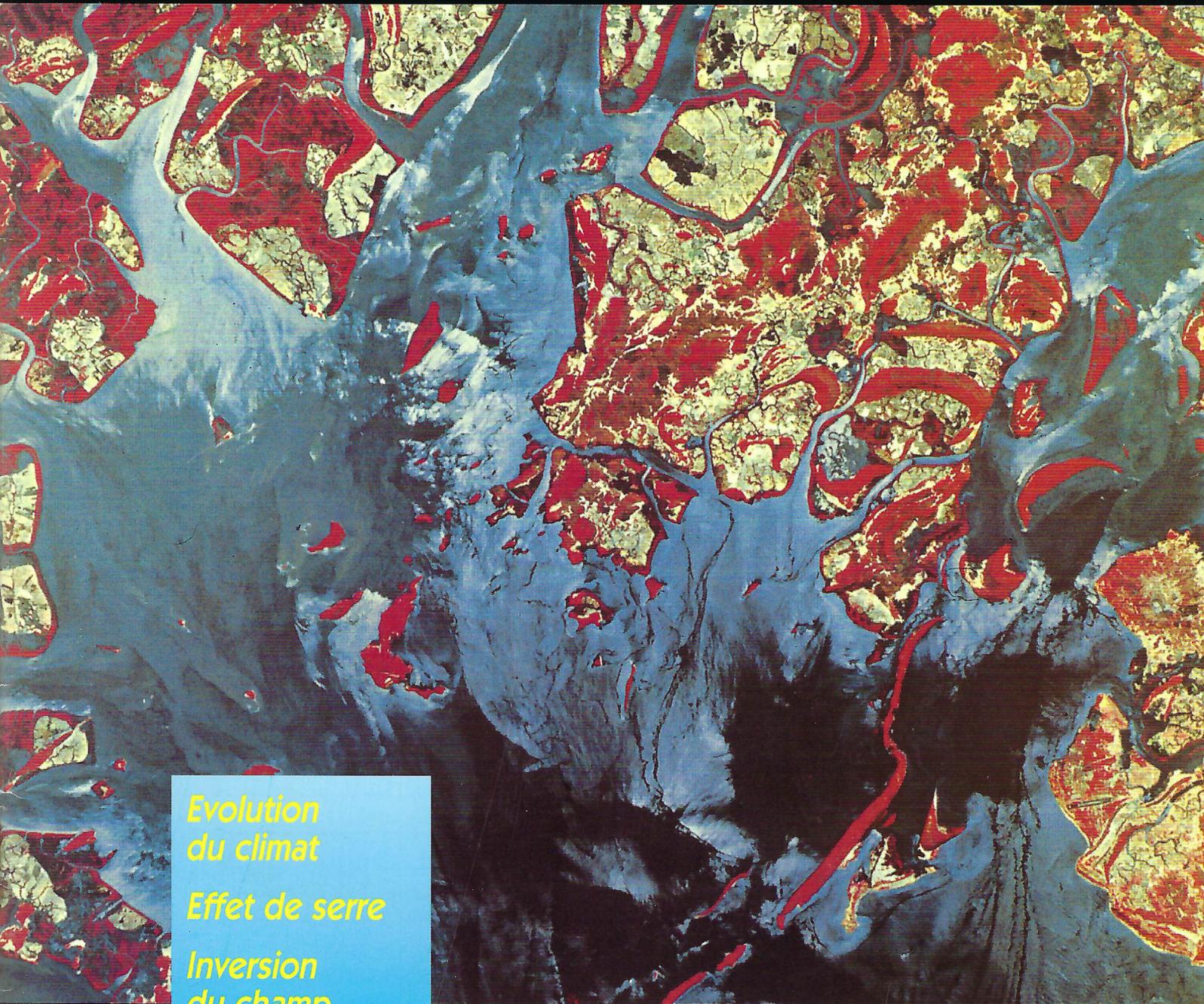


# AUVERGNE SCIENCES

**BULLETIN DE L'ADASTA**

Mars 97

N° 38



*Evolution  
du climat  
Effet de serre  
Inversion  
du champ  
magnétique  
terrestre*

- Louis Leprince -  
Ringuet témoigne .....p. 3
- Le climat  
Evolution naturelle,  
influence  
de l'homme .....p. 4
- Effet de serre et pollution  
atmosphérique ..... p. 14
- Aspects scientifiques  
de l'évolution  
du climat ..... p. 16
- Inversion du champ  
magnétique terrestre  
dans la chaîne des Puy  
(à Laschamp) ..... p. 20
- Conservation du matériel  
scientifique ancien.... p. 25
- Publications :  
Quel-est-ce minéral ?...p. 27
- Activités diverses .....p. 28

### PERMANENCES :

Tous les jours ouvrables  
de 9 h 00 à 12 h 00  
et le mercredi de 14 h 00 à 17 h 00.

### AUVERGNE-SCIENCES

Publication trimestrielle  
19, rue de Bien-Assis  
63100 CLERMONT-FERRAND  
Directeur de la Publication  
Suzane GELY  
Rédaction :  
Jocelyne ALLEE  
N° ISSN 1166-5904

Photo de couverture :  
Vue du Golfe du Bengale  
par satellite  
(avec l'aimable autorisation  
de Spot Image)



Dépôt légal MARS 1997

*Chers Amis,*

*L'ADASTA est repartie grâce au renouvellement de vos adhésions (180 à ce jour) et à vos encouragements. Une équipe scientifique s'est reformée et j'ai accepté de piloter cette renaissance.*

*Ce nouveau numéro de la Revue en est le premier témoignage. Et c'est une grande joie pour moi d'avoir obtenu de Louis Leprince-Ringuet, membre de l'Institut, ce texte inédit qu'il vient d'écrire pour l'ADASTA. Il célèbre la fraternité scientifique qu'il a vécue avec d'autres savants illustres et qui a été à l'origine de la construction du CERN.*

*Pour nous, plus modestement, nous essayons de maintenir un flambeau scientifique qui a été allumé en Auvergne en 1986 par une équipe de bénévoles autour de Roland Jouanisson (il participe encore aux côtés de Jocelyne Allée à la rédaction de cette revue).*

*Vous pouvez nous envoyer des articles, des suggestions.  
Merci de nous aider.  
En toute amitié.*

*S. GELY*



*Suzanne Gély a pris la suite de Roger Vessière à la présidence de l'ADASTA en janvier dernier. Passionnée de tout ce qui concerne les Sciences et Techniques, cette Auvergnate, ancienne élève de l'Ecole Normale Supérieure, et agrégée de Sciences Physiques, a enseigné dans les classes préparatoires aux grandes écoles du Lycée Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, où elle a donné le goût des sciences à nombre de jeunes étudiants. Ses anciens élèves et collègues, tous ses amis, qui connaissent bien le dynamisme et la foi qui l'animent, ne seront nullement surpris de la voir, malgré ses nombreuses activités, consacrer temps et énergie à l'ADASTA.*

### Adhésions et Abonnements

Adhésions à titre individuel .....	150 F
Adhésions à titre collectif .....	500 F
Membre bienfaiteur .....	1 000 F

L'adhésion donne droit au service gratuit du bulletin et à des réductions sur les différents services rendus par l'Association (publications, stages, visites,...)  
Adressez le courrier à **ADASTA, 19, rue de Bien-Assis - 63100 Clermont-Ferrand**  
**Tél. 04 73 92 12 24 - Fax 04 73 92 11 04**

## Louis Leprince-Ringuet témoigne...

Il y a encore quelques années, au milieu de ce siècle, je faisais partie des nombreux scientifiques des principaux pays du monde, qui étudiaient la structure des noyaux atomiques, les rayons cosmiques -ces particules nucléaires traversant l'espace avec une énorme énergie et une vitesse proche de celle de la lumière, et traversant aussi notre corps à raison d'une particule par seconde sur la surface de la paume de la main. Mais, aujourd'hui, la plupart de nos amis nous ont quittés :

Joliot, Irène Curie, Pierre Auger, Francis Perrin pour la France, Oppenheimer, Fermi, Fretter, Brode... pour les Etats-Unis, Blackett, Aston, Powels, Chadwick, Rutherford... pour la Grande-Bretagne, Heisenberg, Bethe, Hahn, Strassman... pour l'Allemagne, Amaldi, Occhialini... pour l'Italie. Je reste donc le seul, ou à peu près, à avoir connu le développement de la physique dès le premier tiers du siècle, et à avoir participé, non seulement à la connaissance des rayons cosmiques, mais également à la construction du grand Centre Européen de Recherches Nucléaires, envisagé, aussitôt après la dernière guerre mondiale, par les rares physiciens qui étaient restés en Europe et n'avaient pas immigré aux Etats-Unis. Le CERN s'est remarquablement développé et attire maintenant des scientifiques étrangers, américains, japonais... par centaines.

Je voudrais exprimer ici mon témoignage sur les relations entre les scientifiques des divers pays et entre ceux d'un même pays. Il s'agit de science fondamentale : on ne s'occupe pas des applications ; dès que l'on découvre un phénomène, on publie aussitôt. Au CERN, il n'est pas question de prendre le moindre brevet. Nous nous réunissions très souvent, soit dans les congrès qui, après 1945, furent nombreux entre cosmiciens, soit par des contacts plus profonds lorsque l'un de nous allait passer un certain nombre de semaines ou de mois dans un laboratoire étranger. Il m'est arrivé plusieurs fois d'aller aux Etats-Unis, à Chicago, à Berkeley, à Brookhaven pour y passer, non seulement plusieurs jours, mais parfois jusqu'à un mois. Nous n'avions pas entre nous de problèmes financiers comme en ont ceux qui sont amenés à prendre des brevets. Dans notre travail, nous



étions souvent sur les montagnes, dans les laboratoires de haute montagne, le Jungfrau Joch, le Pic du Midi de Bigorre, et le petit, mais le plus élevé, celui appelé les Cosmiques, sur les flancs de l'Aiguille du Midi, à Chamonix, à 3 650 mètres -cela avant de nous retrouver pour la construction et le fonctionnement du CERN qui distribuait des millions de rayons cosmiques artificiels toutes les secondes.

Naturellement on travaillait par équipes. Dès les années vingt, dans notre domaine, la notion de chercheur isolé faisant une découverte n'était plus valable. C'était en équipe, autour d'appareils souvent compliqués, que l'on se relayait, et je dois dire qu'il régnait entre nous un extraordinaire climat de fraternité. Il n'y avait ni jalousie, ni amertume ; on se réjouissait quand une équipe étrangère à la nôtre publiait l'observation d'un phénomène nouveau. On se recevait, des semaines ou des mois durant, soit dans les petits laboratoires de haute montagne, soit dans nos centres de recherches à Paris, à Berkeley, à Chicago, à Minneapolis ou ailleurs.

Je tiens à donner ces témoignages de très grande fraternité qui est particulière à la science fondamentale à la période que j'ai vécue avant et après la seconde guerre mondiale. J'ai connu personnellement cette ambiance de sympathie et d'affection mutuelle, qui s'étendait à l'intérieur même de notre équipe entre les scientifiques et les techniciens. En un mot, j'ai été extrêmement heureux de faire de la physique pendant ce siècle, de participer à des découvertes intéressantes sur la structure des noyaux atomiques, sur de nouvelles particules fondamentales créées lors de collisions nucléaires. Ce fut une vie de rêve, avec mes compagnons de travail et mes collègues étrangers. Et cette amitié, dont la base était scientifique, s'étendait à toutes les manifestations musicales, artistiques, sportives ou littéraires intéressant chacun d'entre nous.

Louis Leprince-Ringuet

Louis LEPRINCE-RINGUET de l'ACADEMIE  
DES SCIENCES et de l'ACADEMIE FRANÇAISE

# Le climat : évolution naturelle, influence de l'homme

## 1- MÉTÉOROLOGIE ET CLIMATOLOGIE

L'atmosphère de la terre est essentiellement un mélange gazeux dont les principaux constituants sont rappelés dans le tableau ci-dessous.

Nature du gaz	Pourcentage volumique dans l'air sec
N <sub>2</sub>	78,08
O <sub>2</sub>	20,95
Ar	0,934
CO <sub>2</sub>	0,0322
Ne	0,0018
He	0,0005
CH <sub>4</sub>	0,00015

D'autres espèces chimiques figurent en quantités moindres : Kr, H<sub>2</sub>, Xe, O<sub>3</sub>, CO, NO<sub>2</sub>... On trouve aussi dans l'atmosphère, en quantité variable, de la vapeur d'eau, dont la condensation forme les nuages, et des particules solides, telles que les poussières arrachées au sol par érosion éolienne, et de fins cristaux de sel provenant des océans. Les particules solides ont un rôle majeur en tant que germes de condensation pour la formation des nuages.

En un lieu donné, et à un instant donné, l'état de l'atmosphère peut être décrit par un ensemble de paramètres : citons pression, température, vitesse du vent, humidité de l'air... Cette description du temps qu'il fait, au moyen de paramètres, est le travail du météorologue.

La climatologie en revanche s'intéresse plutôt à la variabilité, dans le temps et dans l'espace, des paramètres descriptifs. Si on fait abstraction de la variabilité géographique, en relation



**Jocelyne ALLEE,**  
Ancienne élève  
de l'Ecole Normale Supérieure.  
Ancien professeur  
de Sciences Physiques.

*Va-t-il faire beau tout-à-l'heure ?  
Aurons nous de la pluie bientôt ?  
Pour des raisons évidentes liées  
à sa survie ou à son confort physique,  
l'homme s'est toujours intéressé  
au temps qu'il fait aujourd'hui,  
à celui qu'il fera demain.  
Afin de comprendre, et de prévoir,  
il est nécessaire de faire retour  
sur le passé ; les scientifiques se sont  
donc penchés sur le problème de  
la reconstitution des climats anciens.  
Mais, depuis quelques années,  
les savants tirent la sonnette d'alarme :  
L'homme est-il en passe de modifier  
son environnement climatique ?  
Il semble en effet qu'une élévation  
de température, résultant  
de l'accroissement de l'effet de serre  
dû aux activités humaines, risque  
de s'ajouter à la variation naturelle  
de ce paramètre. Or un réchauffement  
de la planète pourrait avoir  
des conséquences graves pour l'avenir  
de l'humanité. De nombreux pays sont  
conscients de l'importance de l'enjeu,  
et des organisations internationales  
ont été créées pour étudier ce sujet  
difficile et éclairer la réflexion  
des décideurs.*

essentiellement avec la latitude et le relief, ainsi que de la périodicité annuelle provoquée par le mouvement de la terre, l'étude statistique fait alors apparaître une évolution de plus grande ampleur, par exemple une alternance d'âges glaciaires et de réchauffements. Les données utilisées sont fournies par des méthodes variées, dépendant de l'ordre de grandeur du laps de temps étudié : décennie, siècle, million d'années, et de la place de cette tranche de temps dans l'histoire de la terre. Au cours de cet exposé, seront évoquées quelques techniques de la climatologie et de la paléoclimatologie.

## 2- BILAN ÉNERGÉTIQUE DE LA TERRE

La terre reçoit son énergie du soleil. Avant d'exposer la manière dont elle utilise cette énergie, nous ferons un bref rappel des lois du rayonnement.

### Rayonnement du corps noir

D'une façon générale, les corps émettent des rayonnements dont les caractéristiques dépendent de la température. Les lois suivies sont simples lorsque le corps émetteur est un corps noir, c'est-à-dire un corps idéal susceptible d'absorber tous les rayonnements. Une pastille recouverte de noir de fumée, ou mieux un trou percé dans une enceinte, peuvent être considérés comme de bonnes réalisations pratiques du corps noir.

Loi de Stefan : La puissance rayonnée par unité de surface (encore appelée exitance), du corps noir, ne dépend que de sa température, elle est proportionnelle à la puissance quatre de la température, et s'exprime :

$$M = \sigma T^4$$

où  $\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann, égale à  $5,7.10^8 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$

**Loi de Wien :** elle concerne la répartition spectrale du rayonnement du corps noir. On peut d'abord définir l'existance spectrale ( $M_\lambda = \partial M / \partial \lambda$ ), puis la luminance  $L_\lambda$  qui est l'existance spectrale par unité d'angle solide. Si on représente la luminance du corps noir en fonction de la longueur d'onde, on obtient, pour chaque température, une courbe présentant un maximum pour une certaine longueur d'onde  $\lambda_{\max}$ . Cette valeur particulière de la longueur d'onde est inversement proportionnelle à la température du corps noir.

$$\lambda_{\max} T = \text{constante}$$

La valeur numérique de la constante est  $2898 \mu\text{m}\cdot\text{K}$

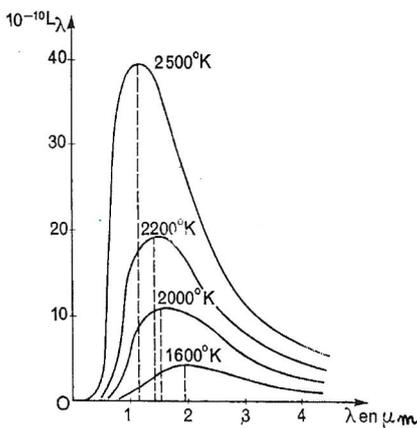


Figure 1 : Réseau d'isothermes du corps noir

Appliquons cette loi au soleil considéré comme corps noir, avec

$$\lambda = 0,48 \mu\text{m}$$

On en déduit la température de surface du soleil :

$$T = \frac{2898}{0,48} \sim 6000 \text{ K}$$

Quant à la terre, sa température superficielle moyenne est  $15^\circ\text{C}$ , soit  $288 \text{ K}$ . D'où

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{288} = 10 \mu\text{m}$$

ce qui est un rayonnement infrarouge.

### Émission et absorption d'un corps réel

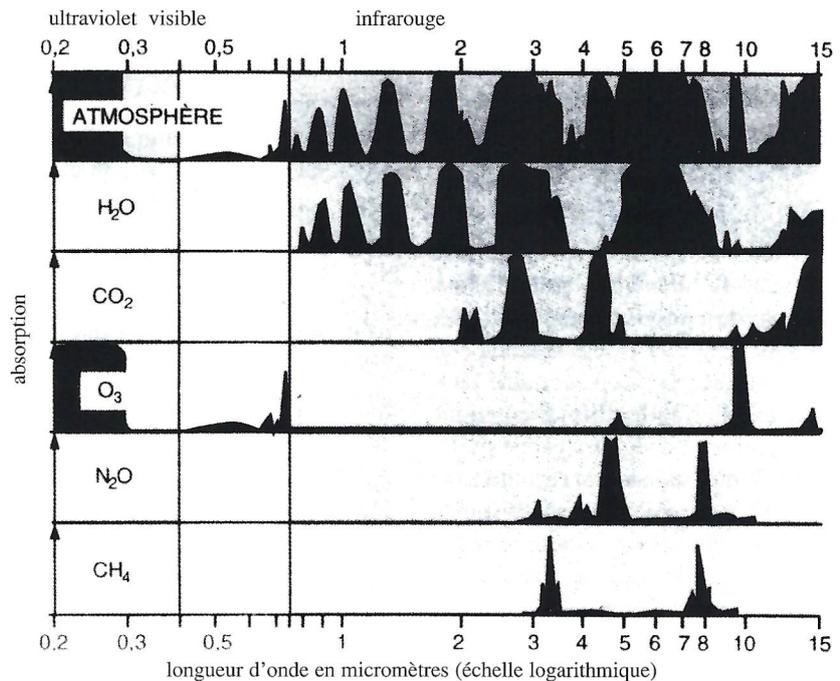
L'existance spectrale d'un corps réel se déduit de celle du corps noir à la même température par un facteur multiplicatif qui dépend à la fois de la température et de la longueur d'onde, et qu'on appelle émissivité  $\epsilon(\lambda, T)$ . Un

corps peut absorber les rayonnements de même longueur d'onde que ceux qu'il émet, l'absorption est donc aussi caractérisée par le coefficient d'émissivité.

### Spectre d'absorption des gaz présents dans l'atmosphère

Le schéma ci-dessous visualise l'absorption des rayonnements du soleil par les gaz de l'atmosphère, en fonction de leur longueur d'onde, et pour une température moyenne de l'atmosphère.

Figure 2 : d'après Alain Foucault, Climat (Fayard)



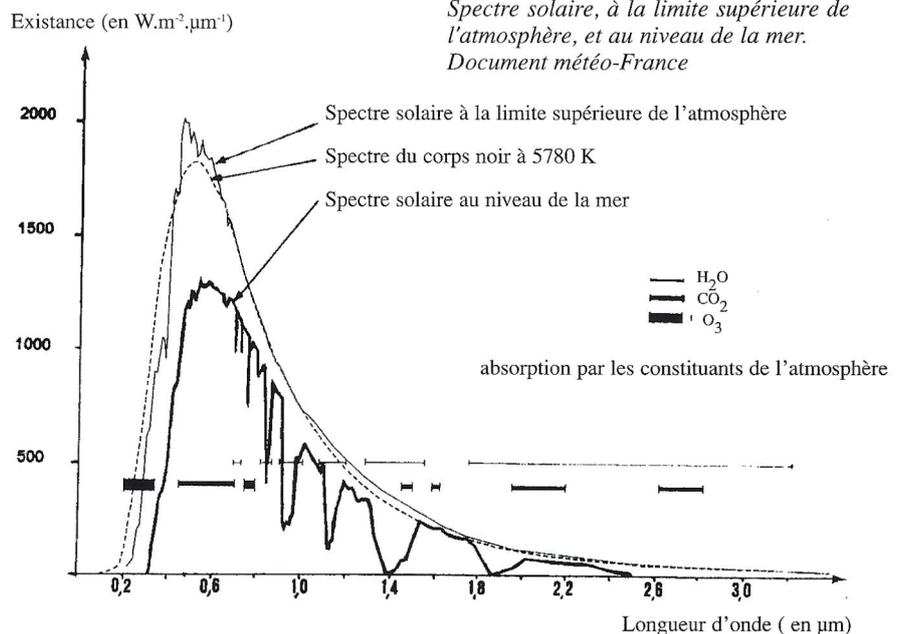
Remarques :

- L'atmosphère est pratiquement transparente dans le domaine des longueurs d'onde visibles et du proche ultraviolet.

- L'absorption de l'ultraviolet par l'atmosphère est due de façon quasi-exclusive à l'ozone, ce qui fait comprendre l'importance qu'on accorde au maintien de la couche d'ozone de l'atmosphère. (Fig. 2)

- La plupart des gaz contribuent à l'absorption dans l'infrarouge et notamment la vapeur d'eau.

Figure 3 : Spectre solaire, à la limite supérieure de l'atmosphère, et au niveau de la mer. Document météo-France



La figure 3 montre que le rayonnement solaire qui parvient à la partie supérieure de l'atmosphère a une répartition spectrale très voisine de celle d'un corps noir à 5780 K. Après traversée de l'atmosphère, le rayonnement présente un spectre amputé par l'absorption.

### Utilisation de l'énergie solaire par la terre

L'absorption n'est pas le seul phénomène subi par le rayonnement solaire. Une partie du flux énergétique est réfléchi par les nuages, et par les surfaces claires du sol, déserts, glaciers. On estime le flux solaire incident à  $340 \text{ W.m}^{-2}$  en moyenne. La fraction absorbée par l'atmosphère est d'environ 20%, la fraction réfléchi, d'environ 30%. Le sol absorbe donc en moyenne un flux venant du soleil de  $170 \text{ W.m}^{-2}$ .

### Effet de serre

Considérons une portion de surface recevant de l'énergie solaire sous forme de rayonnement visible. Lorsque l'équilibre thermique est établi, la surface est à une certaine température  $T_1$ , et le flux énergétique qu'elle émet est égal à celui qu'elle reçoit. Nous supposons en outre que la température d'équilibre correspond, comme c'est le cas pour la terre, à une émission par la surface de rayonnement infrarouge, en accord avec la loi de Wien.

Imaginons maintenant que la même surface soit couverte d'une serre vitrée. Le verre est transparent à la lumière incidente, par contre il ne laisse passer qu'une partie des rayons infrarouges émis par la surface, l'autre partie est réfléchi et reste piégée à l'intérieur de la serre. L'équilibre thermique est donc momentanément rompu, la surface s'échauffe, on dit qu'il y a forçage radiatif. La température intérieure continue de s'élever jusqu'à atteindre une valeur  $T_2$  pour laquelle un nouvel état d'équilibre s'établit.  $T_2$  étant supérieure à  $T_1$ , le flux rayonné par la surface, est plus important, conformément à la loi de Stefan, et d'autre part sa répartition spectrale est décalée vers des longueurs d'onde plus courtes, conformément à la loi de Wien. Remarquons bien le fait, qu'en situation d'équi-

libre, le flux incident est toujours égal au flux émis, mais que leur valeur commune est supérieure au flux émis en l'absence de serre.

Cet effet de serre, dont on vient de décrire le principe, se produit aussi grâce aux gaz absorbants de l'atmosphère, en premier lieu la vapeur d'eau. On peut estimer la température moyenne de la terre en l'absence de tout effet de serre. Compte tenu de la fraction réfléchi, le flux incident reçu par le sol serait

$$\phi = 340 \times 70/100 = 238 \text{ W.m}^{-2}$$

Selon la loi de Stefan, la surface qui émet ce même flux est à la température  $T = (\frac{238}{5,7 \cdot 10^{-8}})^{1/4} = 255 \text{ K} = -18^\circ\text{C}$

C'est dire que notre climat serait bien peu accueillant !

Revenons à la situation réelle. Le sol reçoit du soleil, non pas 238 mais  $170 \text{ W.m}^{-2}$ , en tenant compte des fractions réfléchi et absorbée. Or il est admis que sa température superficielle moyenne est  $15^\circ\text{C}$  soit  $288 \text{ K}$ , et on peut donc calculer le flux que la terre émet sous forme d'infrarouge, en appliquant la loi de Stefan :

$$\phi = 5,7 \cdot 10^{-8} (288)^4 = 390 \text{ W.m}^{-2}$$

De plus la surface du sol évacue un flux de chaleur de  $106 \text{ W.m}^{-2}$ , par convection et évaporation. Au total, la surface du sol émet le flux énergétique total

$$\Phi = 390 + 106 = 496 \text{ W.m}^{-2}$$

S'il n'y a pas forçage radiatif, c'est-à-dire si l'équilibre est réalisé, c'est que le sol a reçu la différence  $496 - 170 = 326 \text{ W.m}^{-2}$  en provenance de l'atmosphère, dont une part vient d'ailleurs du sol, car il s'agit d'échanges mutuels entre sol et atmosphère.

En définitive, la présence dans l'atmosphère, d'ozone, qui absorbe l'ultraviolet, et celle de gaz responsables de l'effet de serre sont des facteurs déterminants, qui ont rendu la vie possible sur terre. On prévoit d'ores et déjà qu'une variation de concentration d'un des gaz absorbants dans l'atmosphère va perturber les échanges énergétiques, et entraîner une variation de température moyenne de la terre à plus ou moins longue échéance, cela sera étudié dans la dernière partie de l'exposé.

## III- LES MÉTHODES NUCLÉAIRES DE DATATION

### Aperçu historique

Si l'idée d'une longue histoire de la terre est déjà présente dans l'antiquité, il faut attendre le XVII<sup>ème</sup> siècle pour qu'on voie s'amorcer une étude scientifique de la succession des événements qui ont jalonné cette histoire. La première science s'intéressant à la datation est la stratigraphie qui étudie l'étagement des couches sédimentaires. Le naturaliste Buffon fut un éminent stratigraphe, à qui l'on doit notamment la division en ères et époques encore utilisée aujourd'hui, et une première estimation de l'âge de la terre, très au-dessous de la vérité : 75000 ans.

Plus tard, la découverte de la radioactivité (1896) entraîna une véritable révolution. En effet, la loi de décroissance radioactive avec le temps, fait de ce phénomène une méthode pratique et élégante de datation des roches et fossiles, et d'établissement d'une chronologie de la terre. L'élément radioactif dont on mesure l'activité doit avoir une période de même ordre de grandeur que l'éloignement dans le temps de l'événement à dater : Au-delà de quelques périodes, l'incertitude sur la datation devient trop grande. Des éléments radioactifs de période relativement courte servent à explorer les derniers millénaires, c'est le cas du carbone 14. Pour remonter aux temps géologiques, on s'adresse à des éléments de période beaucoup plus longue, tels que le potassium 40.

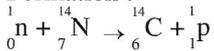
Notons que la mesure de l'activité d'une source exige de posséder un échantillon de masse suffisante. Une méthode plus sensible consiste à mesurer directement la masse des atomes de carbone 14 présents dans l'échantillon directement au spectromètre de masse. Enfin le tandétron de Gif-sur-Yvette, constitué d'un spectromètre de masse couplé à un accélérateur, permet de mesurer de très faibles concentrations et d'améliorer encore la précision de la datation.

### Le carbone 14

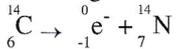
Le carbone 14,  $^{14}\text{C}$  est un isotope radioactif, de période 5730 ans. Mais

il s'en forme de manière continue en haute atmosphère, par action des neutrons lents du rayonnement cosmique sur l'azote de l'air :

Formation :



Désintégration :



$^{14}\text{C}$  s'oxyde très rapidement en  $\text{CO}_2$  et il est assimilé, en même temps que le dioxyde de carbone formé des isotopes stables 12 et 13 du carbone, par les plantes puis l'ensemble des animaux. On retrouve donc dans les êtres vivants les trois isotopes du carbone dans des proportions constantes. En particulier le rapport du nombre d'atomes  $^{14}\text{C}$  au nombre total d'atomes de carbone est voisin de  $1,2 \cdot 10^{-12}$ .

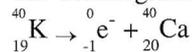
Un échantillon d'un gramme de carbone provenant d'un être vivant présente, en raison de la présence de carbone 14, une activité de 13,6 désintégrations par minute (0,22 Bq). A partir du moment où cet être meurt, les échanges de  $\text{CO}_2$  avec l'atmosphère cessent, le carbone 14 ne se renouvelle donc plus, et l'activité décroît. La mesure de l'activité d'un arbre mort, d'un fossile, fournit directement la date de la mort. On a pu ainsi dater des échantillons sur les trente derniers millénaires. Par exemple, le Centre des faibles radioactivités de Gif-sur-Yvette a daté un fragment d'arbre brûlé par une coulée de lave venue du Puy de la Vache à un peu moins de 8000 ans, ce qui montre le caractère récent de l'activité volcanique en Auvergne.

L'utilisation du spectromètre de masse et du tandétron parvient à repousser la limite de datation par  $^{14}\text{C}$  à 45000 ans avant l'époque actuelle.

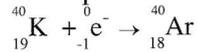
### La méthode Potassium-Argon

Le potassium naturel contient une petite proportion ( $10^{-4}$ ) d'isotope radioactif  $^{40}\text{K}$ . L'origine de cet isotope remonte à la formation du système solaire. Actuellement il ne s'en forme plus de façon naturelle, mais grâce à sa longue période,  $1,3 \cdot 10^9$  ans, il est encore présent sur terre. Deux processus coexistent, avec des probabilités respectives connues :

une désintégration



une capture d'électron



La teneur en potassium dans les roches est très variable. Pour un échantillon donné, la mesure de l'activité permet de déterminer la teneur actuelle en potassium 40. On peut également calculer la teneur initiale de la roche, en ajoutant à la quantité actuelle la quantité de potassium 40 qui a donné naissance aux noyaux fils  $^{40}\text{Ca}$  et  $^{40}\text{Ar}$ . En réalité, la mesure concernant le calcium ne serait pas fiable à cause de l'abondance de cet élément ; c'est donc la quantité d'argon 40 qui est mesurée au spectromètre de masse après dégazage de la roche. En fait la méthode est délicate car la roche peut avoir perdu une partie de l'argon radiogénique au cours de son histoire, et elle devient très imprécise pour les roches jeunes contenant trop peu d'argon. Il convient donc de vérifier la cohérence des résultats de plusieurs méthodes pour valider l'ensemble.

Différents procédés de datation s'appuient sur le même principe, consistant à mesurer la quantité accumulée d'un noyau fils d'isotope radioactif.

On peut y rattacher les méthodes basées sur les déséquilibres qui se

produisent dans les processus naturels de désintégration. Les lois de la radioactivité entraînent une constance dans les proportions relatives d'isotopes d'une famille radioactive. Nous citerons en exemple la famille de l'uranium. Lors de la formation du squelette minéral des coraux, l'ion uranyle provenant de l'eau de mer, peut se trouver inclus dans le réseau cristallin du corail, car sa taille est compatible avec celle de l'ion  $\text{Ca}^{2+}$  alors que les ions des nucléides fils, pour la même raison, ne se trouvent pas dans les coraux vivants. Ces derniers vont donc se former par désintégration spontanée de l'uranium dans les coraux morts et on a pu utiliser ces observations à propos de l'étude des niveaux marins.

## IV- LES ARCHIVES DU CLIMAT

### Les documents historiques

Les documents historiques apportent de précieuses informations sur les tout derniers millénaires. Remarquons toutefois que les données quantitatives doivent être maniées avec précaution, étant donné le manque de précision des instruments de l'époque et l'incertitude sur les conditions dans lesquelles ont été faites les mesures. Par contre les témoignages qualitatifs peuvent être confrontés aux résultats obtenus par d'autres méthodes. On possède par exemple des relevés historiques sur les crues du Nil depuis 5000 ans, sur la formation des glaces et la débâcle en Islande ; en France la date des vendanges donne une idée sur la saison estivale : chaude et sèche quand les vendanges sont précoces, froide et humide en cas de vendanges tardives. Un autre exemple concerne le "petit âge glaciaire" dont témoignent de nombreux textes et qu'on peut situer entre 1600 et 1710. Il se trouve que les taches solaires ont été soigneusement observées et relevées depuis le XVII<sup>ème</sup> siècle, avec l'avènement des instruments d'optique. L'activité solaire pourrait être la cause du refroidissement de la terre (0,5 K en moyenne), responsable de ce petit âge glaciaire, et des famines qui en ont résulté.

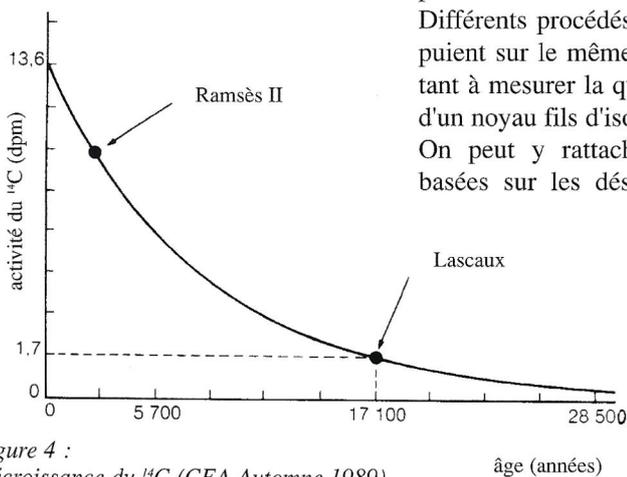


Figure 4 :  
Décroissance du  $^{14}\text{C}$  (CEA Automne 1989)

## La dendroclimatologie

La dendroclimatologie (du grec dendron : arbre) utilise les anneaux concentriques qu'on observe dans la coupe transversale d'un tronc d'arbre. Chaque anneau représente la croissance annuelle de l'arbre, dont l'âge est égal au nombre d'anneaux. En outre chaque anneau, de par son épaisseur, sa structure, donne une idée des conditions dans lesquelles il a grandi. On pense simplement d'abord qu'à un anneau épais correspond une période végétative favorable ; encore faut-il comprendre que ce terme "favorable" est relatif au climat moyen de la région du globe où a poussé l'arbre. D'autre part l'épaisseur d'un anneau dépend de multiples facteurs, parmi lesquels sa position plus ou moins éloignée de l'axe du tronc. Il faudra donc calculer l'écart entre l'épaisseur réelle de l'anneau et une valeur estimée moyenne qui tient compte d'autres paramètres. Dans ces conditions, la courbe de croissance de l'arbre : temps en abscisses, écart d'épaisseur en ordonnées, est révélatrice des fluctuations météorologiques de la période considérée. La dendroclimatologie, développée depuis le début du siècle, a apporté une contribution intéressante à l'étude du climat dans certaines régions.

## Sédiments et fossiles

Les sédiments accumulés lentement, à raison de quelques centimètres par millénaire, au fond des lacs et des mers, sont principalement constitués de squelettes d'êtres vivants souvent très petits. On peut étudier directement les affleurements de terrain, ou procéder à des prélèvements et des carottages en profondeur, sur terre ou en mer. Si le système n'a pas été brouillé, (par des animaux fouisseurs par exemple), il constitue une source d'information dont on ne donnera que quelques aperçus. Il arrive que les sédiments continentaux renferment des pollens. Les éruptions volcaniques laissent des roches qui ont conservé la trace du champ magnétique terrestre tel qu'il était lors de leur solidification, mettant ainsi en évidence des inversions de champ, et permettant un autre procédé de datation. Enfin l'étude des fossiles a apporté une connaissance relative-

ment précise du niveau des mers au cours des âges.

Les foraminifères sont parmi les plus abondants : il s'agit d'organismes marins unicellulaires, à coquille calcaire, présentant de nombreuses espèces, fossilisés depuis des centaines de millions d'années, encore présents aujourd'hui, et même élevés en laboratoire. Les coquilles des foraminifères offrent une grande variété de formes : au sein d'une même espèce, on trouve des individus à coquille plate et droite, d'autres à coquille enroulée et ramassée. Remarquons qu'à volume égal la coquille droite présente une surface extérieure plus grande. Cette forme se développe donc préférentiellement dans un milieu peu oxygéné, car elle augmente la surface d'échange avec l'eau. Les foraminifères à coquille droite apparaissent dans le fond pauvre en oxygène des mers lorsqu'on est en période de haut niveau.

Les coquilles fossiles donnent aussi des indications sur la température. En effet le rapport d'abondance des isotopes de l'oxygène  $^{18}\text{O}$  et  $^{16}\text{O}$  dans l'eau dépend de la température. Lorsque la température s'élève, il y a évaporation, et la proportion de molécules d'eau légère est plus importante dans la vapeur que dans le liquide. Le rapport  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  est donc d'autant plus grand que la température est plus élevée. Or le carbonate de calcium des coquilles de foraminifères en formation va reproduire cette composition isotopique et donner une image de la température. La composition isotopique de l'oxygène des fossiles est déterminée au spectromètre de masse.

Figure 5 :

Contenu des archives glaciaires, CR de l'Académie des Sciences. tome 8, n°2 1991

## Les archives glaciaires

Sur le continent antarctique, les couches de neige déposées peu à peu se tassent, se transforment en glace, s'enfoncent progressivement et s'écoulent vers la côte. Des modèles d'écoulement permettent de reconstituer les trajectoires et par suite la chronologie. D'après cette méthode, à la station Vostok, l'âge à la profondeur de 2000 mètres serait 150000 ans, avec une précision de 10%, résultat validé par l'étude d'événements climatiques datés par d'autres méthodes. Pour les couches supérieures, les propriétés physiques et chimiques de la glace permettent de repérer de façon précise l'alternance des saisons, et de retrouver la trace d'événements ponctuels, entre autres les éruptions volcaniques.

Pour remonter le temps, il faut effectuer des forages à grande profondeur, ce qui suppose la mise en œuvre de moyens techniques et financiers considérables. On comprend que le nombre de forages profonds soit encore très faible. Mais la carotte récupérée présente une fabuleuse richesse d'informations. On y voit d'abord de petites bulles gazeuses, dont le diamètre est de l'ordre du millimètre. Ces bulles ne sont autre chose que des échantillons de l'atmosphère emprisonnés lors de la formation de la glace. Au microscope, la carotte révèle l'existence de poussières de dimensions inférieures au micromètre, fragments d'aérosols présents dans l'atmosphère lors de la précipitation de la neige.

Enfin la composition isotopique des cristaux de glace a enregistré la température à laquelle la neige s'est déposée, ce qui permet de caractériser le climat de l'époque sur la calotte glaciaire.

Propriétés de l'atmosphère	Marquage dans la glace
- Température	Composition isotopique (D/H, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ )
- Précipitations	Stratigraphie physique et chimique
- Composition gazeuse :	Bulles d'air
• d'origine naturelle	$\text{N}_2$ , $\text{O}_2$ , $\text{CO}_2$ , $\text{CH}_4$ , $\text{N}_2\text{O}$
• anthropique	$\text{CO}_2$ , $\text{CH}_4$ , $\text{N}_2\text{O}$
- Charge en aérosols :	Impuretés
• d'origine naturelle :	
océanique	$\text{Cl}^-$ , $\text{Na}^+$ , $\text{SO}_4^{2-}$
continentale	Si, Al
volcanique	$\text{CO}_3^{2-}$ , acidité
cosmique	Ir, $^{10}\text{Be}$ et autres
• d'origine anthropique :	
industrie et autres	$\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{NO}_3^-$ , acidité, métaux lourds : Pb...
explosions thermonucléaires	$^{90}\text{Sr}$ , $^{137}\text{Cs}$

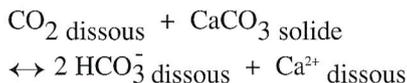
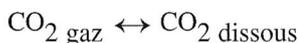


Vue d'une calotte glaciaire par satellite

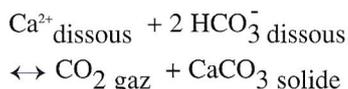
## Les concrétions des grottes

### Mécanisme de formation des concrétions

Les eaux de pluie dissolvent un peu de dioxyde de carbone, celui qui est émis par les végétaux par exemple. Ces eaux s'infiltrent dans les roches calcaires et les rongent. Les processus sont donc les suivants :



Le courant creuse progressivement la roche et une grotte apparaît. Inversement les eaux infiltrées dans la grotte et contenant l'hydrogencarbonate de calcium, peuvent déposer du calcaire lorsque la température de l'eau ou la pression partielle du dioxyde de carbone diminuent. La réaction évolue dans le sens :



C'est le phénomène de concrétionnement.

Les formes et les couleurs variées des concrétions font l'admiration des visiteurs des grottes, mais elles sont aussi le reflet de l'histoire de leur formation. Tout d'abord le dépôt de calcaire est un phénomène dynamique qui dépend au premier chef du débit de l'eau de concrétionnement. La gravité est le facteur prépondérant quand l'écoulement a lieu goutte à goutte, le

calcaire cristallise alors en coulées et colonnes ; les stalactites se forment de préférence pour un goutte à goutte lent, les stalagmites pour un goutte à goutte rapide. Lorsque l'écoulement se fait à faible débit et en milieu confiné, ce sont les forces de tension superficielle qui prennent le dessus, et la cristallisation a lieu dans toutes les directions de l'espace en donnant parfois naissance à de superbes efflorescences et aiguilles.

### Influence du climat sur les concrétions

Si la composition chimique et la texture de la roche calcaire en un site donné ne changent guère avec le temps, en revanche le débit de l'eau, associé à d'autres paramètres, tels que température et pression de  $\text{CO}_2$  ont une influence sur la structure des concrétions ; or ce sont des paramètres liés au climat. Pendant une même phase climatique, qui peut durer des milliers d'années, le concrétionnement se fait de façon constante et un même type de concrétions se développe. En période de froid et de sécheresse, le concrétionnement ralentit et peut même s'arrêter. Les périodes d'arrêt se manifestent par des stries de coloration brune, due à l'oxydation superficielle de la concrétion restée exposée à l'air.

Le système cristallin est aussi en rapport avec les conditions de précipitation : le carbonate de calcium cristallise le plus souvent en calcite, mais plus rarement, si l'alimentation en eau est réduite, et en présence de magnésium, on peut observer une cristallisation en aragonite. Quand la coupe d'une stalagmite présente des passages successifs calcite-aragonite, cela permet de conclure à des fluctuations du climat et d'établir une chronologie relative. D'autres mesures conduiront à une datation absolue.

Dans certaines stalagmites, la coupe révèle des stries, dont l'épaisseur est variable et de l'ordre du millimètre. On a trouvé qu'il se dépose deux lamines par an, en gros, l'une au prin-

temps, l'autre à l'automne, se distinguant par leur couleur plus ou moins brune. Il suffit donc de compter les lamines (un peu comme on compte les cercles concentriques d'un tronc d'arbre) pour dater les dépôts successifs de la stalagmite, cela pour les dernières centaines d'années. De plus on s'aperçoit, en consultant d'autre part les bulletins météorologiques des dernières décennies, que l'épaisseur des lamines est corrélée à la pluviométrie. Une saison particulièrement pluvieuse se décèle par une lamine épaisse. Ces recherches très actuelles ont été évoquées les 14 et 21 janvier 1997 dans l'émission scientifique "Archimède" de la chaîne ARTE.

Ces méthodes, ainsi que beaucoup d'autres, de l'étude du relief à celle du modelé glaciaire, que nous ne pouvons exposer en détail, ont permis la reconstitution du climat passé, parfois avec précision, souvent avec de grandes marges d'incertitude.

## V- ÉVOLUTION NATURELLE DU CLIMAT

### Les climats du passé

L'essentiel des connaissances sur les périodes reculées se déduit de l'étude des dépôts et du modelé glaciaire, qui témoignent de phases de glaciations parfois très étendues à la surface du globe. Entre les glaciations, la terre a connu des périodes chaudes, avec des gradients thermiques peu importants, ce qui fait penser à un effet de serre marqué. De fait, la composition de l'atmosphère, donnée par les bulles gazeuses emprisonnées dans les glaces, a beaucoup varié au cours des âges, et on estime que la concentration en  $\text{CO}_2$  a pu valoir jusqu'à 10 fois sa valeur actuelle, une forte concentration allant de pair avec une température élevée.

La période la mieux connue est évidemment l'ère quaternaire dans laquelle se succèdent des phases d'extension des glaciers, et des phases de recul auxquelles on donne le qualificatif d'interglaciaires, avec une différence de température moyenne de l'atmosphère d'environ 5 kelvins entre les centres des deux phases. Les

Alpes auraient connu six épisodes glaciaires en trois millions d'années environ. Nous sommes actuellement en période interglaciaire, la précédente remonte à 120000 ans. La dernière glaciation s'est produite il y a 18000 ans. Le Canada, le nord des États-Unis, le nord de l'Europe étaient couverts de calottes de glace. La baisse du niveau de la mer était suffisante pour que la Grande-Bretagne soit reliée au continent, et l'homme de Cro-Magnon chassait le renne et le bison dans les steppes et toundras. Une période interglaciaire a suivi, le niveau des eaux a monté considérablement (une centaine de mètres) et un climat humide a régné sur ce que nous appelons aujourd'hui le Sahara. Cette période interglaciaire dure encore de nos jours, mais sur un laps de temps plus petit, on décèle des fluctuations de moindre ampleur ; voici par exemple les cinq épisodes d'extension des glaciers alpins des derniers 3500 ans (relevés dans le livre d'Emmanuel Le Roy Ladurie, voir biblio) :

deux poussées glaciaires séparées par un court intervalle de retrait

- entre -1400 et -1300

- entre -900 et -300

- après le retrait intermédiaire de l'époque romaine, nouveau maximum entre 400 et 750

- puis au Moyen-Age entre 1200 et 1300

-enfin nouveau maximum de 1550 à 1850.

Si un certain caractère oscillatoire se manifeste, on constate pourtant que la durée des phases successives varie dans un large intervalle (de un à plusieurs siècles), ce qui rend toute prévision bien hasardeuse. Dans les années 1940-1970, un léger rafraîchissement a pu faire croire au démarrage d'une nouvelle glaciation.

Signalons qu'au cours des âges, la terre a subi de véritables catastrophes, dont on se demande si elles ne se produisent pas, elles aussi, de façon cyclique. Un large public, enfants compris, connaît l'histoire des dinosaures et de leur disparition. À l'époque des dinosaures, l'air est plus chaud, les pôles sont libres de glace, et la concentration en  $\text{CO}_2$  est très élevée. Leur extinction, il y a 65 mil-

lions d'années, coïncide avec une baisse des températures et une diminution de  $\text{CO}_2$ . Antérieurement, il y a 250 millions d'années, s'était produite une catastrophe de très grande ampleur : dans une première phase caractérisée par une forte instabilité climatique, le niveau des mers avait beaucoup baissé, et une intense activité volcanique avait libéré de grandes quantités de  $\text{CO}_2$ . Puis le niveau des mers est remonté, et les continents ont été recouverts par une eau appauvrie en oxygène, ce qui a entraîné la disparition de nombreuses espèces animales et végétales, la vie elle-même a été en danger.

### Causes de la variabilité naturelle du climat

Les variations de climat peuvent avoir des causes internes : le volcanisme, générateur de poussières et d'aérosols, la tectonique des plaques qui modifie lentement la position des régions par rapport à la terre ; mais aussi des causes externes : les chutes de météorites qui peuvent avoir des conséquences lourdes, l'activité solaire qui modifie le rayonnement reçu. Notre intérêt portera essentiellement sur deux facteurs responsables des variations de grande ampleur du climat : la variation de l'insolation liée au mouvement de la terre, et l'effet de serre.

#### La théorie de Milankovic

Sur un million d'années on peut distinguer des oscillations du climat mettant en évidence des périodes de 100000, 40000, et 20000 ans. Ces variations ont été interprétées par le mathématicien Yougoslave, Milutin Milankovic (1879-1958), dans sa théorie astronomique du climat (1941). L'orbite décrite par la terre autour du soleil est perturbée par les interactions gravitationnelles des autres planètes et de la lune. Il en résulte des variations cycliques des paramètres orbitaux : l'excentricité de l'ellipse, l'angle entre l'axe de rotation de la terre et la normale au plan de l'écliptique, et la rotation de cet axe autour de la normale qui entraîne la précession des équinoxes. Les périodes mentionnées plus haut se retrouvent dans ces variations. On peut alors en déduire la variation de

l'insolation, qui, pour modeste qu'elle soit (moins de 0,6%), va provoquer l'apparition de calottes glaciaires, dont le pouvoir réfléchissant joue un rôle amplificateur.

#### L'effet de serre

On a noté un renforcement du taux de  $\text{CO}_2$  et de  $\text{CH}_4$ , pendant les phases interglaciaires. On estime que la variation des paramètres astronomiques et l'augmentation naturelle de l'effet de serre sont, chacun pour moitié, responsables de l'échauffement de 5 kelvins en période interglaciaire.

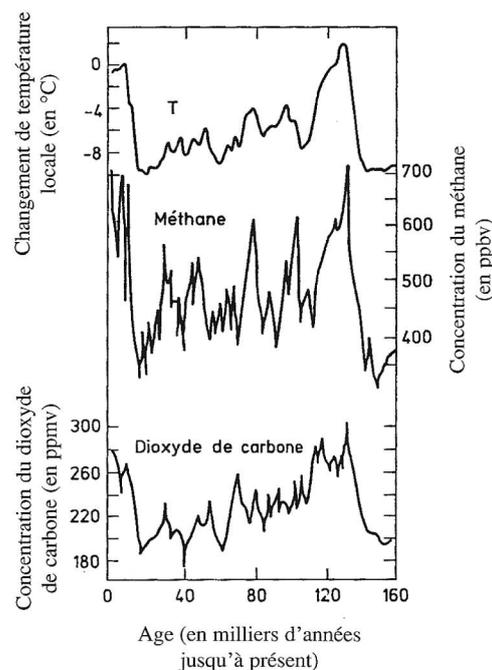


Figure 6 : Corrélation entre les variations de température de l'atmosphère et les teneurs en  $\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4$ . CR de l'Académie des Sciences série générale (tome 8, n°2-1991)

En fait, les deux facteurs, variation d'origine astronomique et effet de serre rétroagissent mutuellement, par le biais des interactions avec l'océan. Celui-ci participe aux échanges de  $\text{CO}_2$  : Une élévation de température diminue la solubilité de  $\text{CO}_2$  dans les couches d'eau superficielles, et c'est un processus rapide ; il est suivi d'un échange lent de carbone entre les couches superficielles et les fonds marins, responsable de l'importante durée de vie du gaz.

## VI- INFLUENCE DE L'HOMME ET DE SES ACTIVITÉS

### Constatations

Nous avons vu que l'effet de serre est naturel, qu'il contribue à rendre la planète confortable et que la vapeur d'eau et les nuages en sont responsables pour environ les deux tiers. Mais depuis le début de l'ère industrielle, on assiste à un accroissement de cet effet, dû aux activités humaines. Les gaz incriminés sont :

- Le dioxyde de carbone produit par les combustions des énergies fossiles (75%), et les feux de forêt dans les régions tropicales (25%). Sa teneur dans l'atmosphère est passée de 280 ppmv (partie par million en volume) avant l'ère industrielle, à 359 ppmv en 1995, avec un léger fléchissement en 1991, peut-être en raison de l'éruption du volcan Pinatubo aux Philippines. L'accroissement annuel est de 1,8 ppmv, soit 0,5%.

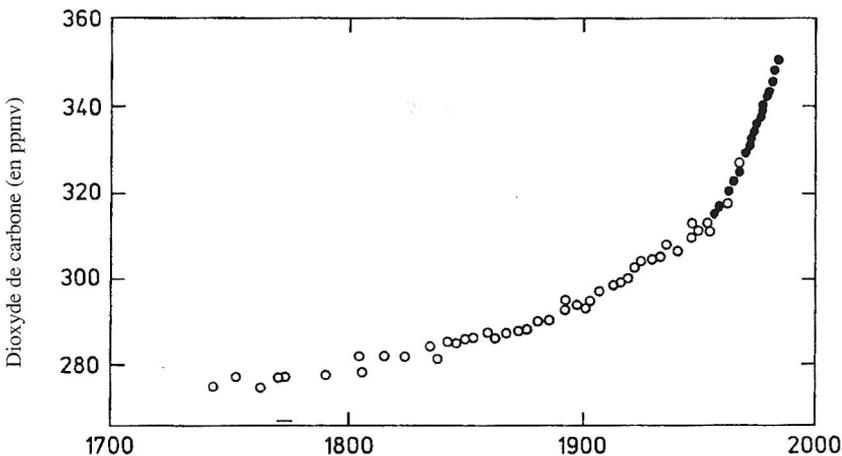


Figure 7 : Teneur de l'atmosphère en  $CO_2$ . D'après les carottes de glace (cercles clairs), et d'après les mesures directes effectuées depuis 1958 à Mauna Loa-Hawaï (cercles noirs).

- Le méthane qui résulte de la dégradation anaérobie des matières organiques. Bien que sa contribution actuelle à l'effet de serre soit moins importante que celle de  $CO_2$ , son accroissement est plus rapide. La teneur dans l'atmosphère est passée de 0,8 ppmv à 1,73 ppmv depuis le début de l'ère industrielle, soit une augmentation de 115%, et elle augmente de 0,9% par an. Le méthane se transforme dans l'atmosphère par des

processus complexes, qui aboutissent au dioxyde de carbone, à la vapeur d'eau et même à l'ozone à des niveaux de l'atmosphère où il n'était pas présent. L'augmentation de la teneur en méthane est étroitement liée aux activités agricoles : les rizières en produisent autant que les marécages et terrains humides naturels ; il est aussi rejeté dans le processus de rumination par les bovins et les moutons.

- D'autres gaz liés à l'activité industrielle comme les chlorofluorocarbures et l'oxyde d'azote  $N_2O$ , dont la longue durée de vie est un inconvénient majeur. Les CFC sont responsables de 15% de l'effet de serre anthropique. Ce sont des composés inertes et inoffensifs dans les conditions ordinaires. Mais ils diffusent dans la stratosphère où ils sont décomposés par les rayons ultraviolets avec production du radical chlore qui attaque l'ozone. Ils sont donc doublement nocifs. Malgré les mesures prises pour limiter leurs émissions, leur teneur ne diminuera probable-

ment pas au cours du prochain siècle. - L'ozone qui apparaît dans la troposphère par transformation du méthane. Il contribue à hauteur de 8% à l'effet de serre anthropique. Mais surtout, à cette altitude, il est nuisible pour les êtres vivants.

L'accord n'est pas unanime parmi les scientifiques pour constater une hausse significative de la température corrélée à l'effet de serre d'origine anthropique. On estime que le réchauffement global est de 0,3 à 0,6 kelvins depuis le XIX<sup>ème</sup> siècle, mais cette hausse n'est régulière ni dans le temps, ni géographiquement, et il est possible qu'une partie des fluctuations ait une origine naturelle.

Nous n'avons pas compté la vapeur d'eau parmi les gaz à effet de serre d'origine anthropique. Les activités humaines en produisent pourtant, mais en quantité négligeable en regard de la production naturelle par évaporation des océans. Toutefois une modification de température pourrait avoir des conséquences sur les phénomènes d'évaporation, de condensation et de formation des nuages, et à nouveau influencer l'effet de serre. Comme c'est souvent le cas en climatologie, causes et effets ne se distinguent pas nettement.

La figure suivante montre que le parallélisme des courbes représentant la variation des taux des gaz d'une part, et l'évolution de la population mondiale d'autre part, est tout à fait remarquable.

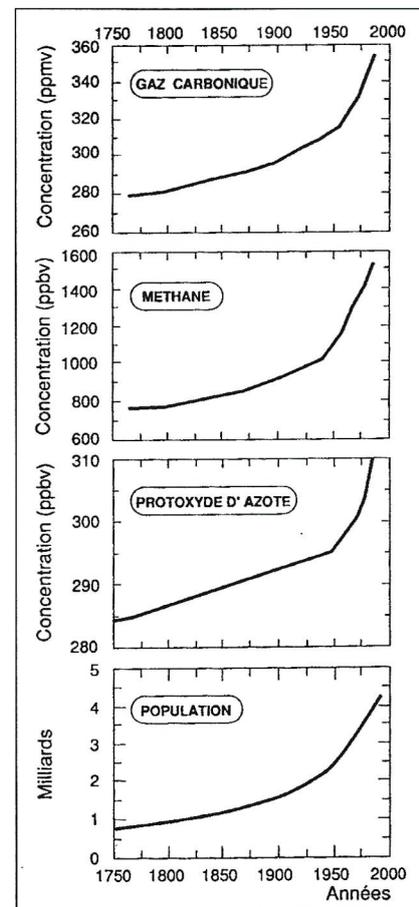


Figure 8 : Teneurs en gaz à effet de serre depuis le XVIII<sup>ème</sup> siècle et de la population mondiale. (CR de l'Académie des Sciences, tome 8 n°2 1991)

### Modèles et prévisions

Toutes les données accumulées sur le climat de la terre au cours des millénaires nous enseignent qu'il n'existe

pas de climat d'équilibre. Le système terre est éminemment instable et réagit fortement aux perturbations. Sur le plan général, il est encourageant de constater que les changements de climat ont été en définitive bien tolérés par la biosphère. Le problème de l'espèce humaine n'est pas résolu pour autant.

Pour améliorer nos possibilités de prévision il faut se construire des modèles décrivant le système global terre (atmosphère + océan + glaces + continents + biosphère), en faisant appel aux lois de la nature et aux données climatiques telles que nous les connaissons, en particulier examiner les flux d'énergie pour chaque longueur d'onde. L'expérimentation étant impossible, le modèle est validé par confrontation avec les situations du passé, sinon on procède à un ajustement progressif. Pour prévoir l'évolution ultérieure il faut faire des hypothèses supplémentaires, sur la variation de population mondiale, et sur les émissions de gaz. Au cours du siècle dernier l'augmentation de l'effet de serre est imputable aux rejets des nations industrialisées. Pour le siècle suivant elle sera due aux combustions par les pays en voie de développement. Compte tenu de ces hypothèses, l'ordinateur est en mesure de calculer l'évolution de la température en divers points du globe, ainsi que d'autres paramètres climatiques. De lourdes incertitudes subsistent : d'une part les modèles demandent à être perfectionnés au fur et à mesure que la connaissance progresse ; d'autre part la puissance des ordinateurs est encore insuffisante pour permettre un maillage fin sur le globe et aboutir à de réelles prévisions locales.

### Un exemple : le cycle du carbone

Le carbone est présent sur terre dans quatre "compartiments" entre lesquels se produisent des échanges. Le compartiment atmosphère le contient sous la forme  $\text{CO}_2$ . La masse de carbone contenue dans l'atmosphère avant l'ère industrielle sera prise pour unité et baptisée unité de carbone (UCAE). Elle vaut maintenant 1,28 UCAE.

Le compartiment surface de l'océan (couche de 75 mètres), contient 1,3 UCAE de carbone sous forme  $\text{CO}_2$  dissous, et ions carbonate et hydrogénocarbonate. Les interactions entre ces deux premiers compartiments sont régies par la température : Les mers chaudes libèrent dans l'atmosphère une quantité de  $\text{CO}_2$  en regard de laquelle la contribution anthropique paraît faible, mais cette production fait partie d'un cycle, ce qui n'est pas le cas pour les rejets humains.

Le compartiment océan (grande profondeur), contient 64 UCAE. On a déjà signalé l'existence de flux lents entre couches profondes et couches superficielles.

Le compartiment biosphère terrestre contient environ 0,75 UCAE de carbone; cette masse augmenterait en même temps que le taux de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère, par augmentation de la photosynthèse.

Reste à introduire dans le modèle l'hypothèse concernant l'émission anthropique de  $\text{CO}_2$ , et là, on ne peut qu'envisager divers scénarios schématisés sur la figure suivante, extraite du livre de Fritz Gassmann (voir biblio).

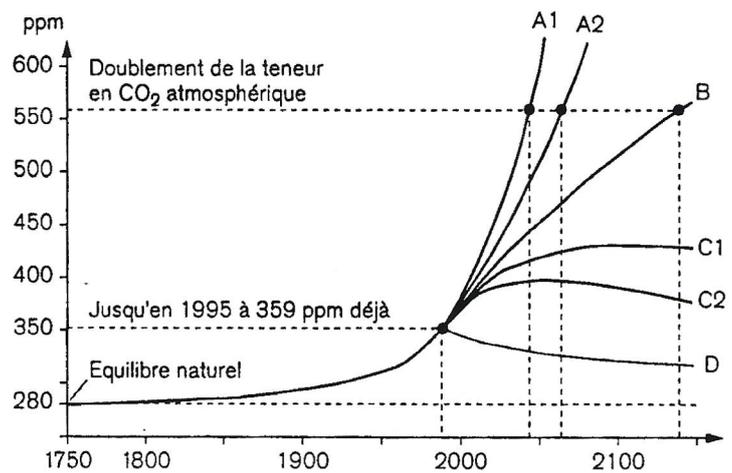


Figure 9 :

$A_1$  : poursuite de la tendance actuelle, soit croissance annuelle des émissions de 2%  
 $A_2$  : augmentation réduite à 1% par an  
 B : gel des émissions au niveau de l'année 1990 moyennant de gros efforts d'économie et, avec des mesures d'économie encore plus rigoureuses :

### La terre se réchauffe : Conséquences

Bien que le mois de janvier 1997 soit venu opportunément nous rappeler que les hivers existent encore, le rapport du GIEC de 1995 nous prédit une élévation de température globale moyenne de quelque 2 à 4 kelvins au cours du vingt-et-unième siècle. Cet important travail, mené par des experts de tous pays, part d'hypothèses raisonnables : mesures d'économie modestes, exploitation de la houille, destruction de forêts, abandon des CFC, émissions de gaz correspondant au scénario  $A_2$ .... La marge d'incertitude tient au fait que nous connaissons trop peu de chose sur le degré de sensibilité du climat et les diverses rétroactions possibles, et on peut imaginer d'éventuelles surprises.

On sait d'autre part que le niveau de la mer s'élève de 15 centimètres par siècle, depuis 1930. La hausse de la température, et le recul des glaciers n'expliquent pas à eux seuls cette élévation. Si la tendance actuelle se poursuit, le GIEC prévoit que le niveau de la mer s'élèverait de 15 à 95 centimètres d'ici 2100.

$C_1$  : diminution des émissions de 1% par an  
 $C_2$  : diminution des émissions de 2% par an  
 D : arrêt total des émissions, hypothèse irréaliste.

Le graphique montre que, même dans le scénario  $C_2$ , il faudrait plusieurs siècles avant de retrouver une concentration en  $\text{CO}_2$  de niveau égal à celui de l'époque préindustrielle.

Il est difficile de prévoir comment réagiraient les écosystèmes. Il se peut que la rapidité des modifications climatiques dépasse les possibilités d'adaptation des espèces, les fragilisent et entraînent la disparition de certaines d'entre elles. À l'inverse, on court le risque de voir proliférer des espèces indésirables.

Enfin, même si l'élévation de température globale reste faible, les changements climatiques locaux, s'ils sont plus importants, peuvent aboutir à de véritables exodes de populations, avec tous les problèmes qui les accompagnent.

## CONCLUSION

Il n'est pas possible à l'auteur de cet article, qui n'est pas un spécialiste de ces questions, de se faire une opinion tranchée, quant au danger représenté par l'augmentation de l'effet de serre d'origine anthropique. On peut penser néanmoins, que prendre conscience du risque sans s'alarmer de façon excessive, et agir en conséquence sans attendre d'avoir des certitudes absolues, est une attitude responsable et bénéfique. À cet égard, on ne peut que se féliciter de l'existence d'organismes internationaux comme le GIEC, et de la ratification de conventions par les États. Il reste à convaincre chacun d'entre nous qu'une économie plus rigoureuse à l'échelle individuelle n'est pas une

chose vaine. Nous ne devons pas non plus oublier que l'expansion démographique, quasi exponentielle, à laquelle nous assistons, est totalement déraisonnable et aggrave considérablement tous les problèmes. Comment nourrir une population qui ne cesse de croître, comment lui assurer un environnement convenable ? Tel est le défi posé au vingt-et-unième siècle.



## BIBLIOGRAPHIE

- Alain FOUCAULT : Climat. (Ed Fayard 1993).  
 Fritz GASSMANN : Effet de serre. Modèles et réalités. (Georg éditeur 1996).  
 Emmanuel LE ROY LADURIE : Histoire du climat depuis l'an mil (Ed Flammarion 1967).  
 Philippe ROQUEPLO : Climats sous surveillance (Economica 1993).

## REVUES

### Sur les méthodes de la climatologie et l'étude des climats passés

- C. ALLÈGRE et S. SCHNEIDER : L'évolution de la terre (Pour la Science déc 1994).  
 J.C. DUPLESSIS et C. LAJ : À la recherche du temps perdu (CEA n° 14 1994).  
 W. BROECKER : L'origine des glaciations (Pour la Science janv 1996).  
 J. REY et R. CUBAYNES : Les variations passées du niveau des mers (Pour la Science av 1996).  
 D. ERWIN : La plus importante des extinctions en masse (Pour la Science sept 1996).  
 P. DUBOIS et B. GRELLET : Les concrétions des grottes enregistrent climats et séismes (Pour la Science janv 1997).

### Sur l'effet de serre

- R. LEYGONIE : L'effet de serre et le réchauffement du climat (Bulletin de l'ADASTA n°19-20).  
 LA VIE DES SCIENCES : Comptes rendus de l'Académie des Sciences. Série générale : L'effet de serre et ses conséquences climatiques. (tome 8, n°2. 1991. Gauthier-Villars).



## MATERIEL ELECTRONIQUE PROFESSIONNEL

Composants - Mesure - Outillage  
 Réalisation circuits imprimés

**63000 CLERMONT-FERRAND**

22, rue Saint-Adjutor  
 Tél. 04 73 31 13 76 - Fax 04 73 31 09 34

**87000 LIMOGES**

17, rue des Arènes  
 Tél. 05 55 32 47 96 - Fax 05 55 32 42 83

# Effet de serre et pollution atmosphérique

14

Tout le monde connaît les serres des jardiniers et des horticulteurs. Dans leur version classique, ce sont des enclos qui reçoivent le rayonnement solaire à travers des verrières. De la sorte, c'est bien connu, on augmente la température moyenne au voisinage du sol dans l'enclos favorisant ainsi la croissance de certaines plantes. Cet "effet de serre" bénéfique en ce qui concerne l'horticulture semble devenir maléfique lorsqu'il est invoqué pour expliquer le réchauffement global moyen de notre atmosphère. Il contribue alors à renforcer efficacement le catastrophisme qui envahit notre fin de millénaire. Les citoyens que nous sommes sont en bon droit de s'interroger sur la réalité de cet effet de serre atmosphérique et de comprendre pour l'essentiel son mécanisme. C'est la Physique qui apporte une réponse simple dans son principe sans évacuer pour autant la complexité des phénomènes qui interviennent pour établir le bilan thermique de l'atmosphère.

Le rayonnement solaire absorbé par le sol chauffe celui-ci ce qui stimule l'émission par le sol d'un rayonnement de même nature que la lumière, mais invisible : il s'agit du rayonnement infrarouge (IR). On connaît les lampes à infrarouge utilisées, par exemple, par les sentinelles dans leur guérite les nuits d'hiver pour se réchauffer. L'énergie apportée par le rayonnement solaire est ainsi restituée par le sol sous forme de rayonnement infrarouge. Le rôle de la serre est d'empêcher que ce rayonnement IR soit totalement évacué dans l'atmosphère et de faire en sorte qu'une partie revienne vers le sol, produisant ainsi une élévation de température. Imaginons un enclos fermé par le haut par une vitre (fig.1). La vitre laisse



**Hubert GIÉ**  
Inspecteur Général  
de l'Éducation Nationale.

passer la quasi totalité du rayonnement solaire qui arrivera ainsi sur le sol de l'enclos. En revanche, le rayonnement IR émis par le sol sera arrêté par la vitre car le verre est absorbant pour ce rayonnement. La température de la vitre s'élève du fait de cette absorption et l'énergie absorbée est restituée intégralement sous forme d'un rayonnement IR émis par la vitre par sa face supérieure et par sa face inférieure. Le rayonnement IR de la vitre est émis pour moitié par la face supérieure et envoyé ainsi dans l'atmosphère et pour moitié par la face

inférieure de la vitre et renvoyé sur le sol où il est absorbé. On comprend que de la sorte une partie de l'énergie est récupérée par le sol. Nous noterons  $F_V$  ce flux d'énergie renvoyé vers le sol sous forme de rayonnement infra-rouge. Ce même flux  $F_V$  est envoyé dans l'atmosphère par la face supérieure de la vitre. Nous noterons de même par  $F_S$  le flux d'énergie solaire qui arrive sur la terre. Nous supposons que ce flux  $F_S$  est intégralement transmis par la vitre, ce qui revient à négliger l'absorption du rayonnement solaire par le verre de la vitre de même que la réflexion de ce rayonnement sur la face supérieure de la vitre.

Le sol reçoit ainsi au total un flux d'énergie :

$$F = F_S + F_V \quad (1)$$

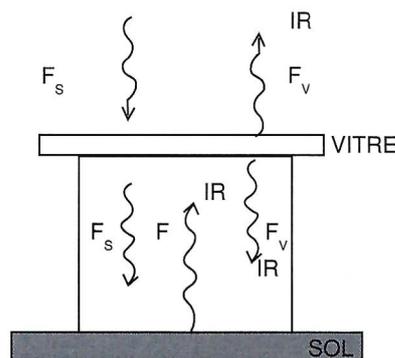
Ce flux  $F$  est réémis entièrement sous forme de rayonnement IR dont nous supposons qu'il sera totalement absorbé à son tour par la vitre, puis intégralement réémis sous forme de rayonnement IR, de sorte que :

$$F = F_V + F_V = 2 F_V \quad (2)$$

La comparaison de (1) et (2) montre que  $F_V = F_S$ . Dans ces conditions, le flux IR rayonné vers le sol par la vitre est égal au flux solaire. Le flux total reçu par le sol est ainsi doublé, soit :  $F = 2 F_S$

On dit parfois que le facteur de concentration  $C$  du dispositif est égal à 2. On comprend facilement que le facteur de concentration augmente avec le nombre de vitres puisqu'on augmente ainsi le flux IR renvoyé vers le sol.\*

\* Pour  $n$  vitres, on montre que  $C = n + 1$  en supposant toujours que le flux solaire est transmis intégralement par les vitres. Ainsi pour deux vitres superposées  $C = 3$



Dans la pratique quatre ou cinq vitres suffisent pour optimiser le dispositif. On réutilise ainsi le flux solaire. On ne peut cependant pas dire qu'il est "piégé" puisque la face supérieure de la vitre réémet vers l'atmosphère un flux qui est égal précisément au flux solaire. Simplement, le fait que le sol reçoive et absorbe un flux d'énergie plus élevé a pour effet d'augmenter la température locale au niveau du sol. La température est d'autant plus élevée que l'énergie absorbée (et réémise !) est plus importante.

L'effet de serre fait souvent "la une des médias" inquiets d'un réchauffement jugé excessif de notre planète et annonciateur de la fin du monde. On met ainsi en cause les gaz dits à effet de serre produits par les activités humaines, principalement le gaz carbonique (ou dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$ ) rejeté dans l'atmosphère par toutes les combustions. Ces gaz jouent un rôle analogue à celui des vitres des jardiniers par un effet d'absorption du rayonnement IR émis par le sol terrestre et en renvoyant vers le sol une partie de ce rayonnement contribuant ainsi au réchauffement de la basse atmosphère. Le dioxyde de carbone n'est cependant pas le seul responsable de l'effet de serre atmosphérique. D'autres gaz y contribuent et en particulier la vapeur d'eau qu'on oublie souvent de citer, observant à son sujet une discrétion assez révélatrice de la manière dont les "informateurs" pipent le jeu.

En fait, le comportement atmosphérique se révèle complexe dès que l'on veut élucider les variations de la température des basses couches atmosphériques. On observe des phénomènes concomitants et souvent agissant de façon opposée. Certains auteurs ont même pu prétendre, sans être contredits absolument que l'effet de serre atmosphérique pourrait conduire à un refroidissement. D'ailleurs s'il est vrai qu'on observe un réchauffement moyen de la basse atmosphère, il n'est pas évident qu'il résulte de la seule augmentation du  $\text{CO}_2$  et la corrélation entre les deux phénomènes est toujours sujette à controverse, sans nier pour autant

que la teneur en  $\text{CO}_2$  de notre atmosphère a augmenté significativement depuis le milieu du siècle dernier. Il ne faut pas sous-estimer un réchauffement naturel. Il convient d'abord de s'interroger sur la fraction du rayonnement solaire qui arrive effectivement sur le sol. Il tombe sous le sens que les nuages jouent un rôle important en renvoyant une partie importante du rayonnement solaire qu'ils reçoivent par le haut. On a pu estimer que, par exemple, une diminution de l'ordre de 2 % du flux solaire renvoyé par les nuages provoquerait un réchauffement de la basse atmosphère équivalent à un effet de serre provoqué par une augmentation de 50% de la teneur de notre atmosphère en gaz carbonique ! A l'inverse, les nuages contribuent eux-mêmes à l'effet de serre car l'eau liquide qu'ils contiennent absorbe en grande partie l'infrarouge. On sait bien que les nuits claires sont plus froides et qu'une couverture nuageuse atténuée le refroidissement nocturne.

D'ailleurs, le rôle de l'eau dans l'équilibre thermique de l'atmosphère est important. Le rayonnement solaire peut provoquer une vaporisation de l'eau liquide, augmentant de la sorte la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère. La vapeur d'eau c'est-à-dire l'eau sous forme gazeuse, contribue aussi à renforcer l'effet de serre. Mais aussi la vapeur d'eau peut se condenser en gouttelettes liquides et former des nuages. La vaporisation au sol de l'eau liquide tend à provoquer un refroidissement car la transformation du liquide en vapeur, pour se produire, doit prélever de l'énergie. (Tout le monde sait qu'une nappe d'éther liquide en se vaporisant sur la peau provoque une sensation de froid). D'où l'idée d'un refroidissement lié à un effet de serre invoqué par certains. A l'inverse, la condensation de la vapeur d'eau libère de l'énergie. Ces quelques indications sommaires sur le cycle de l'eau dans l'atmosphère suffisent à montrer la complexité des phénomènes. Sortons un peu de cette complexité en constatant avec soulagement que les gaz qui constituent principalement notre atmosphère, l'oxygène et l'azote, sont totalement transparents à l'infrarouge et ne pro-

duisent aucun effet de serre. Autrement dit, notre humanité l'a échappé belle et son sort ne tenait vraiment qu'à un fil !

La météorologie générale établit des modèles climatiques qui tentent de prendre en compte ces divers phénomènes. Mais ces modèles restent largement incertains quant à la prévision et l'évolution de la température moyenne de l'atmosphère. Ils prévoient tout de même un réchauffement de notre planète par effet de serre. Heureusement, l'activité humaine ne se réduit pas à la production de gaz à effet de serre. Notre atmosphère "s'enrichit" de particules solides ou liquides formant des aérosols. Ces aérosols perturbent la distribution de l'énergie solaire. D'abord, comme les nuages, ils renvoient une partie de ce rayonnement ("effet d'écran"), mais ils agissent aussi indirectement en perturbant la formation des gouttelettes d'eau dans les nuages. Globalement, ils contribuent directement ou indirectement à un effet opposé à celui de l'effet de serre.

Les conclusions hâtives semblent donc relever plus de la hantise que d'une explication indiscutable d'ordre scientifique du moins pour le moment. Nul doute que nos connaissances dans ce domaine vont en progressant. Pour l'heure, il est sage de rejeter les explications par trop simplistes trop souvent encouragées par l'angoisse régnante. Ce constat ne doit pas conduire non plus à ne pas s'interroger sur l'impact des activités humaines sur notre chance de survie. Ces activités influent indubitablement sur le climat par des effets souvent contradictoires et sans qu'on puisse, en général, incriminer particulièrement l'effet de serre. Dans ce domaine, le manichéisme n'est pas de mise, même s'il paraît commode et simplificateur. Enfin, pour clore cette discussion, indiquons le rôle important joué dans les fluctuations climatiques par les effets de convection, c'est-à-dire la prise en compte du mouvement de grandes masses d'air. Ces effets sont gouvernés par les oscillations de la position de cellules de convection de l'air.

# Aspects Scientifiques de l'évolution du climat

## Résumé à l'intention des décideurs

Groupe de Travail I du GIEC  
Version provisoire du texte officiel

### 1 - LA CONCENTRATION DE GAZ A EFFET DE SERRE CONTINUE D'AUGMENTER

L'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre depuis l'époque préindustrielle (c'est-à-dire depuis 1750 environ) a conduit à un *forçage radiatif* du climat qui tend à réchauffer la surface du globe et à produire d'autres changements climatiques.

- Un accroissement notable de la teneur atmosphérique des gaz à effet de serre a été observé, notamment du gaz carbonique (CO<sub>2</sub> : accroissement de 30% environ), du méthane (CH<sub>4</sub> : 145% environ) et du protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O : 15% environ) (chiffres de 1992). Cette évolution est largement imputable aux activités humaines et, pour l'essentiel, à l'utilisation de combustibles fossiles, à la modification de l'utilisation des sols, et à l'agriculture.

- L'accroissement des concentrations de CO<sub>2</sub>, de CH<sub>4</sub> et de N<sub>2</sub>O s'est ralenti au début des années 90. Cette variation apparemment naturelle n'est, à ce jour, pas complètement expliquée mais des données récentes indiquent que le rythme d'accroissement actuel est comparable à celui observé en moyenne pendant les années 80.

- Le forçage radiatif direct imputable aux gaz à effet de serre à durée de vie longue (2,45 Wm<sup>-2</sup>) est dû essentiellement à l'accroissement de la concentration de CO<sub>2</sub> (1,56 Wm<sup>-2</sup>), de CH<sub>4</sub> (0,47Wm<sup>-2</sup>), et de N<sub>2</sub>O (0,14Wm<sup>-2</sup>) (chiffres de 1992).

- De nombreux gaz à effet de serre restent très longtemps dans l'atmosphère (de plusieurs dizaines d'années à plusieurs siècles pour le CO<sub>2</sub> et le N<sub>2</sub>O) ; ils influent sur le forçage radiatif sur des échelles de temps longues.

*Depuis 1990,  
les connaissances en matière  
de changement climatique<sup>1</sup>  
ont considérablement progressé  
et se sont enrichies  
de nouvelles données et analyses.*

### Etats des connaissances scientifiques

- Le forçage radiatif direct lié à l'action combinée des CFC et des HCFC totalise 0,25 Wm<sup>-2</sup>. Le forçage radiatif net qui leur est imputable est, cependant, réduit de 0,1 Wm<sup>-2</sup> environ, car ces gaz produisent une diminution de l'ozone stratosphérique qui induit un forçage radiatif négatif.

- L'accroissement de la concentration de CFC s'est ralenti et est pratiquement nul. Ceci n'est pas le cas des HCFC. On s'attend à ce que les concentrations de CFC et de HCFC -ainsi que la diminution d'ozone que ces gaz occasionnent- diminuent sensiblement d'ici 2050 grâce à l'application du Protocole de Montréal et aux amendements et ajustements qui lui ont été apportés.

- Jusqu'à présent, certains gaz à effet de serre à durée de vie longue (particulièrement les HFC -gaz de remplacement des CFC- les PFC et le SF<sub>6</sub>) contribuent peu au forçage radiatif. Cependant, l'accroissement de leur concentration pourrait conduire à une augmentation du forçage radiatif de quelques pourcents au cours du XXI<sup>e</sup> siècle.

- Si les émissions de gaz carbonique se maintenaient approximativement à leur niveau actuel (1994), la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère s'élèverait de façon pratiquement constante pendant au moins 200 ans. Elle atteindrait 500 ppmv environ à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle, soit près du double de la concentration de 280 ppmv observée avant l'ère industrielle.

- Les modèles du cycle du carbone indiquent que la teneur de l'atmosphère en CO<sub>2</sub> ne pourrait se stabiliser -autour de 450, 650 ou 1 000 ppmv- que si les émissions de CO<sub>2</sub> d'origine humaine revenaient au niveau de 1990 d'ici respectivement 40, 140 ou 240 ans, et si elles diminuaient nettement au-dessous de ce niveau par la suite.

- La stabilisation des concentrations dépendra davantage des émissions cumulées de CO<sub>2</sub> d'origine humaine au moment de la stabilisation que de l'évolution de ces émissions d'ici que celle-ci soit atteinte. Ceci implique que, si les émissions restent plus élevées dans un premier temps, il faudra, pour obtenir la stabilisation des concentrations à un certain niveau, les réduire davantage ultérieurement. Selon certains des scénarios envisagés, les émissions anthropiques cumulées de 1991 à 2100 devront s'établir à 630, 1 080 ou 1 410 GtC<sup>3</sup> pour que les concentrations se stabilisent à 450, 650 ou 1 000 ppmv respectivement (à plus ou moins 15% dans chaque cas). A titre de comparaison les émissions cumulées correspondantes variaient de 770 à 2 190 GtC dans les scénarios IS92 du GIEC.

- La stabilisation des concentrations de CH<sub>4</sub> et de N<sub>2</sub>O aux niveaux actuels exigerait une réduction des émissions anthropiques de 8 et 50% respectivement.

- Il apparaît que, dans l'hémisphère Nord, la concentration d'ozone troposphérique due aux activités humaines s'est accrue depuis l'ère préindustrielle entraînant un forçage radiatif positif. Ce forçage, encore mal caractérisé, est évalué à environ 0,4 Wm<sup>-2</sup> (dont 15% imputables aux gaz à effet de serre à durée de vie longue). Cependant, les observations effectuées au cours des dix dernières années indiquent que cet accroissement s'est nettement ralenti ou, même, qu'il s'est arrêté.

## 2 - LES AEROSOLS D'ORIGINE HUMAINE ONT TENDANCE A PRODUIRE UN FORÇAGE RADIATIF NEGATIF

- Les aérosols (particules microscopiques en suspension dans l'air) troposphériques provenant de la combustion des combustibles fossiles, de la biomasse, et de d'autres sources, ont entraîné un forçage négatif direct d'environ  $0,5 \text{ Wm}^{-2}$  en moyenne globale, et, probablement, un forçage négatif indirect d'une valeur comparable. Bien que ce forçage négatif soit concentré dans certaines régions et zones subcontinentales, il se pourrait qu'il ait des incidences climatiques aux échelles continentale à hémisphérique.
- A l'échelle locale, le forçage négatif imputable aux aérosols est parfois supérieur au forçage positif dû aux gaz à effet de serre.
- Contrairement aux gaz à effet de serre à durée de vie longue, les aérosols d'origine humaine ont une durée de vie très courte dans l'atmosphère. C'est pourquoi le forçage radiatif qui leur est imputable suit rapidement l'augmentation ou la diminution des émissions.

## 3 - LE CLIMAT A EVOLUE DEPUIS LE SIECLE DERNIER

En un point donné, les fluctuations inter-annuelles du climat peuvent être considérables, mais l'analyse de données, météorologiques ou autres, sur de larges régions et pour des périodes de quelques décennies ou plus, laissent apparaître d'importantes variations systématiques.

- En moyenne globale, la température de surface a augmenté de  $0,3$  à  $0,6^\circ\text{C}$  environ depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Les données recueillies depuis 1990 et les nouvelles analyses effectuées depuis n'ont pas modifié les estimations de cette augmentation de température.
- Les années récentes ont été parmi les plus chaudes depuis 1860 (début de la période d'instrumentation), et ce malgré l'effet de refroidissement dû à l'éruption volcanique du mont Pinatubo en 1991.
- Les températures nocturnes ont généralement augmenté davantage que les températures diurnes.
- Des modifications sont également observées à l'échelle régionale. Par exemple, c'est dans les régions continentales des latitudes moyennes, en hiver et au printemps, que le réchauffement climatique récemment observé a été le plus pro-

noncé, avec un refroidissement dans certaines zones telles que l'Atlantique Nord. La quantité de précipitations s'est accrue sur les continents aux latitudes élevées de l'hémisphère Nord, surtout pendant la saison froide.

- En moyenne globale, le niveau de la mer s'est élevé de  $10$  à  $25 \text{ cm}$  au cours des cent dernières années. Ce phénomène est imputable en grande partie à l'augmentation de la température moyenne du globe.
- Les données dont on dispose sont insuffisantes pour déterminer si les fluctuations de la variabilité du climat ou des conditions météorologiques extrêmes se sont produites à l'échelle globale au cours du XX<sup>e</sup> siècle. A l'échelle régionale, il existe des indications claires de l'évolution de certaines conditions extrêmes et de certains indicateurs de la variabilité du climat (par exemple une diminution de la fréquence du gel dans diverses grandes régions, et aux Etats-Unis, une augmentation de la proportion des chutes de pluie dues à des phénomènes extrêmes). Certains de ces changements semblent indiquer une augmentation de la variabilité du climat, d'autres une diminution.
- La période chaude et persistante du phénomène El Niño -oscillation australe (phénomène à l'origine de sécheresses et d'inondations dans de nombreuses régions) observée entre 1990 et la mi-1995 a été inhabituelle par rapport à la situation au cours des 120 dernières années.

## 4 - UN FAISCEAU D'ELEMENTS SUGGERE QU'IL Y A UNE INFLUENCE PERCEPTIBLE DE L'HOMME SUR LE CLIMAT GLOBAL

Toute influence de l'homme sur le climat se superpose au "bruit de fond" représenté par sa variabilité naturelle. Celle-ci résulte aussi bien de fluctuations internes que de causes externes telles que de la variabilité de l'activité solaire ou les éruptions volcaniques. Les études de détection et d'attribution s'efforcent d'établir une distinction entre les influences naturelles et celles qui relèvent de l'homme. La "détection" est l'opération consistant à démontrer qu'un changement climatique observé est hautement inhabituel au sens statistique. Cette opération ne vise pas à déterminer les motifs du changement. "L'attribution" est l'opération consistant à établir des relations de cause à effet et notamment à contrôler le bien fondé de différentes hypothèses plausibles.

Depuis la parution du Rapport de 1990 du GIEC, la distinction entre les influences naturelles qui s'exercent sur le climat et celles qui relèvent de l'homme a considérablement progressé. De tels progrès ont été accomplis en tenant compte de l'effet des aérosols soufrés en plus de celui des gaz à effet de serre. Ceci a permis d'aboutir à une évaluation plus réaliste du forçage radiatif dû aux activités humaines. Ces effets ont été intégrés dans des modèles climatiques pour obtenir des simulations plus complètes du "signal" climatique d'origine anthropique. En outre, des renseignements précieux sur la variabilité naturelle interne du climat, à des échelles de temps allant de la décennie au siècle, ont été obtenus grâce à des nouvelles simulations par des modèles couplés océan-atmosphère. D'autres progrès sensibles ont été réalisés en passant de l'étude des changements en moyenne globale à une comparaison des caractéristiques spatiales et temporelles entre les changements climatiques modélisés et observés.

Les résultats les plus importants obtenus en matière de détection et d'attribution sont les suivants :

- Selon les informations limitées fournies par différents indicateurs climatiques, la température de l'air, en moyenne globale, est au moins aussi élevée au XX<sup>e</sup> siècle qu'elle ne l'a été à toute autre époque entre la période actuelle et 1400 après Jésus-Christ. Les données antérieures à 1400 sont trop fragmentaires pour permettre une évaluation fiable de la température moyenne du globe.
- Pour déterminer la signification statistique de l'évolution de la température moyenne globale au cours du siècle dernier, il a été fait appel à de nouvelles évaluations de la variabilité naturelle du climat, qu'elle soit interne ou forcée par des processus externes. Ces évaluations sont fondées sur des mesures, sur des données paléoclimatiques, sur les résultats obtenus à partir de modèles climatiques simples ou complexes, et sur des modèles statistiques appliqués aux observations. La plupart de ces études ont permis de détecter des changements significatifs démontrant que la tendance au réchauffement observée n'est vraisemblablement pas uniquement d'origine naturelle.
- Les indications récentes les plus convaincantes de l'influence de l'homme sur le climat viennent de la comparaison des caractéristiques -géographiques, saisonnières et verticales- des changements de températures prédits, en tenant compte de l'effet combiné des gaz à effet de serre et des aérosols soufrés d'origine anthropique, d'une part, et observés, de l'autre. Ces études montrent que la concordance entre ces caractéristiques s'améliore pro-

gressivement, comme on peut s'y attendre, à mesure que le signal d'origine anthropique s'intensifie. Il existe, en outre, une très faible probabilité pour qu'une telle concordance se produise par hasard, comme le résultat de la seule variabilité interne et naturelle du climat. De plus, le profil vertical du changement observé ne correspond pas à celui attendu pour les forçages solaire et volcanique.

- Notre capacité à mesurer l'influence de l'homme sur le climat global reste limitée car le signal attendu est encore difficile à distinguer du bruit de fond lié à la variabilité naturelle, et à cause d'incertitudes sur divers facteurs importants. Ces incertitudes ont trait à l'ampleur et aux caractéristiques de la variabilité naturelle à long terme, de l'évolution temporelle du forçage lié aux gaz à effet de serre, aux aérosols et aux changements à la surface des continents, et de la réponse à ce forçage. Malgré ces incertitudes, le faisceau d'éléments disponibles suggère qu'il y a une influence perceptible de l'homme sur le climat global.

## 5 - ON S'ATTEND A CE QUE LE CLIMAT CONTINUE D'EVOLUER

Le GIEC a élaboré une série de scénarios, concernant l'évolution future des émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols (IS92a à f). Ces scénarios reposent sur certaines hypothèses concernant la croissance démographique et économique, l'exploitation des sols, les progrès technologiques et l'approvisionnement énergétique, ainsi que la façon dont les différentes sources d'énergie contribueront à cet approvisionnement entre 1990 et 2100. A partir de la connaissance du cycle global du carbone et la chimie de l'atmosphère, ces émissions peuvent être prises en compte pour prévoir la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre et des aérosols ainsi que la perturbation induite par rapport au forçage radiatif naturel. Les modèles climatiques peuvent être alors utilisés pour prédire l'évolution future du climat.

- Les simulations de plus en plus réalistes des climats, passé et actuel, obtenues à partir de modèles climatiques dans lesquels l'atmosphère et l'océan sont couplés, donnent davantage confiance dans leur capacité à prédire l'évolution future du climat. Il reste de grandes incertitudes mais celles-ci ont été prises en compte dans l'ensemble des projections de la température moyenne globale et du niveau de la mer.

- Dans l'hypothèse du scénario moyen du GIEC (IS92a), avec la "valeur la plus

probable" de la sensibilité du climat<sup>4</sup> et la prise en compte de l'incidence de l'augmentation prévue de la concentration d'aérosols, l'augmentation prédite de la température moyenne globale à la surface est d'environ 2°C entre 1990 et 2100. Cette valeur est d'un tiers inférieure environ à la "valeur la plus probable" déterminée en 1990. Une telle différence est due essentiellement au plus faible niveau d'émissions prévu par le scénario (en particulier pour le CO<sub>2</sub> et les CFC), à l'incorporation du refroidissement par les aérosols soufrés et à l'amélioration du traitement du cycle du carbone. Le scénario le plus bas du GIEC (IS92c), avec une "faible" valeur de la sensibilité du climat et la prise en compte de l'incidence de la progression prévue de la concentration d'aérosols, conduit à prédire un réchauffement d'environ 1°C en 2100. Le scénario le plus élevé du GIEC (IS92e) et une valeur "élevée" de la sensibilité du climat, conduisent à prédire un réchauffement de 3,5°C environ. Dans tous les cas de figure, la rapidité du réchauffement serait probablement plus élevée qu'elle ne l'a été à toute autre période depuis 10 000 ans ; cependant, à l'échelle de 1 - 10 ans, l'évolution du climat serait marquée par une variabilité naturelle importante. Les fluctuations régionales des températures pourraient être sensiblement différentes de la moyenne globale. En raison de l'inertie thermique des océans, la température n'aurait, en 2100, progressé vers son point d'équilibre que de 50% à 90% ; elle continuerait d'augmenter au-delà de cette date, même si la concentration de gaz à effet de serre s'était alors stabilisée.

- Une élévation du niveau moyen de la mer est prévue en raison du réchauffement des océans et de la fonte des glaciers de montagne et des calottes glaciaires. Dans l'hypothèse du scénario moyen du GIEC (IS92a), avec les "valeurs les plus probables" de la sensibilité du climat et de la fonte des glaces au réchauffement, et la prise en compte de l'incidence de la progression prévue des aérosols, une élévation du niveau de la mer d'environ 50 cm est prédite entre aujourd'hui et 2100. Cette valeur est inférieure de 25% environ à la "valeur la plus probable" déterminée en 1990, en raison d'une augmentation de température prédite plus faible, mais aussi de l'amélioration des modèles climatiques et cryosphériques. Dans l'hypothèse du scénario le plus bas du GIEC (IS92c), avec des "faibles" valeurs de la sensibilité du climat et de la fonte des glaces au réchauffement et la prise en compte de l'incidence des aérosols, la prédiction d'élévation du niveau de la mer est de 15 cm environ entre aujourd'hui et 2100.

Dans l'hypothèse du scénario le plus élevé du GIEC (IS92e), avec des valeurs "élevées" de la sensibilité du climat et de la fonte des glaces, on aboutit à une élévation du niveau de la mer de 95 cm environ entre aujourd'hui et 2100. Le niveau de la mer continuerait de s'élever à une allure semblable au-delà de cette date, même si la concentration de gaz à effet de serre s'était alors stabilisée. Il continuerait de s'élever après que la température moyenne globale se soit stabilisée. A l'échelle régionale, les fluctuations du niveau de la mer pourraient être différentes de la moyenne globale en raison de mouvements de terrain et de changements dans les courants océaniques.

- Les projections obtenues avec des modèles couplés océan-atmosphère sont plus fiables aux échelles hémisphérique ou continentale qu'à l'échelle régionale. On se fie davantage aux prévisions concernant la température qu'à celles concernant le cycle hydrologique.

- Toutes les simulations climatiques, qu'elles tiennent compte du forçage dû à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre et des aérosols ou uniquement du forçage dû à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre, ont les caractéristiques suivantes : augmentation de la température de surface plus importante sur terre que sur mer en hiver ; augmentation de la température de surface maximale dans les latitudes élevées de l'hémisphère Nord en hiver ; faible augmentation de la température de surface dans l'Arctique en été ; intensification du cycle hydrologique en moyenne globale et accroissement de la quantité des précipitations et de l'humidité du sol dans les latitudes élevées en hiver. Toutes ces fluctuations s'expliquent par des mécanismes physiques identifiables.

- En outre, la plupart des simulations, indiquent un affaiblissement de la circulation thermohaline dans l'Atlantique Nord et une réduction largement répandue de l'amplitude thermique diurne. Ces caractéristiques s'expliquent également par des mécanismes physiques identifiables.

- Les effets directs et indirects des aérosols anthropiques ont des incidences sensibles sur les prévisions. En général, celles-ci indiquent des fluctuations de température et de précipitations de plus faible amplitude si l'on tient compte des effets des aérosols, en particulier dans les latitudes moyennes de l'hémisphère Nord. On notera que l'effet de refroidissement dû aux aérosols, loin de compenser simplement le réchauffement dû aux gaz à effet de serre, à d'importantes répercussions sur certaines caractéristiques des

changements climatiques à l'échelle continentale, particulièrement apparentes dans l'hémisphère d'été. Par exemple, les prévisions obtenues à partir de modèles tenant uniquement compte des effets des gaz à effet de serre indiquent un accroissement de la hauteur des précipitations et de l'humidité du sol dans la région de la mousson d'été asiatique, alors que celles obtenues à partir de modèles tenant également compte des effets des aérosols indiquent une possibilité de diminution des pluies de mousson. La répartition spatiale et temporelle des aérosols influe largement sur les projections à l'échelle régionale, ce qui contribue à augmenter les incertitudes liées à ces projections.

- Un réchauffement global devrait conduire à une augmentation du nombre de journées très chaudes et à une diminution du nombre de journées très froides.

- L'élévation des températures entraînera le renforcement du cycle hydrologique, d'où un risque d'aggravation des sécheresses et/ou des inondations à certains endroits et une possibilité de diminution de l'ampleur de ces phénomènes à d'autres endroits. Plusieurs modèles prévoient une augmentation de l'intensité des précipitations, ce qui pourrait conduire à une recrudescence de chutes extrêmes de pluie. Nos connaissances sont insuffisantes à ce jour pour que l'on puisse prévoir si le nombre ou la répartition géographique de fortes tempêtes telles que les cyclones tropicaux vont se modifier.

- Une évolution rapide et soutenue du climat pourrait modifier l'équilibre de la concurrence entre espèces et même entraîner un dépérissement des forêts, d'où une altération de la quantité de carbone absorbée et dégagée par les biomes terrestres. L'importance de cette altération est incertaine, mais elle pourrait, selon le rythme d'évolution du climat, se situer entre 0 et 200 GtC au cours des 100 ou 200 prochaines années.

## 6 - LES INCERTITUDES RESTENT NOMBREUSES

Actuellement, de nombreux facteurs limitent notre capacité à prévoir et à détecter les changements climatiques à venir. Pour réduire les incertitudes, il convient d'approfondir les connaissances dans les domaines prioritaires suivants :

- évaluation des futures émissions et des cycles biogéochimiques, des gaz à effet de serre (y compris les sources et les puits), des aérosols et des précurseurs d'aérosols ; de leur concentration future et de leurs propriétés radiatives ;

- prise en compte des processus climatiques dans les modèles, et notamment des rétroactions liées aux nuages, aux océans à la glace de mer et à la végétation, afin d'affiner les projections concernant la rapidité et les caractéristiques régionales des changements climatiques ;

- collecte à long terme et systématique d'observations directes et reconstitution, à partir d'indicateurs indirects de leurs variations dans le passé, de certains paramètres du système climatique (énergie solaire, éléments du bilan énergétique de l'atmosphère, cycle hydrologique, caractéristiques des océans et changements des écosystèmes, etc.) afin de vérifier la validité des modèles, d'évaluer la variabilité de ces paramètres dans le temps et à l'échelle régionale, et de les utiliser dans le cadre d'études de détection et d'attribution.

Des fluctuations inattendues, rapides et de grande ampleur du système climatique (comme il s'en est produit par le passé) sont difficiles à prévoir de par leur nature même. La future évolution du climat risque donc de nous réserver des "surprises", dues notamment au caractère non linéaire du système climatique. En cas de forçage rapide, les systèmes non linéaires sont particulièrement susceptibles de comportements inattendus. Il est possible de réaliser des progrès en étudiant les processus et les composantes non linéaires du système climatique. On peut citer, parmi ces phénomènes non linéaires, les fluctuations rapides de la circulation dans l'Atlantique Nord et les rétroactions liées aux modifications des écosystèmes terrestres.

## AUTEURS/ CONTRIBUTEURS

Dieter H. Ehhalt, Allemagne ; Martin Heimann, Allemagne ; E. Detlef Schulze, Allemagne ; Osvaldo Sala, Argentine ; Ian G. Enting, Australie ; Graham Farquhar, Australie ; Paul Fraser, Australie ; Ann Henderson-Sellers, Australie ; Harvey Marchant, Australie ; Bryant J. McAvaney, Australie ; Neville Nicholls, Australie ; Neville Smith, Australie ; John Zillman, Australie ; Diognes Alves, Brésil ; Pedro L. Silva Dias, Brésil ; Gylvan Meira Filho, Brésil ; Gorge Boer, Canada ; K.L. Denman, Canada ; Gordon A. McBean, Canada ; M.A. Pe, Canada ; Andrew J. Weaver, Canada ; Ding Yihui, Chine ; Qing-Cun Zeng, Chine ; Xiuji Zhou, Chine ; Daniel L. Albritton, Etats-Unis ; Ebby Anyamba, Etats-Unis ; Tim P. Barnett, Etats-Unis ; Robert Charlson, Etats-Unis ; Rober E. Dickinson, Etats-Unis ; W. Lawrence Gates, Etats-Unis ; Filippo Giorgi, Etats-Unis ; Eileen E. Hofmann, Etats-Unis ; Tom Karl, Etats-Unis ; Gerald A. Meehl, Etats-Unis ; Mark F. Meier, Etats-Unis ;

Jerry Melillo, Etats-Unis ; Michael Oppenheimer, Etats-Unis ; Michael Prather, Etats-Unis ; V. Ramaswamy, Etats-Unis ; David A. Randall, Etats-Unis ; Ben D. Santer, Etats-Unis ; Edward S. Sarachik, Etats-Unis ; David Schimel, Etats-Unis ; Stephen H. Schneider, Etats-Unis ; Frederick Semazzi, Etats-Unis ; Susan Solomon, Etats-Unis ; Ron Stouffer, Etats-Unis ; Kevin E. Trenberth, Etats-Unis ; Robert T. Watson, Etats-Unis ; Don Wuebbles, Etats-Unis ; G.V. Gruza, Fédération de Russie ; Valentin Meleshko, Fédération de Russie ; Yves Fouquart, France ; J. Jouzel, France ; Christian Le Provost, France ; Dominique Raynaud, France ; Tom M.L. Wigley, Grande-Bretagne ; Bruce A. Callander, Grande-Bretagne ; R.G. Derwent, Grande-Bretagne ; Chris K. Folland, Grande-Bretagne ; Michael Grubb, Grande-Bretagne ; Neil Harris, Grande-Bretagne ; Sir John Houghton, Grande-Bretagne ; Peter R. Jonas, Grande-Bretagne ; Peter Liss, Grande-Bretagne ; Kathy Maskell, Grande-Bretagne ; John F.B. Mitchell, Grande-Bretagne ; Davide E. Parker, Grande-Bretagne ; Keith Shine, Grande-Bretagne ; Anthony Slingo, Grande-Bretagne ; P.L. Woodworth, Grande-Bretagne ; Murari Lal, Inde ; S. Sadasivan, Inde ; J. Srinivasan, Inde ; Akio Kitoh, Japon ; Tatsushi Tokioka, Japon ; Mack McFarland, Kenya ; Laban J. Ogallo, Kenya ; Ivar Isaksen, Norvège ; Richard A. Warrick, Nouvelle-Zélande ; Johannes Oerlemans, Pays-Bas ; Arie Kettenberg, Pays-Bas ; A.B. Diop, Sénégal ; Bert Bolin, Suède ; Colin Prentice, Suède ; Henning Rodhe, Suède ; Hartmut Grassl, Suisse ; F. Joos, Suisse ; Eugenio Sanhuza, Venezuela.

1) Par "changement climatique", le Groupe de travail I du GIEC entend toute évolution du climat dans le temps, qu'elle soit due à la variabilité naturelle ou aux activités humaines. Cette définition est différente de celle de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, où l'on entend par "changements climatiques" des changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine, qui modifie la composition de l'atmosphère globale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables.

2) Unité simple permettant de mesurer l'ampleur d'un mécanisme susceptible de conduire à un changement climatique, le forçage radiatif est la perturbation du bilan énergétique du système sol-atmosphère (exprimée en  $Wm^2$ ).

3) 1 GtC = 1 milliard de tonnes de carbone.

4) Dans les rapports du GIEC, la sensibilité du climat désigne généralement la variation à long terme (du point d'équilibre) de la température moyenne globale à la surface à la suite d'un doublement de la concentration atmosphérique de  $CO_2$ . De façon plus générale, elle désigne la variation du point d'équilibre de la température de l'air en surface à la suite d'une unité de forçage radiatif ( $^{\circ}C/Wm^2$ ).

# Inversion du Champ Magnétique Terrestre dans la Chaîne des Puys (à Laschamp)

Exposé fait  
à l'Académie des Sciences  
et Belles lettres de Clermont-Ferrand  
le 5 Février 1997.

Mesdames, Messieurs,  
Mes Chers Amis,

C'est un honneur pour moi de vous présenter un phénomène étrange, surprenant, mystérieux, qui intrigue et divise encore les géophysiciens. Je ne suis pas une spécialiste de géophysique, ni de géomagnétisme mais je vais essayer de faire le point sur un sujet qui n'est pas encore complètement élucidé : l'inversion du champ magnétique terrestre dans la coulée volcanique du Puy de Laschamp (à 13 km au Nord Ouest de Clermont-Ferrand).

Je rappellerai d'abord quelques généralités sur le magnétisme terrestre, puis je parlerai de l'inversion proprement dite et de sa découverte, puis des méthodes de datations employées ; enfin je terminerai par un essai d'interprétation de ce phénomène assez déroutant.

L'Homme s'est toujours intéressé à l'astronomie, il vient de partir à la conquête de l'Espace mais les secrets de notre bonne vieille Terre, sous nos pieds ne sont pas encore tous dévoilés. Bien sûr, la géologie - qui est l'étude des roches - est une science fort ancienne et il est attesté que, dès le VII<sup>ème</sup> siècle avant Jésus-Christ, les Grecs connaissaient la propriété de certaines roches naturelles d'attirer le fer : ils les appelaient "**pierres de Magnésie**" du nom de la ville près de laquelle on en trouvait de grandes quantités (de là vient l'adjectif "**magnétique**"). Peu à peu, on



**Suzanne GELY**  
Ancienne Elève  
de l'Ecole Normale Supérieure  
Agrégée de Sciences Physiques

découvre que le fer, attiré par ces roches qu'on appelle alors "pierres d'aimant", devient lui-même magnétique et peut, à son tour, attirer d'autres morceaux de fer.

Puis on s'aperçoit que de fines lamelles de ces roches - ou des aiguilles métalliques aimantées à leur contact - laissées libres de leur mouvement s'orientent toujours dans un plan vertical passant approximativement par l'Etoile Polaire, donc à proximité du point de la surface terrestre que plus tard on appellera le Pôle Nord : c'était la première manifestation du **magnétisme terrestre**.

On attribue traditionnellement aux chinois (à des dates assez variables selon les historiens, de 300 ans avant Jésus-Christ au onzième siècle de notre ère) la découverte de l'ancêtre de la boussole : une aiguille métallique frottée contre une pierre d'aimant, introduite dans un fétu de paille, mise à flotter à la surface d'une

bassine d'eau indique alors la direction de l'Etoile Polaire.

L'Histoire des Sciences n'a pas retenu le nom de celui qui, le premier, a placé l'aiguille aimantée sur un pivot, au centre d'une petite boîte (le mot "boussole" vient de l'italien **bussola**, petite boîte). L'emploi de la boussole se généralise alors et tous les navigateurs européens l'utilisent à partir du XII<sup>ème</sup> siècle.

Très vite, au XV<sup>ème</sup> siècle, on s'aperçoit que la boussole ne donne qu'approximativement la direction du Nord géographique. On découvre alors que la Terre est équivalente à un barreau aimanté dont la direction ne coïncide pas tout à fait avec l'axe de rotation de la Terre sur elle-même (l'axe magnétique et l'axe de rotation font un angle de 11° environ) : ainsi les pôles magnétiques ne sont pas confondus avec les pôles géographiques : dans l'Hémisphère Nord le pôle magnétique se trouve au Groenland (à 79° de latitude Nord, 69° de longitude Ouest) et c'est vers lui que pointe la boussole.

Mais ce pôle magnétique de l'Hémisphère Nord est, en fait, le pôle Sud magnétique du barreau aimanté équivalent à la Terre (en effet, on sait que les pôles magnétiques de noms contraires s'attirent et de même nom se repoussent).

L'étude systématique du magnétisme terrestre n'a commencé que dans la première moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle lorsque le physicien allemand Carl Friedrich Gauss (1777-1855) - qui était aussi astronome et mathématicien - crée à Gottingen le premier observatoire magnétique. Puis, un

système mondial d'observation se met en place progressivement et, actuellement, plus de 200 stations réparties sur le globe mesurent régulièrement les valeurs absolues et les variations des caractéristiques du **champ magnétique terrestre** que je vais maintenant présenter rapidement.

Il est donné par une aiguille aimantée pouvant s'orienter librement et suspendue en son milieu par un fil sans torsion.

On représente alors ce champ magnétique par un vecteur  $\vec{B}$  situé dans le plan du **méridien magnétique** (plan passant par l'axe des pôles et contenant l'aiguille au point considéré :

- l'angle  $I$  d'inclinaison est l'angle que fait le champ avec le plan horizontal.  
- la *déclinaison*  $D$  est l'angle du méridien magnétique avec le méridien géographique.

La déclinaison est - orientale si le méridien magnétique est à l'est du méridien géographique

- occidentale s'il est à l'Ouest.

$B$  représente l'intensité du champ

$B_0$  représente l'intensité de la composante horizontale.

Ces intensités sont très faibles, des milliers de fois plus petites que celles des aimants ordinaires (droits ou en fer de cheval) ou des électroaimants. Mais elles sont cependant mesurables avec des appareils de précisions appelés **magnétomètres** ; et ce champ magnétique, bien que faible, est suffisant pour orienter la boussole !

Les caractéristiques du champ magnétique que je viens de vous présenter ( $B$ ,  $B_0$ ,  $D$ ,  $I$ ) varient avec le lieu et au cours du temps.

à Paris :

$B_0 = 0,2 \text{ gauss} = 2 \times 10^{-5} \text{ Tesla}$

$I \approx 64^\circ$  environ :  $D \approx 6^\circ$  environ

$B \approx 4,5 \times 10^{-5} \text{ Tesla}$

Mais la valeur de  $B$  diminue régulièrement au cours du temps et, si la décroissance continuait, le champ magnétique terrestre pourrait s'annuler dans 2000 ans environ (ou 3000 ans selon d'autres estimations) !

Il faut remarquer que le 4 octobre 1957 (date du lancement du premier satellite artificiel, Spoutnik 1) a été une date importante pour l'étude du magnétisme terrestre. En effet, jus-

qu'alors, les mesures se faisaient surtout au sol : on avait bien fait des essais dans des avions ou des ballons sondes mais les altitudes de mesure ne dépassaient pas la **troposphère** (cette région de l'atmosphère, jusqu'à 10 km d'altitude environ où la pression atmosphérique diminue régulièrement ainsi que la température qui décroît jusqu'à  $-56^\circ \text{ C}$  environ). Or le **satellite géostationnaire** c'est-à-dire celui qui tourne à la même période que la Terre (24 heures), a un rayon d'orbite de 42100 km environ, soit une altitude de 36000 km environ ! En embarquant des magnétomètres dans les satellites, l'étude de la Terre a pris une dimension spatiale et on a pu vérifier - ce qu'on présentait déjà - que l'influence magnétique de la Terre existe assez loin du globe. Cette zone d'influence du champ magnétique terrestre s'appelle la **magnétosphère** mais, contrairement à ce que suggère son nom, elle n'est pas sphérique : les distances d'influence magnétique varient, selon la latitude, de 10 à 15 fois la valeur du rayon terrestre (qui est de l'ordre de 6400 km).

Mais revenons sur Terre !

Comme je l'ai déjà dit, on ne dispose d'aucune mesure du champ magnétique terrestre antérieure au XVI<sup>ème</sup> siècle. Toutefois, on peut en obtenir indirectement les caractéristiques en examinant certaines roches qui ont "fossilisé" la direction du champ magnétique ancien et même parfois son intensité : c'est ce qu'on appelle **archéomagnétisme** : c'est ainsi qu'on a pu montrer qu'en Europe occidentale, le champ magnétique a régulièrement décro de 0,7 gauss, ( $7 \times 10^{-5}$ ) Tesla 600 ans avant Jésus Christ, à la valeur actuelle 0,45 gauss).

Mais cet examen des roches de la croûte terrestre nous renseigne sur un passé encore plus éloigné : c'est le **paléomagnétisme** qui concerne des variations survenant à l'échelle des temps géologiques. Il semble que la Terre âgée de 4,6 milliards d'années possède un champ magnétique depuis plusieurs milliards d'années mais, à des intervalles de temps variables, la direction du champ magnétique s'est inversée avec retournement complet.

C'est ce phénomène que nous abordons maintenant.

Il a été découvert pour la première fois en Auvergne, au début de ce siècle.

En 1901, le physicien Bernard Brunhes, alors directeur de l'Observatoire du Puy de Dôme (j'ignore s'il était parent du célèbre géographe Jean Brunhes) publie les premiers résultats paléomagnétiques concernant la chaîne des Puys. Avec son élève David, météorologue, il étudie des échantillons prélevés, d'abord sur des dalles taillées de domites, restes de l'ancien temple gallo-romain au sommet du Puy de Dôme, ensuite sous la coulée de lave de Royat. Il trouve une direction nettement différente de celle du champ magnétique terrestre des autres régions de France à ce moment-là.

C'est la première détermination du champ ancien (déclinaison et inclinaison) par la mesure du vecteur **aimantation rémanente** des roches. Mais la méthode est longue, délicate : Il faut d'abord repérer, dans l'espace géographique, par ses coordonnées cartésiennes  $x$ ,  $y$ ,  $z$  l'échantillon étudié, couler du plâtre autour, le prélever avec soin puis déterminer le sens et la valeur de l'aimantation de cet échantillon ainsi bien repéré, en le plaçant - en laboratoire cette fois - dans un champ magnétique auxiliaire, connu, réglable de façon à annuler, par ce champ magnétique extérieur et mesurable, les effets magnétiques de l'échantillon considéré.

C'est ainsi que B. Brunhes a été le premier à trouver des roches d'aimantation inverse et à fournir en 1906 l'interprétation suivante : lorsque la lave sort de terre, les petits cristaux d'oxyde de fer (magnétite) qu'elle contient s'orientent librement dans le sens du champ magnétique terrestre existant à cette époque : ils peuvent se déplacer dans la lave fluide ; en se refroidissant, la masse visqueuse se solidifie figeant, en quelque sorte, ces petits aimants témoins du champ magnétique régnant au moment de l'éruption.

Mais ce n'est qu'à partir de 1950 et après de dures controverses que

l'existence du surprenant phénomène d'inversion magnétique sera reconnu. Parmi les travaux qui ont contribué à l'établir, il faut citer ceux d'Alexandre Roche chercheur en Auvergne, à l'Université de Clermont-Ferrand en 1953.

Cependant la confirmation éclatante n'est venue qu'aux années 1960 lorsque des chercheurs de l'institut d'océanographie de San Diego ont traversé l'Atlantique en traînant derrière leur bateau un magnétomètre au bout d'un filin de plusieurs centaines de mètres, assez long pour éviter que les masses métalliques du bateau dérèglent leur appareil.

Les mesures magnétiques ont alors montré que les fonds océaniques possèdent une alternance de bandes parallèles et successives dans lesquelles les magnétites sont orientées alternativement dans deux directions opposées ; de plus, ces bandes alternées se situent en positions symétriques de part et d'autre de la fracture dorsale du fond de l'océan ! L'interprétation en est simple : par cette fracture, au cours des âges, les laves sont sorties de la Terre, et les oxydes de fer (magnétites) ont été figés, par refroidissement de la lave, selon la direction du champ magnétique de l'époque de l'éruption. Ensuite, au cours d'une nouvelle éruption de nouvelles laves se mettent en place dans la fracture béante, éloignant les laves précédentes de part et d'autre de la dorsale.

En 1964, deux équipes, l'une américaine, l'autre australienne, reprennent l'étude de la succession des inversions au cours des cinq derniers millions d'années. Elles les datent, grâce à la méthode Potassium-Argon (dont je parlerai un peu plus loin). Selon les travaux de Cox trois inversions principales sont d'abord repérées ; elles séparent quatre grandes périodes appelées du nom de physiciens célèbres.

Mais au sein de ces quatre grandes périodes on ne tarde pas à trouver des retournements successifs plus brefs durant de 500 ans à 10 000 ans (durée brève par rapport au million d'années). On désigne toujours ces événements par le nom du lieu où on les découvre pour la première fois et, par



la suite, on garde cette dénomination lorsqu'on retrouve ce même retournement existant en d'autres lieux sensiblement à la même époque. Ces retournements successifs sont si nombreux dans chaque période ancienne que la classification en 4 grandes périodes n'est plus conforme à la réalité de ces inversions répétées au cours des âges.

Cependant, pour des raisons historiques, cette classification établie en 1969 par Cox, a été conservée car il semblait que le champ magnétique terrestre s'était assagi puisque dans la période de Brunhes et depuis 690 000 ans il n'y avait pas eu de retournement ! Et voilà qu'un chercheur, Norbert Bonhommet, dirigé par Alexandre Roche - alors directeur de l'Observatoire de Strasbourg - commence, vers 1970, une thèse sur le magnétisme rémanent des laves du Massif Central. En 1972, dans la coulée du Puy de Laschamp, il trouve un retournement complet du champ magnétique terrestre !

Cet événement appelé "**Le Laschamp**" daté à - 30 000 ans environ fut de courte durée (2000 à 3000 ans environ). Mais cette découverte a eu un grand retentissement dans le monde scientifique car une inversion

des pôles magnétiques aussi récente pourrait être en corrélation avec d'autres phénomènes géophysiques importants (variations climatiques, fracture de la croûte terrestre...) ; ces corrélations difficiles à établir pour des inversions anciennes devraient pouvoir exister pour une période récente.

Aussi on a cherché partout dans le monde des événements de retournement contemporains du Laschamp. On a simplement trouvé deux épisodes brefs :

- l'un en Australie datant de 30 000 ans
- l'autre au Japon mais dans des sédiments et datant de 49 000 ans.

Ainsi " le Laschamp " est encore plus mystérieux que les autres renversements étiquetés par Cox. En effet tous les retournements paléolithiques anciens semblent avoir affecté l'ensemble du globe terrestre puisqu'on les trouve dans les carottes "extraites en différents points de la croûte terrestre : par exemple, les inversions de l'époque Matuyama - qui a précédé celle de Brunhes - ont un aspect mondial. Le Laschamp pourrait être un renversement exceptionnel, très fort - puisqu'il y a retournement complet - ne se faisant sentir que localement.

Période		date en millions d'années
		0
de Brunhes	champ normal	
	<b>Inversion</b>	- 0,7
de Matuyama	champ inverse	
	<b>Inversion</b>	-2,4
de Gauss	champ normal	
	<b>Inversion</b>	-3,5
de Gilbert	champ inverse	
		-4,5

Cela remettrait en cause l'interprétation classique de l'origine du champ magnétique terrestre...

Avant de vous exposer cette interprétation, je veux dire quelques mots des méthodes de datation. Les trois principales sont :

- le C14
- la méthode potassium - Argon
- la thermoluminescence.

Ces trois méthodes sont des applications de la radioactivité naturelle.

La méthode du C14 est bien connue et a permis de nombreuses datations en archéologie.

Le C14 est un **isotope** du C ordinaire (C12) c'est-à-dire que les atomes de ces deux carbones ont même cortège électronique, donc mêmes propriétés chimiques mais ils diffèrent par le noyau qui contient, pour le C14 deux neutrons de plus que le C12. Or le C14 est radioactif avec une **période de 5570 ans** (c'est-à-dire qu'au bout de 5570 ans la moitié du C14 a disparu par radioactivité). Or ce C14 est présent dans l'atmosphère terrestre en proportion très faible mais constante. Il se forme par action des rayons cosmiques sur l'azote atmosphérique mais comme il se détruit au fur et à mesure par radioactivité il s'établit entre formation et destruction un équilibre tel qu'on trouve dans l'atmosphère un atome de C14 pour  $10^{12}$  (c'est à dire un million de millions) atomes de C12. Or les plantes consomment le C atmosphérique sous forme de dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) et, tant que la plante respire ou que l'animal ou l'homme qui s'en nourrit sont vivants la proportion de C14 reste constante. Dès que la plante meurt - ou l'animal - il n'y a plus d'assimilation de C et la proportion de C14 diminue progressivement avec le temps, selon une loi exponentielle : c'est en mesurant le C14 radioactif résiduel dans un échantillon et en le comparant au C14 contenu dans un échantillon de même nature mais vivant qu'on peut dater la mort du premier échantillon.

Or quand les laves sont sorties des volcans elles ont brûlé les forêts envi-

ronnantes : il suffit alors de comparer le C14 des cendres fossiles à celui qui existe actuellement dans un bois fraîchement coupé pour trouver la date de l'éruption volcanique. De la même façon l'étude des cendres prélevées dans les grottes préhistoriques ont permis de les dater. La grotte **Cosquer** découverte en 1991 a été étudiée - par le C14 - au "Centre des faibles radioactivités" de Gif-sur-Yvette (centre associé CEA -CNRS) : on a pu montrer que cette grotte a été fréquentée à 2 époques différentes séparées par plusieurs millénaires : une main exécutée au pochoir remonte à 27 000 ans tandis que pingouins et phoques ont été peints il y a seulement 18 000 à 20 000 ans lors du dernier maximum glaciaire. La grotte **Chauvet** qui vient d'être découverte est encore un peu plus ancienne (34 000 ans).

**La deuxième méthode Potassium-Argon** relève du même principe : le Potassium radioactif donne de l'Argon (Ar gaz rare analogue à l'Hélium, au Néon, au Radon) qui reste emprisonné dans les roches. Mais la période (ou demi-vie) (1130 millions d'années) est sensiblement plus longue que celle du C14 et permet de dater des vestiges encore plus anciens.

Enfin la méthode de **thermoluminescence** permet elle aussi de remonter dans le temps beaucoup plus loin qu'avec le C14, jusqu'à 100 000 ans... Elle a été utilisée par une équipe clermontoise (Jean Fain chercheur, Didier Miallier professeur, à l'Université de Clermont-Fd). Voici le principe : les éléments radioactifs contenus à l'état de traces dans les roches émettent des rayonnements qui déplacent des électrons piégés alors par les impuretés du minéral, créant ainsi des défauts qui s'accumulent au cours du temps. Si on chauffe à  $500^\circ C$  un échantillon du minéral les défauts disparaissent, libérant les électrons qui émettent alors de la lumière c'est la thermoluminescence : l'intensité de la lumière émise est proportionnelle au nombre de défauts : plus elle est intense plus le minéral est ancien.

Mais l'étalonnage est difficile et toutes ces mesures sont délicates : la mise en oeuvre est complexe demandant un soin tout particulier au physicien et nécessitant une équipe pluridisciplinaire intégrant des spécialistes en archéologie, géochimie, pétrologie, volcanologie...

Cependant la comparaison des résultats permet d'obtenir pour le Puy de Dôme une date de 10 000 ans et 11 000 ans (ceci à partir de 2 minéraux différents : zircon et feldspath). Cette datation permet d'expliquer aussi un fait déjà constaté par ailleurs : le quasi dépeuplement préhistorique de la Limagne à 10 000 ans alors qu'au cours des précédents millénaires l'occupation avait été relativement dense : on peut penser que les éruptions violentes et dévastatrices de la chaîne des Puys ont tué ou chassé les populations environnantes. Ainsi la thermoluminescence confirme la Préhistoire...

Elle a permis - en accord avec les deux autres méthodes - d'attribuer à l'inversion de Laschamp une date de 35 000 ans environ...

Il reste maintenant à évoquer un début d'interprétation du champ magnétique terrestre et de ses retournements.

Il est admis qu'au centre de la Terre (dont le rayon, je le rappelle, est 6 400 km) il existe un **noyau métallique fluide**, à haute température, environ  $5000^\circ C$ , de rayon 3 500 km environ, essentiellement constitué de fer donc conducteur de l'électricité. Au coeur de ce noyau, existerait une **graine solide** de 1 200 km de rayon environ. Selon la théorie la plus satisfaisante, l'origine du champ magnétique terrestre résiderait dans la circulation de ce fluide conducteur par convection thermique à l'intérieur du noyau : ces incessants courants de convection brassent et évacuent en permanence la chaleur interne provenant de la radioactivité naturelle profonde : ils sont aussi en correspondance avec le mouvement de rotation de la Terre sur elle-même.

Le mouvement du fluide serait en interaction avec le champ magnétique qu'il crée, le noyau ayant un comportement analogue à celui d'une dyna-

mo **auto-excitée** : une fois amorcée, avec un champ magnétique même très faible la dynamo produit son propre courant électrique qui crée à son tour un champ magnétique et devient ainsi capable de se passer du champ qui lui a donné naissance. Reste à trouver l'explication du démarrage initial ; selon certains théoriciens, un champ magnétique interplanétaire plus intense qu'aujourd'hui pourrait jadis avoir joué ce rôle....

Et alors, comment interpréter les inversions des pôles ?

Lorsque la chaleur interne du noyau s'accumule, n'étant pas correctement répartie par convection, la situation devient critique, instable et se traduit par l'émission radiale de matière brûlante en direction de la croûte terrestre ; les bulles de magma en mouvement vers l'extérieur dérèglent le système, engendrant l'effondrement du champ magnétique puis son retournement en même temps que se produisent des fractures de la croûte

terrestre, d'énormes éruptions volcaniques, des variations de la vitesse de la rotation de la Terre sur elle-même.

Cette évocation est apocalyptique et d'ailleurs des quotidiens font périodiquement des articles à sensation sur ce sujet, "quand le globe perd le Nord" (Libération 8 avril 1992, par exemple).

De nombreuses revues scientifiques sérieuses font le point régulièrement sur cette question difficile. Les phénomènes d'inversion paraissent aléatoires mais les équations de la **magnétohydrodynamique** pourraient bientôt les expliquer. La science du magnétisme de la Terre est aujourd'hui en plein essor ; elle bénéficie aussi des résultats de l'étude spatiale du magnétisme des étoiles dans lesquelles on observe parfois des renversements magnétiques très brefs en l'espace de quelques jours.

La Science est en marche, elle n'a pas dit son dernier mot.

## BIBLIOGRAPHIE

- La Recherche n° 97 - Février 1979 - Jacques Labeyrie  
 n° 201 - Juillet-Août 1988 - La Thermoluminescence  
 Jean Fain et Didier Miallier.  
 Pour la Science n° 212 - Les Bonds du champ magnétique - juin 1995 - Michel Prévost  
 Science et Avenir - Février 1989 - Le Pôle Déboussolé - Jean-François Lavallard  
 Livre Jubilaire de la Société géologique de France 1980 - cent cinquante ans de géomagnétisme - Jean-Louis le Mouel  
 Espace information n° 18 - Novembre 1980 - Etude spatiale du magnétisme terrestre - J.P. Perrol  
 Auvergne-Sciences - ADASTA n° - 30 - Juin 1994 - Radioactivité et mesure du temps en géologie - M. Condomines  
 Thèse de M. Bonhomme 1972

## PROCHAINEMENT À RIOM

### *L'Ecole d'Eté Internationale de Chimie Troposphérique et de Physique Spatiale*

*L'école d'été, qui aura lieu à Riom du 21 au 31 juillet 1997, est organisée sous la responsabilité du LaMP (Laboratoire associé de Météorologie Physique). Ce laboratoire, associé au CNRS, à l'Université Blaise Pascal et à l'Observatoire de Physique du Globe, est fortement impliqué dans les études physico-chimiques de la troposphère.*

*De la part de N. Roche-Chaumerliac, LaMP Clermont-Ferrand, membre du comité d'organisation.*

*Pour contact :*

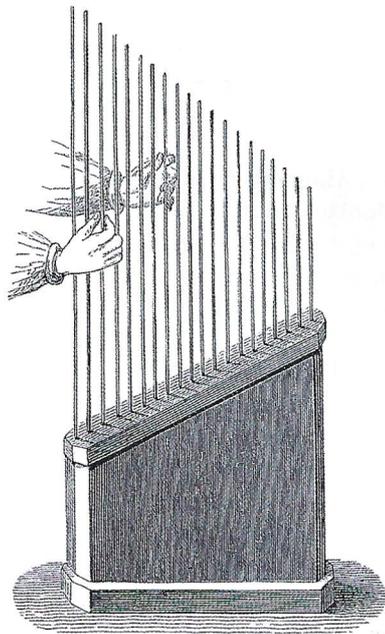
*LaMP*

*Université Blaise Pascal*

*24, avenue des Landais - 63177 Aubière Cedex*

*Tél. 04 73 40 73 53 - Fax 04 73 27 16 57*

# Conservation du matériel scientifique ancien



Harpe de Marloye, extrait de :  
A. Gonot, *Traité élémentaire de Physique*,  
Paris, 1853.

Nous portons à la connaissance de nos adhérents cette note de service (BO n°44 du 5 décembre 1996) émanant de la direction des lycées et collèges.

Ceux qui sont intéressés peuvent venir consulter à l'ADASTA, 19 rue de Bien-Assis aux heures de permanence et à titre d'exemple le catalogue déjà réalisé au Lycée Louis Le Grand à Paris dans ce but de conservation du matériel scientifique ancien.

Les lycées d'enseignement général et technologique, dont la création remonte pour certains au XIX<sup>e</sup> siècle, et qui ont parfois pris la succession d'établissements plus anciens encore, conservent souvent du matériel ayant servi à l'enseignement expérimental des sciences physiques.

Ce matériel ne correspond plus, en général, aux conditions actuelles de l'enseignement.

De ce fait, il est parfois ignoré ou abandonné et risque d'être détruit ou

*Texte adressé aux recteurs d'académie,  
au directeur de l'académie de Paris,  
aux inspecteurs généraux  
de l'éducation nationale,  
aux inspecteurs pédagogiques régionaux  
et aux proviseurs de lycées*

dispersé, lors de travaux d'aménagement et de rénovation que connaissent les établissements.

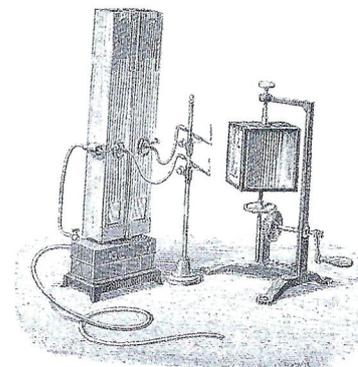
Ce matériel constitue pourtant un élément important de notre patrimoine éducatif, témoignage visible de l'histoire des sciences et de son enseignement.

C'est au XVIII<sup>e</sup> siècle, en effet, que les premiers cabinets de physique ont été créés dans les établissements du niveau secondaire. Dans la première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, les lycées ont été dotés massivement d'un matériel scientifique, avant que la création des exercices pratiques, en 1902, ne diversifie l'usage des instruments, une partie du matériel servant dorénavant au travail des élèves.

Tous ces instruments peuvent fournir de précieux renseignements sur de multiples aspects de l'enseignement scientifique passé, tels l'évolution des procédés pédagogiques, le rôle des appareils dans l'image et les représentations de la discipline, ou leur place dans l'économie de l'enseignement. La qualité de leur fabrication peut en faire des objets de valeur ; certains d'entre eux, dans la construction desquels entrent le cuivre et le verre, sont, en outre, d'une beauté particulière. Vous trouverez, en annexe, une liste d'appareils pouvant se rencontrer le plus fréquemment dans les établissements.

Il est donc du devoir des chefs d'établissement de veiller à la conservation de ce matériel. Ils devront, dans tous les cas :

- vérifier l'existence de matériels dans leur établissement ;



Tuyaux d'orgue avec capsules  
manométriques et miroir tournant,  
Rudolph Kœnig.

- prendre des mesures pour qu'ils soient regroupés en un lieu présentant toutes les conditions de bonne conservation et de sécurité ;
- signaler à la direction des lycées et collèges (DLC D3, bureau des actions éducatives), l'existence de ces fonds, caractérisés dans un descriptif sommaire, sans qu'il leur soit nécessaire d'en dresser eux-mêmes l'inventaire.

Pour identifier les matériels et établir les descriptifs, les chefs d'établissement sont invités, s'ils le jugent utile, à prendre conseil auprès des inspecteurs pédagogiques régionaux de physique-chimie.

Le descriptif qu'ils auront établi devra parvenir au bureau DLC D3 avant le 31 mars 1997. Par ailleurs, les conseillers pour l'action culturelle des rectorats sont concernés par l'éducation à la culture scientifique et technique et constituent donc un relais utile pour l'exploitation et la mise en valeur de ces matériels. Il convient qu'ils soient également destinataires du résultat des investigations menées dans chaque établissement.

En fonction des locaux et des moyens dont dispose chaque établissement, ces matériels pourront ensuite être valorisés de plusieurs façons :

- par la constitution de vitrines ou d'un "coin-musée" dans l'établissement, qui pourront donner aux élèves et aux enseignants une image attirante de l'histoire de l'enseignement des sciences ; les appareils pourront également servir de support à des projets éducatifs spécifiques, associant élèves, professeurs et documentalistes ;
- par la création de petits musées locaux spécialisés, à l'exemple de ceux qui existent ou sont en cours de constitution dans plusieurs villes ;
- par versement aux musées municipaux ou régionaux, tels les centres de culture scientifique, technique et industrielle (CCSTI), là où il en existe.

Quelle que soit la formule adoptée, il est important de veiller à ce que ces matériels soient mis en valeur aussi près que possible des établissements où ils ont été en usage.

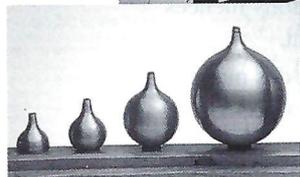
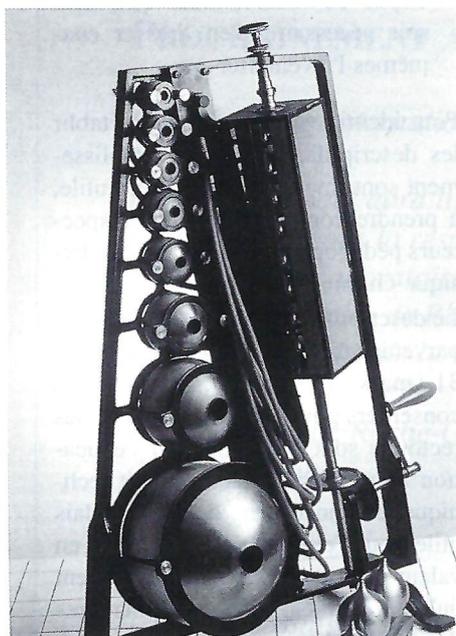
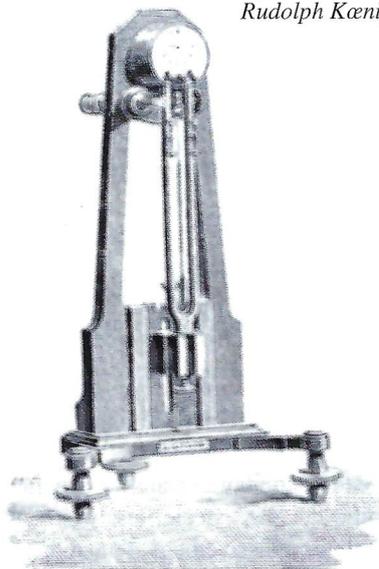
Toutefois, en l'absence de dispositif d'accueil en région, il est possible de verser les matériels au musée national de l'éducation (Rouen/Mont-Saint-Aignan), à qui est reconnu un rôle de conservation à l'échelle nationale.

Je vous remercie de contribuer ainsi à la sauvegarde et à la mise en valeur de ces matériels scientifiques et pédagogiques, qui sont partie intégrante de notre patrimoine éducatif.

*Pour le ministre  
de l'éducation nationale,  
de l'enseignement supérieur  
et de la recherche et par délégation,*

*Le directeur des lycées et collèges  
Alain Boissinot*

*Horloge à diapason,  
Rudolph Koenig.*



*Analyseur des sons  
à réonateurs de Helmholtz.  
Détail de l'analyseur.*

## ANNEXE

### PRINCIPAUX INSTRUMENTS SUSCEPTIBLES DE SE TROUVER DANS LES ETABLISSEMENTS, AVEC INDICATION DE LEUR PLACE DANS LES DISCIPLINES TRADITIONNELLES DE LA PHYSIQUE

#### I - Mécanique et pesanteur

Double cône de Nollet ou "mouvement paradoxal" (déplacement d'un centre de gravité) ; dynamomètre (torsion causée par un poids, exprimée en newton ou d'une autre façon) ; levier ; équilibriste ; balances ; tube de Newton (chute de corps).

#### II - Hydrostatique

Balance hydrostatique (vérification de la loi d'Archimède) ; vase de

Tantale (phénomène des siphons) ; tourniquet hydraulique (vérification du principe de Pascal).

#### III - Hydrodynamique

Pompe aspirante-foulante ; machine pneumatique.

#### IV - Chaleur

Cube de Leslie (notion de chaleur spécifique des corps) ; roue de Tyndall (production de chaleur par frottement) ; thermoscope de Rumford (thermométrie différentielle).

#### V - Magnétisme

Boussole d'inclinaison, de déclinaison, boussole de Gambey, boussole marine (mesures du magnétisme terrestre).

#### VI - Electricité statique

Bouteille de Leyde (principe du condensateur électrique) ; maison de Franklin (utilité du paratonnerre) ; machines électrostatiques : de Ramsden, de Holtz, de Wimshurt, de Carré (décharges créées par frottement).

#### VII - Galvanisme

Piles : de Volta, de Grenet, de Daniell (électricité créée par réactions chimiques).

#### VIII - Electromagnétisme, électrodynamisme

Table d'Ampère, expérience d'Oersted ; boussole des tangentes ; galvanomètres ; télégraphes ; bobine d'induction ou bobine de Ruhmkorff (applications de l'induction).

#### IX - Acoustique

Capsule manométrique de Koenig (représentation graphique de la hauteur des sons) ; crécelle de Marloye (extraction d'harmoniques à partir d'un bruit blanc) ; timbre de Savart ; sirènes de Cagniard de La Tour, de Seebeck (phénomènes de résonance).

#### X - Optique

Héliostats de Gambey, de Silbermann ; polarimètres de Laurent, de Soleil ; goniomètre de Babinet ; spectroscopie ; lunette terrestre, astronomique ; télescopes de Newton, de Grégory, de Foucault.

## Quel est ce minéral ?

*Méthode pratique  
de détermination physico-chimique des minéraux*

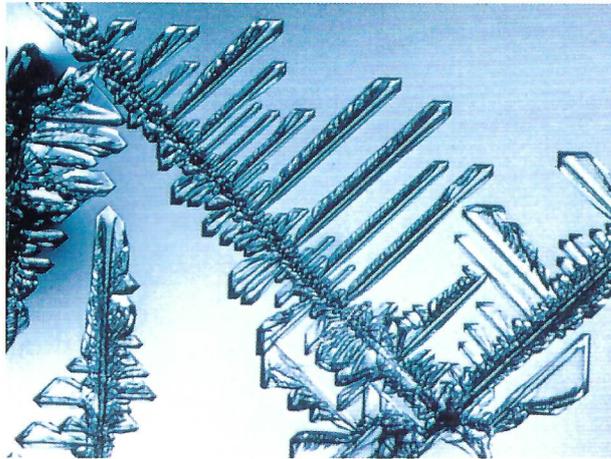
### Description de l'ouvrage

Cet ouvrage n'est pas un livre de minéralogie mais un guide destiné à aider le minéralogiste dans ses déterminations par des moyens « usuels » c'est à dire sans faire appel aux méthodes sophistiquées pratiquées dans les laboratoires.

La première partie, après un rappel des notions de cristallographie, décrit et commente les propriétés physiques des minéraux en insistant sur leur intérêt et leur fiabilité pour la détermination des espèces.

La deuxième partie reprend les méthodes microchimiques de terrain utilisées dans la prospection minière en les complétant par des réactions de chimie analytique de laboratoire. Ces méthodes sont de deux sortes: les procédés par voie humide: ceux de la chimie analytique classique et les procédés pyrognostiques faisant appel à des grillages et ne nécessitant pas d'attaque préalable du minéral. Cela permet de multiplier les réactions de caractérisation, d'étendre l'analyse à une quarantaine de cations et une dizaine d'anions et d'être utile au chimiste comme au minéralogiste. Après une description des différentes façons d'opérer, les réactions pour chaque élément sont décrites en commençant par les plus faciles ou les plus caractéristiques avec des explications sur le processus chimique, la sensibilité et les éventuelles interférences.

Il n'existe à notre connaissance aucun ouvrage récent traitant du sujet, la disparition de la prospection minière en France ainsi que l'orientation parfois théorique de l'enseignement de la chimie à certains niveaux, expliquent sans doute cela. Naturellement il n'est pas question, ici, de concurrencer les procédés modernes des laboratoires (spectrométries diverses, micro-



sondes..) quantitatifs et précis, mais simplement de permettre l'accès à l'analyse chimique à ceux qui ne veulent pas mettre en jeu des moyens aussi lourds et onéreux quand ils ont moins d'exigences ou qu'ils veulent un résultat immédiat.

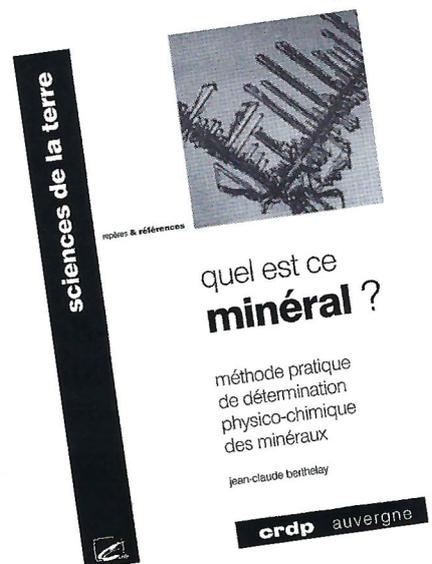
Beaucoup des réactions décrites sont spectaculaires tant du point de vue chimique que cristallographique; elles sont illustrées par des photographies en couleurs (ce dont les anciens traités de microchimie ne pouvaient bénéficier) afin que l'opérateur puisse identifier plus sûrement l'élément qu'il veut caractériser.

Les caractérisations en chimie analytique classique se font soit au moyen de colorations soit au moyen d'insolubilisations sélectives « précipités » caractéristiques pour mettre en évidence l'élément recherché. La microchimie explore au microscope ou au fort grossissement de la loupe binoculaire, ces précipités. Dans un certain nombre d'entre eux on voit, peu à peu, à partir du gel, naître puis grossir des cristaux de forme et de couleur caractéristiques d'un composé donné. Ceux-ci peuvent même aller jusqu'à s'assembler en édifices obéissant aux lois de leur symétrie: par exemple les cristaux d'aluns de césium représentés sur la couverture du livre. Si l'on veut par exemple, pour les cours de

géologie, illustrer la formation de milieux lagunaires, on peut en précipitant un sel de calcium par de l'acide sulfurique former instantanément des cristaux de gypse qui peu à peu s'assemblent en macles "queue d'aronde" caractéristiques.

En plus de leur intérêt pour l'analyse élémentaire ces phénomènes visualisent l'agencement de la matière pour constituer des édifices cristallins. Pour peu que les

solutions de départ soient assez concentrées ces phénomènes sont si rapides qu'ils peuvent être suivis à vitesse réelle. En installant une caméra vidéo sur un microscope il nous a été possible de réaliser une cassette assez spectaculaire et riche d'enseignements. Cette cassette destinée à la diffusion est en cours d'édition (En préparation pour diffusion).



Collection : repères & références, CRDP Clermont-Ferrand  
Préface de Jacques Kornprobst, président de la Société, géologique de France.  
Jean-Claude Berthelay, docteur ès-sciences, est ingénieur de recherches au département des sciences de la terre de l'université Blaise-Pascal à Clermont-Ferrand.

# La porcelaine de Limoges

Visite sur place le mercredi 30 avril 1997

28



En 1768, MACQUER et MILLOT, chargés de rechercher en France des carrières de kaolin, aboutissent en Limousin où, à la suite du chirurgien Darnet, ils reconnaissent à Saint-Yrieix la possibilité d'exploiter des carrières. La formule de la porcelaine dure étant connue, on assiste depuis cette époque à un développement de la recherche pour atteindre, à partir du dernier quart du XIXe siècle, une pâte dite "dure nouvelle" contenant 44 % de kaolin et 56 % de pegmatites. Parallèlement la technique des oxydes métalliques s'adapte aux différentes températures de cuisson requises, pour atteindre les remarquables productions actuelles.

La visite des industries de la porcelaine à

Limoges, revêt un intérêt autant artistique que technique. La pré-

fecture de la Haute-Vienne peut se prévaloir d'une notoriété internationale dans le domaine de la porcelaine. Réservez la date du 30 avril. Un bulletin de participation vous sera proposé prochainement.

J.P. Garcia



## La comète de Hale-Bopp

photographiée par Stéphane Anglaret

de l'Association des Astronomes Amateurs d'Auvergne



Visible à l'œil nu actuellement (mars-avril 1997) dans notre ciel, cette comète a été découverte en juillet 1995, presque simultanément par les deux astronomes dont elle porte les noms. Ne manquez pas d'observer le superbe spectacle de cet astre venu des confins du système solaire et dont le prochain retour n'est prévu que dans plus de 2500 ans...

## L'ADASTA

participera à :

- **EXPO-SCIENCES**

qui se déroulera à Courmon au mois de mai.

- **LA SCIENCE  
EN FÊTE**

en collaboration avec le Collège P. et M. Curie à Aubière au mois d'octobre.