

Introduction

Le **Quaternaire** est la troisième période géologique du Cénozoïque et la plus récente sur l'échelle des temps géologiques. Cette période se caractérise par le retour des glaciations, l'apparition du genre *Homo* et l'Extinction de l'Holocène.

La dénomination « Quaternaire » a été proposée par Jules Desnoyers en 1829 pour qualifier des formations ou terrains, à partir de l'analyse des sédiments du Bassin de la Seine qui semblaient être plus jeunes que les roches du Tertiaire.

Relation avec les autres disciplines

1. Historique de la définition du Quaternaire

La limite inférieure de la période a fait l'objet de nombreux débats scientifiques et restait difficile à préciser car plusieurs marqueurs de froids peuvent être utilisés (donnant une limite inférieure entre environ -2,6 et -1,5 millions d'années). Avec l'avancée des méthodes de datation absolue des roches les plus anciennes et après la découverte de fossiles dans les roches précambriennes, le Quaternaire a été requalifié géo-chronologiquement comme la troisième des périodes géologiques du Cénozoïque (la seconde étant le Néogène). Cette disposition a été confirmée en 2009 par l'Union Internationale des Sciences Géologiques avec un début déterminé à environ 2,6 millions d'années BP.

2. Principes de stratigraphie du Quaternaire

a. Les formations superficielles

Les dépôts quaternaires continentaux se rapportent à ce que l'on appelle les formations superficielles. Il s'agit de dépôts généralement meubles, parfois indurés qui recouvrent le substratum le plus souvent en discordance. Campy et Macaire (1986) les définissent comme constituant l'interface terre-atmosphère. Variables dans leur nature géochimique, leur structure est généralement celle de roches détritiques meubles modifiées par les altérations. Leur répartition et leur nature sont étroitement dépendantes du contexte géomorphologique et des climats locaux.

En général, elles représentent la résultante relique des processus antagonistes, ou complémentaires, de l'érosion et de la sédimentation. La grande variété des formations superficielles reflète celle des environnements sédimentaires. Les unités lithologiques présentent d'importantes variations de faciès latérales et verticales. On rassemble généralement sous la dénomination d'ensembles les groupements horizontaux de formations associées, intriquées résultant d'un phénomène complexe (glaciers, fleuves, etc.). Les formations superposées peuvent être regroupées en complexes reflétant les processus sédimentaires dans le temps. Cette double analyse spatio-temporelle des ensembles sédimentaires au moyen de la sédimentologie et de la géochimie permet de reconstituer la dynamique de leur mise en place.

L'importance des formations superficielles dépend non seulement de la morphologie locale, mais aussi des anciens climats. Si les environnements climatiques froids ont favorisé la mobilisation des formations superficielles, les réchauffements ont tendance à les stabiliser par le développement de la végétation. L'une des grandes caractéristiques des formations superficielles est l'existence de nombreuses lacunes sédimentaires entraînant des discontinuités. A l'exception des dépôts lacustres ou marins profonds, les formations superficielles sont très discontinues, lenticulaires. Les dépôts n'ont pas enregistré toute l'histoire d'un phénomène, mais seulement sa phase maximale. Par exemple les moraines terminales sont les témoins des extensions maximales des glaciers. Les formations superficielles actuellement observables, donc stabilisées, résultent d'un état d'équilibre entre les phases d'érosion et de sédimentation.

b. Les méthodes d'étude

En fait, les démarches des quaternaristes doivent être celles de la Géologie en général, avec en plus certaines approches particulières rendues possibles par la proximité et la finesse de la chronologie des événements et les comparaisons possibles avec les phénomènes actuels.

Les principes élémentaires de la stratigraphie ont fait l'objet des travaux de la Commission de Stratigraphie de l'I.U.G.S. (International Union of Geology Sciences) qui a publié un guide de classification stratigraphique et de terminologie connue sous le nom de Guide Hedberg (1976). Ces recommandations s'appliquent naturellement au Quaternaire.

On peut distinguer trois familles de méthodes dans cette approche :

- La première concerne l'établissement des stratigraphies locales d'après le principe de superposition des couches, la nature des dépôts (Lithostratigraphie) et leur morphologie (géomorphologie), ce dernier aspect étant très particulier du Quaternaire. Cet ensemble que le Guide

Hedberg rassemble sous le terme un peu restrictif de « Lithostratigraphie » pourrait comme l'a suggéré Rat (1978) être qualifié de « stratigraphie géométrique ». Il s'agit de l'analyse des séquences locales, région par région, domaine par domaine. La terminologie recommandée pour la traduire est de la plus grande à la plus petite unité : le groupe, la formation, le membre (ou assise) et le lit (ou la couche).

- La seconde démarche est celle qui consiste à placer les séquences locales par rapport à une échelle de référence. Cette échelle pourrait être lithologique, mais elle se heurterait aux lacunes possibles et à l'inconvénient majeur que représente l'aspect local des conditions de sédimentation. On cherche à se référer à un phénomène qui a une évolution continue et irréversible. Deux ensembles de processus répondent à ces nécessités, ce sont respectivement l'évolution biologique et la chronologie absolue. La biostratigraphie est fondée sur le contenu paléontologique des strates. Compte tenu de la durée très courte du Quaternaire, tous les groupes n'ont pas une vitesse évolutive assez grande et une assez large extension pour servir de repères ;

En milieu continental parmi les mammifères, ce sont les Rongeurs qui présentent le plus grand intérêt parce qu'ils ont évolué très vite, sont très abondants et ont une large répartition.

En milieu marin où les foraminifères et les mollusques n'ont pratiquement pas évolué, la zonation est fondée plutôt sur les successions d'associations écologiques que sur les degrés d'évolution des espèces. L'unité générale de la biostratigraphie est la biozone. Elle se présente sous divers aspects tels que : la zone d'association (ensemble des taxons présents dans tel groupe de couches), la zone de répartition (ensemble des couches correspondant à la répartition stratigraphique du taxon choisi), la zone d'abondance (ensemble des couches où le taxon est très abondant), etc.

- La troisième démarche du stratigraphe consiste à passer des étapes stratigraphie géométrique-biostratigraphie à la chronostratigraphie. La classification chronostratigraphique consiste à placer les séquences des couches dans un cadre qui découpe le temps en unités ayant une valeur mondiale. Les unités chronostratigraphiques qui ordonnent les séquences des dépôts correspondent à des intervalles de temps géologiques distingués comme unités géochronologiques.

Pour ce qui concerne le Quaternaire la hiérarchie des unités chronostratigraphiques et géochronologiques correspondante est la suivante : le système (période) quaternaire est divisé en deux séries (époques) : le Pléistocène et l'Holocène. Les étages sont ensuite subdivisés en chronozones (chrons) : biozones, cénozones et climatozones.

En pratique le stratigraphe décrit selon une approche pluridisciplinaire les séries locales en distinguant les éléments lithostratigraphiques et biostratigraphiques. Ensuite il tente des corrélations de région à région, d'une province sédimentologique à une autre, de domaine à domaine, d'un continent à l'autre. Il peut proposer alors un cadre des échelles chronostratigraphiques qui doivent être remodelées en fonction des progrès. Les unités chronostratigraphiques doivent être établies à partir de gisements ou régions types, le stratotype où l'on doit avoir une séquence sans lacune renfermant des éléments de corrélation.

3. Définition actuelle du Quaternaire

Le Quaternaire est subdivisé en deux époques géologiques : Pléistocène et Holocène. Une troisième époque est actuellement proposée : l'Anthropocène.

Le *stratotype* correspondant à son début, au commencement du Gélasien (début du Pléistocène), est la coupe stratigraphique de *Monte San Nicola* près de Gela en Sicile.

Bien que l'*International Commission on Stratigraphy* (I.C.S.) ait proposé d'étendre le Néogène jusqu'à nos jours en y incluant le Pléistocène et l'Holocène, *The Geologic Time Scale* (2012) maintient ces deux époques géologiques dans le Quaternaire. Tant que la proposition de création de l'Anthropocène n'est pas retenue, l'Holocène correspond à l'actuelle époque géologique.

- Notation chronostratigraphique : q ou IV
- Stratotype : Coupe de Monte San Nicola près de Gela en Sicile (Italie)
- Niveau : Période (Système)
- Ere correspondante : Cénozoïque

Stratigraphie

- Début : -2,6 Ma
- Fin : en cours

Subdivisions

- Pléistocène
- Holocène

Le Quaternaire est l'époque la plus récente de l'histoire de la terre: les dernières 2,6 millions d'années. Il est caractérisé par l'apparition des humains ainsi que des cycles de période glaciaire/interglaciaire répétés, qui ont fortement influencé les montagnes et leur environnement.

Le Quaternaire correspond à la dernière période de l'histoire géologique de la terre. Sa durée est comprise entre 2 et 3 millions d'années. C'est au cours du Quaternaire qu'apparaissent les premiers hommes et que s'y déroule toute l'évolution de l'Homme et de ses techniques. Il est marqué par plusieurs phases de refroidissements climatiques connus sous le nom de glaciations, séparées par des périodes de réchauffements où le climat est proche de celui que l'on connaît actuellement.

Chaque changement climatique entraîne donc des modifications de la faune et de la flore.

La dernière glaciation a eu lieu durant le Paléolithique supérieur. C'est l'époque des chasseurs de rennes. Entre 35 000 ans et 18 000 ans, la région est abandonnée par les hommes. Après le maximum de froid, peu à peu elle est réoccupée par les chasseurs du Paléolithique final à partir de 13 000 ans avant notre ère. A la fin de la glaciation, vers 10 000 ans avant notre ère, tous les continents de la planète sont colonisés par l'Homme.

Chronologie du Paléolithique

De	à	Les différentes périodes		
Limite inférieure	Limite supérieure			
- 35 000 environ	de - 10 000 environ	Paléolithique supérieur	Pléistocène	Préhistoire
- 100 000 environ	- 35 000 environ	Paléolithique moyen		
- 1,6 Ma environ	- 100 000 environ	Paléolithique inférieur		
- 5,3 Ma environ	- 1,7 Ma	Période Pré-Paléolithique archaïque	Pliocène	

Méthodes et outils

- Repérage des contextes géomorphologiques favorables à l'enregistrement des données sédimentologiques et palynologiques : tourbières, cône de déjection, formations colluviales de bas de versant et formations fluviales.

Prospection archéologique de surface et sondages géoarchéologiques (Gagnaire, 1986, 1996, 2002 ; Cubizolle et Georges, 2002 et 2003) pour la détection des indices d'habitat et plus généralement de présence humaine ou de matières premières.

Le pollen est un puissant marqueur de la réponse de la végétation aux changements climatiques du Quaternaire. Lors des périodes froides, les assemblages polliniques dominés par les herbacées reflètent des milieux ouverts. A l'inverse, lors des périodes de réchauffements climatiques, l'augmentation des taux de pollen d'arbres témoigne de la reconquête forestière.

Appliquée aux derniers millions d'années en suivant une démarche actualiste, la palynologie va également servir à décrire les environnements passés. En effet, le pollen émis, transporté puis déposé sur le sol peut se conserver lorsqu'il est enfoui rapidement dans le sédiment. La période géologique du Quaternaire se caractérise par l'émergence puis la récurrence de cycles climatiques depuis 2,6 millions d'années. Les analyses polliniques entreprises sur des sédiments quaternaires enregistrent les dynamiques environnementales en réponse à ces changements climatiques.

4. Anthroposphère

(anthropos, « être humain ») et (kainos, « nouveau »)

L'**Anthropocène** est un terme, relatif à la chronologie de la géologie, proposé pour caractériser l'époque de l'histoire de la Terre qui a débuté lorsque les activités humaines ont eu un impact global significatif sur l'écosystème terrestre.

L'Anthropocène serait la période durant laquelle l'influence de l'être humain sur la biosphère a atteint un tel niveau qu'elle est devenue une « force géologique » majeure capable de marquer la lithosphère.

L'Anthropocène est un concept de plus en plus utilisé dans les médias et la littérature scientifique mais toujours discuté par la communauté scientifique géologique – spécifiquement au sein de la Commission Internationale de Stratigraphie (C.I.S.) de l'Union Internationale des Sciences Géologiques (UISG) – qui détermine les subdivisions de l'échelle des temps géologiques.

5. Importance de la géologie du quaternaire

Pour les projets de génie civil, les événements géologiques récents (soit depuis le début du Quaternaire, environ) sont d'une grande importance. D'une part, les formations quaternaires sont pour la plupart situées à l'interface lithosphère-atmosphère et donc les ouvrages les rencontrent presque toujours ; nous « héritons » en particulier de formations issues de périodes où le climat était fort différent du nôtre : dépôts glaciaires, par exemple. D'autre part, les processus d'évolution actifs à la surface du globe peuvent poser des problèmes de sécurité aux personnes ou de stabilité aux ouvrages ; or les processus

actifs aujourd'hui, éruptions volcaniques ou séismes par exemple, l'ont presque toujours été également dans un passé géologique récent, et peuvent donc être étudiés par les méthodes de la géologie.

6. Les glaciations (D'après le géologue allemand, Albrecht Penck)

Une période glaciaire est une phase climatique et géologique de la Terre pendant laquelle une grande partie des continents est gelée. Il y a eu de nombreuses glaciations dans l'histoire de la Terre et la fin de la période géologique tertiaire et la période quaternaire se caractérisent par leur grande fréquence.

Si l'on exclut la glaciation du Donau, quatre grandes glaciations se sont succédées, suivies chacune d'une période de réchauffement plus ou moins prolongée, ce sont :

- **Biber**, environ de – 3 Ma à -1.8 Ma
- **Danau**, de -1.8 Ma à – 1.2 Ma
- **Günz**, de - 1.2 Ma à - 750.000 ans
- **Mindel**, de - 650.000 à - 300.000 ans
- **Riss**, de - 250.000 à - 120.000 ans

La glaciation rissienne commence il y a 250 000 ans et s'achève vers – 120 000. Au cours du premier interstade, dans une steppe peuplée de rennes, de chevaux et de rhinocéros, vit l'homme de Tautavel (Pyrénées-Orientales), qui a laissé le plus ancien crâne d'hominidé daté avec certitude en Europe. Les derniers représentants de la faune de climat chaud, tels le tigre à dents de sabre et le rhinocéros étrusque, s'éteignent peu à peu. Au cours d'interstades, l'éléphant antique et l'hippopotame, repliés vers le sud, se répandent de nouveau.

L'interglaciaire Mindel-Riss paraît plus chaud et plus humide que le climat actuel. Aux abords de la mer Méditerranée, un paléosol rouge, le ferretto, est le témoin d'une altération des roches active et profonde. Le site de Saint-Acheul, qui a donné son nom à l'Acheuléen, est occupé par ses premiers habitants.

- **Würm**, de - 120.000 à - 10.000 ans (4 épisodes)

Au Würm, dernière glaciation du Quaternaire, les glaciers n'ont pas rejoint partout la limite extrême atteinte en Europe par les glaciers rissiens, mais le froid a été encore plus vif. La faune arctique, renne, bœuf musqué, perdrix des neiges, envahit l'Europe. Bouquetins, chamois et marmottes descendent vers les plaines, où ils rencontrent bisons et aurochs. Cerfs et sangliers prolifèrent lors des interstades, au cours desquels le climat se réchauffe.

L'interglaciaire Riss-Würm (de – 120 000 à – 80 000 ans), représenté par l'Elémien de l'Europe du Nord, est défini par des dépôts lacustres et marins qui reposent sur des argiles morainiques rissiennes et qui supportent les dépôts fluvio-glaciaires de la dernière glaciation. Le niveau de la mer est alors à peine supérieur au niveau actuel (environ de 6 à 8 m). La reconquête de l'Europe du Nord par la chênaie mixte est en cours pendant la deuxième des six phases climatiques, puis recule lors de la troisième phase, plus humide.

Ces chiffres sont approximatifs.

- Tardiglaciaire

Au tardiglaciaire (Würm supérieur), des vagues de froid se poursuivent. La toundra, caractérisée par une rosacée en coussinet, *Dryas octopetala*, qui a donné son nom aux trois stades du dryas, s'étend sur l'Europe septentrionale et médiane. Mais, sous les latitudes moyennes, l'été est plus long et plus ensoleillé que dans la toundra actuelle. Les hommes et de nombreux animaux, comme l'ours des cavernes, se réfugient dans les grottes.

- **L'holocène ou postglaciaire (de – 10 000 ans à aujourd'hui)**

Une rapide fusion des glaciers, amorcée en Europe il y a dix mille ans environ, marque le début de la transgression flandrienne, qui modifie le tracé des littoraux. Les rivages, situés vraisemblablement entre 120 et 70 m au-dessous du niveau actuel lors du maximum glaciaire et entre 100 et 50 m au Würm, lors de la régression préflandrienne, se rapprochent du niveau actuel. Après avoir été libérées rapidement du poids des glaciers, les marges continentales se sont soulevées, lentement, par compensation isostatique. Le mouvement n'est pas encore achevé aujourd'hui; il se poursuit au rythme de 10 m par millénaire dans les îles et les continents proches de la zone arctique. Le mammoth, le rhinocéros laineux et l'ours des cavernes disparaissent. Le renne remonte vers le nord. Au cours du préboréal, la forêt colonise les plaines occupées auparavant par la toundra. La tourbe commence à s'accumuler dans les dépressions mal drainées. La fusion de l'inlandsis scandinave provoque le recul du front glaciaire et la formation d'un lac baltique où s'accumulent les argiles à varves. La mer à Yoldia submerge le lac à la suite du relèvement glacio-eustatique du niveau marin.

- **Le boréal (de – 8 500 à – 7 500 ans)**

Au boréal (environ de – 8 500 à – 7 500 ans), l'orme et la chênaie mixte se substituent aux pins et aux bouleaux, premiers colonisateurs de la toundra. En Fennoscandie, la compensation isostatique annule, entre – 9 000 à – 8 000 ans, les effets de la transgression. Le lac à ancylus succède à la mer à Yoldia. Le climat, encore sec, devient humide au cours de l'Atlantique (de – 7 500 à – 4 500 ans) et se réchauffe.

La reprise de la transgression flandrienne pendant cette période atlantique et le ralentissement du mouvement isostatique changent le lac Baltique en mer à littorines vers – 4 000 ans. Le pas de Calais se forme à la même époque.

- **Le subboréal (de – 4 500 à – 2 800 ans)**

Entre – 4 500 et – 2 800 ans environ, au subboréal, le climat devient moins chaud et plus sec qu'au cours de l'atlantique. L'expansion du hêtre, l'humification et l'acidification des tourbières indiquent ensuite un retour à l'humidité qui distingue le subatlantique.

- **L'action de l'homme au postglaciaire**

Au cours de la période postglaciaire, l'action de l'homme s'est considérablement renforcée. Certes, de nombreux groupes vivent encore longtemps de la chasse, de la pêche et de la cueillette, prolongeant le paléolithique par l'épipaléolithique. Mais, en Orient, s'amorce dès le IX^e millénaire une économie de production. La domestication, puis la culture des céréales favorisent la sédentarisation. Ce mode de vie néolithique se propage vers l'Europe occidentale. Succédant à la métallurgie du cuivre, l'âge du bronze, qui commence au III^e millénaire, marque le début de la protohistoire.

7. Le développement des Hominidés

Apparus au cours du Pliocène, il y a 3,6 millions d'années» (et peut-être même à la fin du Miocène), les hominidés vont évoluer assez rapidement malgré des conditions de vie difficiles, surtout en Europe.

Venus d'Afrique australe et orientale, en passant par le moyen Orient et l'Asie, ils gagnèrent peu à peu l'Europe, en subissant de multiples transformations en nouvelles lignées et nouvelles espèces, toujours de plus en plus évoluées.

Si l'Afrique de l'Est perdait son monopole de "**berceau de l'humanité**" ? Des travaux publiés dans la prestigieuse revue *Science*, jeudi 29 novembre, pourraient ouvrir cette possibilité : ils révèlent que des archéologues ont découvert en Algérie des outils en pierre taillée remontant à 2,4 millions d'années. Des objets bien plus anciens que ceux trouvés dans cette région jusqu'à présent.

Les galets en calcaire et en silex taillés ont été découverts à Sétif, à 300 km à l'est d'Alger, par une équipe de chercheurs internationaux dont des chercheurs algériens. Les outils ressemblaient exactement à ceux dits Oldowan, trouvés jusqu'alors principalement en Afrique de l'Est.

Ils ont aussi déterré à proximité plusieurs dizaines d'ossements animaux fossilisés, présentant ce qui ressemble à des marques d'outils – de véritables outils de boucherie préhistoriques. Ces ossements proviennent d'ancêtres crocodiles, éléphants, hippopotames ou encore girafes.

8. Les conséquences d'une glaciation

Une **glaciation** (ou englaciation) est une **période glaciaire**, c'est-à-dire à la fois une phase paléoclimatique froide et une période géologique de la Terre durant laquelle une part importante des continents est englacée.

Les glaciations ont d'abord été mises en évidence grâce à leurs traces morphologiques (moraines, blocs erratiques) dans les vallées alpines à la fin du XIX^e siècle.

Depuis les années 1950, l'étude des rapports entre les différents isotopes de l'oxygène dans les sédiments prélevés par carottage au fond des océans a confirmé et précisé l'existence de nombreuses fluctuations climatiques plus ou moins cycliques (cf. *Stades isotopiques marins* et *Chronologie isotopique*).

A chaque glaciation a succédé une période de réchauffement plus ou moins longue, rétablissant un climat plus clémente, soit du type tempéré humide (Atlantique), soit sec avec des steppes froides. Ces périodes ont été appelées interglaciaire, ou "interstades"

a) *Conséquences géologiques;*

Une importante modification des rivages s'est produite par suite de l'abaissement, parfois important du niveau des océans; l'eau d'évaporation, stockée par les glaciers sous forme de glace, n'a pas suivi le cycle naturel de récupération par ruissellement.

- baisse du niveau de la mer (glacio-eustasie) : le stockage de glace sur les continents provoque la baisse du niveau des océans (de l'ordre de 120 m lors de la dernière période glaciaire) et provoque l'émergence d'une partie des plateaux continentaux ;

- contraction océanique ;

- mouvements tectoniques verticaux (glacio-isostasie) : sous le poids de la glace, des mouvements tectoniques verticaux affectent les régions englacées et leur marges (enfouissement lors de la glaciation, soulèvement ou *rebond isostatique* lors de la déglaciation) ;

- modification de la circulation océanique mondiale : Elle est alors complètement transformée (avec des influences réciproques, complexes et méconnues dans le détail, sur le climat).

b) *Conséquences écologiques:*

A chaque glaciation, une partie de la flore et de la faune a disparu, soit par l'action directe du froid, soit, pour la faune, par migration vers des régions plus méridionales (les espèces soumises à un froid trop important pour elles, doivent descendre vers les plaines et/ou se rapprocher de l'équateur).

Les proboscidiens (mastodontes, éléphants) disparaissent les premiers, quittant l'Europe pour l'Afrique et le moyen-Orient avec les hippopotames et les rhinocéros.

Seuls subsistent encore, durant la troisième glaciation, les grands mammifères à toison laineuse, rhinocéros laineux, mammouths, ours des cavernes et certains herbivores, rennes, aurochs, chevaux, rongeurs qui réussissent à s'adapter à la maigre végétation des steppes froides.

Enfin, la quatrième glaciation, très sévère, surtout au Würm final, fait disparaître les mammouths, rhinocéros laineux et ours des cavernes définitivement.

Notons cependant que l'homme, le plus grand prédateur y fut aussi pour quelque chose...

8.1. Les traces des paysages glaciaires et périglaciaires du Quaternaire

Les glaciations du Quaternaire ont produit des inlandsis, des calottes glaciaires et le développement de langues glaciaires qui ont couvert et marqué de nombreuses montagnes, y compris en zone intertropicale et des espaces aujourd'hui submergés par la remontée de la mer (plateau continental) qui a suivi la déglaciation.

Les glaces épaisses ont raboté certains reliefs ou entamé le sol d'une manière spécifique. Leur fonte a ensuite libéré une énorme quantité d'eau ; cette double action, associée à des phénomènes de cryoturbation, de solifluxion (gélifluxion)... a laissé de nombreuses traces encore visibles dans les régions anciennement englacées.

Certains modelés d'accumulation et d'érosion en sont notamment caractéristiques. Les ôs, drumlins et chenaux proglaciaires marquent ainsi encore de nombreux reliefs glaciaires et périglaciaires des Alpes, des Pyrénées, des Vosges, du Massif central et de l'Alaska, du Spitzberg, de l'Islande, etc

8.2. Les formes et formations glaciaires

Les *quaternaristes* observent et étudient :

- des vallées, des cirques et des moraines. Dans les vallées, en particulier, il est possible de connaître l'altitude atteinte par la glace lors des glaciations en utilisant certaines formes héritées de celles-ci – les sites témoins – tels les épaulements que présentent parfois les arêtes descendues des sommets latéraux en direction du talweg des vallées.
 - Ces diverses formes périglaciaires, parfois regroupées sous le nom d'hydrolaccolites, comprennent les pingos, les palses et les lithalses dont les reliques sont des laquets. La plupart d'entre elles sont apparues pendant les époques glaciaires, essentiellement dans le nord de l'Europe ; mais à l'heure actuelle encore, des hydrolaccolites prennent naissance sous les climats froids de l'Alaska et du nord-ouest du Canada par exemple.
 - des formations dites kettles, des drumlins, des pipkrates, des laquets, des « fers à repasser » et des dreikanter.
 - d'épais dépôts de loess et de limons, accumulés sur de vastes surfaces en Amérique du Nord, sur les plateaux et les plaines d'Europe moyenne et en Chine septentrionale et, dans l'hémisphère Sud, en Argentine (Pampa). Transportés par le vent, les loess finissent par former une couverture plus ou moins épaisse (jusqu'à 200 m en Chine), rendant fertiles ces régions mais en posant des problèmes de stabilité (sols très vulnérables à l'érosion). Par exemple, la région des Börde (en Allemagne) ou celle de Shanxi (vallée du Huang He en Chine) sont tapissées de loess.
- Certains paysages actuels : formations végétales, lacs, etc. sont des héritages directs de ces épisodes climatiques :
- des landes d'origine glaciaire : par exemple, la plaine de la Geest (Allemagne) et la plaine polonaise sont concernées par les dépôts morainiques du Quaternaire avec de nombreuses landes (Lande de Lunebourg) ou de collines (Mazurie polonaise) encadrant des fleuves qui coulent vers le nord ;
 - des paysages de marais et de tourbières (marais de Pinsk en Ukraine)
 - des lacs (Lac Ladoga, Lac Onega en Russie ; Grands Lacs en Amérique du Nord).

9. La notion de cycle interglaciaire-glaciaire

Une période interglaciaire est une période séparant deux glaciations et durant laquelle les températures moyennes de la planète sont relativement élevées. L'Holocène, époque géologique actuelle, est une période interglaciaire. Il dure depuis la fin de la dernière période glaciaire, il y a environ 11 700 ans.

- *Les cycles glaciaires*

La fin du Cénozoïque est marquée par le retour de glaciations, dites quaternaires, d'environ 2,6 millions d'années à 12 000 ans avant le présent.

Les glaciations quaternaires correspondent à la mise en place d'un climat qui se refroidit et au retour cyclique de périodes froides (dites glaciaires) et tempérées (interglaciaires).

Depuis le début du Q, se sont déroulés une vingtaine de cycles interglaciaire-glaciaire. La durée d'un cycle peut être estimée à 100 000 ans. Le cycle se compose d'une phase tempérée, ou chaude, sensiblement comparable à l'actuel, appelée interglaciaire et d'une phase froide, ou phase glaciaire. L'interglaciaire représente environ 1/10 du cycle, le glaciaire 9/10. Il faut savoir toutefois que les périodes très froides sont aussi des exceptions puisqu'elles ne sont estimées qu'à environ 1/10^e d'un cycle.

- *L'évolution d'un cycle*

Actuellement nous évoluons sous une phase tempérée, il s'agit de l'interglaciaire Flandrien. La dernière période glaciaire (Weichsélien) s'est achevée il y a environ 10 000 ans BP (début du Préboréal, début Holocène).

Les changements climatiques, constants au cours du Quaternaire, vont entraîner avec eux de profonds changements paléo-environnementaux. Les changements les plus profonds vont naturellement s'opérer lors du passage entre les phases tempérées et les phases froides.

Durant les périodes glaciaires, on assiste à un développement important des glaciers aux pôles (inlandsis -calotte polaire, est un glacier de très grande étendue se présentant sous la forme d'une nappe de glace recouvrant la terre ferme et qui peut atteindre plusieurs milliers de mètres d'épaisseur. Ils peuvent se prolonger à la surface de la mer en formant des barrières de glace- scandinave pour l'Europe du nord-ouest) et de montagnes (Alpes, Pyrénées, Balkans, Carpates...). La conséquence de cette rétention d'eau sous forme de glace est une baisse massive de l'approvisionnement en eau douce des océans, phénomène se traduisant par une baisse des niveaux marins.

Les phases antérieures de l'Histoire humaine relèvent de la *paléoclimatologie*. Elles permettent de suivre, au fil de la dérive des continents et des périodes de glaciations successives, les variations liées au changement climatique ayant affecté les sols et les espèces, selon leur nature. Le cycle du carbone (cycle biogéochimique) en est désormais partie prenante. Le cycle des changements climatiques permet aujourd'hui d'estimer 6 glaciations antérieures : Biber, Donau, Gunz, Mindel, Riss et le Würm. (voir plus haut).

10. Changement climatique et Facteurs à l'origine des changements climatiques

Le réchauffement climatique, réchauffement planétaire, réchauffement global ou dérèglement climatique est le phénomène d'augmentation des températures moyennes océaniques et de l'air, induit par la quantité de chaleur piégée à la surface terrestre, mesurée depuis plusieurs décennies, du fait des émissions de gaz à effet de serre (CO₂, etc.)

Un changement climatique, ou dérèglement climatique, correspond à une modification durable (de la décennie au million d'années) des paramètres statistiques (paramètres moyens, variabilité) du climat global de la Terre ou de ses divers climats régionaux. Ces changements peuvent être dus à des processus intrinsèques à la Terre, à des influences extérieures ou, plus récemment, aux activités humaines.

- **Facteurs astronomiques**

Cette théorie est confirmée par l'étude de l'oxygène 18, et largement approuvée par la communauté scientifique explique les cycles climatiques glaciaires / interglaciaires par les variations d'excentricité de l'orbite de la Terre autour du soleil, d'obliquité (des changements dans l'inclinaison de l'axe de la Terre et de précession (changement graduel d'orientation de l'axe de rotation) terrestre et des collisions avec les astéroïdes ou des comètes.

- **Facteurs géologiques**

Comme la dérive des continents, des changements dans la topographie des fonds océaniques, les éruptions volcaniques, la formation des montagnes, l'érosion et l'altération des roches.

- **Facteurs océaniques**, comme l'effet du phénomène El Nino, des changements dans la circulation océanique, des variations du niveau de la mer, la formation de glace, les efflorescences phytoplanctoniques et la production de sulfures de diméthyle (Biochimie : composé organo-sulfuré de formule chimique (CH₃)₂S, produit notamment par le phytoplancton et certaines bactéries).

- **Facteurs intervenant à la surface de la Terre**, notamment l'effet de la végétation sur l'albédo de la surface (la blancheur ou le degré de réflexion de la lumière incidente provenant d'un objet) et l'évapotranspiration, les effets des plans d'eau, y compris l'irrigation et la poussière.

- **Facteurs atmosphériques** tels que le rôle des gaz à effet de serre, du dioxyde de soufre et les polluants atmosphériques, les effets de la couche nuageuse et les interactions entre l'air, la Terre et la mer.

GEOCHRONOLOGIE DU QUATERNAIRE. LES METHODES DE DATATION

1. Datations relatives

Méthodes fondées sur les phénomènes naturels, non calibrées ou par profils

- Varves
- Dendrochronologie
- Stratigraphie
- Biostratigraphie
- Téphrochronologie
- Paléomagnétisme
- Archéomagnétisme
- Isotopes de l'oxygène
- Variation climatique

2. Introduction

L'histoire de l'homme, comme celle de la Terre se situent dans le temps et l'une des grandes difficultés de ces disciplines réside dans la datation. A la base de toute méthode de datation, il y a nécessairement un processus évolutif lié au déroulement du temps.

Les premières recherches d'un chronomètre furent tentées en Sciences de la Terre en utilisant un phénomène qui se serait accru plus ou moins régulièrement avec le temps. On a tout d'abord utilisé la vitesse d'accumulation sédimentaire et d'altération. Puis on est passé au comptage de données rythmiques naturelles comme les stries d'accroissement des fossiles, des arbres (dendrochronologie), des varves avec leurs feuillets successifs d'hiver et d'été. Toutes ces méthodes de datation ont une valeur locale et une utilisation limitée dans le temps (fig. 1)

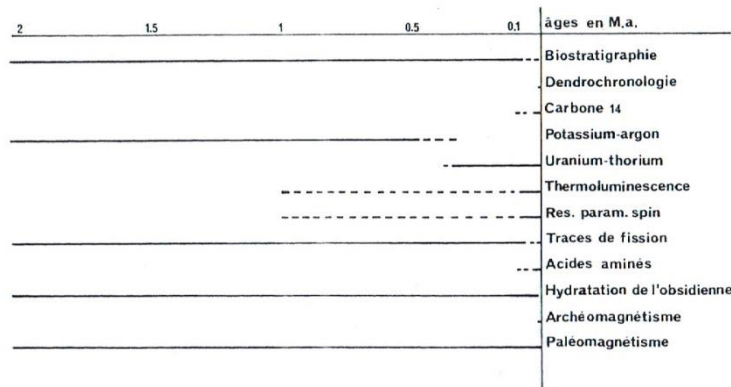


Fig. 1- Les domaines chronologiques couverts par les principales méthodes de datation (d'après Giot et Langouet, 1984)

La biostratigraphie fondée sur le phénomène de l'évolution biologique est une méthode de datation relative. D'autres méthodes enfin qui utilisent les phénomènes physico-chimiques donnent des résultats quantifiés. Elles ont fait tellement impression qu'on les a tout d'abord dites « absolues ». En fait, ce sont des méthodes physiques quantitatives qui conservent une certaine relativité, du fait que les échantillons se trouvent dans des environnements ayant subi le plus souvent une évolution complexe perturbant les conditions initiales.

3. Principales méthodes utilisées en Géochronologie

3.1. La biostratigraphie

La biostratigraphie est une méthode qui utilise le phénomène irréversible de l'évolution biologique. Dans le premier temps, on procédait par analyse des associations de faunes successives (apparition et disparition d'espèces). On s'appuie maintenant en plus sur la distinction des degrés évolutifs des diverses lignées au moyen de méthodes statistiques d'analyses de données et l'on aboutit à une biostratigraphie à haute résolution. Cette méthode implique que l'on connaisse bien le phénomène évolutif. Or il faut savoir que les lignées peuvent avoir des évolutions différentes. Certaines lignées peuvent rester stables pendant des milliers, voire des millions d'années, en stase morphologique. Ces espèces ne peuvent être utilisées que dans des groupements d'espèces où sont seuls significatifs leur première et leur dernière apparition. D'autres lignées sont globalement stables mais ont une grande

variabilité morphologique potentielle qui ne s'exprime que partiellement sous la forme d'écophénotypes adaptés aux conditions locales et momentanées du milieu. Ces écophénotypes ont alors une signification écologique et paléoclimatique mais pas réellement biostratigraphique dans le sens de la chronologie.

Enfin, il existe des lignées qui présentent des évolutions graduelles à rythme d'ailleurs variable. Il semble que ce gradualisme phylétique résulte, dans la plupart des cas d'hétérochronies de développement, c-à-d de l'extension dans le temps des processus ontogénétiques qui règlent la constitution des individus. Seules ces lignées à évolution continue, se prêtent à la biostratigraphie fine en distinguant les degrés évolutifs.

Monde vivant :

Domaine → Règne → Embranchement → Classe → Ordre → Famille → Genre → Espèce

On arrive actuellement au stade où, grâce aux méthodes statistiques et à l'utilisation de l'outil informatique, chaque degré évolutif pourra être défini par des paramètres quantitatifs, et la biostratigraphie à haute résolution. Elles s'appliquent du Pliocène supérieur à la fin du Pléistocène moyen. Au Pléistocène supérieur l'évolution est trop peu marquée pour servir de chronomètre.

3.2. La dendrochronologie

Reconstruire le climat, des zones tempérées et datation.

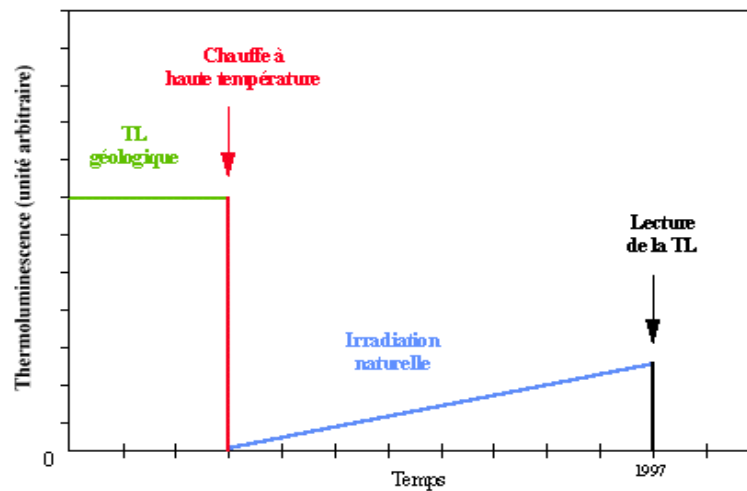
Elle est fondée sur la croissance saisonnière des arbres par dénombrement des anneaux concentriques successifs appelés cernes. Cette méthode utilise les arbres ayant une grande longévité qui peuvent permettre de remonter respectivement à 7000 ans BP et au-delà de 200 ans AT (Actually Time). La largeur des cernes est conditionnée en Amérique du Nord par les précipitations, en Scandinavie par les températures estivales. En Europe c'est le chêne qui permet de reconstituer les grandes séquences (exp. 6000BP en Allemagne), (Fig. 2a et 2b).

Deux arbres contemporains portent les mêmes signatures climatiques, les mêmes cernes. Il est possible d'après l'épaisseur de ces cernes d'établir un signal qui statistiquement peut se recouvrir et être identique. Cela permet d'obtenir une datation de l'arbre et ainsi de l'année d'abatage de cet arbre.

La limite de la méthode : 7000 à 10 000ans

Anneaux de croissance

La largeur de l'anneau est fonction de températures et de précipitations.



Utilisation en archéologie, expertise d'œuvre d'art (céramique)

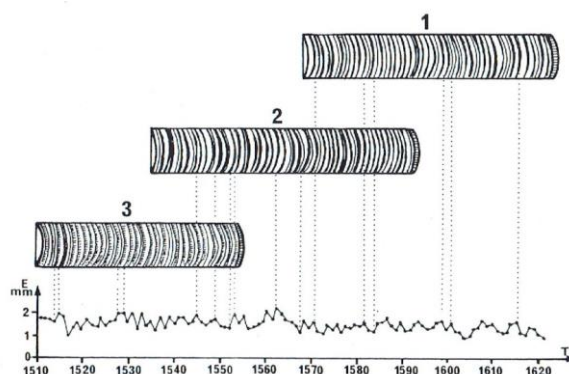


Fig. 2a- La dendrochronologie
(d'après Giot et Langouet, 1984)

Elaboration d'une grande séquence de référence grâce au chevauchement de séquences plus courtes obtenues à partir des troncs d'arbres 1, 2 et 3. La séquence de référence montre les variations de l'épaisseur des cernes (E en mm).

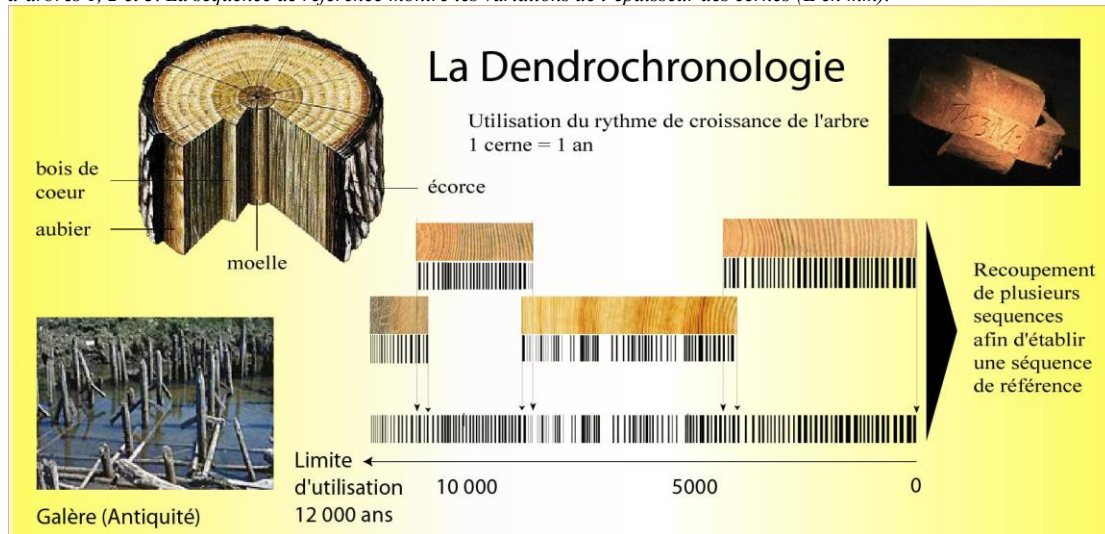


Fig. 2b- La dendrochronologie : utilisation du rythme de croissance de l'arbre

3.3. Archéomagnétisme

Direction du champ magnétique terrestre.

Les minéraux ferromagnésiens s'orientent par rapport au pôle magnétique (direction) de la terre. Cette direction varie suivant les années et un repérage précis des différences entre l'actuel et la direction du passé permet de donner une date.

Les matériaux concernés sont des argiles chauffés (et prélevé in situ)

Limite de la méthode : 7 000 à 10 000ans, avec une précision de 20 ans.

Limites de la méthode

- durée depuis le dernier temps de chauffe
- matériel doit contenir quartz, feldspaths ou zircon
- «capacité d'emmagasinage» des minéraux : 700 000 ans

4. Les datations physiques à partir des isotopes radioactifs

Ces méthodes utilisent des phénomènes physico-chimiques qui suivent des lois ; voire statistiques simples formulables mathématiquement. Beaucoup sont fondés sur la loi de la décroissance de la radioactivité découverte par Rutherford et Soddy en 1905. Ces lois donnent la possibilité d'établir un chronomètre. Dans tous ces phénomènes il faut trouver un fait marquant qui puisse être mis en corrélation avec un événement géologique ou archéologique, un état initial repérable à partir duquel on puisse mesurer une évolution liée au déroulement du temps. Dans la méthode du carbone 14 (^{14}C) absorbé par cet individu diminuera inexorablement. Pour la thermoluminescence ; ce sera le chauffage d'un galet dans un foyer de l'homme préhistorique.

Les datations absolues permettent de fournir un cadre chronologique, mieux défini, aux divers évènements jalonnant le Quaternaire.

Elles permettent une ordonnance des faits dans le temps. Une échelle de temps relative est réalisée par une comparaison des événements les uns par rapport aux autres.

Une échelle de temps absolue apporte une date à un fait, c'est un gain de précision.

Les méthodes de datations absolues utilisées sont diverses et fonctionnent suivant des conditions précises. Chaque méthode doit ou ne peut intervenir qu'en fonction des conditions physico-chimique et de la nature du site comme des matériaux à disposition.

Méthodes fondées sur la croissance ou la décroissance radioactive (Fig. 3)

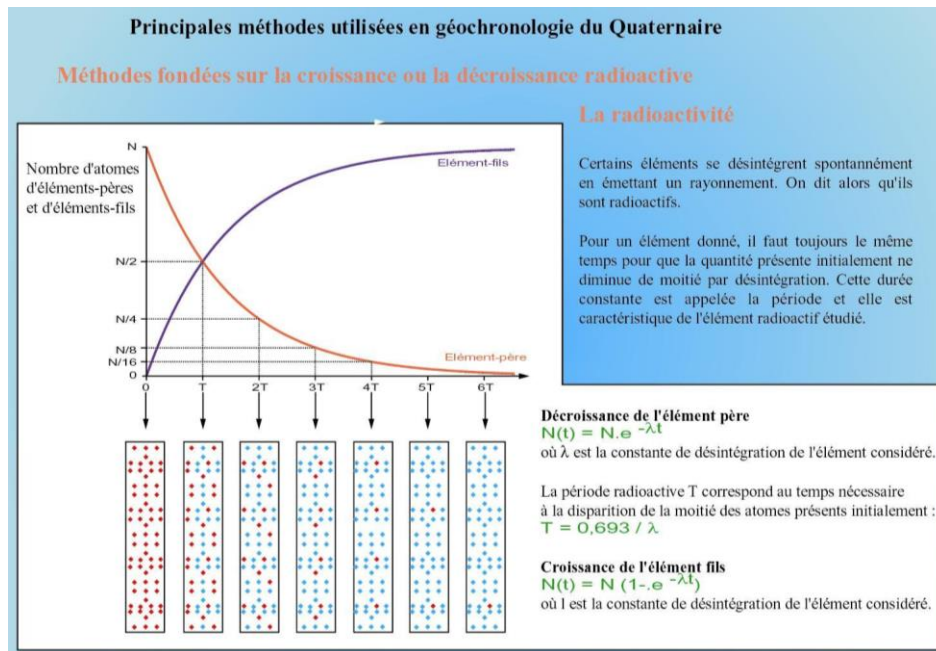


Fig. 3. Principe de la croissance ou la décroissance radioactive

4.1. Datation au carbone 14

Les isotopes du carbone: C11, C12, C13, C14

Le C14 est produit en haute atmosphère (par des rayons cosmiques, puis il est intégré dans le C*O₂. C'est sous cette forme qu'il est absorbé par les plantes et organismes photosynthétique, puis dans le reste de la chaîne alimentaire, (os, chair, bois)

Le C14 fait partie intégrante de la matière organique, à l'heure actuelle comme à un temps T0.

Enfouit, la dose (à T0) ou la concentration du C14 devient une paléodose.

Le C14 est un élément radioactif. Sa période T= 5570 ans, (période de demi-vie).

Les datations au C14 sont exprimées en BP, avec un intervalle de confiance de 95 % (soit deux écarts-types).

4.2. Potassium/Argon

Potassium 40 (se transforme en calcium 40 et Argon 40)

C'est le rapport entre les deux éléments qui va permettre de déterminer une date.

Présent dans les minéraux : Feldspath, micas... dans les roches volcaniques.

Limite de la méthode : (10 000 à plusieurs millions d'années, (500 000) à plusieurs millions d'années).

Période: 1,25 Ma

4.3. Uranium/Thorium

U238 se transforme en Th230, et Pb. Ces éléments sont présents dans les sédiments, coraux, coquillages, travertins, stalagmites

Période: 4,47Ma. (Fig. 4)

Limite de la méthode: (500 000ans)

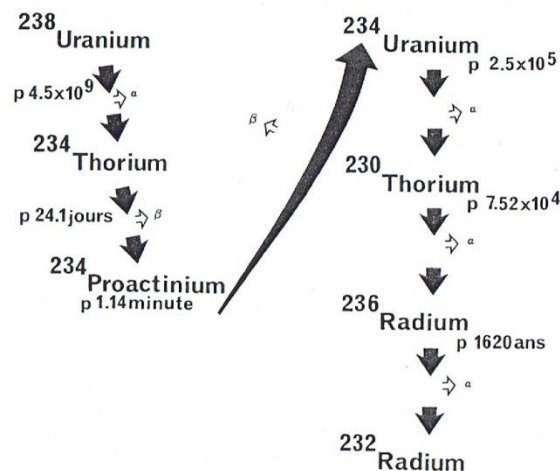


Fig. 4- Désintégration des isotopes de l'Uranium 238 en Thorium et Radium.

Ce que l'on date

- Carbonates
- Dents et ossements de grands mammifères
- Sédiments
- Minéraux volcaniques
- Bois et charbons
- Éléments chauffés

Les isotopes radiogéniques – Isotopes Cosmogéniques

Différents nucléides cosmogéniques

- ^{14}C , ^{10}Be , ^{36}Cl

Définition : Éléments chimiques de même numéro atomique (et donc de même nom et de même position dans la classification de Mendeleïev), mais qui diffèrent par leur masse atomique.

Equation de la radioactivité : $N_t = N_0 e^{-\lambda t}$

Où N_0 : nombre d'atomes de l'élément père à l'instant initial (non déterminable)

N_t : nombre d'éléments fils (déterminable) présents à la date t

λ : constante radioactive

Equation de la demi vie : $t = \ln 2 / \lambda$

Exemples :

$^{10}\text{Be} = 1,5 \cdot 10^6$ ans

$^{14}\text{C} = 5730$ ans

$^{36}\text{Cl} = 3 \cdot 10^5$ ans

Les nucléides cosmogéniques produits dépendent du type de composition minérale de la roche.

4.4. Datation par les acides aminés

Les acides aminés contenus dans un organisme vivant sont lévogyre exclusivement.

Après le mort de l'organisme, il y a une activité chimique qui exécute la transformation de ces acides aminés de lévogyre vers dextrogyre.

Le phénomène se poursuit jusqu'à l'équilibre: 50%.

Limite de la méthode: (1000 à 1 millions d'années).

4.5. Hydratations de l'obsidienne

Après le taille d'un outil sur de l'obsidienne, il se produit une hydratation de la surface de l'objet. En fonction de cette épaisseur il est possible d'établir une date précise jusqu'à 1 millions d'années.

- Archéomagnétisme

Direction du champ magnétique terrestre

Les minéraux ferromagnésiens s'orientent par rapport au pôle magnétique (direction) de la terre. Cette direction varie suivant les années et un repérage précis des différences entre l'actuel et la direction du passé permet de donner une date.

Les matériaux concernés sont des argiles chauffés (et prélevé in situ)

Limite de la méthode : 7000 à 10 000 ans, avec une précision de 20 ans.

4.6. La résonance paramagnétique électronique

La résonance paramagnétique électronique (RPE), résonance de spin électronique (RSE), ou en anglais *electron spin resonance (ESR)* désigne la propriété de certains électrons à absorber, puis réémettre l'énergie d'un rayonnement électromagnétique lorsqu'ils sont placés dans un champ magnétique (Fig.5).

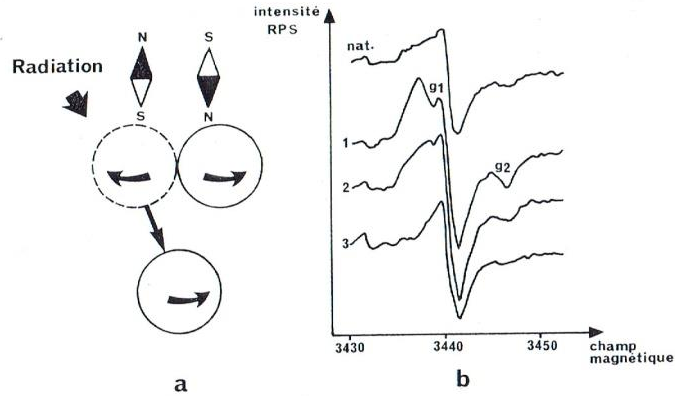


Fig. 5- La résonance paramagnétique de spin

La résonance paramagnétique électronique a été découverte en 1945 par Zavoisky.

Un électron dans une molécule est associé à un nombre quantique dit nombre de spin : $M_s = +1/2$ ou $M_s = -1/2$.

Les électrons ont tendance à s'apparier deux à deux (un électron $M_s = +1/2$ et un électron $M_s = -1/2$). Le spin de la molécule est alors : $S = 0$.

Lorsque ce n'est pas le cas, le système contient un ou des électron(s) célibataire(s) ou non-appariés : s'il n'y en a qu'un, le spin est de $1/2$. L'électron peut alors se positionner sur deux niveaux de valeurs énergétiques différentes : $M_s = +1/2$ et $M_s = -1/2$ (schéma ci-dessous, Fig. 6).

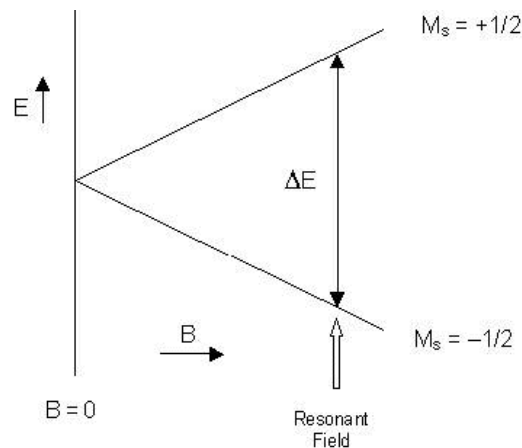


Fig. 6. Résonance paramagnétique électronique

Sous l'action d'un champ magnétique B, l'énergie apportée peut faire passer l'électron d'un niveau énergétique à l'autre : la transition a lieu si : $\Delta M_s = 1$. C'est le phénomène de résonance paramagnétique électronique.

L'énergie de l'onde électromagnétique (9 à 10 GHz) qui fait passer le spin de l'électron d'un niveau énergétique à l'autre vaut : $\Delta E = h\nu = \gamma \cdot \beta \cdot B$

- ΔE : différence d'énergie entre les deux états de spin
 - h : constante de Planck
 - ν : fréquence de l'onde électromagnétique
 - γ_e : rapport gyromagnétique de l'électron paramagnétique (qui vaut : $-q/2.m_e$)
 - β : magnéton de Bohr de l'électron
 - B : champs magnétique

5. Thermoluminescence

Un cristal exposé à des rayonnements emmagasine de l'énergie qu'il émet ensuite sous la forme de lumière quand on le chauffe. Grâce à ce phénomène, on date des statuettes en terre cuite.

Mesurer l'énergie contenue dans des pièges du réseau cristallin. Des électrons libres sont piégés dans les « réservoirs » du réseau cristallin, (anomalies de cristallisations) ...

La quantité d'électrons augmente avec le temps ...(Fig. 7).

U238, Th230, K40, émetteurs d'énergie.

Éléments chauffés?

Les pièges se vident à cette occasion. Pierre de foyer, céramique, couche de lœss (sous lave volcanique), silex chauffés, quartz, tous ces éléments sont enfouis et cachés des rayonnements du soleil.

La dose annuelle correspond à l'énergie libérée par rayonnement des éléments radioactifs de la roche, ou de l'encaissant. La dose archéologique est déterminée comme étant l'énergie stockée, et donc libérée après chauffage. Limite de la méthode : (100 000 ans)

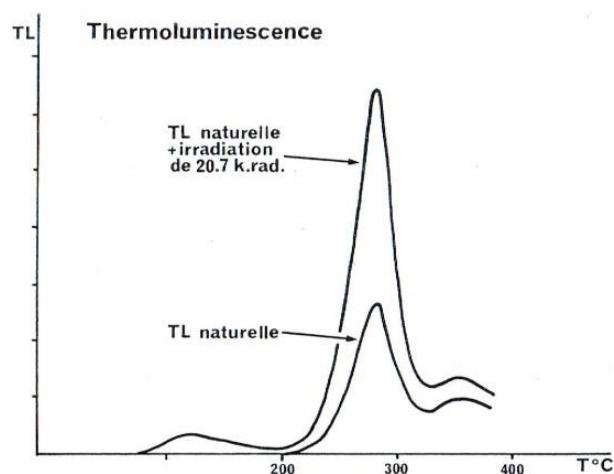


Fig. 7- Courbes de thermoluminescence (exemple d'échantillon de plancher de stalagmite supérieur de la grotte de l'Arago : âge 15 350 +/- 800ans ; d'après Valadas et Massot, 1981)

Ce phénomène est fondé sur l'accumulation par les minéraux, tels le quartz, l'alumine ou le feldspath, de l'énergie provenant de la radioactivité ambiante. Un chauffage à 500 °C ou une exposition à la lumière durant toute une journée libèrent cette énergie sous forme lumineuse. Ces deux propriétés, accumulation et remise à zéro, sont les piliers de plusieurs méthodes de datation. On mesure, d'une part, la paléodose, c'est-à-dire l'énergie emmagasinée depuis la dernière remise à zéro et, d'autre part, la dose reçue chaque année par l'échantillon : le rapport de la paléodose sur la dose annuelle fournit l'âge de l'objet analysé.

Références bibliographiques

Ciampalini, A. Firpo, M. (2015) Depositional architecture and sequence stratigraphy of Pleistocene coarse-grained deltas along the Ligurian coast (Italy). *Journal of Earth System Science*, 124.

De Schepper, S. Head, M. J. (2009) pliocene and pleistocene dinoflagellate cyst and acritarch zonation of dsdp hole 610a, eastern north atlantic. *Palynology*, 33.

Doukas, Constantin S., Papayianni, Katerina. (2016) *Vertebrate Paleobiology and Paleoanthropology Paleanthropology of the Balkans and Anatolia*.

Gaudenyi, Tivadar, Nenadić, Draženko, Jovanović, Mladjen, Bogičević, Katarina. (2014) The stratigraphical position and the use of the term Eopleistocene in Serbian geological literature. *Quaternary International*, 319.

Gibbard, Philip L., Head, Martin J., Walker, Michael J. C.. (2010) Formal ratification of the Quaternary System/Period and the Pleistocene Series/Epoch with a base at 2.58 Ma. *Journal of Quaternary Science*, 25.

Habib, Kazi Ahsan, Jeong, Dageum, Myoung, Jung-Goo, Lee, Youn-Ho. (2015) Population panmixia and the Pleistocene demographic expansion of spotty belly greenling *Hexagrammos agrammus* in the East Sea and Northwest Pacific. *Ocean Science Journal*, 50.

Head, Martin J., Gibbard, Philip L.. (2015) Formal subdivision of the Quaternary System/Period: Past, present, and future. *Quaternary International*, 383.

Higashi, Hiroyuki, Ikeda, Hajime, Setoguchi, Hiroaki. (2015) Molecular phylogeny of *Shortia sensu lato* (Diapensiaceae) based on multiple nuclear sequences. *Plant Systematics and Evolution*, 301.

- Jeffries, Daniel L., Copp, Gordon H., Lawson Handley, Lori, Olsén, K. Håkan, Sayer, Carl D., Hänfling, Bernd. (2016) Comparing RADseq and microsatellites to infer complex phylogeographic patterns, an empirical perspective in the Crucian carp, *Carassius carassius*, L.. *Molecular Ecology*, 25.
- Kuzmina, S. A.. (2015) Quaternary insects and environment of northeastern Asia. *Paleontological Journal*, 49.
- Laine, Angélique. Gauthier, Emilie. Garcia, Jean-Pierre. Petit, Christophe. Cruz, Frédéric. Richard, Hervé. (2010) A three-thousand-year history of vegetation and human impact in Burgundy (France) reconstructed from pollen and non-pollen palynomorphs analysis. *Comptes Rendus Biologies*, 333.
- Mashchenko, E. N., Amirkhanov, Kh. A., Ozherelyev, D. V.. (2015) Morphology of a fossil elephant calf (Archidiskodon, Elephantidae) from the Oldowan Muhkai Ila site. *Doklady Biological Sciences*, 465.
- Palombo, M.R., Brugal, J.-Ph.. (2010) Quaternary mammal communities at a glance. *Quaternary International*, 212.
- Paombo, Maria R.. (2009) Biochronology, paleobiogeography and faunal turnover in western Mediterranean Cenozoic mammals. *Integrative Zoology*, 4. DOI: 10.1111/j.1749-4877.2009.00174.x
- Pan, Tsun-You. Lin, Andrew Tien-Shun. Chi, Wen-Rong. (2015) Paleoenvironments of the evolving Pliocene to early Pleistocene foreland basin in northwestern Taiwan: An example from the Dahan River section. *Island Arc*, 24.
- Papanikolaou, Maria D., Triantaphyllou, Maria V., Platzman, Ellen S., Gibbard, Philip L., Niocaill, Conall Mac. Head, Martin J. (2011) A well-established Early-Middle Pleistocene marine sequence on south-east Zakynthos island, western Greece: Magneto-biostratigraphic constraints and palaeoclimatic implications. *Journal of Quaternary Science*, 26.
- Pavia, Marco. Zunino, Marta. Coltorti, Mauro. Angelone, Chiara. Arzarello, Marta. Bagnus, Cristina. Bellucci, Luca. Colombero, Simone. Marcolini, Federica. Peretto, Carlo. Petronio, Carmelo. Petrucci, Mauro. Pieruccini, Pierluigi. Sardella, Raffaele. Tema, Evdokia. Villier, Boris. Pavia, Giulio. (2012) Stratigraphical and palaeontological data from the Early Pleistocene Pirro 10 site of Pirro Nord (Puglia, south eastern Italy). *Quaternary International*, 267.
- Philip L. Gibbard et Martin J. Head, «The Definition of the Quaternary System/Era and the Pleistocene Series/Epoch», *Quaternaire*, vol. 20/2 | 2009, 125-133.
- Ruddiman, William F. (2018) Three flaws in defining a formal 'Anthropocene'. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 42.
- Walker, M. J. C. Berkelhammer, M. Björck, S. Cwynar, L. C. Fisher, D. A. Long, A. J. Lowe, J. J. Newnham, R. M. Rasmussen, S. O. Weiss, H. (2012) Formal subdivision of the Holocene Series/Epoch: a Discussion Paper by a Working Group of INTIMATE (Integration of ice-core, marine and terrestrial records) and the Subcommittee on Quaternary Stratigraphy (International Commission on Stratigraphy). *Journal of Quaternary Science*, 27.