cependant, ces résultats de plus près (fig. 10), on peut noter trois faits importants.

Tout d'abord on ne note pratiquement aucune tendance générale précise dans un sens ascendant ou descendant. En lissant la courbe, cependant, (fig. 11) une vague tendance vers un abaissement des valeurs à partir des cernes 30-31 se dessine. On remarque ensuite que les variations interannuelles restent relativement faibles. La figure 12 montre la distribution des écarts entre deux valeurs successives par rapport à leur moyenne :

$$Y_1 = (X_1 - X_{1+1}) / 2$$

par contre, si l'on considère la distribution des écarts de l'ensemble des valeurs par rapport à la moyenne générale (fig. 12) suivant la relation :

$$Y_1 = X_1 - X$$

on note des variations beaucoup plus importantes. Ces variations semblent s'ordonner dans le temps suivant un mouvement grossièrement cyclique. On peut observer ainsi deux maximum culminant au niveau des cernes 12 et 39 et trois minimum au niveau des cernes 3, 29 et 53.

En définitive, le signal isotopique montre des variations pseudo-cycliques d'une assez grande amplitude qui viennent se superposer à des variations interannuelles beaucoup plus faibles et tout à fait aléatoires. Le cycle moyen de ces variations est, pour la période étudiée, de l'ordre de quelques dizaines d'années. Il est difficile, enfin, de voir à l'intérieur de cette série se dessiner une tendance générale dans un sens croissant ou décroissant.

En ce qui concerne les échantillons de bois actuel, on note, comme on a pu le constater partout, une diminution des valeurs avec l'altitude. Au niveau du lac la valeur obtenue est de 23.25 ‰.

Il reste à établir la signification climatique précise de ce signal isotopique.

5.3. Discussion

En fonction des précisions précédemment données une augmentation des teneurs en oxygène-18 traduit un abaissement du degré hygrométrique moyen de l'air entraînant un accroissement de l'ETP (évapotranspiration potentielle) et un fractionnement isotopique intense de l'eau au niveau du sol et au niveau du couvert végétal.

Un tel changement de l'état hygrométrique moyen de l'atmosphère peut être lié à deux variables climatiques importantes : soit à une augmentation des températures moyennes annuelles sans variation des précipitations moyennes, soit l'inverse, soit enfin, à une variation simultanée des deux paramètres : augmentation des températures et diminution des précipitations. Dans tous les cas, cette situation se traduit dans le couvert végétal par un certain stress en eau et le résultat apparaît comme un phénomène de sécheresse. D'une façon générale, les mesures isotopiques permettent donc de dire s'il y a ou non un déficit en eau, mais pas si ce déficit est dû à une augmentation des phénomènes d'évapotranspiration ou à une diminution des précipitations moyennes.

A la lumière de ces indications on peut donc constater que les conditions climatiques, dans les environs du site de Charavines-Les Baigneurs, ont connu dans la période précédant l'abattage de l'arbre étudié des fluctuations sensibles, avec une alternance de phases relativement sèches suivies de phases plus humides. La périodicité de ces phases reste de l'ordre d'une quarantaine d'années.

Deux maximum de sécheresse apparaissent ainsi vers les 30-31ème cernes et vers les 78-79ème cernes. Les périodes les plus humides se repèrent au niveau des cernes de rang : 6-7, 58-59, 92-93. Peut-on chiffrer ces variations en termes de déficit moyen en eau ? Ceci est évidemment un exercice périlleux dans la mesure où l'on ne sait pas faire le partage entre l'effet éventuellement lié à la température et celui lié à la pluviométrie. Si l'on considère, toutefois, que les variations isotopiques observées s'expliquent complètement par l'effet unique d'une variation des précipitations, on peut indiquer un ordre de grandeur. On constate, en effet, que le $\delta^{18}\text{O}$ de la cellulose diminue d'environ 0.49 ‰ pour une augmentation d'altitude de 100 m. Si l'on estime le gradient pluviométrique dans une fourchette de 50 à 100 mm pour 100 m de dénivélé, en se référant pour cette évaluation aux études menées dans la région de Thonon on peut calculer le gradient isotopique en fonction de la pluviométrie. Ce calcul donne une valeur de 93 mm d'eau pour 1 ‰ ($P = -93.3 \delta_{\text{mo}} + 3280$) dans l'hypothèse d'un gradient pluviométrique de 50 mm / 100 m et une valeur de 186 mm par δ ($P = 186.5 \delta_{\text{mo}} + 5461$) dans l'hypothèse d'un gradient pluviométrique de 100 mm / 100 m. Etant donné

Ce déficit en eau qui se reflète au niveau de la composition isotopique de la matière organique d'origine végétale, peut découler soit d'une diminution généralisée des précipitations moyennes annuelles, soit d'une augmentation des températures, soit d'une variation conjuguée des deux paramètres. Dans les cycles les plus secs, ce déficit apparaît comme particulièrement marqué par rapport à la moyenne générale de la période considérée et par rapport à l'actuel.

Ainsi, il est probable que le niveau du lac a dû baisser de quelques mètres au cours d'un de ces cycles de sécheresse relative et que les hommes ont pu coloniser la berge dégagée à la faveur de ce retrait des eaux, mais de façon tout à fait temporaire.

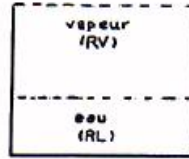


Figure 1. Dans une enceinte close, à une température constante de 25°C, à l'équilibre, la pression de vapeur se stabilise à une valeur constante.

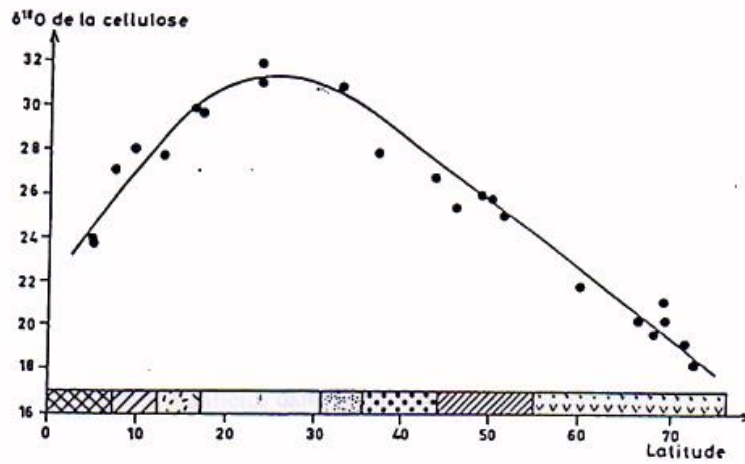


Figure 2. Répartition des teneurs en oxygène-18, en fonction de la latitude, pour divers végétaux.

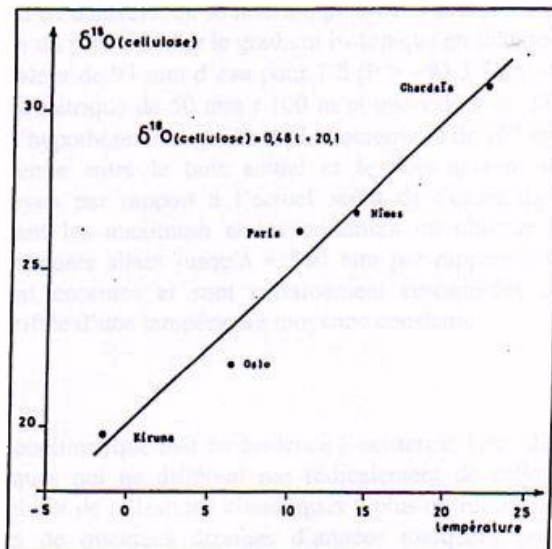


Figure 3. Teneurs en oxygène-18 en fonction des températures.