

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 115 (1989)
Heft: 11

Artikel: Le climat moyen à la surface du globe (II)
Autor: Fischer, Gaston
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-76969>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 12.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Le climat moyen à la surface du globe (II)¹

2. Les périodes glaciaires du climat de la Terre

2.1. La théorie astronomique de Milankovitch

De nombreuses théories ont été proposées pour expliquer les périodes glaciaires. Celle qui réunit aujourd'hui la majorité des suffrages est le fruit des longs travaux de l'astronome yougoslave Milutin Milankovitch, entre 1920

PAR GASTON FISCHER,
NEUCHÂTEL

et 1938. Cette théorie fait appel aux paramètres de l'orbite terrestre autour du Soleil et parvient à rendre compte de la dizaine de glaciations que l'on a pu identifier au cours du dernier million d'années. On a aussi constaté que les glaciations se caractérisent par des

débuts étalés sur une dizaine de milliers d'années, alors qu'elles se terminent en général plus rapidement, sur environ un à deux mille ans. A présent, la Terre est dans une période interglaciaire. La dernière grande glaciation, appelée Würm, a pris fin voici dix à douze mille ans.

La théorie de Milankovitch considère les effets des changements des paramètres orbitaux de la Terre sur l'ensoleillement moyen des deux hémisphères. Trois paramètres relatifs à l'orbite que la Terre décrit autour du Soleil jouent un rôle important quant à l'insolation. Le premier est l'obliquité de l'axe de rotation propre sur l'écliptique, dont la valeur présente est de

$$I = 23,5^\circ.$$

Le deuxième est l'excentricité de l'orbite, qui vaut maintenant

$$e = 0,017.$$

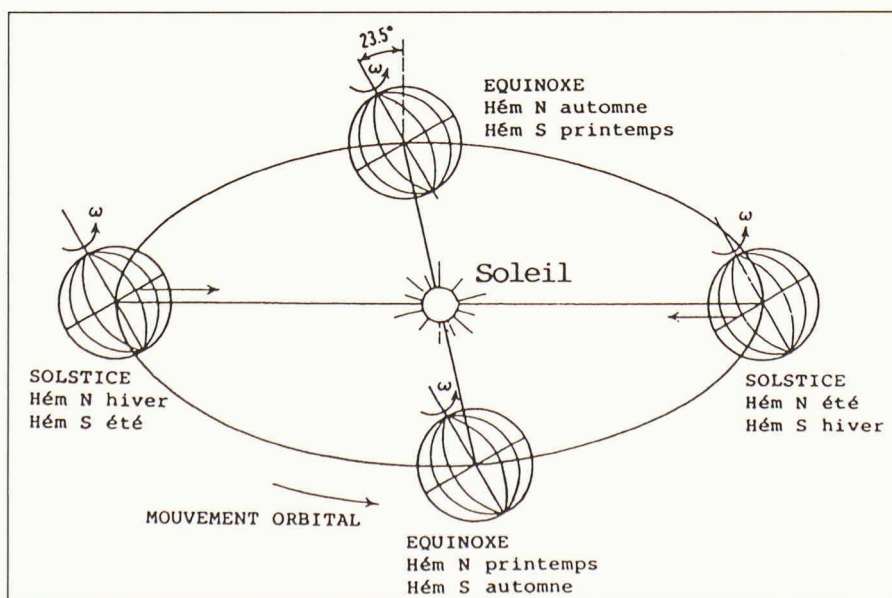


Fig. 5. – Orbite schématisée de la Terre autour du Soleil dans le plan de l'écliptique. La Terre tourne aussi sur elle-même à la vitesse ω , autour d'un axe oblique par rapport à la normale au plan de l'écliptique. La rotation propre crée l'alternance des jours et des nuits. L'obliquité, ou inclinaison, de l'axe de rotation propre combinée au mouvement orbital engendre les saisons.

Le troisième paramètre est la précession des équinoxes. Commençons par présenter ces trois paramètres orbitaux.

2.2. L'obliquité ou inclinaison de l'axe de rotation de la Terre

L'orbite de la Terre autour du Soleil définit un plan qu'on dénomme plan de l'écliptique (fig. 5). En plus de ce mouvement annuel, la Terre tourne journellement sur elle-même autour d'un axe qui accuse une inclinaison par rapport à la verticale du plan de l'écliptique. Comme chacun le sait, la rotation propre de la Terre produit l'alternance des jours et des nuits, alors que l'inclinaison de l'axe de rotation cause le cycle des saisons. Tout cela est bien mis en évidence à la figure 5.

L'inclinaison ou obliquité de l'axe n'est pas un angle absolument fixe. Par suite des interactions gravitationnelles de la Terre avec la Lune, le Soleil et les autres planètes, surtout Jupiter qui est la plus proche et la plus massive des planètes majeures, cet angle varie entre $22,0^\circ$ et $24,5^\circ$ environ, avec une période de 40 000 ans. Lorsque l'inclinaison augmente, le contraste saisonnier des températures entre l'été et l'hiver devient naturellement plus fort. Inversement, ce que dorénavant nous appellerons simplement le *contraste saisonnier* est atténué lorsque l'inclinaison diminue.

Le point important à retenir de cela est que les variations d'obliquité de l'axe de rotation de la Terre produisent une modulation du contraste saisonnier, avec une périodicité de 40 000 ans environ.

2.3. L'ellipticité de l'orbite terrestre

En première approximation l'orbite de la Terre autour du Soleil est une ellipse et le Soleil se trouve à l'un des foyers (fig. 6). Commençons par discuter les effets découlant de cette ellipticité, pour considérer ensuite les consé-

¹ Le premier de cette série d'articles est paru dans *Ingénieurs et architectes suisses*, 9/89, pp. 133-137. Nous les reproduisons avec l'aimable autorisation du quotidien neuchâtelois *L'Impartial*, qui les a publiés dans ses éditions des 4, 5, 25 et 26 octobre 1988, des 23 et 24 novembre 1988 et des 19 et 20 décembre 1988.

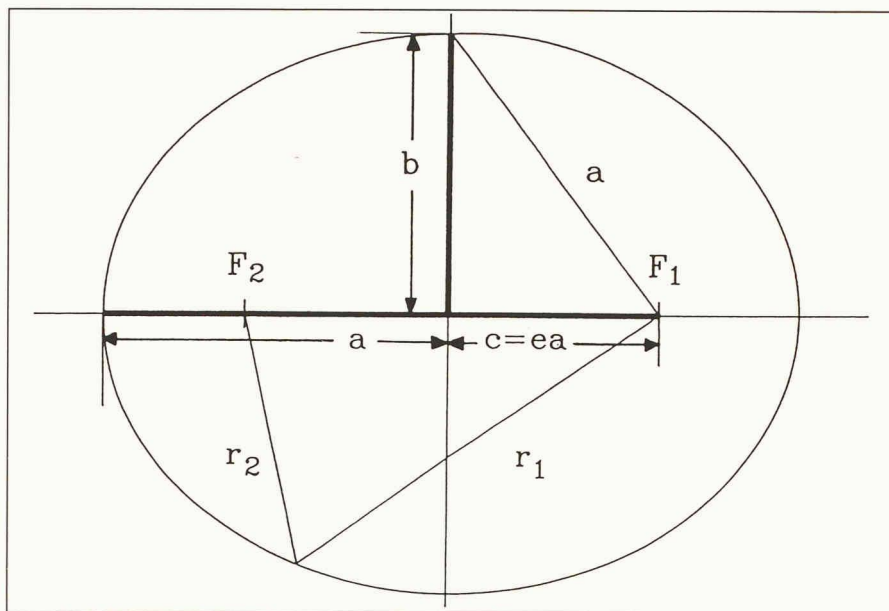


Fig. 6. – Représentation d'une ellipse avec foyers F_1 et F_2 . Les axes de symétrie a et b sont indiqués par des traits plus épais, de même que la distance focale c . La propriété principale des ellipses est que la somme des rayons focaux, $r_1 + r_2 = 2a$. Il en découle que l'excentricité ou ellipticité $e = c/a = \sqrt{1 - b^2/a^2}$. Les valeurs chiffrées de ce paramètre peuvent donner une impression exagérée de l'aplatissement de l'ellipse par rapport au cercle. Ainsi, avec l'excentricité extrême $e = 0,061$ de l'orbite de la Terre, le rapport b/a entre grand et petit axe reste proche de l'unité: $b/a = \sqrt{1 - e^2} = 0,998$, ce qui veut dire que le petit axe de l'ellipse n'est raccourci que de 2 pour mille par rapport au grand axe; en revanche, les foyers se trouvent déjà à 6,1 pour cent du centre! Dans le cas de l'orbite de la Terre, le Soleil se trouverait à l'un des foyers F_1 ou F_2 .

quences des écarts d'une ellipticité parfaite.

On voit bien, à la figure 6, qu'en parcourant son orbite elliptique la Terre se rapproche et s'éloigne du Soleil. Cette oscillation annuelle de la séparation Terre/Soleil produit à elle seule un effet de variations saisonnières, comme l'obliquité dont nous venons de parler. Il y a cependant la différence notoire que ce deuxième effet saisonnier est simultané dans les deux hémisphères, à l'encontre du premier (fig. 5), et il est en général plus faible. Mais il est intéressant de voir comment ces deux effets saisonniers se combinent.

A l'époque présente l'orbite elliptique de la Terre est telle qu'elle se trouve le plus près du Soleil, c'est-à-dire au périhélie de son orbite, aux environs du 4 janvier; elle est à son apogée vers le 6 juillet. Par coïncidence le 4 janvier est situé dans la période la plus froide des hivers de l'hémisphère Nord et c'est précisément à ce moment-là que nous nous trouvons le plus près du Soleil. Le 6 juillet, au contraire, on est en pleine canicule, mais aussi le plus loin du Soleil. De toute évidence, dans l'hémisphère Nord les effets saisonniers combinés causés par l'obliquité et l'ellipticité tendent, en ce moment, à se compenser. Dans l'hémisphère Sud, en revanche, ils se conjuguent pour renforcer ce contraste.

Mais l'ellipticité de l'orbite terrestre, par suite toujours des interactions gra-

vationnelles avec les autres astres les plus proches, n'est pas parfaitement stable; elle connaît deux types de déviations. Tout d'abord, l'ellipse n'est pas exactement fermée, de sorte que la

suite des orbites décrit effectivement une rosette, comme le suggère la figure 7; on pourrait aussi dire que l'ellipse tourne progressivement. Ensuite, la forme de l'ellipse, c'est-à-dire son aplatissement ou ellipticité, change elle aussi. La période de ces deux effets est la même et avoisine les 100 000 ans. Au cours de cette longue période l'ellipticité, ou excentricité e , oscille entre une valeur très faible de 0,0005 et une valeur comparativement grande de 0,061.

Pour bien apprécier l'importance de cette variation on peut calculer le rapport entre les distances de périhélie et d'apogée, qui, selon la figure 6, vaut $(1 - e)/(1 + e)$.

Pour les deux excentricités extrêmes on trouve respectivement 0,999 et 0,885. Cette différence a des conséquences d'autant plus importantes que le rapport entre les ensoleillements minimaux et maximaux pour ces deux excentricités est donné par le carré de ces nombres, soit 0,998 et 0,783. Bien qu'au cours d'une année entière l'ensoleillement moyen de la Terre ne dépende que peu de l'excentricité, l'amplitude des variations au cours de l'année peut être très grande lorsque l'excentricité est importante.

Les variations régulières, à la période de 100 000 ans, de l'ellipse orbitale de la Terre, viennent donc produire une interférence avec les oscillations du contraste saisonnier de 40 000 ans de période, causées par les variations d'obliquité.

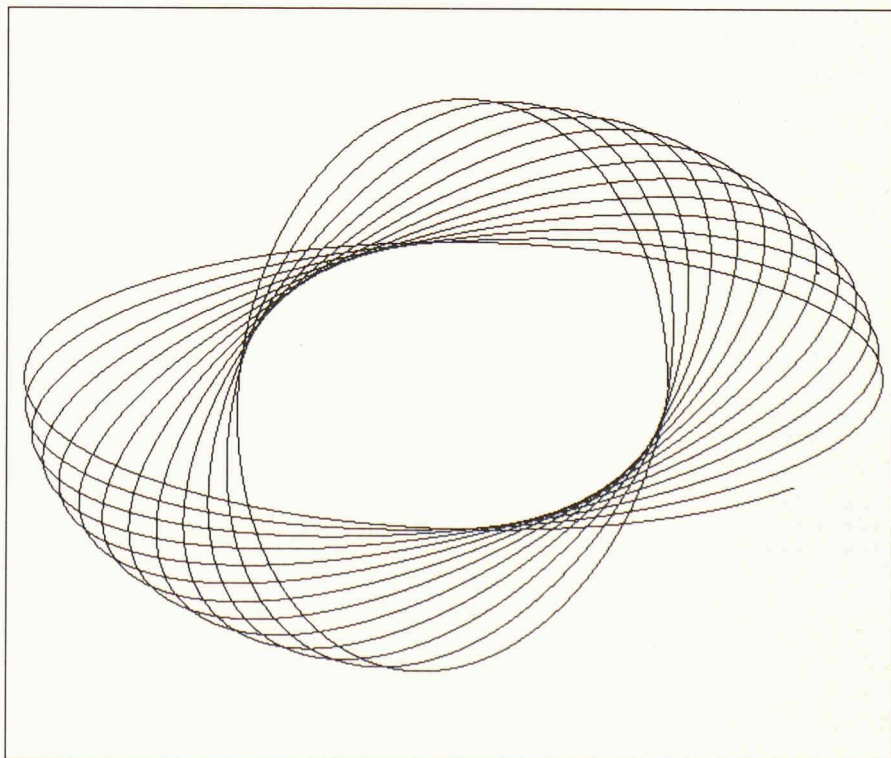


Fig. 7. – L'orbite de la Terre, comme celle de toutes les planètes ou satellites, n'est pas une ellipse parfaite. Elle en est toujours proche, mais l'orientation et la forme de l'ellipse changent lentement au fil du temps, si bien que l'orbite décrit en fait une rosette, dessinée ici de façon exagérée.

2.4. La précession des équinoxes

A première vue l'axe de rotation de la Terre prend une direction fixe dans l'espace. Dans l'hémisphère Nord cet axe perce la voûte céleste dans une direction très proche de celle de l'étoile polaire. En réalité la direction de l'axe de rotation du globe est loin d'être parfaitement stable. Ici nous ne nous intéresserons qu'à ses variations les plus importantes, dans le domaine des périodes que nous avons évoquées plus haut en tout cas.

Pour comprendre le phénomène de la précession des équinoxes il vaut la peine de faire appel au jouet de la toupie. Comme chacun le sait, une toupie qui ne tourne pas tombe immédiatement sur le côté, sous l'effet des forces de la gravité. Suivant la forme du jouet son axe de symétrie est alors plus ou moins parallèle au sol, c'est-à-dire qu'il prend une direction perpendiculaire à la direction des forces de la gravité. Si, en revanche, on réussit à lancer vigoureusement la toupie en rotation, non seulement elle tournera vite, mais encore elle se tiendra bien droite, à la verticale. Par suite des frottements, sur le sol (au point d'appui) et sur l'air ambiant, la toupie ralentit sa rotation et elle commence alors à osciller; mais elle ne tombe toujours pas, précisément parce qu'elle tourne encore! Ce qu'on observe est que les forces de la gravité, au lieu de faire tomber la toupie, font vaciller (ou *précesser*) son axe de rotation qui se met à décrire un cône (le *cône de précession*) dont l'angle d'ouverture augmente à mesure que la vitesse de rotation de la toupie diminue. La toupie finit tout de même par tomber lorsqu'elle s'arrête de tourner.

Ce comportement de la toupie est une des propriétés principales des gyroscopes, utilisés pour la navigation ou pour stabiliser des plates-formes, par exemple sur des bateaux.

Par suite de sa rotation propre la Terre est aussi une toupie et les forces centrifuges qui en résultent la déforment, de sorte que notre globe n'est pas exactement une sphère. C'est plutôt un ellipsoïde de révolution, ou une sphère gonflée dans les zones équatoriales et un peu aplatie entre les pôles de rotation. Son diamètre équatorial de 12 756 km dépasse effectivement le diamètre polaire de 42,8 km.

A cause de cette forme aplatie le Soleil et la Lune, qui sont tous deux approximativement dans le même plan, celui de l'écliptique, exercent sur la Terre des forces gravitationnelles situées toutes deux dans ce plan. Si la Terre ne tournait pas, ces forces auraient tôt fait de ramener son axe de symétrie polaire dans une orientation perpendiculaire à ces forces. Dans le cas du jouet cela correspond à la position de la toupie couchée sur le sol. Pour le globe, en

revanche, cela reviendrait à redresser son axe de rotation, incliné présentement d'environ $23,5^\circ$ par rapport à la verticale au plan de l'écliptique, afin d'annuler cet angle. Mais voilà, la Terre tourne et au lieu de basculer, son axe de rotation se met à précesser, pour décrire le cône circulaire représenté à la figure 8, dont l'angle d'ouverture au sommet est le double de l'angle d'inclinaison de $23,5^\circ$. Puisque la Terre tourne dans le vide il n'y a pas de forces de frottement pour la ralentir (nous ignorons ici les quelques phénomènes, telles les marées, qui conduisent à un ralentissement presque imperceptible de la vitesse de rotation du globe; de

plus, on note que l'atmosphère tourne avec la Terre et ne la freine donc pas). Sa vitesse de rotation est effectivement très stable, de même que le cône décrit par son axe de rotation.

La vitesse du mouvement de précession peut non seulement être calculée, mais on l'observe effectivement et les astronomes n'ont aucune peine à la mesurer avec une très grande précision. Sur le cercle de 360° à la base du cône (soit le haut de la fig. 8), le déplacement annuel est d'environ $50,4$ s d'arc, ce qui correspond à une période de précession de 25 700 ans.

Les conséquences de cette précession peuvent se comprendre facilement.

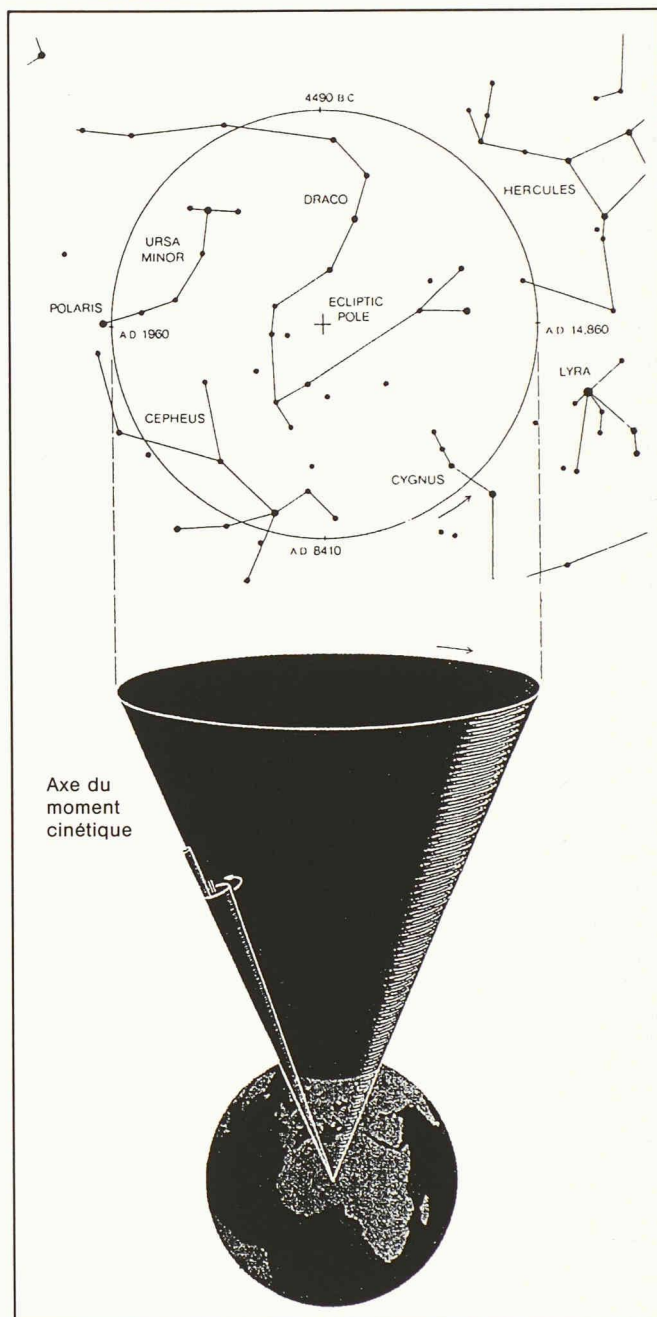


Fig. 8. – La précession des équinoxes est un changement de la direction de l'axe de rotation propre de la Terre. Aujourd'hui cet axe est dirigé approximativement vers l'étoile polaire. Des tablettes grecques vieilles de plus de 4000 ans donnaient pour cette direction un point dans la constellation du Dragon. L'étoile importante dans la constellation de la Lyre est Véga.

Imaginons d'abord que l'orbite de la Terre est une ellipse parfaitement stable. Par suite de l'inclinaison de l'axe de rotation propre il y aura sur cette ellipse, comme nous l'indiquons à la figure 5, un diamètre correspondant aux solstices et un diamètre correspondant aux équinoxes (ce second diamètre passe par ce qu'on nomme aussi le point vernal). En l'absence de précession, les deux diamètres dont nous venons de parler auraient des directions immuables. Avec la précession ils tournent sur l'ellipse à la période de 25 700 ans, raison pour laquelle ce phénomène est appelé *précession des équinoxes*. La précession des équinoxes se combine avec la rotation de l'ellipse qui donne la rosette de la figure 7, car ces deux processus ont le même résultat, celui de déplacer le point vernal par rapport aux axes de symétrie de l'ellipse. La combinaison des deux périodes de 25 700 et de 100 000 ans donne un effet perturbateur du contraste saisonnier à la période d'environ 20 500 ans. C'est ce que nous devons retenir du rôle de la précession des équinoxes sur le contraste saisonnier.

2.5. Le déclenchement des glaciations

Nous avons présenté trois mécanismes concernant les paramètres astronomiques de la Terre et qui tous trois viennent perturber le contraste saisonnier.

Résumons-les en passant des périodes les plus longues aux plus courtes :

1. Les variations d'excentricité de l'orbite de la Terre ont un effet important à la période de 100 000 ans.
2. Les variations d'obliquité engendrent des oscillations du contraste à la période de 40 000 ans.
3. La précession des équinoxes *par rapport aux axes de l'ellipse orbitale* conduit à une périodicité de 20 500 ans.

Ces trois effets produisent une variation continue du *contraste des températures entre été et hiver*. D'autre part et de façon générale, *si ce contraste est atténué dans l'hémisphère Nord, il est renforcé au Sud*.

La reconstitution du cycle des glaciations (fig. 9) et des climats passés, qui fera l'objet d'un prochain chapitre, et sa comparaison avec l'évolution du contraste saisonnier dérivé des paramètres astronomiques ont révélé les faits suivants :

- a) Les glaciations sont déclenchées dans l'hémisphère Nord *lorsque, dans cet hémisphère, le contraste saisonnier est affaibli sur une longue période de temps*.
- b) *On n'observe pas le phénomène symétrique dans l'hémisphère Sud*.
- c) Dans l'hémisphère Sud les glaciations sont contemporaines de celles de l'hémisphère Nord, mais elles y sont fortement atténuées.

On comprend bien aujourd'hui ces observations qui trouvent leur explica-

tion dans la répartition très inégale des masses continentales entre les hémisphères Nord et Sud et dans les variations de la teneur atmosphérique du CO₂, sujet d'un prochain chapitre de cette série.

L'explication fondamentale du déclenchement des périodes glaciaires, lorsque le contraste saisonnier est faible dans l'hémisphère Nord, est le suivant. Pour qu'une glaciation puisse démarquer il faut qu'une partie de la neige de l'hiver survive l'été. Ainsi le sol est encore froid lorsque tombe la neige de l'hiver suivant et elle peut immédiatement s'accumuler. Cela devient possible aux latitudes moyennes et élevées, lorsque l'été n'est pas bien chaud. En revanche, même au cours d'un hiver très clément, on constate qu'il tombe en général à peu près le même volume de neige qu'au cours d'un hiver rigoureux et il faut à peu de chose près la même quantité de chaleur pour la faire fondre. Ce comportement s'explique par la chaleur latente de fusion élevée de la glace ou de la neige : pour faire fondre 1 mètre cube de neige il faut autant de chaleur que pour en réchauffer 10 mètres cubes de -10°C à -2°C. Ainsi, que la neige tombante soit très froide ou juste au-dessous de son point de fusion, il faut à peu de chose près la même chaleur estivale pour la faire fondre.

La raison pour laquelle seul l'hémisphère Nord permet le déclenchement



Fig. 9. – Carte partielle de la dernière glaciation du Würm. (Source : Atlas de la Suisse.)



Cet article nous a été soumis par le Groupe romand des ingénieurs de l'industrie.

de périodes glaciaires provient de la répartition très inégale des masses continentales entre le Nord et le Sud. Presque tous les continents à la surface desquels la neige peut s'accumuler sont situés dans l'hémisphère Nord. Les roches étant d'extrêmement mauvais conducteurs de chaleur, la capacité calorifique des sols continentaux

est effectivement très faible; à 20 mètres sous terre on ne peut déjà pratiquement plus détecter les oscillations annuelles de la température. Cela permet à la neige de s'accumuler et de subsister sur les réceptacles continentaux isolants. Dans l'hémisphère Sud, au contraire, la neige tombe presque partout dans l'eau, qui est à la fois un excellent conducteur calorifique et qui, de par l'énorme masse des océans, constitue un immense réservoir de chaleur.

Dans le chapitre à venir nous verrons que des variations naturelles de la

concentration du CO₂ atmosphérique permettent de comprendre pourquoi l'hémisphère Sud suit de façon un peu atténuée le cycle des glaciations de l'hémisphère Nord.

(A suivre)

Adresse de l'auteur :

Gaston Fischer, professeur
Observatoire cantonal
58, rue de l'Observatoire
2000 Neuchâtel

Industrie et technique

En Allemagne, davantage de femmes dans les professions techniques

Elles sont toujours plus nombreuses en Allemagne les femmes qui font carrière dans des professions à caractère nettement technique.

La fin d'un stage d'entraînement réussi sur un Boeing 737 en août 1988 a par exemple signifié, pour Evi Lausmann, de Sankt Georgen en Haute-Bavière, et Nicola Lunemann, de Cologne, tout juste 23 ans toutes deux, la réalisation d'un rêve: accéder au cockpit des grands avions de ligne de la Lufthansa. Les passagers les appelleront-ils «Madame le Capitaine» ou «Madame la Capitaine»? La question ne se pose en tout cas pas pour le moment puisque, dans un premier temps, elles fonctionneront comme second officier et qu'elles ne pourront pas passer aux commandes dans les fonctions propres du capitaine avant une bonne dizaine d'années.

Mais les femmes sont de plus en plus présentes ailleurs aussi dans la vie économique allemande. M^{me} Erika Emmerich, qui a été présidente du Kraftfahrzeug-Bundesamt de Flensburg (l'office fédéral allemand de la circulation routière), a été nommée au 1^{er} janvier 1989 à la tête du Verband der deutschen Automobilindustrie VDA, le groupement fédéral de l'industrie automobile allemande. Le VDA, dont les membres représentent quelque 750 000 personnes employées, rompt ainsi délibérément avec une tradition qui voulait que ne soient nommés à ces fonctions que des gestionnaires de l'industrie automobile avec une solide expérience technique, et donc des hommes.

Malgré tout, beaucoup de femmes exerçant un métier restent très critiques quant aux chances professionnelles qui leur sont offertes. Cela est particulièrement vrai des professions techniques et scientifiques toujours dominées par les hommes. C'est ainsi que

10% seulement des cadres supérieurs de l'industrie allemande dans ces deux secteurs sont des femmes. «De tous les Etats fortement industrialisés, c'est l'Allemagne qui forme le moins d'ingénieurs femmes», constate M^{me} Ursula Danzer, l'une des organisatrices du Congrès de la femme dans les sciences naturelles et la technique,

Vers un réseau ferré européen à grande vitesse

La Communauté des chemins de fer européens, qui groupe 14 administrations ferroviaires, soit celles des pays de la Communauté européenne ainsi que de l'Autriche et de la Suisse, vient de publier une étude intitulée «Proposition pour un réseau européen à grande vitesse».

Ce document présente l'Europe du rail du XXI^e siècle, telle que la conçoivent les spécialistes, à la lumière des données techniques, politiques et commerciales dans l'Europe de demain.

Cette volonté commune de réaliser un réseau européen à grande vitesse,

qui s'est déroulé en été 1988 à Göttingen, et dont le but était d'améliorer les chances professionnelles de la femme. A l'heure actuelle en République fédérale, une femme sur cinq environ occupe un poste présentant un degré de mécanisation très élevé lié à l'emploi de nouvelles techniques, comme c'est le cas par exemple pour les ordinateurs ou les machines à écrire avec programme informatique.

(INP)

affranchi des handicaps techniques et formels des frontières nationales, est mise en évidence par la décision récente de l'Espagne et du Portugal de construire à l'écartement normal les lignes nouvelles destinées à la liaison de la péninsule Ibérique avec le reste de l'Europe (il est même question, à terme, de la mise à l'écartement normal des lignes existantes).

Nous aurons l'occasion de revenir sur cette démarche du plus grand intérêt, notamment dans la perspective de la future transversale alpine suisse.



Diana Hillinger est actuellement le seul agent de conduite féminin de locomotives dans le Bade-Wurtemberg.
(Photo: INP.)