

La falaise du Tréport

90 millions d'années d'Histoire

La falaise du Tréport est riche d'une histoire longue de 90 millions d'années. Comment se sont fabriquées ces roches qui s'élèvent à 100 m au dessus de la mer ?



La côte d'Albâtre longue de 140 kilomètres entre les estuaires de la Seine et de la Somme doit son nom à la couleur de l'eau au pied de la falaise. La falaise culmine à Criel près du Tréport, le site le plus célèbre, Étretat est mondialement connu.

La falaise du Tréport est principalement constituée de craie. Quand on est sur la plage et que l'on regarde l'entrée du tunnel du funiculaire, on observe des alignements horizontaux plus ou moins foncés que l'on peut suivre des yeux très loin surtout à droite du tunnel. Dans la partie supérieure de la falaise des lits horizontaux de silex très foncés, assez régulièrement répartis sont bien visibles.

La falaise est donc principalement constituée de craie avec des lits de silex.

Nous allons essayer de répondre à deux questions. Comment se sont fabriquées ces roches? Pourquoi cette haute falaise?

Les géologues nous disent que ces roches se sont formées dans la mer, il y a 90 millions d'années. Vous pouvez lire l'annexe N° 1 pour savoir comment ils ont déterminé cet âge. Si vous l'admettez comme acquis, vous continuez votre lecture.

Fabrique de la falaise

les ingrédients

La craie est une roche contenant presque exclusivement du calcaire qui ressemble à celui qui entartre votre bouilloire ou votre cafetière, en langage scientifique c'est du carbonate de calcium, la formule chimique est CaCO_3 , 1 atome de calcium Ca, 1 atome de carbone C et 3 atomes d'oxygène O_3 .

Le silex est une roche constituée principalement de silice, il contient aussi de l'eau, jusque 10% et des oxydes de métaux en très petite quantité qui lui donnent les reflets colorés, noir, blanc, rose... La silice est le matériau le plus courant sur la terre, sa formule chimique est SiO_2 soit 1 atome de silicium Si pour 2 atomes d'oxygène O_2 .

Donc pour former la craie et le silex il faut du calcium et du silicium dans l'eau de mer. Il faut aussi du carbone et de l'oxygène.

Le calcium et le silicium sont des métaux qui n'existent pas comme corps simples dans la nature, c'est à dire sans être unis à au moins un autre corps simple, mais ils participent à la constitution de nombreuses roches. Lorsque celles ci sont altérées, le calcium ou le silicium et d'autres corps simples sont dissous par l'eau qui ruisselle; ils peuvent rester en solution, et arriver à la mer. Ils peuvent aussi être absorbés par des organismes vivants avant d'arriver à la mer. Ces éléments peuvent aussi provenir de sites plus ou moins lointains et être apportés dans la mer par le vent.

Le carbone et l'oxygène proviennent de l'atmosphère. Sous l'action du vent, de la marée, des tempêtes aussi bien que de la lumière et de la chaleur du soleil, la surface de la mer et la base de l'atmosphère sont brassées comme dans une machine à faire le pain et se mélangent. La mer absorbe du gaz carbonique, et donc du carbone et de l'oxygène contenus dans l'atmosphère.

- La transformation des ingrédients

Il y a 90 millions d'années le niveau de la mer était environ 200 mètres plus haut qu'actuellement.

Tout le bassin de Paris, qui pour les géologues comprend aussi le sud de l'Angleterre, était immergé. Pour les curieux, la cause de cette inondation est expliquée dans **l'annexe N°2**.

Dans cette mer vivaient de nombreux organismes microscopiques ou plus gros comme les ammonites ainsi que des poissons, parmi beaucoup d'autres les raies et les requins.

La craie est formée d'une accumulation de coccolithes ce qui en grec signifie pépins de pierres. Ce sont de très petites plaques calcaires de quelques millièmes de millimètre provenant d'organismes marins: les coccolithophoridés. Ces algues microscopiques prélèvent dans l'eau de mer du carbone, de l'oxygène et du calcium pour fabriquer un test, c'est à dire une enveloppe rigide qui supporte et protège l'organisme. Quand l'algue meurt, ce test tombe au fond de la mer et s'il n'est pas dissous, il devient coccolithe.

Pour **les silex** c'est un peu plus compliqué. De très petits organismes animaux ou végétaux appelés diatomées et silicoflagellés utilisent le silicium et de l'oxygène pour fabriquer un test de silice. Quand

l'organisme meurt, la plupart du temps ce test tombe dans la boue au fond de la mer et se dissout. Cependant, sous certaines conditions la silice est préservée à l'état solide dans des défauts de la boue, par exemple des micro-terriers d'animaux fousseurs. C'est le début du silex, et tant que les conditions resteront favorables le silex pompera du silicium et de l'oxygène dans la mer, pour grossir; et de silex en silex un banc complet pourra se former.

Des micro-organismes tels que les coccolithophoridés, les diatomées et les silicoflagellés existent depuis plusieurs centaines de millions d'années et leurs cousins vivent encore de nos jours.

Au fond de la mer les tests et autres débris sédimentent, c'est à dire s'accumulent, se tassent et se transforment. Il faut environ 3 millions d'années pour accumuler les 100 mètres de craie et de silex observables au Tréport.

- Pourquoi les silex sont disposés en couches horizontales

Les géologues nous disent qu'il y a 90 millions d'années non seulement la température sur la terre était beaucoup plus élevée que maintenant, voir annexe N°2, mais qu'elle variait. Pendant quelques milliers d'années la température baisse, puis elle remonte, elle fait du yo-yo. Les curieux peuvent lire **l'annexe N°3**.

Quand la température sur la terre est plus élevée, les organismes qui aiment la silice sont moins nombreux, si bien qu'au fond de la mer uniquement la craie peut se former. Mais quand il fait moins chaud, les organismes qui aiment la silice sont plus nombreux, et les conditions sont favorables pour fabriquer du silex. C'est pour cette raison que les silex sont disposés en couches que l'on distingue très bien dans toute la partie supérieure de la falaise.

Que deviennent ces 100 mètres de craie et silex ?

Il y a 70 millions d'années le niveau de la mer baisse considérablement. Donc tout le Bassin Parisien, et en particulier la région du Tréport, commencent à émerger. Peu après, le continent Afrique rencontre le continent Eurasie; la collision qui se poursuit encore aujourd'hui entraîne la **formation de 2 chaînes de montagnes, les Alpes et les Pyrénées.**

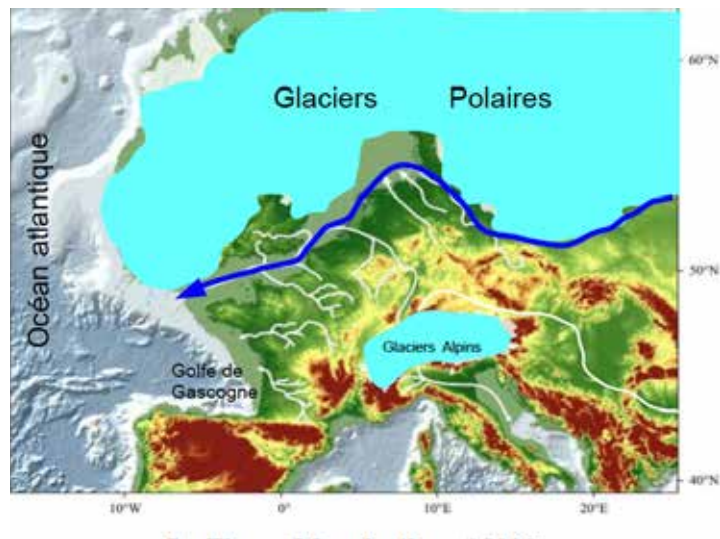
Le Tréport est assez loin de ces montagnes, cependant il en résulte des petites déformations extrêmement lentes, de la croûte terrestre. Ceci est un peu

comparable à ce qui se passe lorsque vous posez de la moquette. Quand vous poussez la moquette déroulée sur le sol, vous avez une grosse bosse (la chaîne de montagne) là où vous poussez et des petits soulèvements ou ondulations 1 ou 2 mètres au delà de la bosse. La région du Tréport est un peu déformée par la poussée du continent Afrique.

Le Fleuve Manche il y a 25 000 ans

Après tout ce temps, nous voilà il y a **25000 ans**, la terre est alors sous climat glaciaire, le Nord de l'Europe sous les glaciers et le niveau de la mer beaucoup plus bas qu'actuellement. Les glaciers polaires empêchent les fleuves du nord-ouest de l'Europe d'atteindre la Mer-du-Nord et la Baltique.

La manche n'est pas une mer, c'est un grand fleuve que les géologues appellent le Fleuve Manche. Ce fleuve coule au fond d'une large vallée, et draine toutes les rivières du nord-ouest de l'Europe, on peut citer l'Elbe, le Rhin, la Meuse, la Somme, la Bresle, la Tamise, la Seine. Le fleuve manche se jette dans l'Océan Atlantique. Il est très probable qu'il existe déjà des falaises le long de ce fleuve comme on en observe actuellement le long de la Seine, par exemple aux Andelys.



Le Fleuve Manche il y a 25000 ans.

Il y a 18000 ans le climat change, la terre se réchauffe, les calottes glaciaires fondent. Une énorme quantité d'eau, provenant de la fonte de ces calottes s'engouffre dans la vallée du Fleuve Manche; le verrou du Pas-de-Calais saute, et la Manche relie la Mer-du-Nord à l'Océan Atlantique.

Et maintenant

Depuis, 15000 ans, la craie est érodée, les silex tombent sur la plage, les falaises sont sculptées comme on les connaît aujourd'hui.

De Marie-Gabrielle Moreau, avec la collaboration de Magali Ader, Jean Besse, Frédéric Fluteau, Nicole Santarelli, Samuel Toucanne. Actifs ou retraités de l'université Paris 7, IPGP ou Ifremer.

L'âge des roches de la falaise

Pour donner un âge aux roches, n'importe où sur la terre, les géologues ont créé la stratigraphie.

La **stratigraphie** est une branche de la géologie qui étudie la succession des dépôts sédimentaires, généralement disposés en strates, mot dérivé de stratus qui signifie couche en latin. Le principe de cette discipline est très simple: **quand 2 strates sont superposées, si elles n'ont pas été bousculées, la plus vieille est celle qui est dessous.** Ce principe a été énoncé dès la fin du 18ème siècle par un géologue britannique.

Au Tréport les géologues ont identifié les fossiles microscopiques ou visibles à l'œil nu qu'ils y ont trouvés ainsi que d'autres caractéristiques physiques ou chimiques de la craie. Ils ont ensuite comparé l'empilement des strates observées au Tréport avec des empilements semblables situés près du Tréport ou beaucoup plus loin. Pour ces observations ils ont utilisé les carrières, le bord des routes, les falaises le long des fleuves et des rivières et aussi les roches traversées par des forages pour chercher de l'eau ou du pétrole. Les géologues ont pu suivre certaines couches ou

strates très loin dans le bassin parisien, jusqu'en Angleterre. Ce bassin ressemble à une pile de crêpes entassées dans une assiette creuse.

La figure ci-dessous montre une coupe géologique du bassin de Paris. Il faut imaginer une gigantesque tranchée verticale, profonde de 3 kilomètres et longue de 550 kilomètres qui traverserait la France d'Ouest en Est, d'Argentan à Épinal en passant par Paris.

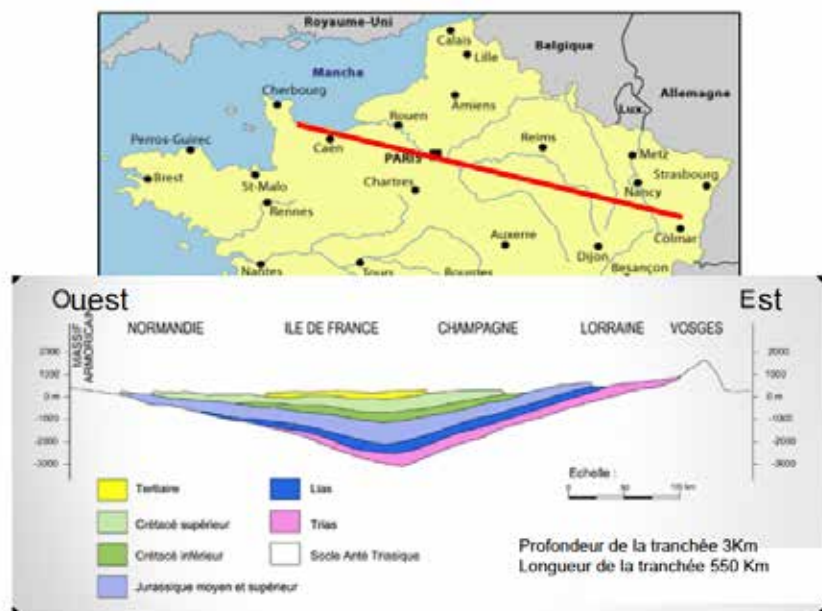
On peut suivre des **crêpes/strates superposées dans l'assiette/bassin de Paris.**

Des empilements plus ou moins semblables, avec les mêmes fossiles ou les mêmes caractéristiques chimiques, ont été trouvés en beaucoup d'autres lieux dans le monde. Pour le monde entier, ces couches **ayant le même âge stratigraphique ont reçu le même nom.** Exemple, la couche dessinée en vert pâle, que l'on observe au Tréport est datée du Crétacé supérieur.

Depuis le milieu du 20ème siècle les chercheurs ont quantifié la durée des temps géologiques grâce à la radioactivité naturelle des roches du monde entier. Ils ont chiffré en années les âges stratigraphiques des différentes couches.

Ces âges chiffrés sont indiqués dans le tableau sous la figure.

Les roches de la falaise du Tréport se sont formées vers 90 millions d'années, environ 10 millions d'années après le début du Crétacé supérieur.



Début et fin des niveaux dessinés sur la figure

âge stratigraphique.	début en millions d'années	fin en millions d'années
plus récent	2,6	
tertiaire	66	2,6
Crétacé supérieur	100	66
Crétacé inférieur	145	100
Jurassique moyen et supérieur	174	145
Lias	201	175
Trias	252	201
plus ancien		252

Le niveau de la mer

Il y a 90 millions d'années, le niveau de la mer était beaucoup plus haut qu'actuellement. Pourquoi ?

À cette époque il faisait beaucoup plus chaud qu'actuellement, il n'y avait pas de glaces sur la terre. Cependant, cela ne suffit pas pour recouvrir le Bassin Parisien de 200 mètres d'eau. Les chercheurs ont calculé que la fusion de toutes les glaces de la planète (glaciers de montagnes aussi bien que calottes polaires) entraînerait une augmentation du niveau de la mer de seulement environ 60 mètres par rapport au niveau actuel.

La cause d'une inondation de 200 mètres ou plus est dans l'histoire même de la croûte terrestre.

Tous les continents existant sur la terre qui étaient dispersés vers moins 400 millions d'années ont

fini de ce rassembler il y a 235 millions d'années. C'est la **Pangée**, nom que donna Alfred Wegener, astronome et météorologue allemand en 1912 à ce supercontinent. En grec ancien Pangée signifie toutes les terres.

Depuis 200 millions d'années, les grandes variations du niveau de la mer dépendent de la dislocation de ce supercontinent. Cette histoire, entre moins 260 millions d'années et aujourd'hui, est résumée dans la figure jointe, par quelques cartes dessinées comme des photographies instantanées.

L'ouverture progressive des nouveaux océans (océan Atlantique, océan Téthys aujourd'hui disparu, océan Indien et océan circum-Antarctique) se fait aux dépens du vieil Océan mondial la **Panthalassa** qui entourait la Pangée. Quand deux continents se séparent, du **magma**, c'est à dire des roches très chaudes en fusion, monte entre les deux continents et forme une chaîne de volcans sous-marins appelée **dorsale océanique**.

Ceci a 2 effets:

a) ces volcans ont un certain volume, d'autant plus grand qu'ils sont chauds, et donc dilatés, ils occupent un volume non négligeable au fond de la mer.

b) ces volcans émettent du gaz carbonique: CO_2 , qui gagne l'atmosphère. Ce gaz entraîne un effet de serre, et donc une augmentation de la température de l'atmosphère et aussi de la mer. L'eau de la mer en chauffant se dilate aussi.

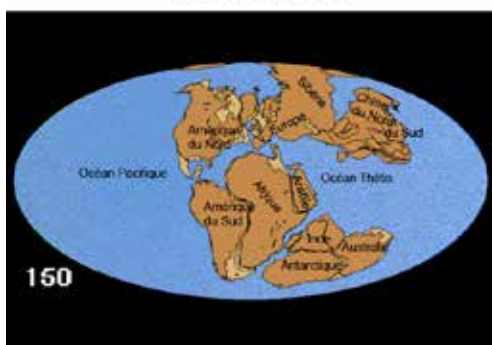
Ces deux effets se cumulent pour faire monter le niveau de la mer. Il en résulte aussi des effets secondaires qui augmentent encore la température et donc le niveau de la mer.

A partir de 160 millions d'années, le super continent Pangée craque de partout, voir la carte correspondante, la longueur totale des dorsales océaniques est grande, le niveau de la mer monte et atteint son maximum vers 75 millions d'années. Le Bassin Parisien et une bonne partie de l'Europe de l'ouest sont sous la mer. De nombreux micro-organismes à l'origine de la craie et des silex pouvaient vivre sans problèmes dans cette mer. Des ammonites et des poissons, comme les raies et les requins y vivaient aussi.

La carte des continents sur la terre il y a 260 millions d'années.



Il y a 160 millions d'années



Il y a 80 millions d'années



Et aujourd'hui



Les variations de climat

Pour décrire les variations du climat dans le passé, les chercheurs utilisent des données physico-chimiques enregistrées dans les sédiments et dans l'eau des glaciers. Le dessin de l'évolution du climat depuis 420 000 ans montre des cycles d'environ 100000 ans. Les chercheurs pensent que cette variabilité existe depuis plusieurs centaines de millions d'années et résulte des cycles astronomiques. Remarque : ce qui figure en orange est important.

Tout le monde sait qu'autrefois, on avait de vraies saisons et qu'aujourd'hui tout est dérégulé. Si le climat change vraiment, comment le sait-on? Le principe du thermomètre a été inventé au début du 17^{ème} siècle par Jean Leucheron, le premier appareil est réalisé peu de temps après à Venise par Santorius, un médecin ami de Galilée. La plus vieille série connue de relevés systématiques de températures a été commencée en Angleterre à la fin de 17^{ème} siècle. **Et avant ?**

Pour la période historique, plusieurs chercheurs ont reconstitué l'histoire du climat grâce aux chroniques de la vie rurale; parmi d'autres données, la date et l'abondance des vendanges et des moissons ou le prix du pain et l'arrivée des famines. Il y a aussi des textes littéraires, par exemple les lettres de Madame de Sévigné dans la deuxième partie du 17^{ème} siècle. D'autre part, au moyen-âge des chroniques d'observations météorologiques qualitatives ont été faites et archivées dans les monastères, elles sont souvent conservées. Quelques chroniques de l'époque romaine nous sont aussi parvenues. **Et avant ?**

La dendrochronologie, dont le principe avait déjà été décrit par Léonard de Vinci, est l'étude des anneaux de croissance des arbres. Le comptage des cernes de croissance permet de déterminer le temps de croissance de l'échantillon du bois étudié. La variation de la taille et des caractéristiques des anneaux montre les conditions climatiques pendant cette croissance. En mettant bout à bout des séquences relatives à des troncs d'arbres de plus en plus vieux, on peut remonter le temps de nos jours à plusieurs milliers d'années. **Et avant ?**

Les chercheurs utilisent des données physico-chimiques enregistrées dans les **sédiments et dans l'eau stockée dans les glaciers.**

Méthode utilisée

On rappelle qu'une molécule d'eau contient 1 atome d'oxygène (O) pour 2 atomes d'hydrogène (H).
Donc **H-O-H** pour symboliser l'eau.

Dans la nature il existe 3 variétés d'atomes d'oxygène qui ne pèsent pas le même poids. L'atome le plus courant, 99,8%, est le plus léger, il pèse 16 unités (nous admettrons cette unité), les chimistes l'appelle ¹⁶O. Ensuite il y a ¹⁸O, environ 0,2%, qui bien entendu pèse 18 unités. ¹⁷O est plus rare, nous n'en parlerons pas ici. D'autre part, un atome d'hydrogène ¹H pèse 1 unité, donc la molécule d'eau la plus courante pèse 18 unités: 16 pour l'atome d'oxygène et 1 pour chacun des 2 atomes d'hydrogène.

Poids de ¹H-¹⁶O-¹H=1+16+1=18 unités

Les molécules avec ¹⁸O sont plus lourdes et pèsent 20 unités; 18 pour l'atome d'oxygène et 1 pour chacun des 2 atomes d'hydrogène.

Poids de ¹H-¹⁸O-¹H=1+18+1=20 unités

L'évaporation de ces molécules d'eau plus lourdes formées avec ¹⁸O, demande plus d'énergie que l'évaporation des molécules d'eau formées avec ¹⁶O.

Il en résulte que dans la vapeur d'eau, au dessus de l'océan, les molécules ¹H-¹⁸O-¹H sont moins nombreuses qu'elles ne le sont dans l'eau de l'océan. La proportion de ¹H-¹⁸O-¹H qui s'évapore en formant l'eau des nuages dépend de la température locale. De même, la proportion de ces molécules ¹H-¹⁸O-¹H qui se condensent quand il pleut ou qu'il neige dépend aussi de la température.

Ensuite, les glaciers sont alimentés par la neige apportée par les nuages, l'eau des glaciers provient donc de l'océan qui s'évapore. Durant les glaciations, une partie de cette vapeur d'eau provenant de l'océan, plus riche en molécules ¹H-¹⁶O-¹H est piégée dans les glaciers. Donc, la proportion de molécules plus lourdes, ¹H-¹⁸O-¹H augmente dans l'océan pendant une glaciation.

Quand la température remonte, les glaciers fondent, leur eau retourne à l'océan, et y ramène les molécules $^1\text{H}-^{16}\text{O}-^1\text{H}$; la proportion de molécules $^1\text{H}-^{18}\text{O}-^1\text{H}$ diminue dans l'océan.

Pendant tout ce temps, les squelettes de la faune microscopique marine qui sédimentent au fond de l'océan enregistrent les variations de la composition de l'eau, en particulier les proportions de $^1\text{H}-^{16}\text{O}-^1\text{H}$ et $^1\text{H}-^{18}\text{O}-^1\text{H}$.

Petits travaux pratiques à imaginer ou à faire à la maison si on a beaucoup de patience pour compter les billes.

Dans un grand sac (l'océan) vous mélangez 100 000 billes, 99800 billes rouges pour 200 billes bleues, il y a $200/100000=0,200\%$ de billes bleues dans le grand sac.

Vous enlevez 10000 billes du grand sac: 9981 billes rouges et 19 billes bleues, pour les mettre dans une petite boîte (les glaciers pendant les périodes froides).

Il y a maintenant $19/90000=0,21\%$ de billes bleues dans le grand sac.

Il y a $19/10000=0,19\%$ de billes bleues au fond de la boîte.

Vous enlevez encore 10000 billes du sac: 9982 billes rouges et 18 billes bleues, pour les mettre en deuxième couche dans la boîte.

Il reste $163/80000=0,204\%$ de billes bleues dans le grand sac.

Il y a $18/10000=0,18\%$ de billes bleues dans la 2ème couche de la boîte.

Si vous remettez les 20000 billes de la boîte dans le grand sac, (déglaçage pendant les périodes chaudes) la proportion de billes bleues dans le sac revient à ce qu'elle était au début de l'expérience: 0,200%.

Les mécanismes réels sont bien sûr infiniment plus complexes que cette expérience, mais celle-ci permet de comprendre pourquoi en allant mesurer la proportion de ^{16}O et ^{18}O , dans chaque couche de la glace polaire (la boîte) et dans chaque couche de sédiments déposés au fond de l'océan (le grand sac) **il est possible d'évaluer le volume de glace sur la terre à un moment donné, et donc de reconstituer l'histoire du climat.**

Prélèvement et Résultats

Parmi toutes les carottes glacières, celle réalisée au dessus du lac de Vostok en Antarctique, est longue de 4000m. Les proportions de ^{16}O et ^{18}O mesurées ont permis de déterminer les variations de température à Vostok depuis 420 000 ans. Ces valeurs sont dessinées sur la Figure N°1, ci-dessous.

Il est donc possible de suivre l'évolution du climat.

Il y a 410 000 ans, point E sur la figure, le climat est tempéré, à peu près comme actuellement. Il se refroidit, avec des courts réchauffements relatifs pendant 90 000 ans, et arrive à un climat glaciaire très sévère aux environs -335 000 ans. Alors il se réchauffe assez vite et redevient tempéré 10 000 ans plus tard à -325 000 ans, point D. Et le cycle recommence; refroidissement pendant 90 000 ans, climat glaciaire vers -250 000 ans et réchauffement en 10 000 ans pour arriver au climat tempéré à -240 000 ans, au point C. Le cycle suivant ressemble aux précédents, avec un climat tempéré à -130 000 ans, point B. Durant le dernier cycle, c'est le même scénario, refroidissement de 90 000 ans, puis réchauffement pendant 10000 ans pour arriver au climat actuel, point A.

Le dessin de l'évolution de climat depuis 420 000 ans ressemble aux 5 dents asymétriques d'une scie. Les chercheurs ont montré que cette évolution du climat en dents de scie asymétriques existe depuis plusieurs centaines de millions d'années. Elle se superpose toujours aux autres phénomènes qui peuvent affecter plus ou moins fortement le climat: volcanisme, tectonique, industrie humaine, etc....

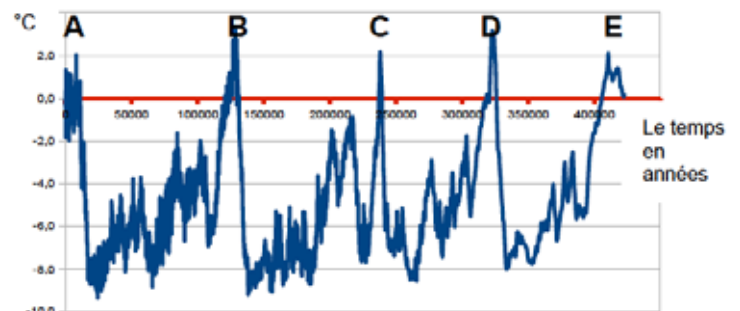


Figure N° 1. Variations de la température près du Pôle Sud depuis 420 000 ans. Le présent est à gauche de la figure, pour remonter le temps on se déplace vers la droite. Un millimètre sur l'axe horizontal représente environ 2000 ans. Les variations

sont dessinées par rapport à la température actuelle; quand la température était la même qu'aujourd'hui, la valeur est zéro. Quand il faisait plus chaud, les valeurs sont positives, quand il faisait plus froid, les valeurs sont négatives.

Pourquoi le climat varie ?

La terre tourne autour du soleil en un an, et elle tourne sur elle-même en 24 heures. Cependant, la terre n'est pas seulement soumise à l'attraction du soleil, toutes les planètes et la lune, ont une action sur elle. De plus la terre n'est pas tout à fait sphérique, elle est aplatie aux pôles et possède un bourrelet équatorial. Le résultat est que son mouvement ressemble à celui d'une toupie qui tournerait indéfiniment en oscillant sur une trajectoire plane, presque circulaire et variable.

Depuis l'antiquité les astronomes ont observé les objets célestes. Progressivement ils ont établi des tables qui permettent de calculer le mouvement des astres et déterminé les cycles astronomiques. D'autre part, dès le 18ème siècle, les géologues se sont interrogés sur l'origine des vallées profondes en forme de U avec moraines et roches striées, des fragments de roche de taille relativement importante déplacés sur de grandes distances, etc.... L'origine glaciaire est établie au début du 19ème. La relation entre les périodes glaciaires et l'orbite de la terre est évoquée par un mathématicien français, Adhémar en 1842; puis montrée par un autodidacte écossais, James Croll en 1875. En 1941 Milutin Milanković, ingénieur astronome serbe, publie La Théorie astronomique du climat, concernant l'ensoleillement et met en évidence l'existence de cycles climatiques (notamment glaciaires) et leur corrélation avec les conditions astronomiques. Les apports conjugués des astronomes et des géologues à partir des années 1950 ont permis de tester et de valider progressivement l'idée d'une influence astronomique dans la variabilité climatique.

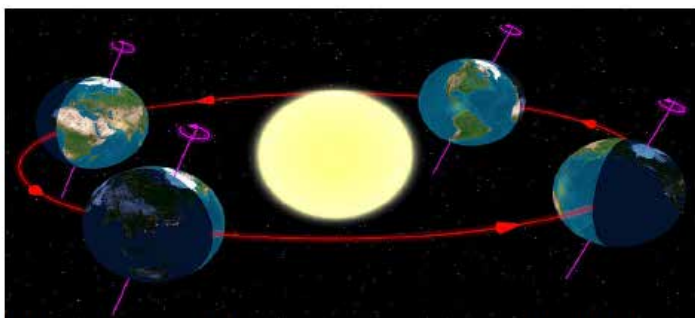


Figure N° 2. Quatre positions de la terre sur sa trajectoire autour du soleil durant une année.

Les 3 caractéristiques des mouvements de la terre autour du soleil

1- Ellipticité : En un an, la terre ne parcourt pas un cercle mais une ellipse autour du soleil (la ligne rouge sur la Figure n°2). On rappelle qu'une ellipse n'a pas de centre, mais 2 foyers, le soleil est un foyer de l'ellipse. L'excentricité de l'ellipse varie de 0 à 6%, cela veut dire que l'orbite de la terre est quasi circulaire, à un peu aplatie. Le grand axe de l'ellipse est toujours le même, il en résulte que l'in-solation augmente un peu quand l'ellipse est plus aplatie puisque en moyenne la distance terre soleil diminue. Les variations de l'ellipse résultent de la combinaison de 2 mouvements se reproduisant chaque 100 000 et 413 000 ans. Actuellement l'orbite est presque circulaire. Ce sont ces signaux qui produisent les cycles en dents de scie A, B, C, D et E, d'environ 100 000 ans sur la Figure 1.

2- Inclinaison de l'axe de rotation ou Obliquité : La terre tourne sur elle-même, ce qui donne le jour et la nuit. Son axe de rotation (violet sur la Figure n°2) n'est pas perpendiculaire au plan de l'ellipse. C'est grâce à cette inclinaison qu'il y a des saisons. Quand un hémisphère est tourné vers le soleil, c'est l'été pour lui et l'hiver pour l'autre hémisphère. L'inclinaison de l'axe de rotation de la terre par rapport à la normale au plan de l'ellipse varie entre 22° et 24,5° ce qui donne des saisons plus ou moins contrastées. Quand l'axe de rotation de la terre est très incliné, les tropiques du Cancer et du Capricorne sont plus éloignés de l'équateur et le cercle polaire est plus éloigné du pôle. En même temps les pôles reçoivent plus de soleil en été, le volume des glaciers polaires diminue. L'axe de rotation de la terre retrouve la même position tous les 41 000 ans. Actuellement, l'inclinaison est de 23,5°.

3- Précession des équinoxes : En plus de la variation de son inclinaison, deux paramètres caractérisent le mouvement de l'axe de rotation de la terre.

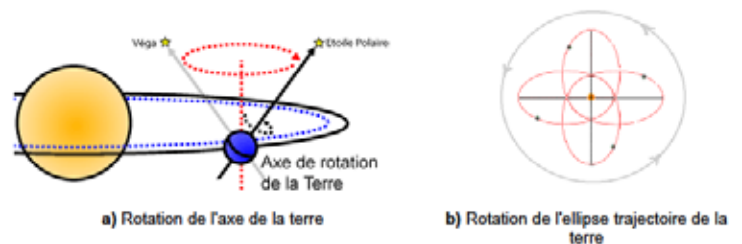


Figure N°3. La Précession des équinoxes

a) L'axe de rotation de la terre décrit un cône autour d'une perpendiculaire au plan de l'ellipse trajectoire de la terre, Figure 3a.

b) En même temps cette trajectoire n'est pas fixe, l'ellipse tourne autour du soleil en restant toujours dans le même plan, Figure 3b. Ces deux mouvements se conjuguent et la cyclicité finale est de 22 000 ans.

Ces mouvements ont deux principaux résultats :

1) Le premier ne nous intéresse pas ici, mais mérite d'être signalé; l'étoile qui marque le pôle Nord (étoile polaire) n'est pas toujours la même, actuellement c'est alpha Ursae Minoris, dans (et il y a) 11000 ans ce sera (c'était) la très brillante étoile Véga, Figure 3a.

2) En ce qui concerne le climat, le résultat est que **les contrastes saisonniers varient dans le temps**. Concrètement, les positions de la terre sur sa trajectoire sont représentées Figure n°4. Actuellement, **pour nous dans l'hémisphère Nord**, l'été arrive quand la terre est la plus éloignée du soleil (Aphé-

lie), ce qui provoque des étés tempérés, tandis que pendant l'hiver, nous sommes près du soleil (Périhélie), nous avons donc des hivers relativement doux. Dans (et il y a) 11000 ans, la situation sera (était) inversée avec des étés plus chauds et des hivers plus froids, toujours pour l'hémisphère nord. C'est évidemment l'inverse pour l'hémisphère sud; actuellement, les hivers y sont plus rigoureux et les étés plus chauds. En fait, il y a beaucoup plus de mer que de continents dans l'hémisphère sud, le contraste des saisons est donc diminué. A cause de la position actuelle des continents sur la terre, les effets de la précession des équinoxes ne sont pas tout à fait symétriques entre les 2 hémisphères.

La combinaison des oscillations se reproduisant tous les 41 000 et 22 000 ans produit les plus petites ondulations, entre les extrêmes A, B, C, D et E sur la courbe des variations de température dessinés Figure N°1.

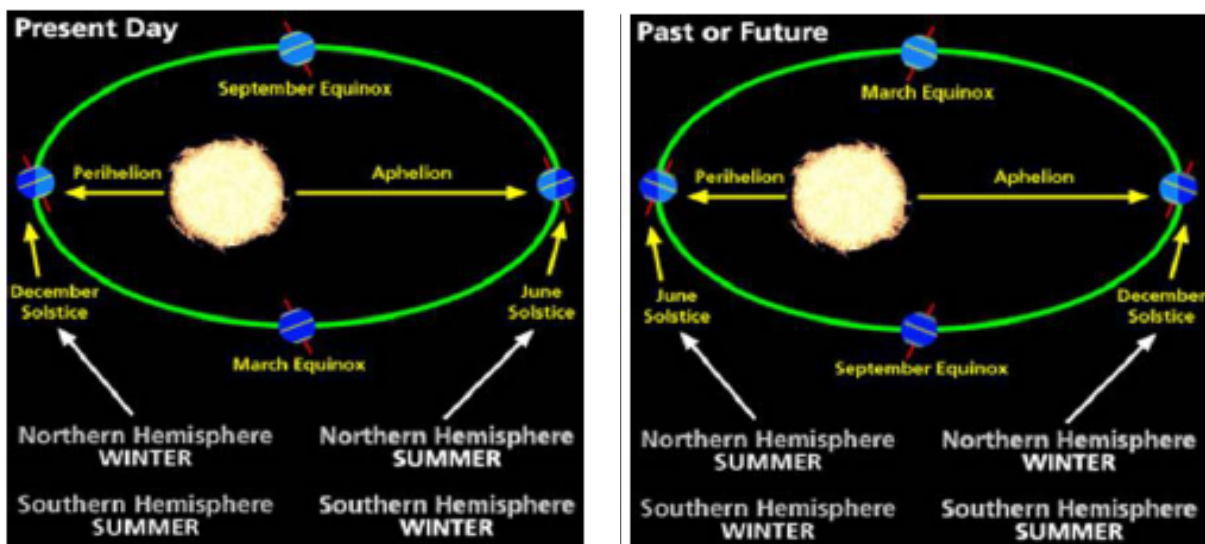


Figure 4. Positions de la terre par rapport au soleil, aujourd'hui et dans (et il y a) 11 000 ans.