

# Ecologie et évolution du monde vivant

**Michel Godron**

## CHAPITRE

### INTRODUCTION

#### LE RAYONNEMENT SOLAIRE ET SES ROLES MAJEURS EN ECOLOGIE

L'écologie étudie les relations entre les communautés d'êtres vivants et leur environnement physique. Autrement dit, elle essaie de comprendre comment des molécules organiques de grande taille s'assemblent pour constituer des organismes capables de réagir et même de penser. C'est une ambition vertigineuse, une synthèse située à l'horizon de nos connaissances, une tapisserie de Pénélope qu'il faut remettre en chantier chaque matin.

Pour démêler l'écheveau du monde des vivants, il faut en tirer un fil d'Ariane capable d'ordonner l'ensemble de l'ouvrage. La succession des chapitres repose donc sur une idée simple : l'ensemble des phénomènes écologiques est une chaîne de transformations d'énergie couplées à des transmissions d'information, qui s'est amorcée dès l'aube des temps géologiques. Le présent ouvrage n'est qu'un maillon de ces innombrables transmissions d'information et il a besoin, en retour, des critiques de ceux qui auront eu le courage de le lire. Si je livre ce manuscrit aux aléas du monde, c'est pour que ces critiques espérées puissent naître et provoquer les remaniements et les compléments les plus nécessaires. De la discussion jaillit la lumière...

Pour résumer l'esprit dans lequel j'ai travaillé, je ne peux que vous dire, comme au début de Lucien Leuwen :

"Lecteur bienveillant,

" Écoutez le titre que vous donne. En vérité, si vous n'étiez pas bienveillant et disposé à prendre en bonne part les paroles que je vais vous présenter, je ne vous conseillerais pas d'aller plus avant. Ceci fut écrit en songeant à un petit nombre de lecteurs que je connais et à d'autres que je ne connais pas, ce dont bien me fâche : j'eusse trouvé tant de plaisir à passer les soirées avec eux !

" Dans l'espoir d'être entendu, je ne me suis point astreint à garder les avenues contre une critique de mauvaise humeur. Pour être académique et disert, il fallait un talent qui manque, et ensuite ajouter à ceci 150 pages de périphrases...

"Adieu, ami lecteur ; songez à ne pas passer votre vie à haïr ni à avoir peur."

#### LE RAYONNEMENT SOLAIRE ET SES ROLES MAJEURS EN ECOLOGIE

Le rôle le plus évident du Soleil vis-à-vis de la biosphère est de fournir de l'énergie radiative, en surabondance, dans une étroite gamme de longueur d'ondes. Après avoir précisé la quantité et les qualités de cette avalanche d'énergie, nous verrons qu'elle apporte aussi l'information qui a structuré toute la biosphère

## 11 LE RAYONNEMENT SOLAIRE

### 111 LA QUANTITE D'ENERGIE SOLAIRE QUI ATTEINT LA TERRE

#### 111.1 La constante solaire

Une surface exposée aux rayons du Soleil dans la haute atmosphère reçoit environ 2 calories par minute et par centimètre carré, c'est-à-dire, une quantité de chaleur capable d'élever de deux degrés la température d'un cm<sup>3</sup> d'eau, soit :

- 2 . 4,185 joules par minute et par cm<sup>2</sup>
- 8,37 joules par minute et par cm<sup>2</sup>
- (0,14 watt par cm<sup>2</sup>) soit 1,4 kW par m<sup>2</sup>
- ou encore environ 1.000 kilocalories par cm<sup>2</sup>) et par an.

Cette quantité est souvent nommée "constante solaire". A titre de comparaison, le flux de chaleur qui vient des profondeurs de la terre est de 0,005 calories par cm<sup>2</sup>) et par heure, soit moins de 0,004 pour cent de la constante solaire.

Considérons maintenant le globe terrestre : sa face exposée au Soleil a une surface de 127.000.000 km<sup>2</sup>), et l'énergie qu'elle reçoit en une seconde vaut :

- 127.000.000 . 1 000 . 1 000 . 1 000 . 1,4 kW
- soit 1,78 . 10 puissance 14 kW
- soit encore 1,78 . 10\*14 kW

Ceci correspondrait à la combustion de soixante dix millions de tonnes de pétrole en une seconde (soit deux cent super-pétroliers explosant en une seconde), ou à la dissipation, en une seconde, de l'énergie d'une bombe atomique de puissance moyenne (celle d'Hiroshima a libéré 1,4 . 10\*14 joules).

#### 111.2 L'origine des photons solaires

L'énergie nécessaire au fonctionnement de tous les systèmes biologiques vient directement ou indirectement du Soleil. Actuellement, le Soleil est composé de 70 % d'hydrogène, 28 % d'hélium et 2 % d'oxygène, de carbone, de fer, etc. Sa température interne atteint 15 millions de degrés Celsius alors qu'elle est voisine de 5.800 °C à sa surface. Elle résulte d'un ensemble complexe de réactions nucléaires (cycle de BETHE) où quatre atomes d'hydrogène se transforment en un atome d'hélium, en produisant 6,1 . 10\*8 kilocalories (ou 2,58 . 10\*12 joules) par atome-gramme d'hélium, et en perdant 0,7% de leur masse, soit 28,7 milligrammes.

Au total, l'énergie produite atteint 4 . 10\*23 kW, et 564 millions de tonnes d'hydrogène seraient brûlés chaque seconde. Cette quantité n'est pas négligeable par rapport à la masse totale du Soleil (2 . 10\*27 tonnes) et le Soleil évolue progressivement ; il est actuellement dans une phase d'augmentation de sa production d'énergie, et la température de la surface de la Terre atteindra 500 degrés dans quelques milliards d'années. En conséquence, l'ensemble de phénomènes que nous appelons "la vie" a accompli plus des trois cinquièmes de son existence, et notre mode de vie est transitoire, et presque éphémère ...

#### 111.3 Les variations locales de l'énergie reçue

Les deux calories par cm<sup>2</sup> que nous recevons du Soleil sont un maximum qui serait atteint seulement pour les points du globe où les rayons arrivent perpendiculairement au sol. Pour tous les autres points, il faut multiplier ce chiffre par le cosinus de la latitude, ce qui entraîne, en moyenne, une réduction de moitié. Il faut tenir compte aussi de la nébulosité, de la diffusion du rayonnement, etc. Finalement, les variations à la surface du globe terrestre de la quantité d'énergie reçue au sol en une année sont indiquées sur la figure 11-2. Les variations de l'énergie reçue au cours d'une année, à l'observatoire de Paris, sont indiquées sur la figure 11-3.

Au total, la Terre reçoit en une année une énergie égale à :

- $1,78 \cdot 10^{14} \text{ kW} \cdot 86\,400 \text{ sec/jour} \cdot 365 \text{ jours}$ )
- $= 1,78 \cdot 3,15 \cdot 10^{21} \text{ kJ}$ )
- $= 5,6 \cdot 10^{21} \text{ kJ}$ )
- $= 5,6 \cdot 4,18 \cdot 10^{21} \text{ kcal}$ )
- $= 1,4 \cdot 10^{24} \text{ cal}$ )
- $= 1,4 \cdot 10^{14} \text{ tonnes d'équivalents-pétrole (tep)}$
- $= 1,4 \cdot 100.000.000.000.000 \text{ de tonnes de pétrole}$

A titre indicatif, le total de l'énergie absorbée par la photosynthèse sur l'ensemble du globe terrestre est inférieur au centième de cette quantité. En ce qui nous concerne plus directement, la ration alimentaire d'un homme doit comprendre au moins 2 500 calories par jour ; en conséquence, l'humanité consomme  $4 \cdot 10^9 \cdot 2\,500 \text{ cal/jour} \cdot 365 \text{ jours} = 3,65 \cdot 10^{15} \text{ calories par an}$ , c'est-à-dire un milliardième de l'énergie reçue. Cette cascade de transformations à très faible rendement n'est pas due au hasard, et la trame de cet ouvrage est de chercher pourquoi ce gaspillage apparent se produit.

Lorsque les nuages de poussières volcaniques obscurcissent le ciel, le système énergétique de la biosphère n'est plus alimenté, la végétation dépérit et de nombreuses espèces disparaissent. La dernière éruption grave est celle du volcan indonésien Tambora qui a explosé en 1816, en passant de 4.300 m de haut à 1.800 m, et en émettant un nuage de poussières qui a refroidi même le nord de l'Amérique : cette année-là, il a neigé en juin et gelé en août à la latitude de Naples. Un "super volcan" enfoui sous des sédiments, le mont Toba (Indonésie) a explosé il y a 72.000 ans : le nuage aurait occulté plus de 90 % de la lumière solaire pendant 6 ans en faisant localement chuter la température de 15 °C. Les anthropologues pensent qu'une des conséquences de cette catastrophe a été une diminution de la population des Homo sapiens dont le nombre aurait été réduit à quelques dizaines de milliers de personnes. En Papouasie, en Nouvelle Zélande, dans le parc national de Yellowstone (Wyoming), d'autres géants endormis risquent d'éternuer dramatiquement.

Le Soleil envoie son rayonnement dans toutes les directions, et la Terre en capte seulement un dix milliardième. A l'échelle du millénaire, l'énergie reçue par la Terre n'est pas constante, parce qu'elle varie en raison de phénomènes astronomiques étudiés par Mutin Milankovic : l'excentricité de l'orbite de la Terre autour du Soleil varie selon un cycle de 100.000 ans, l'inclinaison de l'axe des pôles par rapport au plan de l'orbite terrestre (nommé écliptique) varie selon un cycle de 41.000 ans, et la position des solstices et des équinoxes sur cet orbite fait un tour complet en 21.000 ans (c'est la précession des équinoxes). Ces variations sont vraisemblablement à l'origine des glaciations du Quaternaire (fig. 11-1 et § 242, 423 et 842).

## 112 LA QUALITE DE L'ENERGIE RADIATIVE : SA LONGUEUR D'ONDE

Pour des raisons qui seront examinées à la fin de ce chapitre, il est important de prendre en compte la "qualité" de l'énergie qui nous est donnée par le Soleil : c'est un rayonnement électro-magnétique, qui comprend toute une gamme de longueurs d'onde, selon les lois de STEFAN et de WIEN (voir l'annexe 1 de ce chapitre). La longueur d'onde où la puissance est maximale est voisine de 0,5 microns ; la quasi-totalité de l'énergie émise par le Soleil est située dans le domaine 0,25 microns à 5 microns, et la plus grande partie de cette énergie est comprise entre 0,4 microns et 0,8 microns (= 400 nm à 800 nm)<sup>1</sup> (cf. fig. 11-4).

La fraction de courte longueur d'onde du rayonnement solaire est diffusée par les molécules d'air selon la loi de RAYLEIGH, proportionnellement à l'inverse de la quatrième puissance de la longueur d'onde du rayonnement :

$$D = k \cdot 1 / L^4$$

En conséquence, il n'arrive au sol qu'une fraction de la totalité du rayonnement :

ultra-violet visible infra-rouge

en microns : 0,22 0,26 0,30 0,35 0,37 0,40 0,45 0,55 0,75 0,95

% transmis : 1% 10% 30% 50% 60% 70% 80% 90% 97% 99%

De plus, les gaz de l'air absorbent environ 10% de l'énergie incidente dans certaines bandes étroites du spectre solaire ; finalement, le spectre du rayonnement "visible" disponible au niveau du sol par ciel clair est indiqué sur la figure 11-4. La position de ce domaine par rapport à l'ensemble des ondes électromagnétiques est indiqué sur la figure 11-5.

Pour ce qui concerne le plus directement les hommes et les femmes, le rayonnement ultra-violet qui traverse l'épiderme des humains régule la production de la vitamine D3 qui, à son tour, active l'hormone de croissance anti-rachitique. Inversement, les UV-A (320 nm à 400 nm) et les UV-B (280 nm à 320 nm) attaquent l'ADN des cellules de la peau et provoquent des cancers ; ils réduisent aussi la stabilité du génome de certaines plantes (G. RIES et al., 2000)

A titre de curiosité, les UV-A et les UV-B ne jouent pas le même rôle pour le bronzage des vacanciers et pour les coups de soleil.

Enfin, une infime part du rayonnement est constituée de protons, qui ont peut-être une influence sur les capacités d'absorption de l'atmosphère, et sur la teneur en ozone de la stratosphère (§ 122, 212, 214 et 843).

### 113 LA GAMME DU RAYONNEMENT « VISIBLE »

L'étroitesse de la gamme des radiations qui arrivent au sol permet de quitter un instant la physique et l'astronomie, pour faire une première incursion dans le domaine biologique : la figure 11-4 montre que la gamme des rayonnements que nous recevons du Soleil est nommée « rayonnement visible » ; ce n'est pas une coïncidence heureuse produite par un hasard bienveillant ; au contraire, elle s'explique parce que l'œil s'est développé, au cours de l'évolution, de manière à utiliser "au mieux" les possibilités de perception offertes par la gamme des radiations qui arrivent en grande quantité jusqu'au sol.

Déjà, certains êtres unicellulaires sont sensibles précisément aux longueurs d'onde de la lumière du Soleil et possèdent un "phototropisme" général, positif ou négatif qui les conduit vers territoires favorables : les Algues flagellées *Chlamydomonas* pour se rapprocher de la lumière, ou pour se mettre à l'abri. Le préliminaire de l'œil apparaît chez les Amibes hétérotrophes qu'il aide à capturer leurs proies : quand un corpuscule passe devant leur tache oculaire sensible au rayonnement solaire, il fait de l'ombre et l'Amibe développe alors ses tentacules pour le capturer. Cet avantage s'est développé en milieu aquatique au point que le diamètre des yeux des Calmars *Architeuthis* dux atteint 30 cm.

A ce sujet, une remarque complémentaire s'impose : les caractères qui permettent de séparer les animaux des végétaux sont rarement absolus, puisqu'il existe des végétaux hétérotrophes, des animaux fixés, des plantes carnivores (les *Drosera*, les *Nepentes*, etc. § 623), des plantes hétérotrophes qui consomment la sève produite par d'autres plantes, etc. Parmi ces caractères distinctifs, la présence de l'œil est l'un des seuls qui soit strictement propre aux animaux. Finalement, un raccourci audacieux conduirait à dire que les yeux des animaux sont issus de la prédation.

Une autre utilisation du rayonnement solaire par des animaux est plus inattendue : les Dinoflagellés *Pyrocystis lunula* et *Pyrocystis noctiluca* produisent de la lumière à 480 nanomètres avec leur protéine nommée luciférine (analogue à celle des Vers lumineux) lorsque l'eau est agitée par des Crevettes qui viennent s'en nourrir ; cette lumière leur rend service parce qu'elle attire les prédateurs des Crevettes !

Ce type de remarque, où l'évolution est présentée sous une forme très finaliste, ne doit pas être considéré comme une explication causale (qui serait très entachée d'anthropomorphisme) mais comme un raccourci imagé, commode pour se faire comprendre.

### 114 L'ALTERNANCE DES JOURS ET DES NUITS

L'alternance des jours et des nuits (rythme "circadien") règle certaines phases du développement des plantes qui, par exemple, ont besoin de jours longs pour fleurir. Cette régulation passe souvent par l'intermédiaire des phytochromes. Le phytochrome sensible à l'infra-rouge lointain de longueur d'onde

égale à 730 nanomètres induit la floraison ; au contraire, le phytochrome sensible au rouge clair (660 nanomètres) inhibe la floraison.

Au printemps, l'allongement des jours transforme le phytochrome 660 en phytochrome 730, et permet à la floraison de se déclencher à la période favorable. Exposer la plante pendant quelques secondes à un rayon laser de 660 nm produit le même effet ; inversement, un laser de 730 nm inhibe la floraison. Ceci peut rendre service aux horticulteurs, aussi bien pour empêcher les salades de monter à graine que pour déclencher la floraison des oeillets à la date optimale.

## 12 LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

Au total, l'énergie donnée par le Soleil, qui est la "source chaude" alimentant la biosphère (cf. annexe 1-1) repart en totalité vers les espaces intersidéraux après avoir animé les mouvements de l'atmosphère et tout le système de la biosphère.

### 121 LE BILAN ENERGETIQUE GLOBAL DE LA TERRE ET DE L'ATMOSPHERE

A l'échelle de quelques années, la Terre conserve une température moyenne stable, et elle n'accumule pas d'énergie thermique. Un équilibre entre les "arrivées" et les "sorties" d'énergie est donc établi, et la totalité de l'énergie solaire reçue par la Terre est renvoyée vers les espaces intersidéraux.

Les bilans sont loin d'être parfaitement analysés, mais des ordres de grandeur peuvent être déduits des chiffres plus ou moins concordants de plusieurs auteurs (M. BUDYKO, 1974 ; J. TRIPLET et G. ROCHE, 1971). L'ensemble est présenté sur la figure 12-1, qu'il est utile de commenter pour bien saisir les voies de transit de l'énergie ré-émise par la Terre :

- 30% de l'énergie solaire incidente sont directement renvoyés vers les espaces intersidéraux, sous forme de rayonnement de courte longueur d'onde réfléchi par les nuages (17%), l'atmosphère (3%) et le sol ou la végétation (10%) ; en d'autres termes, l'albedo (§ 31 et Annexe 1-1) moyenne de la Terre et de son atmosphère est égale à 0,3 ;

- - 17% sont absorbés par la vapeur d'eau et les poussières de l'atmosphère ; la majeure part de ces 17% est temporairement utilisée pour évaporer l'eau des nuages, puis remise en liberté dans l'atmosphère lorsque la vapeur d'eau (transparente) incluse dans l'atmosphère se condense pour donner de nouveaux nuages ;
- - les 53% qui arrivent au sol sont totalement ré-exportés, plus ou moins directement :
- = 6 % sont émis par le sol et la végétation sous la forme de radiations de grande longueur d'onde et vont directement vers les espaces intersidéraux ;
- = 12 % sont aussi émis par le sol et la végétation, mais sont absorbés par l'atmosphère ;
- = 35 % sont transmis par convection et par conduction à l'atmosphère (6% réchauffent l'atmosphère, sous la forme de chaleur sensible et 29% évaporent de l'eau).

Les 64 % qui sont temporairement hébergés dans l'atmosphère viennent de trois sources :

- - 17 % viennent directement du rayonnement solaire ;
- - 12 % viennent du rayonnement émis par le sol et la végétation ;
- - 35 % ont été transmis par le sol et la végétation).

Ils sont ensuite envoyés eux aussi vers les espaces intersidéraux sous la forme de rayonnement de courte longueur d'onde.

Un autre aspect du bilan est que l'émission totale en grande longueur d'onde vaut 70% du rayonnement solaire reçu, qui se décomposent ainsi :

- - 6% sont émis directement par la Terre (y compris par la végétation) ;
- - 17% ont été absorbés lors de l'arrivée du rayonnement solaire dans l'atmosphère, et sont ré-émis par l'atmosphère, les poussières et les nuages ;

- - 12% ont été émis par la Terre, absorbés par l'atmosphère, les poussières et les nuages, et sont ré-émis vers les espaces intersidéraux ;
- - 35% ont été transmis de la Terre à l'atmosphère, puis ré-émis par celle-ci.

Ce bilan équilibré est valable pour l'ensemble du globe, mais il est nettement positif pour les latitudes tropicales, et nettement négatif pour les zones polaires. Il faut donc qu'un système de compensation s'établisse, grâce aux courants océaniques et à la circulation atmosphérique. Les courants océaniques sont lents, et ils ne transfèrent vers les pôles que 10 % de l'énergie excédentaire. L'air se déplace beaucoup plus vite, et un double courant s'établit : en haute altitude, de l'air chaud et humide va vers les pôles, alors que, à basse altitude, de l'air froid et sec va vers l'équateur.

Les océans absorbent mille fois plus de calories que les continents, en particulier parce que la chaleur latente d'évaporation de l'eau (voir Annexe 1-3) est beaucoup plus élevée que la chaleur spécifique de la terre. De fait, l'évaporation d'un litre d'eau absorbe 539.000 calories, alors que le réchauffement de 1°C d'un kilogramme de terre absorbe environ 2.000 calories. En conséquence, c'est surtout l'évaporation de l'eau des mers équatoriales (et la condensation de cette eau dans les zones tempérées et froides sous forme de pluie) qui assure l'équilibre thermique de l'ensemble. Cette circulation atmosphérique "mérienne", modulée par la force de Coriolis, sera étudiée dans le paragraphe 13, après avoir examiné les mouvements verticaux de l'atmosphère.

## 122 LES PROFILS VERTICAUX DE TEMPERATURE DANS LA HAUTE ATMOSPHERE

Si l'atmosphère était transparente pour le rayonnement infra-rouge émis par le sol et la végétation (§ 312), la température « radiative » d'équilibre de la Terre serait de - 18°C (G. ISRAEL, 1985). C'est l'effet de serre qui porte la température observée à +14°C, soit 32°C de plus que la température "radiative". L'altitude où sont atteints les - 18°C qui correspondent à l'équilibre est voisine de 2.000 m. Nous verrons dans le paragraphe 842 que l'augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère augmente l'effet de serre alors que les poussières émises par les volcans le diminuent.

Les transformations de l'énergie au sein de l'atmosphère sont très complexes. Leur résultat est que le refroidissement régulier de l'air en altitude, qui nous paraît une évidence, a lieu seulement dans la basse atmosphère (nommée la troposphère, parce qu'elle est le siège de mouvements divers...). Au-delà, trois gradients alternés se succèdent (fig. 12-2 et Atlas).

Au-dessus de la troposphère se trouve la tropopause ; elle est située à 8 km d'altitude, dans les régions polaires, avec une température de - 50 degrés C, et, dans la zone équatoriale, à 17 km, avec une température de - 80 degrés C.

Ensuite, la température croît à nouveau régulièrement, au sein de la stratosphère (10 km à 50 km) où se trouve la couche d' ozone qui absorbe le rayonnement situé juste au-delà du violet, entre 0,18 et 0,3 microns, qui tuerait les êtres vivants actuels (§ 214 et 843). Cette couche est très ténue, et son épaisseur serait de 3 mm si elle était comprimée à la pression qui règne au niveau du sol. Au dessus de la stratosphère se trouve la stratopause, où la température est voisine de 0 à 10 degrés C. Au-delà, dans la mésosphère, elle décroît à nouveau jusqu'à 85 km (mésopause), puis croît à nouveau dans la thermosphère, qui va jusqu'à 500 km.

La couche située entre 80 km et 150 km est aussi nommée ionosphère par ce qu'elle contient les ceintures ionisées qui réfléchissent les ondes radio de courte longueur d'onde (qui sont la cause des « orages magnétiques ») et les aurores polaires (nommées aurores boréales dans l'hémisphère nord). Celles-ci ont pour origine des flux d'électrons et de protons éjectés par le Soleil à grande vitesse (500 km/sec à 1.000 km/sec) qui sont attirés par le champ magnétique des 2 pôles et provoquent la luminescence des ions de l'ionosphère, sous la forme de draperies bleues et vertes, avec des nuances jaunes et rouges.

L'azote et l'oxygène des hautes couches absorbent le rayonnement X, qui pourrait nous être néfaste.

A partir de 500 km d'altitude, les atomes et les ions sont relativement éloignés les uns des autres, et la température n'a de sens que dans la physique de la cinétique des particules ; elle atteint plus de 1.000°C vers 3.000 km, dans une atmosphère composée surtout d'hélium et d'hydrogène.

Ajoutons enfin que 99% de la masse de l'atmosphère terrestre sont inclus dans la troposphère et dans la stratosphère, qui représentent une pellicule très mince, d'épaisseur inférieure à 1% du rayon de la Terre. C'est une des raisons qui justifient leur intégration dans la biosphère.

## 123 LA STABILITE ET L'INSTABILITE DE L'AIR DANS LA BASSE ATMOSPHERE

### 123.1 Explication générale

L'air chaud monte dans l'atmosphère, (bien qu'il fasse plus froid en altitude) : il suffit de regarder le bourgeonnement d'un cumulus (cf. § 123.2), ou les orbes du vol plané d'une Buse, pour voir que des "ascendances" peuvent naître dans l'air atmosphérique.

Dans quelles conditions apparaît cette instabilité ? Pour le comprendre, considérons un petit volume d'air,  $V_1$ , situé à l'altitude  $H_1$ , en imaginant qu'il est enfermé dans un ballonnet élastique (fig. 12-3) ; il est en équilibre avec l'air qui l'entoure si son poids est exactement égal à la poussée d'Archimède qu'il reçoit de la part de toutes les molécules d'air qui l'entourent.

Les mouvements aléatoires de l'atmosphère peuvent cependant conduire le ballonnet à monter un peu, jusqu'à l'altitude  $H_2$ , par exemple ; en montant, il se dilate, puisque la pression atmosphérique diminue quand l'altitude augmente. En se dilatant, il se refroidit, par un phénomène nommé "détente adiabatique" ; ce refroidissement est l'inverse de l'échauffement que produit une compression (cet échauffement est sensible, par exemple, dans la main qui tient une pompe de bicyclette, pendant que l'on gonfle un pneu). La dilatation produit un refroidissement, parce qu'elle est un travail, qui consomme de l'énergie aux dépens de l'agitation désordonnée des molécules d'air du ballonnet ; ce prélèvement d'énergie ralentit, en moyenne, les molécules et ceci correspond exactement à une diminution de la température de l'air du ballonnet, puisque la température est précisément le résultat de cette agitation des molécules du ballonnet. Dans l'air sec, le coefficient de décroissance de la température est de  $1^\circ\text{C}$  par km d'altitude ; dans l'air humide, il est compris entre  $0,4^\circ\text{C}$  et  $1^\circ\text{C}$  par km.

Comparons maintenant la température de l'air du ballonnet et celle de l'air environnant situé à l'altitude  $H_2$  : si l'air du ballonnet est devenu plus froid que l'air qui l'entoure, il sera aussi plus dense, et il redescendra ; l'atmosphère sera alors "stable". Si, au contraire, malgré le refroidissement dû à la détente, l'air du ballonnet est plus chaud que l'air qui l'entoure à l'altitude  $H_2$ , il sera aussi plus léger que cet air ambiant, et il montera encore plus ; l'atmosphère sera alors "instable" ; en effet une faible ascension aléatoire s'accroît alors automatiquement, en une boucle de rétro-action positive. L'instabilité s'installe ainsi, en moyenne, quand la température de l'air décroît de plus de  $1^\circ\text{C}$  par 100 mètres.

En résumé, si une petite ascension "accidentelle" du ballonnet suffit pour entraîner une ascension de plus grande ampleur, l'atmosphère est instable. Cette instabilité se produit quand le "gradient" réel de température de l'atmosphère est plus intense que le "gradient de détente adiabatique" de l'air. Les nuages qui se produisent alors sont des "cumulus". C'est le cas, en particulier, quand une masse d'air froid survole des terres relativement chaudes. Nous verrons ainsi, dans le paragraphe 135 (figure 13-5), que l'air qui arrive à la suite d'un "front froid" produit des cumulus. De même, par un matin de brouillard, quand la Terre se réchauffe fortement l'influence du rayonnement solaire, le gradient réel augmente, et le brouillard "se lève".

Le raisonnement qui vient d'être fait ne s'applique pas à une couche d'air tout entière. En effet, si l'air monte en un endroit, il doit redescendre ailleurs, et l'instabilité se traduit par une combinaison de courants ascendants et de courants descendants accolés. Quand un avion passe d'une ascendance à un courant descendant, il est brutalement rabattu vers le sol, donnant aux passagers l'impression d'un "trou d'air".

### 123.2 Les nuages

C'est J.-B. de Monet, chevalier de Lamarck qui a proposé, en 1776-1788, dans ses "Phénomènes de l'atmosphère", la classification des nuages que nous continuons à utiliser, mais c'est L. Howard qui, plus

tard, a repris ses idées en y ajoutant les noms à consonance latine tels que cumulus, stratus, nimbus, cirrus.

Lorsque l'air instable monte et se refroidit, la vapeur d'eau qu'il contient en arrive souvent à se condenser en petites gouttelettes qui constituent un cumulus. Ce phénomène se produit couramment en climat tropical humide, où l'on voit des "flottes de cumulus" apparaître au milieu de la journée, quand le Soleil a réchauffé la terre qui était couverte de rosée matinale. Nos climats, des masses d'air stable peuvent côtoyer des masses d'air instable, à l'échelle de quelques kilomètres. Ainsi, les marais et les sols humides de la Camargue se réchauffent moins vite, au cours de la journée, que les sols environnants ; les courants ascendants sont alors moins forts au-dessus de la Camargue, et il y a moins de condensations nuageuses pendant la matinée. Ceci a été régulièrement vérifié ces dernières années, grâce aux photographies prises régulièrement vers 11 heures du matin par le satellite Landsat.

L'importance essentielle de l'instabilité est que les ascendances entraînent une condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air, et provoquent la formation de nuages verticaux. Ainsi, lorsque le Soleil a chauffé toute la matinée un territoire chargé d'humidité, plusieurs phénomènes s'enchaînent :

- - le gradient de température augmente,
- - l'air devient instable,
- - les ascendances produisent ces nuages qui bourgeonnent comme des choux-fleurs, et que l'on nomme cumulus.

Si les ascendances s'amplifient, les cumulus noircissent, se gonflent, et deviennent des cumulo-nimbus, puis des nimbus, dont le sommet est en forme d'enclume et qui sont chargés d'éclairs, de grêle et d'orages.

Que se passe-t-il au sommet des cumulus ? L'eau qui s'est condensée dans les colonnes ascendantes a donné de la chaleur (à l'inverse de l'eau qui "prend" de la chaleur pour s'évaporer) ; l'air en a bénéficié, et le gradient de température est devenu plus faible. En conséquence, l'instabilité de l'air diminue, les mouvements ascendants ralentissent et s'arrêtent. L'air froid, qui a perdu son humidité, redescend alors sur les flancs du nuage et produit des courants descendants, qui donnent des "trous d'air" (cf. fin du paragraphe 123.1).

En moyenne, les nuages contiennent 0,2 grammes d'eau liquide par mètre cube, soit 200 tonnes pour un nuage d'un kilomètre cube. Mais les nuages denses en contiennent beaucoup plus. J.-P. CHALON (2002) donne quelques exemples : un petit cumulo-nimbus, dont le volume est voisin de 1 km<sup>3</sup>, contient 10.000 tonnes d'eau sous forme de vapeur et 500 tonnes d'eau sous forme de gouttelettes. Un gros cumulo-nimbus occupe 1 000 km<sup>3</sup> (l'ordre de grandeur de ses dimensions est 10 km . 10 km . 10 km) ; il peut contenir jusqu'à 1 milliard de tonnes d'eau (soit le poids de 500.000 automobiles) dont plusieurs millions de tonnes d'eau liquide et de glace, et il peut déverser 4.000 tonnes de pluie par seconde. Pourquoi cette masse considérable ne tombe-t-elle pas immédiatement ? En partie parce que des courants ascendants l'entraînent vers le Soleil, mais surtout parce que l'air humide est moins dense que l'air sec !

### 123.3 Les gradients atmosphériques

Pour suivre ces ascendances, les météorologues envoient dans l'atmosphère des ballons-sondes munis de thermomètres, afin de déterminer le profil des températures réelles. Ils y ajoutent des hygromètres parce que le raisonnement précédent doit être complété par des calculs plus complexes pour tenir compte du refroidissement dû à la condensation de la vapeur d'eau.

Ces mesures ont permis de calculer des gradients moyens (pour lesquels l'air est stable) : la décroissance moyenne de la température de l'air dans la troposphère varie entre - 5°C et - 6,5°C pour 1.000 m, et la décroissance de la pression est logarithmique. Au niveau de la mer, on perd 1 mb en montant de 8,4 m ; à 3 km, la décroissance est de 1 mb pour 11,3 m, et, à 5,5 km, la décroissance est de 1 mb pour 14,8 m.

Le résultat est résumé dans le tableau ci-dessous :

|             |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|-------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Alt<br>(km) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

|                      |      |     |     |      |     |     |     |     |     |      |
|----------------------|------|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| <b>Pression (mb)</b> | 1013 | 795 | 701 | 616  | 540 | 472 | 411 | 356 | 307 | 899  |
| <b>Temp. (°C)</b>    | 15   | 8,5 | 2   | -4,5 | -11 | -17 | -24 | -30 | -37 | 43,5 |

En montagne, la situation est souvent complexe. Par exemple, entre Briançon (1.324 m) et une station située à 2.030 m au col du Lautaret (J. RONCHAIL, 1980), le gradient moyen mensuel a varié de 0°C à -14,7°C au cours des 11 premiers mois de l'année 1978. Ce gradient est plus faible la nuit que le jour, puisque la moyenne mensuelle du gradient des températures minimales, atteintes à la fin de la nuit, est, au cours de cette période, de -2,4°C, alors que la moyenne mensuelle du gradient des températures maximales y est de -10,1°C. Cette faiblesse du gradient des minimums résulte de la descente de l'air froid (plus dense) dans les vallées, au cours de la nuit, surtout quand la région est dans une situation anticyclonique (cf. § 124 et § 15) ; il fait alors presque aussi froid dans les vallées que sur la montagne. Au contraire, dans la journée, l'énergie radiative venant du Soleil s'accumule mieux dans la vallée que sur le haut des versants balayés par le vent ; les vallées sont plus chaudes et les sommets plus froids, et le gradient s'accroît.

Le gradient thermique varie aussi au fil des saisons :

|                                  |            |         |
|----------------------------------|------------|---------|
|                                  | avril 1978 | nov. 78 |
| moyenne du gradient des minimums | 4,5        | 0       |
| moyenne du gradient des maximums | 14,7       | 7,8     |

Cette variation saisonnière vient de ce que, dans cette région, l'amplitude des variations diurnes est proportionnelle à la quantité de rayonnement reçu ; en effet, l'amplitude diurne est grande en été, parce que le Soleil chauffe fortement la terre au cours de la journée, et que le ciel est souvent dégagé de nuages au cours de la nuit, où la terre se refroidit en envoyant un important rayonnement infrarouge (5 à 20 microns) vers les espaces intersidéraux. Au contraire, en hiver, le Soleil reste bas, et le ciel est souvent couvert ; les gradients sont moins intenses.

Le gradient de température peut atteindre jusqu'à -4°C par 100 m quand la terre est très chaude. A l'opposé il peut être inversé au voisinage du sol quand celui-ci est plus froid que l'atmosphère. Ceci se produit en particulier quand la terre se refroidit en fin d'après-midi. L'atmosphère est alors très stable, au point que les fumées urbaines et les émissions de gaz industriels (SO<sub>2</sub> et SO<sub>3</sub> en particulier) restent au-dessus des villes. Cette situation est si nocive que l'activité industrielle doit alors être stoppée pendant quelques heures dans certaines villes industrielles telles que Toronto.

Pendant les nuits claires, la Terre se refroidit beaucoup, et l'eau contenue dans l'air se condense en donnant de la rosée, et quelquefois du brouillard, surtout dans les dépressions où l'air froid descend et s'accumule.

## 124 LES MOUVEMENTS HORIZONTAUX DE LA BASSE ATMOSPHERE

Regardons maintenant une fraction de l'atmosphère couvrant quelques millions de kilomètres carrés. La pression n'y est pas uniforme, et l'air va spontanément des hautes pressions (anticyclones) vers les basses pressions (ou dépressions), mais il n'y va pas en ligne droite, parce que la rotation de la terre (30 km par seconde, soit 1.670 km/h, à l'Équateur) déplace à chaque instant le "but visé". Ceci se comprend aisément dans le cas d'une masse d'air partant du Sahara pour aller vers le Gabon : pendant que l'air se déplace vers le sud, il arrive sur des zones où la Terre tourne vers l'est avec une vitesse plus grande que dans la zone d'où il est parti. La dépression n'arrive pas au Gabon, puisque ce pays a déjà défilé vers l'est pendant que la masse d'air commençait à se déplacer (figure 12-4). Finalement, la masse d'air arrivera à droite de la dépression gabonaise, s'enroulant en quelque sorte autour d'elle. Dans l'hémisphère nord, la masse d'air est ainsi "déviée" vers la droite ; dans l'hémisphère sud, tout s'inverse, et la masse d'air est déviée vers sa gauche.

Plus généralement, quand un mobile M, de coordonnées géographiques X et Y, se déplace avec une vitesse  $V_r$  à la surface de la Terre, sa vitesse absolue,  $V_a$  (par rapport à un système de coordonnées indépendant

de la position de la Terre) est bien la somme géométrique de sa vitesse relative par rapport à la surface de la Terre,  $V_r$ , et de la vitesse propre de la Terre, nommée vitesse d'entraînement,  $V_e$ .

$V_r$ , la vitesse relative, à pour composantes

$$V_x = dX/dt$$

et  $V_y = dY/dt$

$V_e$ , la vitesse d'entraînement, se décompose en une translation  $OO'$  et une rotation  $w$ .

La vitesse absolue du mobile,  $V_a$ , est sa vitesse par rapport à un système d'axes de coordonnées sidérales indépendant de la position de la terre ; si les coordonnées du mobile par rapport à ce système sidéral sont  $X, Y, Z$ , la vitesse absolue a pour composantes  $dX/dt, dY/dt, dZ/dt$ , dérivées de  $X, Y$ , et  $Z$  par rapport au temps.

L'accélération absolue de  $M$  par rapport à ce système est :

$$G_a = dV_a/dt$$

Les composantes de  $G_a$  sont  $d^2X/dt^2, d^2Y/dt^2, d^2Z/dt^2$ , et l'on démontre en quelques lignes que  $G_a$  n'est pas égal à la somme de l'accélération relative et de l'accélération d'entraînement, parce qu'il faut leur ajouter une accélération complémentaire, dite accélération de Coriolis, liée à la rotation de la vitesse d'entraînement. Or la Terre tourne sur elle-même en 24 heures, ce qui correspond à 463 m/seconde à l'Equateur, soit 1.670 km/h.1

Cette accélération existe même si l'accélération d'entraînement et l'accélération relative sont nulles. Il y correspond une force, dite force de Coriolis, qui se manifeste dès qu'un mobile se déplace à la surface de la Terre. Cette force est perpendiculaire à l'axe des pôles et perpendiculaire au vecteur qui représente la vitesse relative du mobile. Sa composante horizontale est du même ordre de grandeur que la force horizontale qui pousse l'air des anticyclones vers les dépressions, et elle est perpendiculaire à la direction du mouvement ( $V_r$ ), vers la droite dans l'hémisphère nord, vers la gauche dans l'hémisphère sud. Il y aura équilibre "dynamique" si la vitesse de la masse d'air est telle que la force de Coriolis équilibre exactement la résultante des forces horizontales. Cet équilibre sera atteint si la vitesse relative  $V_r$  du mobile est perpendiculaire à la composante horizontale des forces de pression.

Finalement, les vents sont orientés presque parallèlement aux isobares (fig. 12-3) et non pas selon la direction qui va du centre des anticyclones vers le centre des dépressions.

### 13 LES PRINCIPAUX CLIMATS DU MONDE

Le Soleil tient plusieurs rôles dans le jeu des phénomènes biologiques et PLATON écrivait déjà, cinq siècles avant notre ère : "c'est le Soleil qui fait les saisons et les années, qui gouverne tout dans le monde visible et qui, d'une certaine manière, est la cause de tout ce qu'il voit." (République, VII, 516 b).

L'ensemble de l'atmosphère et de la surface des continents et des océans est une gigantesque machine thermique où l'air est brassé par les vents et où l'eau ne cesse de passer de la phase liquide à la phase gazeuse (cf. § 41), et inversement. Ces phénomènes s'ordonnent à la surface du globe en fonction de la latitude, selon de grandes ceintures, nommées "zones" par le mathématicien grec Thalès (mort vers av. J.-C.). Un « Abrégé de géographie » de 1716, qui se réfère aux cartes publiées par l'Académie des sciences, commence aussi sa description du monde par l'étude des « zones » climatiques.

Pour en comprendre la succession, le plus simple est de partir de la zone équatoriale où le climat résulte directement de l'action du Soleil.

#### 131 LA ZONE EQUATORIALE

La figure 13-1 permet de voir que la durée des jours et des nuits varie au cours des saisons : par exemple, le 21 décembre, la partie ombrée de la ligne qui représente le tropique du Cancer est plus longue que la partie éclairée de cette ligne. Cependant, à l'Équateur, les jours et les nuits sont toujours égaux, et le Soleil est exactement au zénith à midi le 20 mars et le 23 septembre ; au solstice d'été, sa trajectoire reste tout entière dans la partie septentrionale du ciel, et, à midi, il monte seulement jusqu'à 66°33' de hauteur au-dessus de l'horizon (et 23°27' d'écart du zénith) ; au contraire, au solstice d'hiver, le Soleil reste dans la partie méridionale du ciel, et atteint aussi 66°33' de hauteur.

En résumé, pour les personnes qui vivent à l'équateur, sa trajectoire paraît se balancer, de chaque côté du zénith, un peu au nord pendant notre été, un peu au sud pendant notre hiver. Ces oscillations ne sont pas suffisantes pour entraîner des variations importantes de la température au cours des saisons, et les moyennes mensuelles varient seulement de 1 ou 2 degrés Celsius autour de la moyenne annuelle (généralement voisine de 26°C).

La zone équatoriale reçoit beaucoup d'énergie solaire, puisqu'elle est presque perpendiculaire aux rayons du Soleil. Cette énergie radiative se transforme surtout en "chaleur latente de vaporisation" de l'eau disponible. Très souvent, la chaleur reçue pendant le jour produit suffisamment de nuages pour qu'un orage se déclenche en fin d'après-midi, et que la nuit soit humide ou même brumeuse. Finalement, les variations diurnes de la température atteignent souvent 3 à 5°C, et cette "amplitude diurne" est plus grande que l'amplitude saisonnière (qui est la différence entre la moyenne des températures du mois le plus chaud et la moyenne des températures du mois le plus froid).

La zone équatoriale est assez fortement arrosée, mais les deux saisons où le Soleil passe au zénith sont les plus pluvieuses. Au contraire, les deux solstices correspondent à de petites saisons sèches.

Puisque l'air est fortement chauffé dans la zone équatoriale, il y monte, comme dans une cheminée, et l'équateur correspond à une ceinture de basses pressions, vers laquelle convergent des vents réguliers, les alizés. Ceux-ci amorcent leur trajectoire selon une direction nord-sud dans l'hémisphère nord (et sud-nord dans l'hémisphère sud), mais nous avons vu au paragraphe 124 que l'accélération de Coriolis (qui naît dès qu'un mobile se déplace à la surface de la sphère terrestre) les dévie vers la droite dans l'hémisphère nord, et vers la gauche dans l'hémisphère sud. Le schéma final est présenté sur la figure 13-2.

La zone de convergence inter-tropicale est occupée par de l'air humide et souvent instable, qui produit de puissants cumulo-nimbus montant jusqu'à 15.000 m ; pendant les périodes de stabilité, des voiles d'altostratus et de cirro-stratus en plusieurs nappes s'établissent fréquemment.

La "cheminée équatoriale" est quelquefois nommée ZIC (zone intertropicale de convergence).

En fait, c'est seulement sur les océans que le système fonctionne aussi simplement. Sur les continents, et en particulier sur le Sahara (d'après M. LEROUX, 1976), il s'établit plutôt un "front inter-tropical" (F.I.T.) parce que l'air se réchauffe au contact du sol surchauffé et devient moins dense. Une dépression d'une dizaine de millibars s'installe alors entre 25 et 30 degrés de latitude, et la coupe verticale devient un peu plus compliquée. Les pluies issues de ce front sont plus orageuses, et il s'établit souvent une ligne de "grains" (fig. 13-3) sur la frange méridionale des alizés (renforcés par des injections d'air polaire), entre le lac Tchad et la boucle du Niger.

Les alizés entraînent les eaux superficielles des océans en créant des courants marins dirigés vers l'ouest aux latitudes proches des deux Tropiques (fig. 13-6). L'air se charge alors de vapeur d'eau, et les alizés apportent ainsi de l'air tiède et humide sur les parties orientales des continents, en particulier sur l'Amazonie, sur les Caraïbes, sur le nord-est de l'Australie et sur le sud de la Chine.

## 132 LES ZONES TROPICALES

Éloignons-nous de l'équateur, vers le nord par exemple. La saison sèche d'hiver, correspondant à la saison où le Soleil est au-dessus de l'hémisphère sud, sera de plus en plus marquée, et, au contraire, la saison sèche d'été sera très courte, puisque les deux passages du Soleil au zénith, qui encadrent le solstice d'été, seront très rapprochés. On va ainsi progressivement du régime équatorial, à deux saisons sèches égales,

vers les régimes tropicaux à deux saisons sèches inégales, puis au régime tropical pur, à une seule saison sèche. En Afrique, cette succession correspond au passage de la zone guinéenne à la zone sahélienne.

Le "balancement" annuel de la cheminée équatoriale autour de l'équateur entraîne un déplacement du système des vents et des fronts, qui est illustré par la figure 13-4 pour le cas de l'Afrique. En outre, les masses d'air qui viennent du Golfe de Guinée sont humides et elle donnent naissance à des "lignes de grains" qui se déplacent vers l'ouest et souvent se rechargent en humidité sur l'Atlantique avant d'aller donner des cyclones dans le golfe du Mexique. A haute altitude, les courant-jets vont aussi de l'est à l'ouest (Madden-Julian). Il est souvent parlé de "mousson" pour les pluies du Sahel africain, mais il est préférable de limiter l'usage de ce terme aux phénomènes de l'océan Indien. Le changement climatique différencie encore plus ces deux types de climats, parce qu'il apporte des pluies supplémentaires en Inde alors qu'il augmente la sécheresse dans le Sahel africain.

Le total des pluies annuelles diminue régulièrement au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'Equateur, et il est de plus en plus variable d'une année à l'autre. Les plantes les mieux adaptées à cette irrégularité sont les plantes annuelles. PH. DAGET ET AL. (1991) ont suivi l'évolution du recouvrement de 48 espèces annuelles dans une savane parcourue par les troupeaux à 450 km au nord-est de Dakar, dans le Ferlo sahélien : le recouvrement spécifique de *Zornia glochidiata*, par exemple entre 1981 et 1988 est égal à 51 %, 78 %, 4 %, 0,1 %, 56 %, 75 % et 59 %. et il est expliqué pour 92 % par les précipitations de septembre et de juillet qui varient entre 53 mm et 179 mm.

### 133 LES ZONES DES GRANDS DESERTS

De chaque côté de la zone d'ascension de l'air équatorial, que le Soleil "promène" d'un tropique à l'autre au fil des saisons, s'étendent, au nord et au sud, des zones de stagnation d'air sec (hautes pressions, dites "anticyclones" indiquées sur les figures 13-2, 13-4, 13-5), où se trouvent les grands déserts (Sahara et Kalahari en Afrique, Sonora en Amérique du Nord, Atacama en Amérique du Sud, et Victoria en Australie).

Cette simple énumération souligne que c'est sur la partie occidentale des continents que se développent les grands déserts. Ceci est dû en partie à un phénomène annexe : il existe, à l'échelle des océans, un système de courants, qui constituent des cellules plus ou moins elliptiques. La circulation s'y fait de l'équateur vers les pôles dans la partie occidentale des océans, et des pôles vers l'équateur dans la partie orientale (fig. 13-6). En conséquence, ce sont des courants froids qui baignent les parties occidentales des continents, et ils en accentuent le caractère désertique même quand ils provoquent des brouillards côtiers (nommés neblines).

Les courants océaniques jouent un rôle capital dans la régulation thermique du globe (J. WHITEHEAD, 1998) et nous y reviendrons dans le paragraphe 842.5.

En outre, les alizés, qui vont toujours vers l'ouest, arrivent sur ces zones après avoir parcouru des continents où ils n'ont pas pu se charger d'humidité.

Les zones désertiques actuelles n'ont pas toujours existé dans leur répartition actuelle, car elles dépendent de phénomènes qui sont très sensibles aux bilans énergétiques méridiens. Il faut savoir, par exemple, que les ceintures anticycloniques tropicales et polaires n'existent plus en altitude ; au contraire, le profil méridien des isobares situées au-dessus de l'isobare 700 mb décroît régulièrement de l'Équateur vers les pôles, qui correspondent à une intense dépression, où le vent circule constamment d'ouest en est.

Les climats désertiques sont couramment définis par la rareté des précipitations, mais les déserts absolus, où il ne pleut pratiquement jamais, sont rarissimes. Sur la plus grande partie des déserts, il pleut quelquefois, mais les pluies sont très irrégulières, et la végétation est obligée d'utiliser des processus extrêmes pour s'adapter à cette non-prévisibilité.

Une étude attentive permet cependant de déceler une variation progressive du sud au nord d'un grand désert tel que le Sahara : au sud, les pluies ont plutôt lieu pendant l'été, comme dans la zone tropicale, alors qu'au nord, elles ont plutôt lieu pendant l'hiver, qui est relativement froid.

## 134 LES ZONES MEDITERRANEENNES

Les deux zones de hautes pressions (ou anticyclones) comprises entre 20 et 30 degrés de latitude (nord et sud) sont couvertes par des masses d'air stagnantes, en « subsidence » (fig. 13-2 et 13-5) ; celles-ci alimentent par leur face polaire des vents réguliers qui vont de l'ouest à l'est (fig. 13-2) ; ces vents sont nommés "quarantièmes rugissants" dans l'hémisphère sud, où ils se déploient sans frein sur les trois océans.

La frange septentrionale du Sahara est caractérisée par une augmentation progressive des pluies de la saison froide, et le maintien d'une saison sèche en été quand les anticyclones sont le plus loin de l'équateur. Ce type de climat est dit méditerranéen, puisqu'il règne autour de la Méditerranée, mais il existe aussi en Californie, au Chili, dans la province du Cap, et à l'ouest de l'Australie.

Une variante très atténuée peut sans doute aussi être décelée au Japon. En effet, il existe autour de la Mer Intérieure, et en particulier dans l'île de Kyushu (I. MIYATA, 1981), d'importantes forêts d'arbres à feuillage persistant (*Castanopsis cuspidata*, *Cyclobalanopsis gilva*), et 4 autres espèces du même genre, *Machilus thunbergii*, *Distylium racemosum*, etc.). Ces forêts sempervirentes ne suffisent évidemment pas pour dire que le climat est méditerranéen, mais elles obligent au moins à se demander comment les variations climatiques du Quaternaire ont produit ce type de formation.

Ph. DAGET (1980) a comparé plusieurs modes de délimitation du climat méditerranéen. Il discute en particulier la valeur relative de la limite biogéographique de l'Olivier, en particulier parce que la limite d'extension d'une plante cultivée dépend trop des techniques agricoles et de la conjoncture économique.

Les Romantiques qui redécouvraient la Côte d'azur et la Toscane ont répandu l'idée de la douceur de l'hiver dans les climats méditerranéens, E. de MARTONNE (1929) les a suivis en prenant le critère des températures minimales du mois le plus froid (m) supérieures à 5°C. Mais cette manière de voir oublie que les montagnes de l'Atlas ou de Turquie sont extrêmement froides, quoiqu'elles soient situées indiscutablement dans la zone méditerranéenne. Les auteurs plus récents fixent cette limite à  $m > 2$  ou  $m > 0$ , mais cette convention ne résout pas le problème des hautes montagnes méditerranéennes.

C'est pourquoi Ph. DAGET confirme que la "sécheresse estivale" est le premier caractère discriminant de la méditerranéité, et qu'elle s'exprime utilement à l'aide du coefficient d'EMBERGER :

$$S = Pe/ME$$

où Pe est la somme des précipitations des trois mois d'été (juin, juillet et août), et ME la moyenne des maximums quotidiens de la température au cours de ces trois mois.

Pour le Languedoc et la Provence, la limite semble pouvoir être placée à  $S < 7$  mais pour l'Espagne du Nord, la Bulgarie, le Caucase et le Moyen Orient, il semble préférable de prendre  $S < 5$ . En outre, l'indice de continentalité pluviale d'ANGOT, ( $C = \text{précipitations des six mois les plus chauds} / \text{précipitations des six mois les plus froids}$ ) est inférieur à l'unité dans les régions méditerranéennes, et l'indice de continentalité thermique de GORCZINSKI modifié par CONRAD doit être inférieur à 25°C.

De l'Italie à l'Iran s'étend la limite qui sépare les climats méditerranéens (à sécheresse estivale) des climats tempérés continentaux qui bénéficient de pluies d'orage en été. Le long de cette limite, l'indice de continentalité pluviale C (= précipitations des six mois les plus chauds/précipitations des six mois les plus froids) est voisin de 1.

De même, pour qu'un climat soit nettement méditerranéen, il faut que le coefficient de continentalité thermique K' soit inférieur à 25 :

$$K' = (1,7 A / \sin(\phi + 10 + 9h)) - 14$$

avec :

- - A : amplitude thermique moyenne,
- - phi : latitude,
- - h : altitude

### 135 LES ZONES TEMPEREES

Au-delà, en allant vers le nord, s'étendent les climats tempérés, dominés par la circulation "zonale" des vents d'ouest. La dominance de ces vents, dont l'ensemble constitue les deux "tourbillons circumpolaires", se comprend si l'on se souvient que les masses d'air venant des anticyclones tropicaux et montant vers les latitudes moyennes sont entraînées par la Terre avec une grande vitesse, vers l'est, alors que la rotation de la Terre affecte peu les masses d'air polaire ; finalement, quand les masses d'air tropicales arrivent dans la région tempérée, elles continuent à avancer, sur leur lancée, vers l'est.

Les climats tempérés sont "océaniques" sur les côtes occidentales, et l'écart entre les températures de l'hiver et de l'été y est relativement faible, parce que le « volant thermique » de l'eau des océans est beaucoup plus fort que celui de la terre des continents, en particulier parce que l'évaporation de l'eau, en été, absorbe une quantité de chaleur considérable. Pour l'Europe occidentale, la chaleur apportée par le Gulf Stream est un complément faible mais non négligeable.

Le climat devient de plus en plus « continental » au fur et à mesure que les masses d'air survolent les continents. Ceux-ci se réchauffent (et se refroidissent) plus vite que les océans, et les variations annuelles des températures y sont beaucoup plus accentuées. En outre, les turbulences ascendantes qui s'établissent en été au-dessus des terres surchauffées entraînent l'apparition d'orages, qui apportent des précipitations estivales. Au contraire, en hiver, les continents se refroidissent intensément ; l'air qui les surmonte se refroidit aussi ; il devient plus dense et plus stable ; ainsi, de hautes pressions s'établissent, capables de contrer les vents d'ouest et d'envoyer des vents d'est glacés vers les côtes maritimes occidentales.

La zone des vents d'ouest est fragmentée, le long des parallèles, en une succession de cellules de basses pressions « cycloniques ». Les courbes qui expriment la forme de ces immenses cuvettes sont les isobares, équivalentes aux courbes de niveau concentriques qui entourent un lac. On pourrait penser que l'air va en droite ligne de l'anticyclone vers le centre de la dépression mais, ainsi que nous l'avons vu au paragraphe 124, l'accélération de Coriolis détourne les masses d'air vers leur droite dans l'hémisphère nord, et la dépression y sera ainsi entourée d'un grand tourbillon qui tourne en sens inverse des aiguilles d'une montre. Finalement, les vents sont presque parallèles aux isobares et d'autant plus forts que celles-ci sont plus serrées.

Le centre de la dépression est constitué par la pointe d'un "coin" d'air chaud qui vient se glisser dans les masses d'air arctique (ou antarctique). Le contact entre ces masses d'air provoque des phénomènes qui peuvent être caractérisés sur une coupe verticale, d'orientation ouest-est (fig. 13-7).

Le coin d'air chaud progresse vers l'est en écrasant l'air froid sous sa masse. Au contact des deux masses d'air (« front chaud »), la vapeur d'eau incluse dans l'air chaud se condense en donnant une série de nuages de plus en plus bas, qui se transforment souvent en pluies. A l'ouest de la perturbation, l'air froid dense situé à l'arrière du coin d'air chaud soulève ce dernier, et produit un "front froid" souvent ourlé de cumulo-nimbus (la classification des nuages est assez récente, puisqu'elle vient de J.-B. de LAMARCK et elle reste encore imparfaite, mais il est utile de la connaître pour distinguer les types de temps, qui sont essentiels dans la bioclimatologie la plus moderne).

Un observateur au sol, situé dans la zone des vents d'ouest, voit ainsi se succéder trois masses d'air, séparées par deux fronts :

- une masse d'air froid, souvent peuplée de cumulus pendant la journée ; le gradient réel de température entre le sol, relativement chaud, et le haut de cette masse d'air froid est plus fort que le gradient de détente adiabatique (cf. § 123) ; en conséquence, l'air est un peu instable ; le vent y est du secteur sud-ouest ;
- le front chaud, accompagné de stratus de plus en plus bas et souvent d'une pluie fine ; le gradient de température devient plus faible que le gradient de détente adiabatique, et l'air devient stable ; il est porté par un vent d'ouest ;

- la masse d'air chaud ;
- le front froid, généralement un peu orageux (puisque le gradient de température y est fort) et presque toujours porteur d'averses ; son passage s'accompagne d'une "montée" du vent vers le noroît ;
- une masse d'air froid, qui apporte souvent du ciel bleu entre les cumulus, puis du beau temps.

En altitude, vers 12 km, près de la discontinuité de la tropopause, dans la zone où s'affrontent l'air polaire et l'air tropical (CF. J. TRIPLET ET G. ROCHE, 1971) s'établit périodiquement un courant-jet, qui peut atteindre 100 m/s, surtout en hiver.

### 136 LES ZONES POLAIRES

Au nord de la trajectoire des dépressions, règnent les masses d'air polaire, qui correspondent habituellement à un anticyclone. En effet, l'air froid des pôles est dense et il "descend" vers les latitudes plus basses. Au cours de ce déplacement, la force de Coriolis le dévie vers l'ouest aussi bien dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud.

Cet air froid rencontre, au voisinage de 60° de latitude, l'air tempéré tiède et il en condense alors la vapeur d'eau. En conséquence, le temps y est souvent brumeux, et les inversions de température y sont fréquentes.

### 137 VUE D'ENSEMBLE : UNE CLASSIFICATION GENERALE DES CLIMATS

La classification des climats à l'échelle du monde commence à pouvoir être reliée aux grands types de végétation, en particulier si l'on ordonne les climats en fonction de caractères importants pour la vie des végétaux, en suivant, par exemple, une synthèse déduite de celle de L. EMBERGER (1945), qui hiérarchise les caractères de la manière suivante :

- - le premier de ces caractères est l'opposition entre les climats désertiques et les climats non désertiques ;
- - le second est le type de photopériodisme ;
- - le troisième est l'amplitude des variations thermiques saisonnières ;
- - le quatrième est la présence d'une (ou deux) saisons sèches ;
- - le cinquième est la "forme" de climat, c'est-à-dire le degré de sécheresse (celle-ci peut être constante au cours de l'année, ou concentrée en une ou deux saisons sèches) ;
- - le sixième est la « variante », qui dépend des froids hivernaux.

La classification peut alors être présentée sous une forme simple :

1 - Climats désertiques (c'est-à-dire où les précipitations ne surviennent pas tous les ans)

11 - Climats désertiques équatoriaux, où les jours et les nuits sont égaux tout au long de l'année ; ils sont localisés dans des plaines, à l'exception de quelques montagnes du sud du Pérou ; la température y est élevée tout au long de l'année.

12 - Climats désertiques tropicaux, où le rythme photopériodique quotidien est presque constant et les saisons thermiques peu prononcées ; ils sont chauds toute l'année (Chili, entre 25 degrés N et la frontière septentrionale ; S-O de l'Afrique, entre 18 degrés S et 30 degrés S ; littoral de l'Érythrée ; Arabie méridionale ; région d'Aden).

13 - Climats désertiques à saisons thermiques prononcées et à photopériodisme quotidien nettement inégal.

131 - à hivers relativement chauds (Basse Californie, Sahara). Les maxima mensuels de température y atteignent 50 °C en Irak, 57 °C en Libye et en Californie. L'amplitude thermique diurne peut y atteindre 50 °C.

132 - à hivers moyennement froids (Sahara oriental ; Nord de la Californie)

133 - à hivers très froids (Turkestan oriental).

**2 - Climats non désertiques, où il pleut tous les ans, au moins pendant certaines saisons.**

**21 - Climats intertropicaux, à photopériodisme uniquement quotidien.**

**211 - Climats isothermes : durée des jours et durée des nuits presque égales.**

**211.1 - Pas de saison sèche (lorsque ces climats sont secs, ils le sont par l'abaissement général de la pluviosité) :**

**Ce sont les climats équatoriaux typiques. Il en existe plusieurs formes, telles que :**

- - le climat équatorial humide, où les moyennes mensuelles varient seulement de 1 ou 2 degrés Celsius autour de la moyenne annuelle (généralement voisine de 26°C) ; les
- variations diurnes de la température atteignent souvent 3 à 5°C ; les précipitations peuvent atteindre 2.000 mm à 4.000 mm.
- - le climat équatorial subhumide,
- - le climat équatorial semi-aride,
- - le climat équatorial aride,
- - le climat équatorial per-aride,
- - le climat équatorial de haute-montagne.

**211.2 Deux saisons sèches, l'une (celle qui correspond, sur l'hémisphère nord, à notre été) étant la moins accusée, l'autre très nette, coïncidant avec notre hiver. Ce sont les climats subéquatoriaux (mêmes formes que ci-dessus, sous 211.1).**

**212 - Climats à saisons thermiques marquées ; durées des jours et des nuits nettement, mais faiblement, inégales. Pluviosité concentrée sur la période correspondant à une période chaude : ce sont les climats tropicaux.**

Suivant l'intensité et la durée de la saison sèche, on peut distinguer au moins cinq formes : humide (où les précipitations annuelles atteignent 12 mètres en Inde), subhumide, semi-aride, aride, saharienne (très aride) et une forme de haute montagne, ainsi que des variantes (chaude et moins chaude) pour chacune d'elles.

**22 - Climats extratropicaux, à photopériodisme quotidien et saisonnier ou uniquement saisonnier, à saisons thermiques.**

**221 - Climats sans saison très froide (y compris des climats relativement secs, où la sécheresse est due à un abaissement général de la pluviosité). Ces climats sont souvent dits tempérés. Les formes de ces climats ne sont pas encore connues, mais il y a sûrement des formes homologues des climats précédents (humide, subhumide, semi-aride, aride, per-aride et haute montagne) avec des variantes chaudes ou froides, suivant les températures hivernales.**

**221.1 - Climats sans saison sèche régulière (climats océaniques quand la proximité de l'océan atténue les contrastes thermiques)**

**221.2 - Climats à saison sèche hivernale, où la pluviosité est concentrée sur la saison chaude.**

Ces climats sont souvent dits continentaux et présentent les mêmes formes que les climats océaniques. L'amplitude thermique annuelle atteint 67 °C en Sibérie.

**221.3 - Climats à saison sèche estivale, où la pluviosité est concentrée sur les saisons froides.**

**Ce sont les climats méditerranéens. Formes reconnues :**

- - climat méditerranéen per-aride (saharien),
- - climat méditerranéen aride,
- - climat méditerranéen semi-aride,
- - climat méditerranéen subhumide,
- - climat méditerranéen humide,

- - climat méditerranéen de haute montagne.

Chacun de ces climats peut, à son tour, être décomposé en plusieurs variantes, suivant que la moyenne des minimums du mois le plus froid est nettement supérieure à 0 degré, autour de 0 degré, ou nettement en-dessous de 0 degré.

222 - Climat du soleil de minuit, à photopériodisme plus ou moins bi-saisonnier ; climats froids.

222.1 - Climats ayant encore une alternance quotidienne des jours et des nuits, mais photopériodisme déséquilibré à très longs jours en été et très longues nuits en hiver : ce sont les climats subpolaires dont les formes ne sont pas définies), mais il existe sûrement un climat sub-antarctique, caractérisé par un régime thermique quasi équatorial, de très faible amplitude, même en hiver (Kerguelen, Shetland du Sud, Orcades du Sud, et la Terre de Graham).

222.2 - Climats tendant vers 6 mois de nuit et 6 mois de jour : ce sont les climats polaires. On y distingue quelquefois, pour l'Antarctique :

- - un climat polaire continental,
- - un climat polaire glacial, où la température peut descendre jusqu'à
- - 89 °C (à la base de Vostok), avec des précipitations presque nulles (situation anticyclonique permanente).

L'évolution des climats est examinée en particulier dans le paragraphe 23.

## 14 LES PHENOMENES CLIMATIQUES REGIONAUX ET LOCAUX

### 141 LES MOUSSONS

Le phénomène des moussons est en opposition avec la circulation générale. C'est pourquoi il doit être considéré comme "régional", quoiqu'il s'étende sur tout le sud du continent asiatique.

Il a été vu, dans les paragraphes 121 et 131, que la circulation méridienne globale est régie par l'alternance des zones de basses et de hautes pressions (figure 13-3) ; cette alternance est nette au-dessus des océans, mais elle est perturbée par les grandes masses continentales, et en particulier par le continent asiatique, où la Sibérie est extrêmement froide en hiver : la masse d'air froid qui couvre en hiver la Sibérie est plus dense que les masses d'air voisines (puisque l'air froid est plus "lourd" que l'air chaud). En conséquence, la pression atmosphérique est plus forte au-dessus de la Sibérie et elle atteint, en moyenne, 1.035 mb (et elle est montée jusqu'à 1.083 mb le 31 décembre 1968), et il apparaît un anticyclone de Sibérie qui irradie des flux d'air sec (mousson d'hiver) vers le sous-continent indien et l'Indonésie (fig. 14 - 1). Au contraire, en été, le continent surchauffé constitue une dépression qui fait appel d'air, et attire les masses d'air tiède et humide qui stagnent au-dessus de l'Océan indien (mousson d'été).

Le caractère original de ce phénomène est le renversement brutal des courants atmosphériques, qui s'effectue en quelques jours, en particulier pour l'arrivée de la mousson pluvieuse, accompagnée d'orages désirés et célébrés.

La mousson accompagne l'apparition d'El Nino : la mousson d'été rafraîchit habituellement la « piscine » d'eau chaude qui stagne près de l'Indonésie ; quand ce rafraîchissement est insuffisant, le courant chaud qui va d'Indonésie vers le Chili s'intensifie et apporte de la chaleur jusqu'à Noël, la fête d'El Nino, l'Enfant-Jésus ; les bancs d'anchois ne trouvent plus les eaux froides de la remontée océanique (upwelling) située au large du Chili ; des pluies torrentielles arrivent sur les Andes et quelquefois sur la Californie, avec leur cortège d'épidémies ; inversement, la sécheresse sévit sur l'Inde et l'Indonésie ; les typhons sont plus fréquents sur le Pacifique et les ouragans plus rares sur l'Atlantique ; les courants-jets de haute altitude sont déviés, etc.

Sur les autres continents, des phénomènes saisonniers qui présentent quelques analogies avec les moussons sont aussi observés (M. LEROUX, 1974, 1975) : en Afrique équatoriale (fig. 13-4), en Amazonie et au nord

de l'Australie, pendant la saison chaude, une dépression continentale attire les masses d'air humides venant des océans. Ce phénomène ne s'accompagne pas d'une inversion saisonnière de la direction du déplacement des masses d'air, et il n'est qu'une simple déviation des alizés à la fin de leur parcours. Il est un peu abusif de le nommer "mousson", parce que ce terme d'origine arabe ("mausim" = saison) mérite de caractériser les oppositions saisonnières radicales.

#### 142 LA BRISE DE TERRE ET LA BRISE DE MER

En moyenne, 88% de l'énergie envoyée par le Soleil sur la mer est transformée en chaleur latente d'évaporation. Plus précisément, pour élever de un degré la température d'un gramme d'eau, il faut 1 calorie (mais il faut 600 calories, c'est-à-dire 2.500 joules, pour le vaporiser, alors qu'il en suffit de 80 pour faire fondre 1 g de glace). En conséquence, la mer se réchauffe moins vite que la terre, au cours de la journée, et la terre cède une partie de sa chaleur à l'air qui se dilate et monte, produisant un appel d'air. Celui-ci se traduit au niveau du rivage par un vent frais, la "brise de mer", qui s'établit au cours des heures chaudes (fig. 14 -2a).

La nuit, au contraire, la terre se refroidit plus vite que la mer parce qu'elle rayonne plus de chaleur vers les espaces intersidéraux ; l'air situé au-dessus de la terre se refroidit par contact ; il devient plus dense, et alimente la "brise de terre" (fig. 14 -2b).

Dans la région des Grands Lacs du nord-est de l'Amérique, lorsque des masses d'air froid arctique (dont la température est comprise entre - 10°C et - 20°C) arrivent au-dessus des lacs, elles se réchauffent, puis s'élèvent et engendrent des nuages. La condensation de la vapeur d'eau et sa solidification en neige donnent des calories à l'air ambiant, qui se réchauffe et monte encore plus, et ainsi de suite jusqu'à épuisement de la vapeur d'eau contenue dans l'air. Finalement, la région des Grands Lacs reçoit nettement plus de neige que le Labrador.

#### 143 LES BRISES DE MONTAGNE

Des phénomènes analogues se produisent dans les vallées, où les versant exposés perpendiculairement aux rayons du Soleil sont à l'origine d'ascendances qui appellent l'air du fond de la vallée ; c'est la brise d'aval (sauf au-dessus des glaciers où une couche d'air froid, épaisse de quelques dizaines de mètres, descend régulièrement, de jour comme de nuit ; c'est le "vent du glacier"). La nuit, l'air froid descend la vallée par gravité, donnant lieu à la brise d'amont. A la fin de la nuit, l'air du fond de la vallée est plus froid que celui qui le surmonte ; il y a donc souvent une inversion de température qui favorise la condensation des brouillards, dans une atmosphère calme. Ensuite, le Soleil chauffe le sol dans les vallées ce qui entraîne un réchauffement de l'air des vallées et une montée de cet air chaud vers le haut.

Ces alternances sont à l'origine du dicton bien souvent vérifié :

"Nuages sur les monts reste à la maison,

nuages dans la vallée, va à ta journée."

#### 144 LE FOEHN

Quand une masse d'air monte pour franchir une chaîne de montagnes, elle se refroidit ; la vapeur d'eau s'y condense en donnant un niveau de nuages ou de brouillards, souvent à partir de 800 m environ (c'est l'"étage des brouillards", généralement favorable au Hêtre).

Après avoir passé la crête, la masse d'air sec descend sur l'autre versant, et se réchauffe, devenant ainsi encore plus sèche (fig. 14 -3). En effet, la pression de vapeur saturante,  $P_s$ , est une fonction régulièrement croissante de la température :

|    |       |
|----|-------|
| T  | $P_s$ |
| en | en    |
| °C | mb    |

|     |      |
|-----|------|
| -20 | 1,3  |
| -18 | 1,5  |
| -16 | 1,8  |
| -14 | 2,1  |
| -12 | 2,4  |
| -10 | 2,9  |
| -8  | 3,3  |
| -6  | 3,9  |
| -4  | 4,5  |
| -2  | 5,3  |
| 0   | 6,1  |
| 2   | 7,1  |
| 4   | 8,1  |
| 6   | 9,3  |
| 8   | 10,7 |
| 10  | 12,3 |
| 12  | 14,0 |
| 14  | 16,0 |
| 16  | 18,2 |
| 18  | 20,6 |
| 20  | 23,4 |
| 22  | 26,4 |
| 24  | 29,8 |
| 26  | 33,6 |
| 28  | 37,8 |
| 30  | 42,4 |
| 32  | 47,6 |
| 34  | 53,2 |
| 36  | 59,4 |
| 38  | 66,3 |
| 40  | 73,8 |

Considérons, par exemple, l'air qui franchit les Cévennes, à 1 500 mètres d'altitude, un jour où la température est de 16°C ; si l'air est alors saturé d'humidité, la pression partielle de vapeur d'eau y est égale à la tension de vapeur de l'eau ; celle-ci vaut, d'après le tableau précédent, 18,2 mb. Sur la crête, la pression partielle et la tension de vapeur sont donc toutes les deux égales à 18,2 mb, et leur quotient, qui est, par définition, l'"humidité relative" est égal à 100%.

En descendant vers la plaine, l'air se recomprimera et se réchauffera, par exemple jusqu'à 22°C ; la pression partielle de la vapeur d'eau sera toujours 18,2 mb ; la pression saturante étant alors de 26,4 mb, l'humidité relative sera de  $18,2/26,4 = 70\%$ .

Ceci explique pourquoi les nuages apportés avec les masses d'air humide par les vents d'ouest s'effilochent quand ils passent sur la ligne de crête, et ne donnent guère de pluie au-dessus du Languedoc les jours de tramontane. C'est la barrière Cévennes-Montagne noire qui provoque un effet de fœhn environ deux jours sur trois et donne au climat du Languedoc son caractère méditerranéen.

Au contraire, les jours où le vent du sud (le "marin") apporte de l'air tiède et humide sur le Languedoc, il pleut sur les collines et petits causses du Languedoc et sur les Cévennes. Celles-ci reçoivent donc une double ration de pluies, et il n'est pas surprenant qu'elles détiennent le record des précipitations en France (selon le Mémorial de la météorologie nationale, il tombe un peu plus de 2 mètres par an à l'Observatoire de l'Aigoual)

En Europe, le fœhn est particulièrement intense dans certaines vallées des Alpes du Nord : lorsque l'arrivée de ce vent sec et chaud s'annonçait, le tocsin sonnait dans les églises pour alerter les habitants afin qu'ils éteignent le feu de leur cuisine, en raison du risque d'incendie des chalets de bois. La conséquence la plus cocasse de cette tocsin était d'inciter les ménagères imprévoyantes à courir alors chez le charcutier pour acheter du saucisson et du salami.

En Asie, c'est aussi un effet de fœhn du massif du Khawakarpo (6.809 m) qui produit un contraste brutal entre les steppes tibétaines et les forêts ombrophiles des vallées du Yunnan.

## 145 LES CYCLONES

Quand les eaux de surface de l'Atlantique dépassent la température de 26°C sur 50 ou 60 mètres de profondeur, à la fin de l'été, leur évaporation peut alimenter la croissance d'une ascendance et amorcer une rétroaction positive : la vapeur d'eau monte avec l'air chaud jusqu'à plusieurs milliers de mètres d'altitude où l'eau se condense en donnant des nuages et en dégageant de la chaleur latente de condensation (cf. Annexe 1-3) qui diminue le gradient thermique et qui augmente donc la vitesse d'ascension de l'air. Au centre du cyclone, la pression atmosphérique est très faible et la surface de l'océan monte de plusieurs mètres. La largeur d'un cyclone peut atteindre un millier de kilomètres. Autour de l'œil du cyclone, il peut se produire une inversion de l'ascendance, et l'air redescend alors vers l'océan dans l'œil du cyclone, entre les murs de cumulo-nimbus. Le diamètre de l'œil du cyclone peut atteindre une quarantaine de km. L'ensemble du cyclone tourne comme une toupie, à cause de l'accélération de Coriolis (§ 124).

L'énergie calorifique donnée par l'océan chaud se transforme partiellement (3 %) en énergie mécanique qui augmente la vitesse des vents, comme dans un moteur à vapeur. Le bilan thermique des cyclones est un transfert de chaleur des tropiques vers les pôles : ce sont, en quelque sorte, des soupapes de sûreté de la circulation atmosphérique méridienne. Une moyenne de 90 cyclones par année est habituelle et nous ne savons pas encore si leur fréquence va augmenter avec le réchauffement général de la planète (§ 84)

Cette immense toupie se déplace comme les alizés, c'est-à-dire vers l'ouest dans l'hémisphère nord et vers l'est dans l'hémisphère sud. Elle laisse derrière elle une traînée d'eau refroidie de 3 °C observée par les satellites captant le rayonnement infra-rouge. Dans ces latitudes comprises entre 25° et 30°, la force de Coriolis (cf. § 124) donne un coup de fouet à la toupie. La vitesse du vent peut alors atteindre 260 km/h et les dégâts deviennent catastrophiques quand le cyclone arrive sur un rivage : 15.000 morts au Honduras le 19 septembre 1974, 6.800 morts au Bangla-Desh le 24 mai 1985 et 139.000 morts le 29 avril 1991, 6.000 morts à Leyte, dans les Philippines le 5 novembre 1991, 24.000 morts ou disparus en Amérique centrale à la fin d'octobre 1998, 9.300 morts en Inde dans l'état d'Orissa le 29 octobre 1999. Au-dessus du continent, le système thermodynamique n'est plus alimenté en eau et le cyclone s'évanouit.

Sur le continent africain, des ascendances locales et des "lignes de grains" naissent périodiquement à la latitude du Tropique du Cancer et se déplacent vers l'ouest, comme les alizés.

## 15 LES TYPES DE TEMPS

La combinaison des types climatiques "zonaux" et des effets "locaux" peut être synthétisée dans la notion de type de temps, qui a été utilisée par B. THIEBAUT (1968), H. DELANNOY ET M. LECOMPTE (1975) et J. RONCHAIL (1980). Ainsi la combinaison du flux d'ouest venant de l'Atlantique et de l'effet de fœhn (§ produit le type de temps où il pleut sur le Rouergue et la Montagne Noire, alors qu'il fait assez beau sur le Languedoc balayé par le vent nommé tramontane.

Un autre exemple a été étudié par J. RONCHAIL (1980) qui a dénombré neuf types de temps sur les Alpes du sud. Ce sont, en particulier :

- - situation anticyclonique méridienne de nord
- - situation anticyclonique méridienne de sud
- - situation anticyclonique zonale à caractère atlantique
- - situation anticyclonique zonale à caractère continental
- - situation dépressionnaire locale
- - situation dépressionnaire zonale de nord-ouest
- - situation dépressionnaire zonale de sud-ouest ou méridienne de sud
- - situation dépressionnaire méridienne de nord
- - dorsale (prolongement d'un anticyclone eurasiatique, en saison froide, ou bordure de la dépression saharienne, en saison chaude).

La géographie des types de temps se lit comme une carte en relief, où les anticyclones sont des dômes, et les dépressions des vallées. La situation locale est alors caractérisée par des termes tels que : marais barométrique, dorsale anticyclonique, versant occidental de vallée, axe de vallée, goutte froide, versant oriental de vallée, flux rapide d'ouest.

Les travaux cités au début de ce paragraphe montrent comment les précipitations et les températures observées au sol dépendent du type de temps, et il suffit d'en donner un exemple pour saisir l'intérêt de ce genre d'études : à Briançon, il ne pleut pratiquement pas en situation anticyclonique au sol (sauf en situation d'anticyclone atlantique), et les fortes pluies viennent surtout en situations dépressionnaires d'ouest ou de sud-ouest, sauf s'il existe une dorsale à l'altitude isobarique de 500 mb.

Les types de temps oscillent sur des périodes de quelques jours, mais les variations des climats peuvent être décelées sur plusieurs échelles de temps, qui seront examinées dans les paragraphes 23 et 24 .

## 16 LA NATURE DE LA VIE : UNE TRANSMISSION D'INFORMATION

### 161 QU'EST-CE QUE LA VIE ? (LE PARADOXE DE SCHRÖDINGER)

« Par le mot vie, nous entendons le fait de se nourrir, de grandir, de se reproduire et de dépérir par soi-même ». Cette première définition que proposait Aristote1 est encore pertinente et les définitions plus modernes l'expriment seulement d'une autre manière quand elles disent que la vie est un système original de transformation de l'énergie (c'est pourquoi nous avons commencé par voir d'où vient cette énergie). Mais la vie utilise moins de 1% de l'énergie solaire, et il faut comprendre, en deuxième analyse, que la vie est un système de codage et de transmission de l'« information » portée par l'énergie absorbée.

En effet, un physicien éminent, ERWIN SCHRÖDINGER, a fait remarquer qu'un animal, un homme, ou une plante adultes ne « consomment » pas d'énergie, puisqu'ils en rendent au milieu extérieur autant qu'ils en reçoivent (en particulier quand ils transpirent en transformant l'eau qu'ils ont importée sous forme liquide en vapeur incolore inodore et sans saveur). Par exemple, un homme qui reçoit 3 000 calories par jour, et garde un poids constant, les rend sous forme de chaleur sensible et, surtout, de chaleur latente (cf. annexe 1-3) ; il fonctionne comme une machine thermodynamique transformant de l'énergie de haute qualité en énergie "dégradée"(cf. annexe 1-2) mais, pour le comprendre, il faut revenir au problème de l'originalité du vivant et au rôle éventuel du hasard, des probabilités et de la nécessité.

### 162 LA VIE EST REGIE PAR LES LOIS DE LA PHYSIQUE

#### 162.1 Aspects biochimiques

La chimie du XVIII<sup>e</sup> siècle était essentiellement une science d'analyse ; celle du XIX<sup>e</sup> a donné de plus en plus de place aux synthèses minérales, puis organiques, mais elle n'a pas su réaliser la synthèse des grosses molécules biologiques. Pour les premiers biochimistes, la construction de ces édifices regroupant des milliers d'atomes paraissait un prodige de la nature. Les recherches rigoureuses de LOUIS PASTEUR, montrant que la génération spontanée des microbes est impossible, ont contribué à ancrer dans les esprits le caractère extra-ordinaire, au sens originel du mot, de ces molécules.

Dans ce contexte, il est normal que l'on ait alors pensé que la vie était un phénomène improbable, un accident de la nature. On a même tenté de calculer la probabilité de synthèse spontanée des protéines. En effet, une molécule d'ADN est un arrangement des 4 nucléotides fondamentaux en une chaîne d'environ 4.000 maillons. La probabilité de la synthèse spontanée d'une molécule d'ADN paraît alors, a priori, aussi faible que celle de la sortie de quatre mille nombres pairs consécutifs à la roulette d'un casino. Ce type de calcul avait beaucoup impressionné plusieurs biologistes du milieu du XX<sup>e</sup> siècle, qui en avaient conclu que la vie n'avait pas pu apparaître spontanément sur la Terre. Mais cela reposait sur l'idée que la probabilité d'un événement pourrait être définie comme la limite de la fréquence observée de cet événement. Mais il faut être plus précis et se souvenir que le calcul de la probabilité - définie comme étant égale au rapport du nombre de cas "favorables" au nombre de cas "possibles" - suppose que tous les cas possibles sont équiprobables. En fait, ils ne sont pas tous également probables a priori , et il faut faire appel à des calculs de chromodynamique quantique pour connaître leurs probabilités. Et il faut aussi regarder d'autres aspects avant de conclure.

## 162.2 Aspects thermodynamiques

Dans un domaine plus théorique, les thermodynamiciens découvraient progressivement la signification du principe de Carnot, selon lequel les systèmes isolés tendent statistiquement vers un "désordre" maximal, par transformation de toute l'énergie disponible en chaleur, c'est-à-dire en agitation désordonnée des molécules constituantes. (cf. l'annexe 1-2, à la fin du présent chapitre).

La synthèse biologique des grosses molécules fragiles (thermolabiles) que sont les sucres, les graisses et les protéines paraissait, aux yeux de certains, aller à l'encontre de ce principe physique, et de nombreux biologistes admettaient plus ou moins implicitement que la biologie était un domaine scientifique très particulier, situé hors du champ d'application de la physique.

Ainsi, quand LOUIS PASTEUR a découvert que l'acide tartrique produit par certaines réactions biochimiques comprenait un seul isomère, l'acide tartrique "gauche" (alors que les deux isomères apparaissent en quantités égales dans les réactions chimiques qui ont lieu en dehors des êtres vivants), il paraissait logique d'en déduire que les phénomènes biologiques ont des caractères originaux (la "chiralité", dans le cas présent), qui les différencient nettement des phénomènes étudiés en chimie minérale. Mais c'était aller un peu trop vite parce que l'affaire est plus complexe (§ 211).

## 162.3 Entropie, néguentropie et information

### 162.31 Un retour de pendule

Une réaction ne pouvait manquer de se dessiner et, par exemple, E. SCHOFFENIELS (1973) montre que des réactions apparemment peu probables ont, en fait, des chances non négligeables de se produire si l'on tient compte des structures moléculaires dans l'espace à trois dimensions.

De même, si une auto-synthèse des tartrates est amorcée par une première molécule "gauche" (selon un processus analogue à l'ensemencement des nuages par des cristaux d'iodure d'argent qui font cesser la surfusion des gouttelettes d'eau), il est normal que toutes les molécules suivantes soient aussi des molécules "gauches". X. SALLANTIN (2000 ET 2003) relie cette particularité à des propriétés fondamentales de la matière.

NIELS BOHR (1885-1962) avait vu que les phénomènes biologiques ne devaient pas être étudiés comme les autres : « Dans toutes les expériences sur les organismes vivants, il doit rester une incertitude sur les conditions physiques auxquelles le système est soumis, et la liberté laissée à l'organisme doit être suffisamment large pour lui permettre de nous cacher ses secrets ultimes. »

La raison pour laquelle les systèmes biologiques ne peuvent pas être étudiés en faisant seulement appel aux lois que les physiciens utilisent habituellement est clairement exposée par le physicien E. SCHRÖDINGER (né en 1887 et mort en 1961, qui avait osé demander Qu'est-ce que la vie ?) : « Tout ce que nous connaissons sur la structure des êtres vivants conduit à penser que leur activité ne peut pas être réduite aux manifestations des lois habituelles de la physique. Et ce n'est pas parce qu'il faudrait faire intervenir une quelconque « nouvelle force » contrôlant le comportement des atomes dans les organismes vivants, mais c'est parce que leur structure est différente de tout ce qui est étudié dans les laboratoires de physique. De manière analogue, un ingénieur connaissant seulement le fonctionnement des machines à vapeur qui examinerait un moteur électrique serait prêt à admettre qu'il ne comprend rien aux principes de fonctionnement de ce nouveau moteur. » (in *What's Life*, 1972, Atomisdat, p. 77 ; c'est moi qui ai souligné le mot « habituelles »).

E. SCHRÖDINGER ne dit nullement que la vie échappe aux lois de la physique, il rappelle seulement que les lois utilisées « habituellement » ne suffisent pas pour comprendre le fonctionnement des êtres vivants. Actuellement, la physique a considérablement progressé et les spécialistes de la physique quantique manipulent des outils extrêmement puissants (en particulier la chromodynamique quantique) qui pourront peut-être expliquer le comportement « inhabituel » des molécules biologiques (P. PERRIER, 1998).

Sur le plan thermodynamique, l'affaire est encore plus simple : il suffit de faire attention à l'énoncé du principe de Carnot pour voir que l'accroissement de l'entropie est inéluctable seulement dans les systèmes isolés (les exemples donnés au paragraphe 8 de l'annexe 1-2 placée à la fin de ce chapitre aideront à comprendre la différence entre un système isolé et un système fermé). Or, la biosphère est un système fermé (puisque'elle n'échange pratiquement pas de matière avec le reste du cosmos), mais elle ne constitue pas un système isolé (puisque'elle reçoit en permanence de l'énergie solaire). En conséquence, elle peut "dégrader" cette énergie radiative de "haute qualité" pour la transformer en chaleur, et peut ainsi "exporter" de l'entropie (et importer de la négentropie, c'est-à-dire de l'information).

Cette diminution locale de l'entropie n'est pas en contradiction avec le deuxième principe de la thermodynamique. En effet, ce principe reste valable si l'on considère l'ensemble constitué par la Terre et le Soleil, où le total de la production d'entropie reste toujours positif : en résumé, le Soleil envoie de l'énergie de haute qualité (longueur d'onde voisine de 0,5 micron = 500 nanomètres) vers la Terre ; la Terre renvoie de l'énergie de moins bonne qualité, parce que sa longueur d'onde est plus grande (10 microns) ; une partie de cette différence de qualité d'énergie est acquise par la biosphère sous forme de « négentropie » lors de chaque capture d'un photon par la chlorophylle lors de la photosynthèse.

Ce n'est pas le seul cas où un rayonnement est capable de structurer un matériau désordonné : un faisceau d'ions d'hélium frappant une couche mince d'un alliage amorphe de fer et de platine déplace les atomes jusqu'à ce qu'ils se structurent en couches horizontales. Pour mieux comprendre ce phénomène, il faut regarder de plus près la notion d'entropie.

#### 162.32 L'évolution spontanée des systèmes isolés

L'entropie est présentée, dans l'annexe 1-2, sous son aspect relatif aux échanges de chaleur et d'énergie. Pour passer à la notion de négentropie et d'information, nous commencerons ici par rappeler l'expérience de GAY-LUSSAC, réalisée en 1806.

Cette expérience consiste à laisser un gaz se détendre dans le vide et à constater que cette détente, qui ne produit pas de travail, ne modifie pas la température ; elle est réalisée en ouvrant le robinet qui relie un ballon A, plein de gaz, à un ballon B, de volume identique, où est réalisé un vide aussi poussé que possible (figure 16-1).

A l'échelle macroscopique, le système passe ainsi spontanément de l'état 1 (ballon A plein et ballon B vide), qui est un système hétérogène, (c'est-à-dire un système structuré), à l'état 1-2, où A et B sont pleins (système homogène = système déstructuré). Cette expérience simple exprime parfaitement l'un des aspects les plus forts du deuxième principe de la thermodynamique, qui peut être énoncé ainsi :

« Toute transformation spontanée d'un système thermiquement et radiativement isolé en augmente l'homogénéité, et le déstructure par une augmentation de son entropie globale.»

Cette formulation du deuxième principe conduit à dire que l'entropie est approximativement analogique au "désordre" des molécules. Malheureusement, cette analogie est trop imprécise pour être vraiment utile. L'annexe 1-2 essaiera d'aller un peu plus loin dans ce domaine.

Depuis l'apparition de la vie, les systèmes biologiques se sont de plus en plus structurés, sans échapper au second principe de la thermodynamique. Pour mieux le comprendre, il faut préciser un peu les notions de négentropie et d'information.

#### 162.33 Indétermination et information

Revenons à l'expérience de GAY-LUSSAC, dans son état 1, où le gaz est seulement présent dans un ballon, mais supposons que nous ne savons pas si le gaz est dans le ballon A ou s'il est dans le ballon B. Un observateur qui veut savoir quel est le ballon plein peut placer chacun d'eux sur l'un des plateaux d'une balance, pour voir quel est le ballon le plus lourd, et il a une chance sur deux de trouver le gaz dans le ballon A et une chance sur deux de le trouver dans B. Autrement dit, cette observation lui apporte de l'information sur le contenu des deux ballons qu'il examine.

S'il examine 4 ballons, A, B, C, D, dont un seul serait plein, il devrait faire deux fois plus d'observations : il pourrait placer deux ballons sur chacun des deux plateaux d'une balance, par exemple A et B d'un côté, C et D de l'autre. Si, par exemple, le plateau portant C et D est le plus lourd, il lui suffit de recommencer l'expérience en plaçant C sur un plateau et D sur l'autre.

S'il examine 8 ballons, c'est-à-dire  $2 \times 3$  ballons, le même raisonnement montre qu'il lui faudrait 3 expériences. S'il examine, plus généralement,  $2^n$  ballons, il lui faut  $n$  expériences pour acquérir l'information correspondant à la réponse à la question : "quel est le ballon qui contient le gaz ?". Formalisons ceci en un calcul de probabilités : s'il y a deux ballons, la probabilité de trouver le gaz dans A est égale à  $1/2 = 1/2^1$  et une seule expérience suffit pour savoir où est le gaz. S'il y a quatre ballons, la probabilité est égale  $1/4 = 1/2^2$ , et deux expériences sont nécessaires. S'il y a  $2^n$  ballons, la probabilité est égale  $1/2^n$ , et  $n$  expériences sont nécessaires pour acquérir l'information souhaitée.

Cet exemple très simple permet de comprendre pourquoi les ingénieurs qui se sont souciés de l'information transmise par les lignes téléphoniques et du codage des messages (H. NYQUIST, 1924, 1928 ; R. HARTLEY, 1928 ; C. SHANNON, 1948) ont été conduits à prendre pour unité d'information la réponse à la question "oui ou non", quand les deux éventualités ont autant de chances de se produire, c'est-à-dire quand la probabilité de chaque éventualité est égale à  $1/2$ . A. LIBCHABER (2003) a écrit que L. Szilard a ensuite montré que le coût énergétique d'une unité d'information est égal à  $k_B T \ln 2$ , où  $k_B$  est la constante de Boltzmann ( $= 1,38 \cdot 10^{-16}$ ), mais cette formule non équilibrée peut nous laisser perplexe (cf. l'annexe 2 § 11).

Pour les expériences plus complexes, où le voile d'indétermination est progressivement levé par des observations successives, les remarques du paragraphe précédent aident à comprendre pourquoi la quantité d'information moyenne acquise en regardant l'issue d'une expérience est estimée par le nombre d'observations élémentaires qu'il faut effectuer pour lever l'indétermination qui existait avant l'expérience. On démontre que ce nombre est exactement le logarithme à base 2 de l'inverse de la probabilité et l'on arrive à la formule de BRILLOUIN (1959) :

$I(E) = \log_2$  de l'inverse de la probabilité de E

$$= \log_2 (1/P) = - \log_2 P$$

Quand la probabilité P est égale à  $1/2^n$  (c'est-à-dire quand l'expérience réalisée est exactement la combinaison de  $n$  observations élémentaires du type pile ou face), la formule précédente devient :

$$I(E) = \log_2 (2^n)$$

$$I(E) = n$$

Le comité consultatif international télégraphique et téléphonique a donné à l'unité d'information le nom de binon (CULLMANN, 1968) puis de shannon, dont l'abrégié est "sha". Ainsi, une expérience telle que « pile ou face », dont les deux issues ont chacune une probabilité égale à  $1/2$ , apporte exactement 1 sha d'information. Une expérience qui peut produire  $n$  issues équiprobables permettra d'acquérir  $n$  shannons d'information.

Si les issues possibles, numérotées 1, 2, ... , i, ... , n, ne sont pas équiprobables, et si chacune d'elles correspond à  $n_i$  cas possibles, la formule précédente devient :

$$I(E) = \log_2 1/P$$

$$\text{avec : } P = \frac{n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot n_i \cdot \dots \cdot n_n}{N!}$$

$$\text{soit : } I(E) = \log_2 \frac{N!}{\prod n_i !}$$

L'approximation de Stirling conduit alors à la formule de Shannon :

$H(E) = \text{somme } P_i \cdot \log_2 (1/P_i)$

et il apparaît ainsi que la formule de Shannon n'est qu'une approximation de la formule de Brillouin, qui est plus fondamentale (parce qu'elle ne fait pas inférence à un univers infini et inconnu).

### 162.33 Néguentropie et information

Dans l'expérience de GAY-LUSSAC, quand on ouvre le robinet qui sépare les deux ballons, l'entropie thermodynamique du système augmente ; sa néguentropie diminue, et l'information que l'on pouvait obtenir en observant la présence (ou l'absence) du gaz est devenue nulle, puisque l'on est certain de trouver le gaz dans les deux ballons. Ce rapprochement permet de comprendre pourquoi néguentropie et information sont synonymes, quoique ces deux quantités concernent habituellement deux échelles d'observation extrêmement différentes.

Les liaisons entre l'entropie et l'information sont analysées en détail par L. BRILLOUIN (1959) ; pour nous, il suffit de comprendre que la quantité d'information contenue dans une structure (telle que l'ensemble des deux ballons de Gay-Lussac, ou un message télégraphique ou le code génétique) peut être transmise en étant "portée" par une énergie assez faible. S. FRONTIER (1981) souligne que "les applications de la théorie de l'information ne font que croître", et M. GODRON (2007) montre pourquoi les calculs d'information sont un outil utile pour analyser l'hétérogénéité des « habitats » et des paysages (cf. § 54).

## 163 ÉVOLUTION DES SYSTEMES ET STABILITE

### 163.1 Entropie maximale et structuration

Les systèmes physiques isolés suivent la tendance très générale imposée par le principe de Carnot et se "déstructurent" inévitablement, en allant vers des états de plus en plus probables et de plus en plus stables ce qui correspond à un accroissement de leur entropie (cf. annexe 1-2). Cette déstructuration peut se réaliser directement par la désagrégation des nucléons (protons et neutrons), s'il se confirme qu'ils sont instables à l'échelle de  $10^{33}$  années. L'espace serait alors sans doute finalement rempli uniquement par des photons et des neutrinos (P. SALATI, 1985).

A l'opposé de cette tendance, des structurations apparaissent localement, par exemple dans les "cellules de Bénard" : un liquide placé dans une casserole est entraîné dans des tourbillons qui s'ordonnent quelquefois en cellules de forme approximativement hexagonale, qui ressemblent aux cellules des "sols polygonaux". La structure "dissipative", qui apparaît alors, correspond à une diminution locale de l'entropie, qui n'est pas en contradiction avec le principe de Carnot puisque le récipient qui contient le liquide n'est pas isolé : les cellules de Bénard apparaissent dans l'eau seulement si elle est couplée avec une source de chaleur, et cette chaleur provient obligatoirement d'une dégradation d'énergie de bonne qualité (chauffage électrique, réaction chimique, pompe mécanique à chaleur, etc.) qui s'accompagne d'une production d'entropie.

Le bilan de l'ensemble constitué par le liquide chauffé et la source de chaleur est toujours une augmentation d'entropie, c'est à dire une acquisition d'information selon la formule de Brillouin, et cet ensemble finira par atteindre l'égalisation des températures correspondant au principe de Carnot, quand la source de chaleur sera épuisée.

L'inéluctable augmentation de l'entropie n'exclut pas une structuration locale quand le système est hétérogène et quand il reçoit de l'énergie venant de l'extérieur. L'une des expériences les plus remarquables dans ce domaine a été réalisée par T. SHINBROT ET F. J. MUZZIO (2001) : ils placent des billes dans les deux moitiés d'une boîte dont le fond est soumis à des vibrations qui peuvent faire sauter les billes au-dessus de la cloison qui sépare les deux moitiés ; si la répartition des billes dans les deux moitiés de la boîte n'est pas parfaitement symétrique, les billes s'accumuleront progressivement dans la case où il y a déjà un plus grand nombre de billes ; en effet, dans cette case, les billes disposeront individuellement d'un peu moins d'énergie que dans la case la moins pleine, et elles sauteront moins facilement par dessus la cloison ; au contraire, dans la case la moins pleine, chaque bille dispose de plus d'énergie et pourra plus facilement franchir la cloison. Le calcul des transferts d'énergie montre que le second principe de la

thermodynamique est respecté, parce que l'entropie globale des billes diminue plus que lorsque les deux moitiés de la boîte contiennent exactement le même nombre de billes.

Depuis l'origine de la vie, les systèmes biologiques ont vécu une structuration qui est un peu analogue à l'apparition des cellules de Bénard. C'est possible parce que la biosphère n'est pas un système thermodynamiquement isolé ; elle constitue ainsi une "irrégularité locale" en cours de structuration à l'intérieur du système Soleil-Terre qui, dans son ensemble, se déstructure lentement. Un écosystème peut se structurer en restant durablement fermé, à condition qu'il ne soit pas isolé de toute source d'énergie de bonne qualité. Pratiquement, l'humanité ne risque nullement de manquer d'énergie (§ 87), mais seulement des formes d'énergie dont elle sait prélever facilement l'information dont elle a besoin.

Dans les deux exemples qui viennent d'être présentés, la structuration est possible grâce à un apport d'énergie venant de l'extérieur du système, qui est donc un système non-isolé. A l'INRA de Bordeaux, R. DEWAR se pose la question. Il reprend les calculs de Boltzmann, mais au lieu d'étudier la distribution statistique de l'énergie à l'équilibre, il étudie statistiquement le cheminement de l'énergie. Il démontre mathématiquement que, dans un système thermodynamique non-isolé, hors équilibre, et stationnaire, les chemins les plus probables sont ceux qui maximisent le flux d'énergie. Le résultat de Prigogine est donc général. Une structure dissipative s'auto-organise de façon à maximiser la dissipation d'énergie de l'univers. C'est le principe de production maximale d'entropie.

Les structures dissipatives ont été très étudiées depuis 1960 (P. GLANSDORFF ET I. PRIGOGINE, 1971), et elles sont liées au fait que la matière ne peut pas convoyer l'énergie sans subir de contrecoup (I. PRIGOGINE, 1989). Nous y reviendrons dans les annexes 1-2 et 1-4.

Pour la végétation, le flux solaire qui l'atteint produit un déséquilibre qui entraîne la possibilité de prendre plusieurs chemins, par des "bifurcations" (R. THOM, 1993) qui constituent l'histoire du système. Une question lourde de conséquences reste encore posée : pourquoi les systèmes isolés ne vont-ils pas tous immédiatement vers leur état le plus stable, c'est-à-dire vers l'état où la température est uniforme, et où tous les corps sont mélangés ?

### 163.2 La lenteur des transformations énergétiques

Un premier élément de réponse est banal : le passage d'un système vers un état plus stable est souvent très lent : les gaz se mélangent assez rapidement, mais les solides résistent très longtemps à l'érosion du temps, et des millions d'années sont nécessaires pour que leurs assemblages de molécules se désagrègent, et produisent le mélange homogène où l'entropie est maximale.

### 163.3 L'inertie des systèmes énergétiques et les chemins anastomosés

Cette lenteur est certaine, mais elle ne suffit pas pour expliquer que certains systèmes peuvent suivre plusieurs chemins pour aller vers un état plus stable, et il faut ajouter un deuxième élément de réponse : les systèmes énergétiques matériels possèdent une "inertie", qui les conduit souvent à dépasser le point d'équilibre, un peu comme le balancier d'une pendule, entraîné par son élan, dépasse la verticale et ne l'atteint définitivement qu'après y être passé à grande vitesse plusieurs milliers de fois. C'est pourquoi, lorsque les "états" sont ainsi très transitoires, ils sont trop insaisissables pour être, à proprement parler, des "états" observables, et il vaut mieux employer alors le terme de "complexion", dont le charme un peu désuet n'exclut pas une signification thermodynamique très rigoureuse (cf. l'annexe 1-2 §10 du présent chapitre).

Finalement, si un système tend inéluctablement vers sa complexion la plus stable, il peut subsister pendant longtemps dans des complexions relativement instables, où plusieurs futurs immédiats bien différents sont presque aussi probables les uns que les autres. Une analogie aidera à comprendre cette multiplicité des futurs : l'eau d'un torrent qui arrive à son cône de déjection finira toujours par arriver au confluent du torrent et de la rivière qui coule au fond de la vallée, mais l'eau peut suivre un très grand nombre de chemins, qui partent du sommet du cône et s'anastomosent d'une génératrice à l'autre, avant de se rejoindre dans la rivière, au point le plus bas du cône de déjection ; la fin du trajet est parfaitement "déterminée", mais le chemin suivi par une molécule d'eau dépend d'un si grand nombre de variables

qu'il est difficilement déterminable et, en fait, "aléatoire". Cette apparition du hasard et des probabilités nous conduira à un troisième élément de réponse, dans le paragraphe 164.4.

L'application de ces idées au système cosmologique du monde est précisée dans le paragraphe 4 de l'annexe 1-2.

## 164 STABILITE ET PROBABILITE : LA RESISTANCE AUX PERTURBATIONS

### 164.1 Ce qui caractérise la vie

Notre monde est un terrain d'expériences spontanées, où les systèmes biologiques, emportés par leur élan, produisent sans cesse de nouvelles complexions, qui sont plus ou moins stables. L'eau du torrent ne descend pas toujours exactement selon la ligne de plus grande pente du terrain : il suffit d'un très faible obstacle pour que l'eau parte vers un chenal en pente plus douce.

Autrement dit, l'écologie moderne ne peut être que probabiliste, et le deuxième principe peut s'y formuler ainsi :

"Tout système biologique est un perpétuel ajustement dynamique de structures métastables, soumises à des variations d'environnement plus ou moins aléatoires, et les structures les moins instables sont aussi les plus probables".

Une formulation plus simple serait : la vie produit régulièrement des structures de plus en plus stables et de plus en plus complexes, tout simplement parce qu'elles résistent mieux aux perturbations et durent plus longtemps que les structures instables.

Il est alors possible de revenir à la question simple : "Où est donc la différence entre les systèmes biologiques et les systèmes purement chimiques ?". Il me semble qu'il n'existe pas une différence radicale qui permettrait de savoir si un ensemble de molécule est vivant ou mort. Par exemple, certains tissus continuent à se développer dans le corps d'un animal, longtemps après la mort de l'individu. Il est difficile de dire précisément à quel moment la chimie "minérale" a développé les nouveaux processus qui ont amorcé la vie, mais le point crucial est sans doute l'intervention d'une mémoire dans le fonctionnement du système.

Les grosses molécules prébiotiques réagissent instantanément aux modifications de leur environnement, selon les lois des équilibres physico-chimiques dans des systèmes de réactions "immédiates", sans médiation, même quand elles sont lentes. Mais, en cybernétique, on connaît des systèmes plus perfectionnés qui comprennent un "capteur" sensible aux modifications de l'environnement, un centre de décision qui traduit le signal transmis par le capteur sous la forme d'une action, qui est alors une "rétro-action". L'exemple biologique le plus banal est celui de la réaction des muscles de votre bras quand vous avez posé la main sur une casserole brûlante.

Les premiers êtres vivants se distinguaient alors des agrégats de molécules minérales par leur réaction commandée par un centre de décision qui met en jeu une "mémoire". C'est pourquoi de nombreux biologistes pensent que le premier système biochimique qui puisse être qualifié de "vivant" est la combinaison d'un acide nucléique codant (ARN) et de la protéine dont il catalyse la production. Les premières structures "vivantes" ont ainsi pu se dédoubler en gardant une "mémoire", liée à des "nucléotides" constitués d'un ribose, d'une base et d'un phosphate (les acides nucléiques libérés lors de la destruction d'une cellule sont d'ailleurs une importante source de phosphates dans les cycles de la matière organique).

A. CAIRNS-SMITH (1985) souligne à juste titre que des structures dotées d'une mémoire des formes sont nécessaires pour assurer toute "reproduction" et il montre bien l'importance des "échafaudages" moléculaires relativement primitifs (peut-être constitués en liaison avec des argiles) qui peuvent avoir joué ce rôle à l'aurore de la vie.

Les expériences de T. CECH ET A. ZAUG, parues dans Science en janvier 1986, permettent de penser que l'ARN peut avoir été simultanément l'embryon de mémoire et le support des activités catalytiques

"utiles", que l'on croyait réservées aux protéines des enzymes. W. GILBERT, prix Nobel en 1980, proposa aussitôt d'appeler ces ARN "ribozymes", pour souligner l'importance de ce double rôle.

L'ARN (acide ribonucléique) diffère de la double hélice de l'ADN sur trois points :

- - une molécule d'ARN correspond à un seul des deux montants de l'échelle d'ADN, muni des demi-barreaux correspondants ;
- - le ribose y remplace le désoxyribose ;
- - sur le demi-barreau, la thymine de l'ARN est remplacée par l'uracyle, qui admet l'adénine comme binôme dans le deuxième demi-barreau, comme pour l'ADN.

Chez les êtres vivants actuels, un filament d'ARN messager est la "crémaillère" le long de laquelle un ribosome se déroule, en accrochant au passage les molécules d'acide aminé accolées à de petits morceaux d'ARN "de transfert" qui portent chacun le "négatif" de l'un des codons enchâssés le long de l'ARN messager. Une protéine composée de 1.000 acides aminés se construit de la même manière. L'hypothèse actuelle est donc que l'ARN primitif catalysait directement la production des protéines. Cette hypothèse est crédible puisque les virus à ARN, après des inversions de polarité, induisent dans les cellules l'enchaînement d'acides aminés apportés par les ARN de transfert.

N. GALTIER, M. GOUY ET N. TOURASSE ont montré que les proportions de guanine et de cytosine dans les ARN d'organismes très anciens font penser qu'ils se sont produits en milieu tempéré. C. PONNAMPERUNA ET AL. (1963) ont observé la production de précurseurs de l'ARN et de l'ADN (ribose et désoxyribose) dans des expériences analogues à celles de S. MILLER. L'utilisation de ces molécules hélicoïdales comme mémoire capable d'orienter la synthèse des acides aminés a pu être assez précoce. Quelle est l'origine de l'association fidèle d'une séquence spécifique d'ADN à une lignée de Procaryotes ? Il n'est pas impossible que la "sélection chimique" (qui sera évoquée un peu plus loin) ait favorisé des "pré-virus" constitués d'une molécule d'ADN (ou d'ARN ?) parallèlement à l'élaboration des gouttes de protoplasme des "pré-bactéries".

La double hélice de l'ADN apporte l'avantage d'une stabilité plus grande, et d'un système de duplication rapide (par ouverture de l'échelle, comme une fermeture éclair, et réappariement de chacun des demi-barreaux, à la vitesse de 10 à 20 nucléotides par seconde). Par exemple, le virus du Bactériophage T2 (qui mesure environ 0,1 micromètre et qui est souvent nommé virus T2) injecte seulement un filament d'ADN (long d'environ 60 micromètres quand il est déplié) à travers la membrane d'une Bactérie. Ce filament suffit pour mobiliser les protéines de la Bactérie et pour produire une centaine de Bactériophages nouveaux. Les coacervats (§ 212.4) contenant des ARN avaient ainsi plus de chance d'assurer la reproduction du système.

Il est possible que plusieurs systèmes de codage primitif aient coexisté en ces époques lointaines, préluant très tôt à l'émergence de lignées durables. F. JACOB (1981) pense que, très vraisemblablement, tout a commencé avec de petites séquences de 30 à 50 nucléotides (ce sont les constituants élémentaires de l'ADN et de l'ARN, cf. § 253) produites par l'évolution chimique et capables chacune de coder 10 à 15 acides aminés. C'est seulement après coup que de telles séquences ont pu être unies par un processus de ligature pour former des chaînes protéiques plus longues. Certaines de celles-ci se sont alors avérées utiles et ont été sélectionnées. Des mutations suffisent alors pour affiner la structure. Un essai d'approfondissement de cette idée est recensé dans l'annexe 2-2.

Le processus ainsi décrit par F. JACOB correspond exactement à la règle générale proposée au paragraphe 164, et c'est une "sélection chimique" qui a été à l'origine des premières structures vivantes, qui aboutissent à des polynucléotides composées de plusieurs millions de paires de nucléotides. Le même auteur attire l'attention sur une conséquence de ce qu'il appelle des "bricolages" : "La phase réellement créatrice de la biochimie n'a pu survenir que très tôt, car l'unité biochimique qui sous-tend l'évolution du monde vivant n'a de sens que si les organismes primitifs contenaient déjà la plupart des constituants communs aux êtres vivants : systèmes de réplication et de traduction, etc."

L'une des questions qui restent posées est : pourquoi ces processus ne sont-ils plus observés aujourd'hui sur la Terre ? Une première réponse est l'existence de la couche d'ozone qui atténue la puissance du rayonnement solaire, exactement dans la gamme de longueurs d'ondes favorables aux synthèses

biochimiques. De plus, s'il arrive que des molécules "pré-biologiques" se forment encore de nos jours dans les eaux superficielles, elles sont vraisemblablement absorbées par l'un des organismes qui composent les chaînes alimentaires actuelles. En conséquence, il serait vain de courir les océans à la recherche de ces précurseurs moléculaires de la vie.

De même, à l'intérieur d'un système de planètes analogues à celles qui sont proches de nous (cf. l'annexe 1-5 du premier chapitre), il apparaît que la Terre occupe une position privilégiée pour que la vie, telle que nous la connaissons, puisse s'y développer : les planètes plus proches du Soleil sont trop chaudes et les planètes lointaines sont trop froides. Sur Vénus, le climat a suivi la même évolution que sur la Terre, pendant les deux ou trois milliards d'années qui ont suivi la constitution de ces planètes (G. ISRAEL, 1985). Mais, sur Vénus, en particulier à cause de l'effet de serre, l'eau s'est presque totalement évaporée, puis échappée (la température actuelle de la surface de Vénus est voisine de 470°C).

#### 164.2 Stabilité et structures spatiales

En fait, l'eau d'un torrent ne suit pas toutes les génératrices du cône de déjection, parce que le champ des possibles n'est pas homogène, puisque l'espace lui-même n'est pas homogène, dès qu'il est habité par la matière. Les physiciens le savent bien, puisque toute particule "organise" l'espace autour d'elle-même, et le jeu des interactions entre des particules voisines aboutit à la constitution des structures relativement stables que sont les atomes. De même, toute molécule d'acide désoxyribonucléique participe à la structuration biologique de l'individu où elle se trouve, en se combinant avec ses compagnes d'hélice pour intervenir dans les réactions enzymatiques.

Considérons, par exemple, des acides aminés présents dans une solution aqueuse ; ils peuvent être regroupés en "séquences", en fonction du code génétique, pour constituer une molécule de protéines. La formation d'une protéine correspond alors à une diminution d'entropie qui peut être calculée (G. SCHULZ, 1951, Electrochem. 55, p. 569) en imaginant que la séquence est linéaire. Pour une séquence longue, l'information correspondante à cette entropie est égale à  $4,57 \log n$ , en appelant « n » le nombre initial d'acides aminés.

Ce type de calcul n'est évidemment pas applicable directement aux organismes et aux communautés d'êtres vivants. Cependant, une formulation analogue peut être utilisée pour calculer l'information incluse dans un paysage, où les animaux et les végétaux sont groupés en bâtissant des communautés. Puisque l'étude des communautés est, depuis ERNEST HAECKEL (1866), l'objet de l'écologie, ceci peut être résumé sous une forme plus concise :

"Les transformations des systèmes écologiques qui ont lieu dans l'espace hétérogène où vivent les plantes et les animaux aboutissent à des structures spatiales plus ou moins métastables ; la structure spatiale des individus et des communautés est alors le résultat de leur fonctionnement passé aussi bien que la source de leur fonctionnement futur."

Ce principe est le fondement majeur de l'écologie des paysages (§ 542) qui prend directement en compte l'hétérogénéité de l'espace où nous vivons.

#### 164.3 Rappel de quelques définitions relatives à la stabilité

Pour préciser les notions relatives aux équilibres, l'exemple le plus simple est celui du système constitué par une barre d'acier soumise à une force de traction. Il permet de définir deux seuils : la "charge de rupture" et la "limite d'élasticité".

Si la force appliquée dépasse la "charge de rupture", C, la barre se casse, et le système est détruit.

Si la force est beaucoup plus faible que la charge de rupture, la barre retrouve exactement sa forme quand elle n'est plus soumise à la traction et l'on est dans le domaine des "déformations élastiques" dont la borne supérieure est la limite d'élasticité, E. Dans ce domaine, l'allongement, D, est proportionnel à la force subie, F (fig. 16-4) :

$$D = k \cdot F$$

Le coefficient  $k$  est le coefficient d'élasticité, qui est une caractéristique importante du système.

Si la traction est comprise entre  $E$  et  $C$ , on est dans le domaine des "déformations inélastiques", ou domaine des déformations permanentes, ou domaine de la ductilité. Par exemple, si l'on a exercé la force  $G$  (comprise entre  $E$  et  $C$ ), produisant la déformation  $GN$ , puis que l'on diminue progressivement la traction, la barre revient vers son état initial en maintenant la proportionnalité entre la déformation et la force exercée (ceci correspond au trajet  $NP$  sur la figure 16-4), mais elle ne retrouve pas sa longueur initiale, et elle conserve un résidu de déformation  $OP$ , à partir duquel se définit la nouvelle limite d'élasticité  $G$ , après "écrouissage" (opération consistant à travailler, en le frappant, laminant, étirant, un métal, selon P. ROBERT, 1967). En quelque sorte, l'aptitude de la barre à réagir a été augmentée, et le travail effectué pour aller jusqu'en  $N$  est proportionnel à la surface du quadrilatère curviligne  $OMNQ$ . Ce travail est nommé "résistance vive".

On voit ainsi que la limite d'élasticité n'est pas un caractère permanent de la barre d'acier. Le dépassement de la limite initiale d'élasticité (écrouissage) produit ainsi un effet inattendu : la barre y gagne en « ténacité » puisque sa charge de rupture augmente (mais sa ductilité, qui est son aptitude à être tréfilée, risque alors de diminuer).

L'application aux systèmes écologiques des notions issues de la mécanique serait sage, en particulier pour le mot "résilience" qui caractérise la résistance au choc : si l'on regarde la définition précise de ce terme, il apparaît que son emploi exige la connaissance de la "résistance vive", qu'il est bien difficile de mesurer dans les systèmes biologiques. Malheureusement, depuis quelques années, certains écologues l'utilisent sans réfléchir. Par exemple, K. MCCANN (2000) définit une "résilience générale" qui serait l'inverse du temps requis pour que le système revienne à un des états antérieurs d'équilibre ou de non-équilibre et une « equilibrium resilience » qui serait l'inverse du temps de retour à l'équilibre immédiatement antérieur.

Il faut essayer d'être plus précis et de choisir dans la gamme des termes disponibles celui qui convient à la notion mise en jeu. Le terme "vulnérabilité" est l'un des plus sûrs, et il peut être défini comme étant l'inverse de l'élasticité.

B. CHANSON ET AL. (1989) emploient le mot « fragilité » comme synonyme de faible résistance à la propagation d'une fissure existante.

Des problèmes analogues se posent en géomorphologie (J. TRICART, 1975) : le domaine des déformations élastiques est alors le « régime permanent », au cours duquel le système oscille saisonnièrement. Le système géomorphologique passe d'un régime permanent à un autre régime permanent si les calculs de régression montrent que l'ajustement à deux droites de régression est meilleur que l'ajustement à une seule droite. En théorie, il est alors possible de trouver une régression non linéaire très satisfaisante, mais, en pratique, le calcul des deux régressions est la plupart du temps déjà suffisamment délicat.

Un excellent exemple de ces changements de régime est celui des pluies exceptionnelles de juin 1957 dans le Queyras (J. TRICART, 1975). Les effets de la crue des torrents ont été si intenses qu'ils ont dépassé tout ce qui avait eu lieu depuis une dizaine de milliers d'années, et la dynamique des cours d'eau a suivi, depuis 1957, un autre régime permanent. Au contraire, la dynamique des versants a retrouvé son régime antérieur, grâce à une cicatrisation rapide.

#### 164.4 Déflexion et rétablissement

Il reste bien nécessaire de clarifier le vocabulaire sur quelques autres points.

Par exemple, K. MCCANN (2000) nomme « résistance » le fait qu'un écosystème reste composé des mêmes espèces au cours du temps. Ce phénomène avait été nommé « persistance » par P. VAN VORIS et al. (1978). Ces auteurs ont aussi observé qu'un grand nombre d'études de « stabilité » concernent la sensibilité du modèle mathématique qui est censé représenter le système biologique, plutôt que la stabilité réelle de ce système ; ils estiment judicieux de dire qu'un paramètre du système est stable quand l'« intégrale de la perturbation » qu'il permet d'observer est petite. En effet, cette intégrale tient compte à la fois de l'amplitude de la déformation du paramètre après l'agression, et de la rapidité du retour à l'état initial. L'inconvénient de cette approche est que cette intégrale pourra avoir la même valeur pour un

système qui se déforme beaucoup mais revient vite à son état initial, et pour un système qui se déforme peu, mais revient lentement à son état initial.

Pour éviter les ambiguïtés, il faut donc distinguer régulièrement, dans tout déplacement d'un équilibre biologique, la « déflexion » (déformation résultant d'une perturbation extérieure), et le rétablissement qui la suit. On s'aperçoit alors que les systèmes écologiques jeunes ont une déflexion et une résistance vive faibles, mais une grande vitesse de rétablissement ; au contraire, les systèmes âgés ont souvent une résistance vive forte, une grande amplitude de déflexion et une faible vitesse de rétablissement ; ils sont « vulnérables ». Ces remarques seront incluses implicitement dans la synthèse du paragraphe suivant.

#### 164.5 Types et degrés de stabilité : le modèle des "montagnes russes"

Les paragraphes 164.1 à 164.3 peuvent aider à comprendre le paradoxe de SCHRÖDINGER (§ 161) : les êtres vivants absorbent de l'énergie et la rendent ensuite pour la dégrader, c'est-à-dire pour en tirer l'information (= la négentropie) qui leur permet de maintenir et de développer leurs propres structures. Cette acquisition d'information par une plante ou par un animal lui est « utile », parce qu'elle lui permet d'atteindre un état plus stable en augmentant sa capacité de réponse aux perturbations. Le point délicat est le passage vers cet état plus stable, car le système doit souvent franchir un seuil avant de pouvoir atteindre cet état plus stable.

La comparaison avec l'équilibre d'une bille sur des montagnes russes (fig. 16-2) aidera à le comprendre : dans le profil qui va de A à Z, le point d'équilibre le plus stable est B (entropie maximale), mais, C, D et E sont aussi des points d'équilibre "métastable", où la bille revient si les perturbations qu'elle subit restent modérées.

Si nous secouons le système, il est quasiment certain que la bille finira, le plus souvent, par aller en B, mais il pourra arriver qu'elle aille en C, et elle y restera aussi longtemps que les secousses ne la feront pas sortir du "puits" C. A fortiori, si elle arrive en D ou en E, elle n'en partira que par accident.

Si la bille est en C, et si on la perturbe, elle atteindra "presque spontanément" le point B, mais il lui faudra un "accident" favorable pour qu'elle atteigne D et, a fortiori, E.

Ceci montre que l'évolution du système ne dépend pas seulement du niveau de stabilité maximale, mais aussi des probabilités d'accès (hauteurs des seuils, "sections de capture", puissance des attracteurs) aux points d'équilibre métastables, et aussi des risques de départ des « puits » de stabilité.

Le but de ce schéma est de faire comprendre que les équilibres biologiques, qui sont tous métastables (puisque tous les êtres vivants mourront un jour), résistent inégalement aux perturbations. Ainsi, un état métastable, tel que E, peut résister mieux aux perturbations que l'état le plus stable, B, où un faible choc suffit pour envoyer la bille en C ; c'est pourquoi la formulation la plus précise consiste à dire que E est "moins instable" que D et que C.

Un des exemples les plus curieux est celui de la capture des Insectes par une plante carnivore, la Venus dioneae : au repos, ses feuilles sont convexes, comme une coque de navire, ce qui correspond à une situation de basse énergie dans un puits de métastabilité peu profond ; quand un Insecte se pose sur la feuille, elle commence à se fermer par une réaction cellulaire, puis, en quelques dixièmes de seconde, sa courbure s'inverse, et elle se referme brutalement, en emprisonnant sa proie. La petite quantité d'énergie apportée par l'Insecte a suffi pour que la feuille sorte du puits de métastabilité et tombe très vite dans un autre puits de métastabilité, correspondant à une courbure inversée, comme un couvercle de boîte de conserve qui se courbe en produisant un « clic » sonore.

Ce schéma s'applique aussi dans un domaine très différent, celui de l'équilibre temporaire du champ d'inflation ouverte qui serait lié à l'origine de notre univers (M. BUCHER, A. GOLDHABER - Open Universe from Inflation, Physical Rev. D 52, 6 : 3314 -3337, 1995). Il est aussi nommé « paysage énergétique » en physique (P. G. DEBENEDETTI ET F. H. STILLINGER, 2001).

Ce genre de raisonnement s'applique aussi, par exemple, aux variations d'énergie qui accompagnent le devenir d'un électron issu du choc d'un photon sur une molécule de chlorophylle (fig. 16-3) parce que

chacun des états du système est nettement distinct des autres. Il correspond aussi à la "stabilisation sélective" chère à J.-P. CHANGEUX : ce sont les images mentales "sélectionnées" (par le passage d'un seuil tel que L, M ou N) et "stabilisées" qui sont mises en mémoire dans notre cerveau.

En économie, ce schéma correspond aux équilibres de Nash (§ 863). On parle alors quelquefois de « dynamique intermittente » qui s'applique à des phénomènes de turbulence étudiés par Kolmogorov et qui se traduit spatialement par des plages homogènes « laminaires » séparées par des « falaises » turbulentes (J. PH. BOUCHAUD, Pour la Science, 314 : 142-147, 2003).

Plus généralement, les "bifurcations" de R. THOM, qui se produisent dans les systèmes énergétiques situés loin de l'équilibre étudiés par I. PRIGOGINE, montrent que l'alternance de variations progressives et de ruptures brutales est thermodynamiquement possible. Le modèle des montagnes russes intègre ces deux types de phénomènes.

#### 164.6 Les plantes menacées et les montagnes russes

La "vulnérabilité" des espèces est prise en compte dans tous les programmes de préservation de la biodiversité, et il faut se souvenir qu'elle comprend deux aspects complémentaires :

- - la résistance de l'espèce aux perturbations habituelles, qui est la profondeur du puits de métastabilité à l'intérieur duquel elle vit et assure sa descendance, et qui est une élasticité ;
- - la résistance de l'espèce aux perturbations exceptionnelles, c'est à dire sa "résilience", sa résistance aux chocs.

En physique, les propriétés comparées d'une plaque de verre et du fil d'acier d'un trombone montrent comment ces deux aspects se combinent :

- - le verre résiste bien aux agressions mécaniques faibles, puisqu'il n'est pas rayé par les métaux, mais sa résilience est faible puisqu'il se brise au moindre choc ;
- - le fil d'acier se plie facilement dès qu'il subit une pression, et il ne se brise que s'il est soumis à un choc très violent.

#### 164.7 La vulnérabilité et la sensibilité de la végétation

Pour la végétation, les deux exemples qui permettent de comprendre la différence entre la résilience et l'élasticité sont celui d'une forêt naturelle et celui des herbes folles d'une allée de jardin :

- - la forêt évolue facilement autour d'un état moyen au fil des saisons et des années, parce qu'elle réagit avec élasticité aux variations régulières du climat, mais elle sera durablement détruite après le passage d'un bull-dozer ;
- - les herbes folles de l'allée disparaîtront sous l'action de la binette du jardinier ou seront tuées par la sécheresse de l'été, mais elles renaîtront à la première pluie.

La carte des séquences de végétation combinée à celle des types de végétation (cf. l'Atlas du Languedoc-Roussillon, qui a reçu la médaille d'argent du CNRS) permet d'établir une carte de "sensibilité" de la végétation (M. GODRON ET J. POISSONET, 1972) : la végétation d'un polygone résultant de la combinaison de ces deux cartes est "sensible aux perturbations" si le type de végétation est fortement métastable et si sa vitesse de cicatrisation au cours de la séquence est faible ; à l'opposé, elle est peu sensible si le type de végétation d'un polygone est situé à gauche dans le modèle des montagnes russes et si la vitesse de cicatrisation est grande.

### 165 STABILITE DES SYSTEMES ET "ORGANISATION"

Finalement, la biosphère se structure (c'est-à-dire va à contre-courant de l'homogénéisation inéluctable à long terme = diminue son entropie) en empruntant de la néguentropie (= de l'information) au rayonnement solaire. Cette structuration se maintient (= l'information peut se transmettre) seulement si l'état final est moins instable que l'état initial.

Les structures qui ne correspondent pas à des puits de métastabilité disparaissent inéluctablement ; c'est seulement l'acquisition d'une plus grande stabilité qui permet à un système biologique d'atteindre un état métastable plus riche que l'état le plus stable, qui est la mort.

L'organisation des êtres vivants n'est pas un miracle, ni un accident, ni le fruit d'un hasard tout-puissant et irrationnel ; elle résulte du "principe de Maupertuis" (nommé aussi principe du moindre effort" par les étudiants qui aiment le pratiquer dans la vie), qui est une loi d'efficacité maximale : tous les systèmes naturels évoluent de manière à mettre en jeu le moins d'énergie possible. L'organisation des êtres vivants résulte de l'acquisition progressive de systèmes de régulation analogues à un thermostat qui régule la température du local où il est situé. Pour ce faire, le système détecte les écarts à la température souhaitée, et met en route la production de calories (ou de frigories) qui rapprochera la température réelle de la température souhaitée. Un tel système est "adapté" à l'objectif de son constructeur. Des systèmes de ce type existent chez les êtres vivants, par exemple sous la forme simple de la thermorégulation des animaux à sang chaud, ou de la modification de la courbure du cristallin de l'œil, qui "accommode" la netteté de la vision.

Ces régulations interviennent continuellement dans le corps de chacun de nous puisque, chaque jour, plus de cent milliards de nos cellules (sur les quelques dizaines de milliers de milliards qui constituent notre corps), se dédoublent et que cent milliards de cellules meurent. Et pourtant, nous restons presque identiques à nous-mêmes tout au long de la journée.

Une perfection plus subtile est celle d'un système qui modifie son organisation pour maintenir sa pérennité, c'est-à-dire pour rester fonctionnel quand l'environnement change. Dans ce cas, le fonctionnement adapté au deuxième environnement peut être inadapté au premier environnement. Un des exemples les plus typiques est celui de la transformation des Poissons en Amphibiens (ou, inversement, de la transformation de Mammifères terrestres en Cétacés). Le système est alors dit "auto-organisateur" (cf. § 862). La stabilité de ce type de systèmes doit alors être comprise très largement, puisque le système subsiste au-delà de la limite de déformation permanente (§ 164.2)

Les systèmes biologiques sont essentiellement auto-organisateurs à plusieurs échelles et il est normal qu'ils soient durables, puisque leur principe est justement de résister aux perturbations. Ainsi, les "erreurs" de transcription du code génétique sont aussi "utiles", au cours de l'évolution, que la fidélité de la reproduction.

Ceci montre que l'« adaptation » (§ 271) est un mécanisme perfectionné qui peut aboutir à une étonnante adéquation entre la structure et le fonctionnement, qui est peut-être la source de la qualité esthétique des êtres vivants, et aussi de la qualité des paysages (M. GODRON, 2007 et § 542).

Dans la noosphère, la mémoire collective de l'humanité intervient dans les processus écologiques, souvent pour stabiliser à un niveau acceptable les systèmes écologiques où nous vivons (§ 875). Or, toute mémoire est couplée avec un système de traitement de l'information et le rapport entre la quantité d'information contenue dans la mémoire et l'information traitée en une seconde est voisin de 10, aussi bien dans les systèmes nerveux des animaux que dans les ordinateurs

On voit ainsi que le fonctionnement et la structure sont intimement liés, et qu'il faut les observer ensemble, en étudiant l'organisation du système. L'organisation peut aussi bien être considérée comme une "structure fonctionnelle" que comme une "fonction structurante". L'essentiel est de comprendre que l'organisation présente des aspects spatiaux (structures) et des aspects temporels (fonctionnement), dont elle est la synthèse. E. DURKHEIM avait exprimé ceci sous une forme admirable : "Sans doute, les phénomènes qui concernent la structure ont quelque chose de plus stable que les phénomènes fonctionnels ; mais entre les deux ordres de faits, il n'y a que des différences de degré. La structure même se rencontre dans le devenir, et on ne peut la mettre en lumière qu'à condition de ne pas perdre de vue ce processus du devenir. Elle se forme et se décompose sans cesse ; elle est la vie parvenue à un certain degré de consolidation, et la distinguer de la vie dont elle dérive ou de la vie qu'elle détermine équivaut à dissocier des choses inséparables." (cf. § 86).

Aujourd'hui, cette idée se traduit par une règle cybernétique simple :

La structure actuelle d'un système est le résultat de son fonctionnement passé et elle conditionne son fonctionnement futur.

Signalons au passage que la structure peut être nommée "matriciel", par analogie avec le "logiciel". Ce terme semble bien choisi, puisqu'une matrice est effectivement une structure transformante (cf. Annexe 1 du chapitre 7) mais il faut encore attendre pour voir si ce terme aura droit de cité.

Dans d'autres domaines scientifiques, il a été possible de passer de l'étude descriptive de la structure et du fonctionnement jusqu'à l'étude des relations d'organisation, et ce passage a conduit à des progrès importants. Ainsi, J. LAVOREL écrit au sujet de la photosynthèse : "Une autre dimension et la nécessité d'un nouveau cadrage des images structurale et fonctionnelle devaient être introduites...", et il constate que les biologistes travaillent sur des ensembles moléculaires dont l'organisation "assez précise permet l'apparition de propriétés nouvelles par rapport à celles des molécules constitutives". C'est le problème de l'émergence, qui sera abordé dans le chapitre 9, mais nous regarderons maintenant directement l'émergence de la Vie, qui a eu lieu grâce à des relations dynamiques qui diminuent l'indétermination et augmentent l'information.

## ANNEXE 1-1

### RUDIMENTS DE PHYSIQUE DU RAYONNEMENT

#### 1 PRINCIPES (CF. EN PARTICULIER, G. BRUHAT, 1962)

Au soir d'une belle journée d'été, si vous passez devant un mur, vous sentirez qu'il émet un rayonnement infra-rouge qui vous réchauffe. La chaleur ne vient pas d'un échauffement de l'air près du mur, parce que vous pourrez vérifier avec un thermomètre que l'air absorbe peu de rayonnement et reste froid. C'est bien une émission d'énergie radiative que vous avez perçue. Cette simple expérience met en évidence un fait plus général : dès qu'un corps est à une température supérieure au zéro absolu, il émet de l'énergie sous forme de radiations.

Considérons, plus rigoureusement, un corps placé sur des croisillons de liège dans une enceinte où règne le vide (c'est-à-dire dans un calorimètre), le transport de chaleur par conductibilité (c'est-à-dire par contact) du liège ou de l'air sont faibles puisque le liège et l'air sont mauvais conducteurs. Si l'air est immobile, les transports de chaleur par ventilation (par "convection") sont nuls. Pourtant, le corps va échanger de l'énergie radiative avec l'enceinte, jusqu'à ce que sa température soit égale à celle de l'enceinte. Lorsque l'équilibre est atteint, le corps reçoit autant d'énergie qu'il en émet.

En effectuant des mesures, nous allons considérer le flux d'énergie émis par l'unité de surface de la source de radiation, dans l'intervalle de longueur d'onde  $L + dL$ , pendant l'unité de temps. Ce flux est appelé "émittance énergétique de la source pour la longueur d'onde  $L$ " ; il est symbolisé par  $W_L$ . Cette quantité dépend de la nature du corps ; elle est toujours inférieure à celle qui est émise par un corps parfaitement émetteur théorique, qui est appelé "corps noir". Un corps presque noir peut être réalisé en considérant un petit opercule percé dans la surface d'une sphère creuse.

#### 2 LOI DE STEFAN-BOLTZMANN (1879 OU 1869)

##### 2.1 Énoncé

L'émittance énergétique d'un corps porté à la température  $T$  est aussi nommée « pouvoir émissif », et cette quantité d'énergie est proportionnelle à la quatrième puissance de la température absolue :

$$W = s \cdot T^4$$

avec une constante  $s$  qui est égale à  $5,7 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{deg K}^{-4}$

L'unité d'émittance énergétique est la quantité d'énergie émise par un corps noir dont l'étendue est égale à l'unité de surface. Les radiations ainsi émises se présentent à la fois sous forme d'onde et sous forme de

particules nommées photons. L'œil humain est si sensible que cinq ou six photons frappant la rétine suffisent pour exciter le nerf optique (R. FEYNMAN, 1987).

Un observateur extérieur reçoit seulement l'énergie rayonnée dans sa direction. Il faut donc rapporter aussi l'énergie émise à l'unité d'angle solide, et à l'unité de surface apparente, et l'on arrive ainsi à la notion de "luminance spectrale énergétique" (qui était appelée autrefois brillance).

Ce sont certaines irrégularités dans la luminance spectrale qui ont donné naissance à une partie de la théorie des quantas, lorsque Max Planck fut contraint en 1900 - en un « acte désespéré » - d'admettre que les échanges énergétiques à l'intérieur du corps noir ne pouvaient se faire que par de très petits grains d'énergie, qu'il a nommés « quantas ». La loi de Planck donne la répartition de l'énergie dans les fréquences possibles.

## 2.2 Application

La loi de STEFAN permet de calculer la température d'une source quand on connaît la quantité d'énergie qu'elle émet. Ainsi elle conduit à estimer la température de la couche externe du Soleil à 6 000 degrés absolus (ou °K).

En relation avec la loi de STEFAN, on peut calculer la quantité d'énergie qu'il faut fournir à l'unité de volume du "vide" pour élever de 1 degré C la température du rayonnement (op. cit., p. 613). Ce calcul n'est pas directement utile en écologie, mais nous le mentionnons pour conduire à réfléchir sur la nature du rayonnement. Cette chaleur spécifique du vide,  $C_v$ , est égale à :

4 . a .  $T^3$

avec  $a = 7,67 \cdot 10^{-15} \text{ CGS} = 7,67 \cdot 10^{-16} \text{ SI}$

Cette quantité est beaucoup plus petite que la chaleur spécifique des corps habituels, mais elle devient très importante quand la température atteint plusieurs millions de degrés (par exemple à l'intérieur du Soleil).

Pour comprendre un peu mieux ce qu'est le vide, chassons l'air d'un cylindre, en poussant le piston à fond, et fermons le robinet de vidange du cylindre. Tirons maintenant le piston, pour créer un vide dans le cylindre, et attendons un peu, pour que l'équilibre thermique s'établisse. Poussons à nouveau le piston vers le fond du cylindre : contrairement à ce que l'on pourrait imaginer, le piston ne revient pas spontanément jusqu'au fond du cylindre, même si aucune molécule de gaz n'est entrée dans le cylindre. Le "vide" exerce une pression sur le piston, à cause du rayonnement électromagnétique qui est émis par les parois du cylindre et durablement installé dans le vide. Ceci peut être exprimé d'une manière imagée en disant qu'un "gaz de photons" (sans poids) occupe le "vide".

En mécanique quantique, il est montré que, dans le vide, des paires de particules et de leurs anti-particules surgissent en permanence (sinon, tous les paramètres physiques seraient exactement connus, ce qui est incompatible avec l'indétermination démontrée par Heisenberg) ; ces antiparticules s'annihilent presque immédiatement, sauf si un champ magnétique les écarte puisqu'elles sont de signe contraire. Le vide possède donc une énergie quantique qui n'est pas nulle. Dans le cosmos, ce phénomène devient si important près des "trous noirs" qu'il provoque des "sursauts gamma" qui convertissent en énergie une part importante de la masse disponible.

Il est logique de se demander d'où vient l'énergie radiative fournie par un corps qui rayonne. La réponse est donnée par A. EINSTEIN (1905), dans un des articles fondateurs où son génie s'est révélé : « Un corps émet de l'énergie  $L$  sous forme de rayonnements, la masse alors diminue de  $L / C^2$  ( $C$  étant la vitesse de la lumière) ... La masse d'un corps est une mesure de son contenu d'énergie ; si l'énergie change de la quantité  $L$ , la masse change dans le même sens d'une quantité  $L / 9 \cdot 10^{20}$ , l'énergie étant mesurée en ergs, et la masse en grammes. »

Depuis quelques années, des physiciens ont construit des appareils où la lumière va plus vite que 900.000 km/s : un laser émet un rayonnement qui traverse un gaz d'atomes de césium et une partie de ce rayonnement peut aller si vite qu'elle semble ressortir avant même d'être entrée (L. WANG et al., 2000). Les physiciens assurent que cette exception ne remet pas en cause la théorie de la relativité ni la causalité des phénomènes. Nous pouvons donc rester sereins et continuer à utiliser nos lampes électriques sans craindre que leur lumière ne nous échappe.

### 3 LOI DE WIEN (1894 OU 1874)

L'énergie émise par un corps est très faible dans les très faibles longueurs d'onde, de même que celle qui est émise dans les très grandes longueurs d'onde ; en conséquence, la courbe qui exprime la variation de la "luminance spectrale", EL, en fonction de la fréquence, est une courbe en cloche, qui passe par un maximum pour une fréquence correspondant à la longueur d'onde maximale, Lmax (fig. 1 de l'annexe 1-1).

WIEN, puis BOLTZMANN, ont montré que la courbe EL2, pour la température T2, se déduit de la courbe EL1 par l'anamorphose suivante : quand les abscisses sont augmentées dans la proportion K, les ordonnées sont augmentées dans la proportion K<sup>3</sup>.

Si l'on considère la courbe de variation de EL en fonction de la longueur d'onde, L, l'anamorphose se traduit par une règle simple : quand les abscisses sont diminuées dans la proportion T1, les ordonnées sont augmentées dans la proportion T2<sup>5</sup> ; ceci est illustré par la figure 1, ci-jointe, sur laquelle on voit le maximum se déplacer régulièrement vers la gauche (longueurs d'ondes plus petites, c'est-à-dire lumière de plus en plus "bleue", selon la courbe tracée en pointillé.

La longueur d'onde Lmax, pour laquelle la luminance spectrale est maximale, décroît quand la température croît :

$$L_{\max} \text{ (en microns)} \cdot T \text{ (en degrés K)} = 2.900$$

Ainsi, la température de la Terre est voisine de 290 degrés K (c'est-à-dire à 17 degrés C) ; elle émet donc principalement à une longueur d'onde Lmax = 10 microns (c'est un rayonnement infrarouge). A la température du soleil (6 000 degrés K), Lmax = 0,5 microns = 500 nanomètres. La différence entre ces deux longueurs d'onde explique l'origine de l'« information » acquise par la biosphère (§ 162). Le rayonnement "X" de 0,1 nanomètre correspond à une température de 30 millions de degrés K, et le rayonnement gamma à une température de 30 milliards de degrés K, liée à la déstructuration du noyau des atomes.

La figure 1-An1 montre que la plus grande partie de l'énergie rayonnée est comprise entre 0,5 Lmax et 2 Lmax, c'est-à-dire, dans le cas du Soleil, entre 0,25 micron et 1 micron.

De même, la plus grande partie de l'énergie rayonnée par la Terre est comprise entre 5 microns et 20 microns (rayonnement infrarouge).

L'un des types de rayonnement méconnus est celui dont la fréquence est comprise entre 0,3 et 10 térahertz et la longueur d'ondes entre 0,03 mm et 1 mm, qui le situe entre l'infra-rouge et les ondes radio. Il est nommé rayonnement T (pour térahertz, qui signifie 10<sup>12</sup> hertz = 1.000 gigahertz). Comme tous les autres rayonnements, il est composé d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui oscillent de concert et s'induisent l'un l'autre en se propageant à la vitesse de la lumière. La particule correspondante est, comme d'habitude, le photon, qui possède alors une énergie inférieure à 0,1 électron-volt, insuffisante pour que le photon puisse arracher un électron en arrivant sur un capteur comme cela se produit avec les photons solaires et il peut seulement chauffer des molécules telles que celle du bismuth. Les rayons T ne sont pas ionisants et ils sont arrêtés seulement par les métaux et l'eau ; ils permettent donc de voir les éléments métalliques et la forme du corps à travers les vêtements.

Les rayons cosmiques sont très différents, puisque ce sont des particules de très haute énergie (10<sup>19</sup> électrons-volts, soit un million de fois plus que les particules produites par les accélérateurs des physiciens) émises par des trous noirs situés au centre de nébuleuses à noyau actif situées à quelques

centaines de millions d'années-lumière. Ils sont freinés par le rayonnement fossile reliquat du big bang. Il arrive en moyenne une de ces particules chaque siècle sur 1 km<sub>2</sub> de la Terre.

#### 4 LOI DE KIRCHOFF (CORPS NON NOIR)

Un des caractères du corps noir idéal (et des petites sphères percées d'un opercule qui sont presque des corps noirs) est d'absorber totalement l'énergie qu'il reçoit. Les autres corps absorbent une partie de l'énergie qu'ils reçoivent, et réfléchissent le reste. Le quotient de l'énergie ainsi réfléchi par l'énergie reçue est nommé "albedo". Inversement, le quotient de l'énergie absorbée par l'énergie incidente qui arrive sur un corps non noir est le "facteur d'absorption", AL ; il est toujours inférieur à l'unité, et égal à  $1 - \text{albedo}$  (cf. § 311).

Le facteur d'absorption dépend de la longueur d'onde du rayonnement reçu. Par exemple, la chlorophylle absorbe nettement mieux le rouge et le bleu que les couleurs de longueur d'onde moyenne, comme le vert et le jaune ; c'est parce qu'elle renvoie beaucoup de vert qu'elle paraît verte à nos yeux.

Un corps très réfléchissant (argent poli) ou très diffusant (porcelaine dépolie) a un facteur d'absorption voisin de zéro. L'une des surfaces les plus blanches est celle des élytres du Coléoptère asiatique *Cyphocilus* dont la couche externe est épaisse seulement de cinq micromètres (20 fois moins qu'une feuille de papier).

Un corps non noir placé à l'intérieur d'une enceinte échange de l'énergie radiative avec les parois de l'enceinte, jusqu'à ce qu'un équilibre soit atteint. On démontre que la luminance spectrale du corps, FL, (quantité d'énergie émise par l'unité de surface, dans l'unité d'angle solide, au voisinage de la longueur d'onde L) est alors égale à son facteur d'absorption multiplié par la luminance spectrale du corps noir :

$$FL = AL \cdot EL$$

Autrement dit, un corps non noir, placé en équilibre dans une enceinte, absorbe moins d'énergie que le corps noir, il émet aussi moins d'énergie que le corps noir, dans la même proportion. Ce sont, à température égale, les corps qui absorbent le plus qui émettent aussi le plus.

A la limite, un corps parfaitement réfléchissant n'émettrait pas de lumière propre. Ainsi regardons une plaque de métal poli, parsemée de taches de noir de platine, placée dans un four et portée à incandescence : les taches "noires" paraîtront alors plus claires que la plaque de métal.

Le facteur d'absorption dépend généralement de l'angle d'incidence du rayonnement ; il est plus faible quand les rayons arrivent obliquement. C'est pourquoi une boule incandescente paraît plus lumineuse au centre que sur ses bords.

Appliquons la loi de KIRCHOFF à la Terre illuminée par le Soleil : son albedo est voisine de 30%, et elle absorbe donc 70% de la constante solaire (fig. 12-1). Elle tend ainsi à se réchauffer ; en conséquence, dès que sa température est supérieure au zéro absolu, elle émet un rayonnement de grande longueur d'onde (10 microns), selon la loi de STEFAN, qui lui prend de l'énergie. L'équilibre s'établit ainsi autour d'une température moyenne, dite "température thermodynamique d'équilibre".

Si l'atmosphère était absolument transparente, cette température d'équilibre serait voisine de  $- 22^{\circ}\text{C}$ . En fait, la basse atmosphère absorbe une partie de l'énergie émise par la Terre, et se réchauffe ; les  $- 22^{\circ}\text{C}$  sont alors atteints aux environs de 5 km d'altitude (fig. 12-2).

#### 5 PRESSION DE RADIATION ET DENSITE D'ENERGIE

Lorsqu'un faisceau de radiations atteint un corps, il y provoque des courants induits, et le champ magnétique correspondant produit des forces de répulsion. Tout se passe comme si le rayonnement exerçait une pression sur la surface éclairée.

Cette pression est numériquement égale à la quantité d'énergie U contenue dans l'unité de volume du rayonnement incident (U est appelé densité d'énergie). Si la surface est parfaitement réfléchissante, l'unité

de volume contiendra autant d'énergie réfléchi que d'énergie incidente, et la pression de radiation sera égale à  $2U$ .

Dans le cas du rayonnement solaire, les 2 calories reçues en une minute sur un centimètre carré correspondent à :  $1,4 \cdot 10^6$  ergs par seconde. Cette énergie est contenue dans un cylindre de section unitaire ayant pour longueur 30 000 000 de centimètres. Le faisceau incident contient donc :  $1,4 \cdot 10^6 / 3 \cdot 10^{10} = 5 \cdot 10^5$  erg ; la pression correspondante est de  $5 \cdot 10^{-5}$  barye, pour un corps noir, et de  $10^{-4}$  barye pour un corps parfaitement réfléchissant.

L'une des curiosités de la physique quantique est de prévoir que le « vide » le plus parfait, qui ne contient aucune particule et qui n'émet aucun rayonnement possède cependant une certaine énergie « noire », liée à des particules « virtuelles », et même une chaleur spécifique.

## 6 APPLICATION A LA TELEDETECTION

Les photographies aériennes sont très utilisées depuis plusieurs dizaines d'années pour observer la végétation et la surface de la Terre ; elles peuvent être sensibles à la gamme du rayonnement visible (pellicules panchromatiques), à l'infra-rouge ou à des longueurs d'onde choisies à l'avance ("fausses couleurs").

Les satellites de télédétection sélectionnent certaines longueurs d'onde. Ainsi SPOT reçoit du vert (0,5 à 0,59 microns), du rouge (0,61 à 0,68 microns) et de l'infra-rouge (0,79 à 0,89 microns). Pour identifier la couverture végétale (ou le type de sol qui apparaît entre les plantes) qui apparaît en chacun des points de l'image reçue par le satellite, il est commode de placer à quelques mètres au-dessus du sol un radiomètre qui perçoit les mêmes longueurs d'onde que le satellite. La "signature" des plantes est caractérisée par le quotient luminance/éclairage. La luminance est le flux énergétique (en watts) émis par la couverture végétale (ou par le sol), et l'éclairage est le flux énergétique reçu par la même surface.

### ANNEXE 1-2

#### RUDIMENTS DE THERMODYNAMIQUE

(cf., en particulier, G. BRUHAT, 1962)

Les biologistes ont souvent peur d'affronter les mystères de la thermodynamique. Il est pourtant assez facile de saisir que cette science peut être pour nous une alliée plus qu'une ennemie, en particulier parce qu'elle montre comment il est possible de relier les observations macroscopiques aux phénomènes microscopiques.

#### 1 TYPOLOGIE DES SYSTEMES THERMODYNAMIQUES ET DES TRANSFORMATIONS

Les systèmes thermodynamiques peuvent être classés en plusieurs types, en fonction de leurs relations avec leur environnement, que l'on appelle généralement l'"extérieur" du système.

##### 1.1 Systèmes isolés

Un système isolé n'a aucune relation avec l'extérieur. Il n'échange ni énergie ni matière avec son environnement ; ses parois sont rigides, et il ne peut pas être comprimé ou dilaté, puisque ces variations de volume seraient un échange d'énergie mécanique avec l'extérieur. Ces parois ne doivent pas non plus transmettre de chaleur (l'on dit qu'elles sont "adiabatiques"). Sa masse reste constante. Finalement, il ne peut subir que des transformations internes, à volume constant.

##### 1.2 Systèmes fermés et non-isolés

Un système fermé n'échange pas de matière avec l'extérieur, mais il peut échanger de la chaleur, de l'énergie mécanique (s'il se dilate ou se contracte), et, éventuellement, de l'énergie électrique, magnétique, ou radiative. Généralement, les systèmes fermés étudiés par les mécaniciens ont une composition chimique

constante, et cette propriété est souvent sous-entendue. L'exemple le plus courant est celui des machines thermiques (machines à vapeur, moteur à explosion, etc.) qui échangent avec l'extérieur de la chaleur et de l'énergie mécanique.

Les systèmes biologiques peuvent, à la limite, être des systèmes fermés, et ils peuvent aussi être thermiquement isolés, même pendant des durées relativement longues (un aquarium placé dans un calorimètre, par exemple), mais ils ne peuvent pas rester longtemps radiativement isolés (sauf l'exception signalée en particulier dans les paragraphes 211 et 214 du chapitre 2). Pour fabriquer des moteurs, les thermodynamiciens négligent généralement les entrées d'énergie radiative, mais les systèmes biologiques sont moins brutaux et ils utilisent systématiquement l'énergie radiative du Soleil.

Pour les systèmes fermés (mais non isolés), on distingue habituellement les transformations monothermes, où le système est en contact avec une seule "source" de chaleur (qui reste à température constante, mais peut aussi bien recevoir de la chaleur qu'en donner) et les transformations dithermes, où deux sources extérieures sont en jeu. Les deux parties d'un système ditherme peuvent évidemment rester chacune à une température constante (la transformation est alors dite isotherme), mais un système monotherme peut aussi subir une transformation isotherme. Il peut, par exemple, se dilater, ce qui tend à entraîner une diminution de température, et recevoir des calories au fur et à mesure qu'il se détend, en compensation exacte, de manière que sa température reste constante.

Une transformation sans échange de chaleur avec l'extérieur est adiabatique ; une transformation à pression constante est isobare ; enfin une transformation à volume constant est isochore.

### 1.3 Systèmes ouverts

Un système ouvert échange de l'énergie et de la matière avec l'extérieur. Si l'on veut y appliquer le principe de la conservation de la masse, il faut écrire :

$$dM = dM_e + dM_s = 0$$

en appelant  $M$  la masse du système,  $dM_e$  la masse qu'il reçoit de l'extérieur,  $dM_s$  la masse qu'il donne à l'extérieur.

### 1.4 Réversibilité

Indépendamment de leur degré d'ouverture et d'isolement, les systèmes peuvent subir des transformations plus ou moins réversibles : une transformation est dite réversible si elle s'effectue progressivement, sans saut brusque, et en équilibre avec l'extérieur, de telle manière que le système puisse à chaque instant revenir à son état antérieur. Dans le cas contraire, par exemple quand une étincelle électrique déclenche une explosion, la transformation est irréversible.

Les transformations irréversibles sont, en particulier :

- - les flux de chaleur dus à une hétérogénéité de températures,
- - les flux de matière dus à une hétérogénéité de concentration (pensez à la diffusion d'une goutte de vin dans un verre d'eau, ou à la dissolution d'un morceau de sucre),
- - les variations d'hystérésis magnétiques,
- - les frottements, qui transforment de l'énergie mécanique en chaleur.

Aucune transformation réelle n'est parfaitement réversible. En effet, la réversibilité parfaite supposerait qu'il n'y ait aucun frottement, et que les échanges de chaleur aient lieu entre corps qui auraient la même température (cf. les paragraphes 5 et 6 de la présente annexe).

### 1.5 Tableau d'ensemble

Cette typologie peut se résumer dans le tableau suivant :

## SYSTEME TRANSFORMATIONS

isolé ( parois étanches) elles sont :

- parois rigides - toutes internes
- parois adiabatiques - réversibles ou irréversibles
- toutes adiabatiques

fermé et non-isolé :

ses parois sont étanches elles peuvent être de n'importe quel type, mais il existe, en particulier, des transformations :

- - isothermes
- - adiabatiques
- - isobares
- - isochores
- - réversibles
- - irréversibles

ouvert les transformations sont analogues à celles des systèmes fermés, mais il faut ajouter dans toutes les équations les termes complémentaires qui caractérisent les effets des échanges de matière entre le système et son environnement.

## 2 LE PREMIER PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE

SADI CARNOT écrivait, avant 1836, dans des notes qui ont été connues après sa mort : "La chaleur n'est autre chose que la puissance motrice, ou plutôt que le mouvement qui a changé de forme ; c'est un mouvement. Partout où il y a destruction de puissance motrice dans les particules des corps, il y a en même temps production de chaleur en quantité précisément proportionnelle à la quantité de puissance motrice détruite ; réciproquement, partout où il y a destruction de chaleur, il y a production de force motrice."

"On peut donc penser en thèse générale que la puissance motrice est en quantité invariable dans la nature, qu'elle n'est jamais à proprement parler ni produite, ni détruite. A la vérité, elle change de forme, c'est-à-dire qu'elle produit tantôt un genre de mouvement, tantôt un autre, mais elle n'est jamais anéantie... D'après quelques idées que je me suis formées sur la théorie de la chaleur, la production d'une unité de puissance motrice nécessite la destruction de 2,70 unités de chaleur" (op. cit., p. 74).

Ces réflexions sont au centre du premier principe de la thermodynamique, dit principe de la conservation de l'énergie (ou principe de l'équivalence) :

Au cours de toutes les transformations (non nucléaires), l'énergie se transforme, sans jamais disparaître, autrement dit, un type d'énergie est toujours équivalent quantitativement (et non pas qualitativement) à un autre type d'énergie.

Ce premier principe permet de définir l'"énergie interne" d'un système fermé, à partir des variations de travail et des échanges de chaleur observés entre deux états du système. Pour cela, nous allons examiner des transformations de plusieurs types, qui seront, dans ce §, des transformations de très faible amplitude, au cours desquelles la température et la pression n'auront pas le temps de varier sensiblement, et pour lesquelles nous pourrions adopter la notation différentielle. Autrement dit, nous considérerons des intervalles de temps aussi petits que l'on voudra, inférieurs à toute quantité assignée à l'avance.

Dans une transformation à volume constant, il n'y a pas d'échange de travail avec le milieu extérieur et la variation d'énergie interne est exactement égale à la chaleur échangée :

$$UB - UA = QB - QA = dQ$$

Considérons maintenant une transformation où le volume varie, mais où la pression reste constante et égale à P. Les échanges de travail mécanique se résument, entre l'état initial A et l'état final B, à :

$$P.(VA - VB) = P.dV$$

La variation d'énergie interne, pour l'ensemble de ces deux transformations, est alors :

$$UB - UA = QB - QA + P.(VA - VB) = dQ + P.dV$$

Plus généralement, il faut tenir compte aussi de la variation d'énergie électromagnétique de conduction, dE, et de la variation d'énergie électromagnétique de rayonnement, dE'. Alors, la variation d'énergie interne d'un système de masse constante et immobile, au cours d'un cycle ouvert (où l'état final est distinct de l'état initial), est :

$$UB - UA = dQ + P.dV + dE + dE'$$

Le premier principe revient ainsi à dire que la variation d'énergie interne entre l'état A et l'état B dépend seulement des échanges d'énergie physique (travail, chaleur, électricité, rayonnement électromagnétique) avec l'extérieur. Il peut alors être exprimé, sous le nom de principe de l'état final et de l'état initial, en disant que la variation d'énergie interne entre A et B ne dépend pas du chemin physique suivi entre A et B.

### 3 FORMULATION FINE DU PREMIER PRINCIPE - DEFINITION DE L'ENERGIE INTERNE (G. BRUHAT, 1962, OP. CIT., CHAP. VIII)

Nous avons vu au paragraphe précédent que, dans le cas où la pression reste constante :

$$dU = dQ + P.dV \quad (1)$$

Si la pression varie au cours de la transformation qui fait passer le système de l'état A à l'état B, l'équation (1) devient une véritable équation différentielle. Elle peut alors être intégrée et donner :

$$UB - UA = QB - QA + \text{Intégrale de } P.dV$$

Or, l'intégrale définie qui permet de mesurer la variation d'énergie interne pourrait a priori dépendre du "chemin" suivi entre A et B dans l'espace à trois dimensions Q, P, V. Considérons, par exemple, le diagramme de coordonnées P et V, où un point représente un état du gaz (fig. 1 de la présente annexe), et observons un cheminement énergétique passant par trois points A<sub>0</sub>, A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>. Partons du point A<sub>0</sub>, de coordonnées P<sub>0</sub>, V<sub>0</sub>, T<sub>0</sub>, et comprimons le gaz. Il tend à s'échauffer (comme on le constate en tenant dans la main une pompe de bicyclette) puisque les chocs entre molécules se multiplient. Si le gaz est dans une enceinte non isolée, c'est-à-dire s'il peut céder de la chaleur, sa température reste constante. On arrive ainsi au point A<sub>1</sub> où P<sub>1</sub> > P<sub>0</sub>, V<sub>1</sub> < V<sub>0</sub> et T<sub>1</sub> = T<sub>0</sub>.

Si on isole maintenant l'enceinte, et que l'on continue à comprimer le gaz, sa température augmentera, et la pression augmentera d'autant plus vite. L'ascension du point figuratif sera plus rapide, et ce point arrivera ainsi en A<sub>2</sub>, de coordonnées P<sub>2</sub> > P<sub>1</sub>, V<sub>2</sub> < V<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> > T<sub>1</sub>.

Le travail fourni au gaz est la somme de la chaleur fournie par le gaz et de l'intégrale de P.dV ; il est proportionnel à la surface totale hachurée sur la figure. Or, selon le principe de l'état initial et de l'état final, la variation de l'énergie interne entre A<sub>0</sub> et A<sub>2</sub> ne dépend pas du chemin parcouru. En langage mathématique, ceci revient à dire que les dérivées partielles de U par rapport au volume (à température constante) et par rapport à la température (à volume constant) sont égales entre elles (op. cit., p. 117 et suiv.). Nous n'insisterons pas sur les applications de cette formulation fine du premier principe, parce

qu'elle exigerait des développements analytiques un peu longs, mais il était nécessaire de la signaler, car elle constitue une base de départ précieuse pour démontrer un grand nombre de lois de la thermodynamique.

#### 4 LE DEUXIEME PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE

En 1824, SADI CARNOT a compris (avant même d'avoir découvert le premier principe de la thermodynamique) que certaines transformations se produisent toujours dans le même sens. Ainsi, quand de la chaleur circule dans un système, elle va toujours du corps le plus chaud vers le corps le plus froid, de telle manière que les températures s'égalisent progressivement. De même, un gaz tend toujours à occuper toute la place qui lui est offerte, etc.

Ces deux exemples montrent que le deuxième principe repose sur des observations très simples, qui n'ont rien de mystérieux, mais qui permettent de caractériser le "sens" de l'évolution des systèmes, en distinguant leur passé et leur futur. Il permet même de savoir que certains futurs sont impossibles. En particulier, il entraîne la certitude que l'univers tend vers un système déstructuré à température uniforme. C'est pourquoi A. EINSTEIN disait de lui que "c'est le plus métaphysique des principes de la physique".

Ajouter les travaux de Poincaré et de Prologine.

L'application du deuxième principe à la cosmologie est délicate : l'univers est habituellement considéré comme un système isolé (sinon, il communiquerait avec un autre univers !) et son entropie est alors toujours croissante. Ce n'est pas incompatible avec le Big bang, puisque l'univers primitif aurait été, dans cette hypothèse, une bulle d'énergie de très haute qualité et très homogène. Les lois de la physique nous permettent de remonter dans le temps jusqu'à une fraction de seconde - le "temps de Planck" - après le Big bang. Au moment de sa naissance, l'univers était un formidable concentré d'énergie (considérée comme une fluctuation du vide quantique) et l'on ne peut pas dire s'il était grand ou petit parce que les notions d'espace et de temps sont apparues en même temps que l'univers, et c'est seulement après le temps de Planck que l'univers a commencé à se dilater.

Les atomes, puis les molécules, puis les nébuleuses, les étoiles, les planètes, etc. sont apparus ensuite. La transparence de l'espace intersidéral, qui nous a légué le rayonnement fossile de Penzias, en a diminué l'homogénéité. L'univers est ainsi devenu de plus en plus complexe, de plus en plus structuré et cette évolution paraît, à première vue, en contradiction avec le second principe de la thermodynamique qui dit qu'un système isolé devient de plus en plus homogène. En fait, la structuration de l'univers cosmologique ne contredit pas le deuxième principe, puisqu'elle s'est accomplie en consommant de l'énergie de très haute qualité, riche en néguentropie. Puisque nous ne savons pas si l'univers est limité et s'il se dilatera indéfiniment, nous ne pouvons pas prévoir ce que sera son état final.

#### 5 DEFINITION THERMODYNAMIQUE DE L'ENTROPIE

Considérons un système fermé qui est en contact avec une "source" de chaleur (ou de froid). Une telle source fournit de la chaleur (ou du froid) sans que sa température varie. Un radiateur est ainsi une source chaude, et un frigidaire une source froide ; un lac est une source froide par rapport à une barre de fer chauffée au rouge que l'on plonge dans l'eau du lac ; de même, l'atmosphère est une source froide par rapport au moteur d'une mobylette. En fait, une source froide est un producteur de "frigories", ce qui revient à dire que c'est un capteur de calories.

Le principe de Carnot signifie que l'énergie "coule" toujours de la source chaude vers la source froide, qui est, en fait, un "puits" où arrive l'énergie.

Une application du principe de CARNOT est qu'un système fermé, mais non isolé, qui est en contact seulement avec une source chaude (capable de lui fournir de la chaleur), et décrit un cycle monotherme ne peut pas produire de travail mécanique. En effet, ce travail mécanique pourrait ensuite être transformé en frottement pour échauffer la source chaude, et l'on aurait ainsi transféré de la chaleur du corps le plus froid vers le corps le plus chaud, ce qui est contraire au deuxième principe (et au bon sens !).

Les machines capables de transformer régulièrement de la chaleur en énergie doivent donc disposer de deux sources thermiques : la source chaude est, par exemple, une chaudière à charbon ou un cylindre à l'intérieur duquel a lieu une combustion explosive ; la source froide est l'atmosphère extérieure, ou un condenseur refroidi volontairement. Le travail est produit par un ensemble mécanique, qui peut être une turbine, ou, plus simplement, un cylindre et un piston. Pour obtenir le déplacement du piston, il faut qu'il existe une différence de pression entre ses deux faces, l'une étant au contact du gaz réchauffé par la source chaude, et l'autre au contact du gaz refroidi par la source froide. Le système doit donc comprendre l'ensemble mécanique, la source chaude et la source froide ; il constitue alors une "machine thermique".

Dans ces conditions, l'ensemble mécanique reçoit une quantité de chaleur  $Q_1$ , positive par convention, et il donne à la source froide une quantité de chaleur  $Q_2$ , négative par convention. Le travail effectué est :

$$W = - (Q_1 + Q_2)$$

Il est logique que  $W$  soit négatif, puisque ce travail est produit par l'ensemble mécanique. Le rendement de l'ensemble est, par définition, le rapport entre l'énergie mécanique produite et l'énergie calorifique fournie par la source chaude ; ce rendement,  $r$ , est un coefficient supérieur à 0, et il est donné par :

$$r = - W / Q_1$$

$$r = ( Q_1 + Q_2 ) / Q_1$$

$$r = 1 + Q_2/Q_1$$

Pour évaluer ce rendement en fonction des températures, les thermo-dynamiciens ont utilisé la température absolue, mesurée en degrés Kelvin, qui est égale à la température centésimale (ou température Celsius) + 273,15. La définition de la température absolue permet alors d'écrire (op. cit., p. 89) :

$$T_1 / T_2 = - Q_1 / Q_2$$

et

$$r = 1 - T_2 / T_1$$

Considérons ainsi une machine fonctionnant réversiblement entre 100°C (température de l'eau bouillante) et 20°C ; les températures absolues correspondantes sont  $T_1 = 100 + 273 = 373^\circ\text{K}$ , et  $T_2 = 20 + 273 = 293^\circ\text{K}$  ; la machine aura alors un rendement de :

$$1 - 293 / 373 = 80 / 373 = 0,21 = 21\%$$

Le rendement atteindra 38% si la vapeur est surchauffée à 200°, et 44% si sa température atteint 400°.

De la relation :

$$T_1 / T_2 = - Q_1 / Q_2$$

nous tirons :

$$Q_1 / T_1 = - Q_2 / T_2$$

$$Q_1 / T_1 + Q_2 / T_2 = 0$$

Plus généralement, si une machine fonctionne avec plusieurs sources numérotées 1, 2, ... , n, nous aurons :

$$Q_1/T_1 + Q_2/T_2 + \dots + Q_n/T_n = 0$$

Si les sources sont infiniment nombreuses et si leurs températures varient continûment, chacune des quantités  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  sera infiniment petite, et sera notée  $dQ_1, dQ_2, \dots, dQ_n$ . La transformation sera alors "réversible" (cf. début de cette annexe) et l'expression précédente deviendra une intégrale :

$$S = \text{Somme de } dQ/T = 0$$

La fonction  $S$  qui vient d'être définie joue un rôle considérable, et Clausius l'a nommée "entropie" : le verbe grec "tropaein" signifie "tourner, infléchir, se tourner pour revenir, revenir en arrière". Clausius, le physicien qui a construit, en 1845, le mot "entropie", a écrit à ce sujet : "C'est à dessein j'ai formé ce mot, de manière qu'il se rapproche autant que possible du mot énergie, car ces deux quantités ont une telle analogie dans leur signification physique qu'une certaine analogie de dénomination m'a paru utile". Le phénomène physique, le "retour en arrière", l'"infléchissement", avait été découvert un demi-siècle plus tôt par SADI CARNOT, qui a oublié de lui donner un nom à succès, mais qui avait bien vu que l'augmentation d'entropie d'un système isolé est l'un des phénomènes où la "flèche du temps" trace un chemin orienté en sens unique (CF. I PRIGOGINE, 1996).

Les calculs qui viennent d'être faits reviennent à dire que, dans le cas d'une transformation réversible, l'entropie du système n'augmente pas. C'est pourquoi  $S = \text{Somme de } dQ/T$  est la fonction qui caractérise l'entropie. Elle confirme bien que l'augmentation d'entropie est nulle pour toutes les transformations adiabatiques (sans échange de chaleur) puisqu'alors  $dQ = 0$ .

Pour définir la température d'un corps, les thermodynamiciens ajoutent aux trois principes classiques de la thermodynamique une relation de transitivité : deux corps qui sont en équilibre thermique avec un troisième corps sont aussi en équilibre thermique entre eux. Cette relation paraît évidente à première lecture, mais elle est nécessaire dans certains raisonnements fondamentaux.

La plupart des systèmes thermodynamiques complexes que nous connaissons, par exemple le corps d'un animal ou la totalité de biosphère, sont des systèmes non isolés, ce qui signifie qu'ils échangent de l'énergie avec leur environnement. Il faut donc faire les calculs d'entropie pour l'ensemble constitué par le système qui nous intéresse et par son environnement. Par exemple, la personne enfermée dans un calorimètre (cf. le paradoxe de Schrödinger § 161) reçoit de son environnement de l'énergie chimique de haute qualité dans les aliments qu'elle consomme. Elle redistribue cette énergie dans son environnement sous des formes diverses (énergie calorifique de la "chaleur animale", énergie mécanique si elle se déplace, énergie chimique résiduelle dans ses déjections).

*Le bilan énergie reçue - énergie rendue est évidemment nul, puisque la personne n'a pas accumulé d'énergie pendant son séjour dans le calorimètre. Alors, dit Schrödinger, pourquoi avons nous besoin de consommer des aliments, puisque nous ne conservons pas l'énergie qu'ils nous fournissent ? La réponse est simple : nous absorbons de l'énergie chimique de haute qualité et nous rendons en grande partie de l'énergie calorifique de basse qualité. Autrement dit, nous consommons de la qualité d'énergie, c'est à dire de la néguentropie.*

Il en est de même pour la biosphère, qui est un système fermé mais non isolé : elle absorbe la lumière solaire, énergie rayonnante de courte longueur d'onde et donc de haute qualité, et elle renvoie de l'énergie rayonnante infra-rouge, de plus grande longueur d'onde et de moindre qualité, en consommant ainsi la néguentropie qui lui permet de se structurer (§ 162).

## 6 ENTROPIE ET IRREVERSIBILITE

L'exemple présenté dans le paragraphe précédent est un idéal, qui n'est jamais atteint. En effet, il suppose que les échanges de chaleur ont lieu avec des sources infiniment nombreuses, et telles que chacune d'elles est en équilibre thermique avec l'ensemble mécanique, de manière que les transformations soient réversibles. Autrement dit, l'augmentation d'entropie d'une machine thermique (qui inclut des échanges de chaleur) est nulle si la machine est parfaitement réversible. Les machines thermiques réelles, qui ne sont pas réversibles, fournissent de l'entropie à leur environnement.

En effet, deux corps échangent de la chaleur seulement si leurs températures sont différentes, en conséquence, il n'existe pas de transformations parfaitement réversibles ; elles sont toujours irréversibles,

et le rendement réel est toujours inférieur au rendement calculé précédemment. En conséquence, il y a toujours une augmentation d'entropie à l'intérieur d'un système isolé.

Mais les échanges de chaleur entre des corps qui sont "presque" à la même température ( $T_1 - T_2$  est alors un infiniment petit du premier ordre) entraînent une production d'entropie qui est un infiniment petit de second ordre (op. cit., p. 111). En conséquence, les échanges de chaleur entre corps à températures voisines sont pratiquement réversibles. C'est en vue d'obtenir de tels types d'échanges de chaleur que les centrales électriques s'ornent de ces immenses hyperboloïdes de révolution qui dominent les vallées de nos grands fleuves.

En résumé, pour toutes les transformations (sans frottements) réversibles qui ont lieu à l'intérieur d'un système isolé, sans qu'il y ait d'échange de chaleur avec l'extérieur :

$$dS = 0$$

Dès qu'une transformation non réversible (et en particulier la création de chaleur) a lieu à l'intérieur d'un système isolé, l'entropie de ce système augmente :

Tout phénomène irréversible donne lieu à une "création d'entropie".

La quantité d'entropie créée peut même servir à caractériser le degré d'irréversibilité du phénomène. (op. cit., p. 111)

## 7 ÉCHAUFFEMENT OU REFROIDISSEMENT D'UN SYSTEME NON ISOLE

Considérons un système non isolé thermiquement, constitué par un corps de capacité calorifique  $c$  et de masse  $m$ . Mettons-le au contact d'une source chaude : il subit une augmentation de température,  $dT$ , et la variation d'entropie est :

$$dS = dQ/T = m \cdot C \cdot dT / T$$

Puisque la quantité de chaleur reçue est égale à  $m \cdot c \cdot dT$ , l'intégrale est facile à calculer :

$$S_2 - S_1 = m \cdot C \cdot \text{Log } T_2/T_1$$

On vérifie ainsi que l'entropie du corps chauffé a augmenté. Par exemple, l'entropie d'une barre d'acier de 100 g qui est chauffée de 70 degrés augmente de 10,3 joules/degré. Ce calcul montre aussi que, si l'on avait mis le corps en contact avec une source froide, sa température aurait diminué, et son entropie aussi aurait diminué. Ceci n'est pas un paradoxe, puisque le système considéré n'est pas alors isolé, et que l'augmentation d'entropie est inéluctable seulement dans les systèmes isolés, tels que l'ensemble constitué par la Terre et la face du Soleil qui lui envoie de l'énergie.

La biosphère est un système fermé, mais non isolé, et il n'est pas étonnant que son entropie puisse diminuer. Il n'est pas nécessaire de faire appel à la thermodynamique des systèmes ouverts pour comprendre que l'entropie de la biosphère peut diminuer. Un système fermé (par exemple un aquarium) n'est pas obligatoirement un système isolé. Il est alors tout naturel que l'entropie d'un système biologique fermé et non isolé diminue, par exemple quand il est refroidi par le vent.

La formule précédente montre que l'entropie d'un corps est minimale quand sa température est égale au zéro absolu. Tous les corps sont alors sous forme solide, et tous les atomes sont immobiles (ils sont même orientés parallèlement au champ magnétique). On a alors affaire à un ordre exact et le principe de NERNST (nommé quelquefois troisième principe de la thermodynamique) affirme que l'entropie tend alors vers une valeur finie, que M. PLANCK a proposé de considérer comme nulle. Au contraire, quand la température d'un corps est supérieure au zéro absolu, les atomes ne sont plus parfaitement liés, et ils peuvent bouger les uns par rapport aux autres. Quand le corps arrive à la température de fusion, l'énergie de liaison des atomes devient égale à celle de l'agitation thermique, et ils peuvent se disposer assez librement les uns par rapport aux autres ; le corps passe alors à l'état liquide ; s'il est encore plus chauffé,

il passe à l'état gazeux, dans lequel les molécules s'agitent en désordre (cf. l'annexe C à la fin du présent chapitre).

Un animal est un système thermodynamique ouvert, qui absorbe essentiellement de l'énergie chimique ; il produit de l'énergie calorifique, de l'énergie mécanique (pour ses déplacements), et de l'énergie chimique, sous la forme de synthèse de nouvelles cellules ; il rejette aussi de l'énergie chimique dans ses déjections et dans les sous-produits de la respiration.

Le fonctionnement de ce système dépend de la température extérieure, et T. BIKAWA (1986) a ainsi observé que l'abaissement de 1°C de la température ambiante (entre 23°C et 13°C) augmente le "coefficient de transformation" de l'animal qu'il étudiait (coefficient qui est voisin de 3.700 cal/kg).

Plus généralement, la variation d'entropie est la somme de deux termes ; l'un est relatif aux échanges de chaleur du système avec l'extérieur, et il peut avoir un signe quelconque (il est nul seulement si le système est isolé) ; l'autre concerne les transformations internes au système, et il est toujours négatif (sauf dans le cas idéal d'une transformation interne parfaitement réversible).

## 8 EXTENSION AU DOMAINE MACROSCOPIQUE

Le passage direct du "microscopique" au "macroscopique" est rarement possible, en particulier parce que le "microscopique", à l'échelle atomique, n'est pas nettement continu. En particulier, les travaux de J. PERRIN, repris par N. WIENER ET B. MANDELBROT (1981) montrent que l'usage de fonctions non différentielles est nécessaire pour l'étude du mouvement brownien.

L'entropie est une grandeur "extensive" (voir le paragraphe 11), ce qui signifie que l'entropie de l'ensemble d'un système est exactement la somme de l'entropie de ses parties. En conséquence, il est possible de calculer l'entropie physique d'un système macroscopique tel qu'une barre de fer ou un moteur d'automobile ou même une forêt. L'entropie statistique est liée à l'incertitude quant à l'état du système, c'est-à-dire au nombre d'états microscopiques où peut se trouver le système observé. Si un observateur effectue une mesure qui réduit le nombre d'états possibles, il réduit aussi l'incertitude relative au système. Par exemple, si la température d'un kilogramme d'eau, sous la pression atmosphérique, est égale à 50°C, nous savons que cette eau est sous forme liquide. Cette remarque a conduit W. ZURECK (1989) à décomposer l'entropie physique en deux parties : l'entropie statistique et l'entropie algorithmique ; cette dernière est mesurée par la taille du programme informatique qui permet de codifier le résultat des mesures qui sont effectuées (KOLMOGOROV, 1965 ET CHAITIN, 1969).

Dans cette perspective, la complexité d'un système devient mesurable : c'est le nombre minimal d'informations du programme informatique capable de décrire le système. Cette mesure semble plus fine que celle de l'incertitude liée aux probabilités, qui dépend de l'"algèbre de probabilités" adoptée pour caractériser le système.

## 9 LE RAYONNEMENT DU CORPS NOIR

Le rayonnement émis par un corps noir exerce une pression sur les corps environnants ; quand le corps noir est placé dans le vide, son rayonnement "échauffe" le vide, parce que le vide a une capacité calorifique qui n'est pas absolument nulle.

La variation d'entropie correspondante peut être calculée (op. cit., p. 610) et il apparaît que la variation d'énergie interne est proportionnelle à la variation de température :

$$dU/U = 4.dT/T$$

$$\text{Log } U = 4.\text{Log}T + a$$

$$U = a.T^4$$

qui est la loi de STEFAN (cf. Annexe 1 - 1).

## 10 ENTROPIE ET NOMBRE DE COMPLEXIONS

Dans le cas des molécules d'un gaz, L. BOLTZMANN a défini, vers 1877, leurs états microscopiques (appelés "complexions") en caractérisant chaque molécule par ses coordonnées  $x, y, z$  et par le vecteur représentant sa quantité de mouvement  $M_{vx}, M_{vy}, M_{vz}$ .

Ce n'est pas par hasard que le mot « complexion » ressemble au mot « complexité ». Nous avons vu dans le chapitre 1, et en particulier dans le paragraphe 16, que cette complexité est le moyen qui leur permet d'augmenter la résistance aux perturbations, mais il faut reconnaître que cette notion est difficile à définir. KOLMOGOROV (1965) ET CHAITIN (1969) ont proposé de la mesurer par la longueur du programme informatique le plus court qui permette de reconstituer la structure. Par exemple, la suite 1, 1, 1, etc. ou la suite 134, 136, 138, etc. sont peu complexes. De même, les structures définies par la récurrence  $S_{n+1} = f(S_n)$  sont peu complexes, même si leur structure paraît confuse.

Un gaz parfait est complexe, au sens de Kolmogorov et Chaïtin, puisque toutes ses molécules sont indépendantes et que le programme devrait comporter autant de termes qu'il y a de molécules. Un gaz très peu dense, où les interactions entre molécules sont rares, est proche d'un gaz parfait. Une formalisation plus précise des hypothèses de Boltzmann et de leurs conséquences est donnée par L. SAINT-RAYMOND (2004, Pour la Science, n° 324 : 52-59).

Plusieurs complexions différentes peuvent correspondre au même état macroscopique (défini par la pression  $P$  et par le volume  $V$ ). Assimilons les états possibles à un ensemble de cases, et les molécules à un ensemble de  $N$  billes. Si toutes les billes sont dans la même case, cet état macroscopique correspond à une seule complexion. Si toutes les billes, sauf une, sont dans la case  $C_1$ , et si la bille isolée est dans une autre case  $C_2$ , cet état macroscopique peut être réalisé de  $N$  manières différentes puisque chacune des  $N$  billes peut être dans la case  $C_2$ . Si  $Q$  billes sont dans une case, et toutes les autres billes dans une autre case, le nombre de complexions correspondant est égal à :

$$N! / Q! \cdot (N - Q)!$$

Plus généralement, si  $Q_1$  billes sont dans la case 1,  $Q_2$  billes dans la case  $Q_2$ , etc.,  $Q_p$  billes dans la case  $p$ , le nombre de complexions possibles est égal à :

$$W = N! / Q_1! \cdot Q_2! \cdot \dots \cdot Q_p!$$

Ce nombre  $W$  est d'autant plus grand que son dénominateur est plus petit et que les nombres  $Q_1, Q_2, \dots, Q_p$  sont plus égaux entre eux. L'état le plus probable est celui où les molécules sont uniformément réparties entre tous les états possibles. On démontre que ceci correspond à une distribution où la "fonction de partition",  $Z$ , est de type exponentiel.

L'idée essentielle de BOLTZMANN a été de relier l'entropie et le nombre de complexions possibles, qui a toutes les chances d'augmenter avec le temps ; cette relation s'exprime très simplement par la relation :

$$S = k_B \text{Log } W$$

avec  $k_B$ , la constante de Boltzmann, =  $1,38 \cdot 10^{-16}$  si l'entropie,  $S$ , est exprimée en erg par degré Celsius.

$W$  est une fonction du nombre de particules, de leur masse, de l'énergie incluse, et du spin des particules. Ainsi, l'entropie d'une molécule-gramme d'hélium est égale à 30,1 joules par °K. Parallèlement, un shannon d'information est équivalent (et non égal) à  $9,52 \cdot 10^{-24}$  joules par °K. C. SAGAN (1977) a même calculé que l'information accumulée dans une Bactérie peut être estimée à  $3 \cdot 10^5$  shannons, alors que celle des Mammifères serait de  $10^{10}$  shannons.

L'état le plus probable est celui qui correspond à une répartition uniforme des molécules, donc à une densité constante en tous les points du gaz. Autour de ce maximum de probabilité, les fluctuations relativement probables sont réparties selon une distribution où les fluctuations les plus probables sont très peu différentes de la répartition uniforme. Ces fluctuations sont analogues au bruit de fond des appareils électroniques, et elles font que le principe de Carnot n'est qu'une première approximation. Dans le cas

d'un gaz parfait mono-atomique, les calculs conduisent à retrouver la formule générale  $PV = RT$ , en précisant que  $R$  est égal à la constante de BOLTZMANN, multipliée par le nombre d'AVOGADRO (nombre de molécules contenues dans 22,4 litres de gaz).

Si l'on refroidit le gaz, le nombre de complexions diminue, puisque les quantités de mouvement des molécules diminuent. A l'extrême, c'est-à-dire au zéro absolu, toutes les molécules ont une position déterminée et elles ont des vecteurs vitesse de même grandeur et de même direction. Un tel état est celui d'un cristal où tous les atomes sont orientés de la même manière par rapport au champ magnétique. C'est un état très improbable, qui est modifié par la moindre addition d'énergie (en fait, il est si improbable qu'il n'est jamais atteint). Ceci montre que l'information correspondant à la structure cristalline est très élevée, puisque la position de 3 atomes détermine celle de tous les autres.

L'hypothèse fondamentale de BOLTZMANN est que toutes les complexions possibles pour une masse de gaz à température connue et pression connue sont équiprobables. La probabilité d'un état macroscopique est alors proportionnelle au nombre de complexions qui permettent de le réaliser (op. cit., p. 489). Ceci revient à dire que toutes les complexions peuvent se réaliser successivement, et que les complexions qui se réalisent le plus souvent sont les plus probables. Autrement dit, l'augmentation d'entropie est synonyme de la tendance naturelle vers la réalisation des états les plus probables.

J'ai hésité à écrire le mot "naturelle" dans la phrase précédente, car il implique que nous observons un monde où il existe une nature abstraite sous-jacente à tous les phénomènes. Réflexion faite, je garde ce mot parce que la Science ne pourrait pas déployer sa richesse et sa splendeur s'il n'existait pas une Nature du monde qui en règle le fonctionnement et qui lui permet d'être intelligible.

## 11 ENTROPIE ET INFORMATION

La formule de Brillouin, qui est bien plus intéressante que celle de Shannon, donne l'information obtenue quand on observe l'arrivée d'un événement dont la probabilité est  $P$  :

$$I = \log_2 1/P$$

Cette formule donne, dans le cas présent une quantité d'information  $I$  :

$$I = \log_2 \prod_i Q_i / N !$$

avec  $Q_i$  = nombre de molécules qui sont dans l'état "i"

le symbole du produit des  $Q_i$ ,

et  $N$  = le nombre de molécules.

L'augmentation d'entropie correspond alors à une diminution de l'information liée à la connaissance de la répartition des  $N$  molécules dans tous les états possibles.

### Remarque 1

L'entropie est une grandeur physique "extensive", et les entropies de deux fractions A et B d'un système s'additionnent ( $S = S_A + S_B$ ), alors que les nombres de complexions se multiplient ( $N = N_A \times N_B$ ). C'est pourquoi il est logique que l'entropie soit une fonction logarithmique du nombre de complexions.

### Remarque 2

Il a été dit au cours du paragraphe précédent que la répartition statistique la plus probable est celle pour laquelle le nombre de complexion est maximal. En appliquant la formule approchée de Stirling :

$$\log N ! = N \cdot \log N - N$$

nous pouvons alors écrire :

$$I = N \cdot \log N - N + (\text{Somme } Q_i \cdot \log Q_i) - \text{Somme des } Q_i$$

soit, puisque  $N = \text{Somme des } Q_i$  :

$$I = N \cdot \log N - \text{Somme des } Q_i \cdot \log Q_i$$

$$I = - \text{Somme de } (Q_i \cdot \log Q_i) - N \cdot \log 1/N$$

$$I = - \text{Somme de } (Q_i/N \cdot \log Q_i/N)$$

soit encore, en appelant  $p_i$  la probabilité de trouver une molécule quelconque dans l'état  $i$  :

$$I = - \text{Somme de } p_i \cdot \log p_i$$

$$I = \text{Somme de } p_i \cdot \log 1/p_i$$

Cette quantité atteint bien son maximum lorsque les probabilités de tous les événements sont égales et l'on reconnaît ici la formule de Shannon, qui est une formulation inférentielle de la formule de Brillouin.

La formule de Shannon implique une inférence à un univers infini dont est tiré l'échantillon observé et il en résulte un "biais" dans l'estimation statistique de la quantité d'information. C'est pourquoi nous utiliserons la formule de Brillouin plutôt que celle de Shannon quand nous calculerons l'information qu'apporte l'observation de la localisation des plantes dans un échantillonnage systématique (§ 56) pour mesurer l'hétérogénéité de la végétation.

### Remarque 3

La notion d'information prend de plus en plus d'importance depuis quelques dizaines d'années et ce n'est pas par hasard que le mot « informatique » a été choisi pour la nouvelle science qui traite de l'information dans ses multiples aspects. Ainsi, tout système matériel est composé de particules élémentaires caractérisées par leur position, leur masse, leur spin, leur vitesse, leur charge électrique, etc. et toutes ces quantités sont de l'information qui peut être mesurée en bits. La loi de Margolus-Levitin dit qu'un minimum de temps est nécessaire pour transformer un de ces bits :  $t \geq h/4 E$ , où  $h$  est la constante de Planck ( $6,626 \cdot 10^{-34}$  joule . seconde) et  $E$  l'énergie nécessaire (en joules).

Or, selon la formule d'Einstein  $E = m c^2$ , il est possible de transformer l'énergie contenue dans un kilo de matière ordinaire pour transformer les bits qui caractérisent cette masse matérielle au rythme de  $10^{51}$  opérations par seconde. Cet ordinateur théorique serait même doté d'une structure en parallèle. (S. LLOYD ET Y. J. NG, Pour la Science, 325, 2004 : 30-37).

## 12 FLUCTUATIONS ET STABILITE

Par exemple, (op. cit., p. 512), prenons le cas de deux ballons de volume égal ; appelons  $W_p$  le nombre de complexions qui correspond à un état où  $M + p$  molécules sont dans le ballon A, et

$M - p$  molécules sont dans le ballon B. En reprenant le raisonnement indiqué à la page précédente, il vient :

$$W_p = \frac{2M!}{(M + p)! (M - p)!}$$

La formule de STIRLING conduit à :

$$W_p = W_m \cdot e^{-((p^2)/M)}$$

La probabilité maximale correspond à  $W_p = W_m$  qui est obtenu lorsque  $e^{((p^2)/M)} = 1$ , c'est-à-dire lorsque  $p = 0$ . Cette situation correspond exactement aux complexions où il y a le même nombre de molécules dans chacun des deux ballons.

La distribution de probabilité en fonction de  $p$  est de type gaussien, et un calcul simple pourra être fait en prenant le cas où  $p =$  racine carrée de  $M$  : on aura alors,  $W_p = W_m \cdot e^{-1}$ . Le nombre de complexions correspondant est de l'ordre de  $W_m/e$ , ce qui est loin d'être négligeable. Par exemple, si chaque ballon a un volume de 22,4 litres, le nombre de molécules,  $M$ , est égal au nombre d'Avogadro ; la racine carrée de  $M$  vaut environ  $2,5 \cdot 10^{11}$ , et il y a fréquemment ce nombre de molécules en excédent dans l'un des deux ballons. Ce chiffre peut paraître élevé, mais il faut bien voir qu'il se traduit seulement par une surpression de  $10^{-12}$  bar, qui reste trop faible pour être mesurée avec un manomètre. Dans l'atmosphère, ces fluctuations de la densité de l'air à l'échelle de la longueur d'onde de la lumière sont suffisamment intenses pour entraîner des variations de l'indice de réfraction, dont la conséquence est la couleur bleue du ciel. RICHARD FEYNMAN (1987, P. 137), après avoir montré comment les électrons périphériques d'un atome absorbent des photons incidents et ré-émettent des photons en diffusant la lumière apportée par les photons incidents, donne une explication plus générale : "Les atomes de l'air diffusent la lumière du Soleil et sont la cause de la couleur du ciel."

Cette thermodynamique probabiliste n'a pas dit son dernier mot. Elle provoque encore des discussions passionnées et passionnantes, sans doute parce qu'elles essaient de préciser le rôle du hasard dans la construction de notre monde.

### 13 LE HASARD ET LA NECESSITE

Dans les sciences modernes, le hasard joue un rôle que les savants du XIX<sup>ème</sup> siècle n'avaient pas imaginé parce qu'ils pensaient expliquer le fonctionnement de l'univers par un enchaînement de causes et d'effets, sans laisser de place au hasard (ce mot vient de l'arabe "Al Zahr" qui désigne le dé à jouer et A. Einstein se demandait si Dieu avait joué aux dés en créant le monde). La brèche principale dans ce bloc de certitudes est venue de la physique quantique où « la stricte causalité est fondamentalement et intrinsèquement indémontrable. Donc elle n'est plus un vrai concept scientifique. » (B. HOFFMANN, 1967, P. 175).

En dehors du domaine quantique, il est généralement admis que les mêmes causes déterminent les mêmes effets, mais, en pratique, on ne peut jamais réunir deux fois de suite exactement le même ensemble de causes, et les effets ne sont pas parfaitement déterminés, puisqu'ils subissent toujours des fluctuations plus ou moins amples. La répétition d'une expérience, même très soignée, ne donne jamais exactement les mêmes résultats. M. GIRAULT (1964) va même jusqu'à affirmer que "dans la plupart des expériences faites actuellement, tant en recherche théorique qu'en recherche appliquée, les modèles déterministes ne conviennent pas". Nous sommes aujourd'hui loin de Claude Bernard, qui pensait pouvoir affirmer en 1847 : "La statistique exclut le rationalisme... aussi voyons-nous la statistique disparaître dès qu' [une science] est constituée dans son ensemble ou dans ses parties. En effet, la statistique est surtout en faveur dans les sciences obscures et arriérées" !

Dans les sciences expérimentales, la connaissance de l'état initial d'un système ne suffit pas pour prédire son évolution future. C'est la cas lorsqu'une faible modification des conditions initiales (plus précisément lorsque son amplitude est égale ou inférieure à celle de la précision des mesures) rend possible une large gamme d'évolutions. C'est aussi le cas de l'évolution dynamique d'un système de trois corps massifs étudié par H. Poincaré à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, ou de la boule de billard dont le comportement après qu'elle ait frappé une des bandes latérales est assez précisément prédictible alors que le résultat du choc d'une autre boule dépend fortement du point d'impact. C'est aussi le cas de l'évolution des systèmes turbulents qui produit l'image du battement d'aile d'un papillon qui provoque une tempête (§ 863).

Plus généralement, il est possible de dire que les causes "occasionnelles" sont les conditions nécessaires et suffisantes pour qu'un effet ait toutes chances de se produire. Mais la cause causale, c'est-à-dire la raison pour laquelle ces conditions entraînent presque toujours le même effet échappent presque toujours : pourquoi le Soleil attire-t-il les planètes ?

Après Kant, F. ALQUIE (1953) se plaçant à un niveau très général, montre que les sciences ne peuvent pas expliquer la totalité de la réalité : "L'explication intégrale, la déduction universelle ne sont pas

possibles dans les sciences... On voit que, dans la plus grande partie de son domaine, la science nous donne, non la compréhension véritable que réclame notre raison, mais une illusion de compréhension ... Le physicien, connaissant la loi qui relie le passage du courant dans un filament et l'échauffement de ce filament, peut avoir l'impression qu'il comprend pourquoi la lampe s'allume. Mais il suffit de réfléchir pour s'apercevoir qu'il n'y a pas en tous ces cas de compréhension véritable. Comprendre, ce serait saisir le pourquoi, c'est-à-dire la CAUSE ou la FIN. Or, la science ne nous révèle que le comment, c'est-à-dire la loi"... "Nous en sommes réduits à constater seulement qu'un fait succède à un autre fait : toute loi n'est pour nous que l'expression d'une coïncidence constante".

H. Poincaré montre clairement, dans "La valeur de la science", que ce que nous avons coutume d'appeler causalité repose seulement sur la succession des phénomènes et que celle-ci est bien moins rigoureuse qu'on ne le pense habituellement. Il conclut même que les règles relatives à la succession des phénomènes "ne sont que le fruit d'un opportunisme inconscient". Cette remarque est pleinement valide dans le domaine de la botanique : E. LE FLOCH (1969) conclut de son travail sur le déterminisme des phénomènes qu'il serait illusoire de prétendre "expliquer" des phénomènes, puisque les enchaînements chronologiques eux-mêmes ne peuvent être caractérisés sans aléas.

VON NEUMANN, cité par G. CHAITIN (2003), partageait cette opinion : « Le point de vue selon lequel la physique théorique n'explique pas les phénomènes, mais seulement les classe et les relie est aujourd'hui adopté par la plupart des physiciens théoriciens ».

E. GOBLOT (1899) reprend les arguments d'Aristote pour aller encore plus loin : "La convenance [entre les parties du système] est donc le premier indice de la finalité, comme la coïncidence est le premier indice de la causalité. La coïncidence exceptionnelle ou rare peut être accidentelle ; le signe de la causalité, c'est la coïncidence constante. De même, la convenance simple peut être fortuite ; le signe de la finalité, c'est la convenance complexe."

Dans ces conditions, le hasard n'est pas un événement sans cause, un cache-misère de nos incertitudes, un accroc temporaire au déterminisme, qui se rétrécirait comme peau de chagrin au fil de l'accroissement de nos connaissances. N'oublions pas que le hasard est, depuis Kolmogorov, un concept mathématisable et que le calcul des probabilités est maintenant fondé sur une axiomatique parfaitement rigoureuse qui dote les événements possibles d'attributs précis (par exemple, la somme de leurs probabilités est égale à l'unité) ; le hasard correspond seulement au fait que l'événement peut survenir ou ne pas survenir au cours de l'expérience, mais ce n'est pas un "moteur" capable de faire apparaître des événements inattendus.

Finalement, l'attitude la plus équitable me semble être celle de Bohm : "Toute loi néglige une infinité de facteurs aux niveaux inférieurs. En tant qu'approximative, elle est alors une loi statistique. Mais si l'on pénètre plus profondément, on atteint les causes des fluctuations et on obtient une loi stricte ; seulement, comme ce niveau plus profond est à son tour soumis à des facteurs dont il n'a pas été tenu compte, la loi apparaîtra elle aussi comme statistique. De ce point de vue, une loi a nécessairement un aspect déterministe et un aspect statistique".

En fait, les lois que l'on présente comme déterministes sont des lois dont l'intervalle de confiance est très petit. En contrôlant de plus en plus, a priori ou a posteriori, les facteurs du milieu, les biologistes peuvent réduire les intervalles de confiance et tendre vers des lois de plus en plus déterministes ; mais ces contrôles de plus en plus fins font régulièrement apparaître des problèmes nouveaux et les phénomènes deviennent de plus en plus complexes. Augmenter la sensibilité d'un instrument de mesure oblige habituellement, en contrepartie, à en limiter l'emploi à des conditions restreintes.

J. MONOD (1970), soulignait le rôle du hasard en écrivant que "L'univers n'était pas gros de la vie, ni la biosphère de l'homme". Il est effectivement difficile de trouver une solution simple au problème de l'équilibre entre le hasard - dont F. JACOB (1981, P. 43) reconnaît l'intervention dans l'évolution des êtres vivants - et la « nécessité » des lois qui règlent, de manière déterministe, toutes les réactions physiques et chimiques. Mais les exemples précédents montrent la voie d'une solution générale.

Ainsi, en génétique, la dérive génique, l'effet fondateur, le fonctionnement des gènes neutres (§ 25 et 26) ne sont pas strictement déterminés par la sélection naturelle de Darwin mais reposent sur des processus probabilistes rigoureusement analysables. Pour voir comment le hasard et la nécessité sont deux aspects complémentaires des processus, il suffit de penser à la première molécule de porphyrine, qui est apparue à

un instant précis et en un certain lieu, mais qui aurait pu se produire à d'autres instants et en un grand nombre d'autres lieux. Les réactions chimiques qui produisent les porphyrines sont parfaitement déterminées, sans aléa ni liberté, mais l'incertitude sur le lieu et l'instant est laissée - consciemment et volontairement - dans le domaine du hasard aussi longtemps que nous n'avons pas essayé de lever cette incertitude.

En écologie, E. PIELOU (1969) prend nettement position : "Whether or not one regards all natural occurrences as fundamentally determinate, it is clearly impracticable to treat them as such, and a model in which chance mechanisms are incorporated is sure to be nearer the truth than a deterministic one". (Que l'on considère les phénomènes naturels comme déterminés ou non, il est clairement impossible de les traiter comme totalement déterminés, et un modèle probabiliste est certainement plus proche de la vérité qu'un modèle déterministe). Et même, un peu plus loin, elle considère que les modèles déterministes sont tout juste dignes d'être examinés "as a preliminary to studying their modern stochastic versions".

#### 14 QUELQUES REMARQUES FINALES

Il faut encore savoir que la mécanique statistique de BOLTZMANN repose sur un principe de discernabilité des molécules qui ne correspond pas exactement à la réalité physique connaissable. C'est pourquoi des statistiques plus élaborées ont été proposées. Celle de FERMI-DIRAC qui inclut le principe d'exclusion de PAULI et s'applique aux particules dont le spin est demi-entier, et celle de BOSE-EINSTEIN qui est utilisée pour les particules à spin nul ou entier. Nous reviendrons sur ce point dans l'annexe du chapitre 5 où les modèles d'évolution de la structure de la végétation seront évoqués.

L'analyse de BOLTZMANN prête beaucoup d'attention à la cinématique des atomes, et conduit à une conception de l'entropie très liée au "désordre" spatial ; j'ai suivi cette conception dans les paragraphes précédents, parce qu'elle est extrêmement commode pour aider un biologiste à comprendre des notions un peu abstraites. Il faut pourtant savoir que les statistiques plus complexes conduisent à une interprétation plus fine, associée au nombre des états énergétiques accessibles aux éléments du système considéré.

L'augmentation d'entropie n'est alors plus liée uniquement au désordre spatial, et une "structuration" spatiale peut accompagner une augmentation d'entropie. Tel est sans doute le cas des molécules qui nageaient dans le "bouillon tiède" des lagunes précambriennes exposées à un intense rayonnement ultraviolet ; l'énergie fournie par le Soleil a pu alors être à l'origine de la transformation de ces molécules en macro-molécules, puis en organismes vivants.

#### ANNEXE 1-3

##### LES TROIS ETATS PRINCIPAUX DE LA MATIERE

Ce sont l'état solide, l'état liquide et l'état gazeux. Dans chacun d'eux, le corps peut être réchauffé, si on lui fournit de la chaleur, ou refroidi si il cède de la chaleur. Ce type d'échange de chaleur correspond à la "chaleur sensible".

La quantité de chaleur qui fait varier de 1°C l'unité de masse d'un corps est sa "chaleur massique" (symbolisée par  $c_p$ , et mesurée en calories par gramme de masse, pour 1°C) qui est presque inversement proportionnelle à sa masse atomique (en grammes):

|                  | A.cP | A.cP  | masse atomique |
|------------------|------|-------|----------------|
| <b>Beryllium</b> | 9    | 0,39  | 3,5            |
| <b>Bore</b>      | 10,8 | 0,24  | 2,6            |
| <b>Aluminium</b> | 27   | 0,21  | 5,7            |
| <b>Fer</b>       | 55,8 | 0,11  | 6,1            |
| <b>Cuivre</b>    | 63,5 | 0,093 | 5,9            |
| <b>Argent</b>    | 108  | 0,055 | 5,9            |
| <b>Antimoine</b> | 122  | 0,050 | 6,1            |

|       |     |       |     |
|-------|-----|-------|-----|
| Plomb | 207 | 0,031 | 6,4 |
|-------|-----|-------|-----|

La chaleur massique de l'eau est égale, par définition, à 1. Celle de la croûte terrestre est voisine de 0, ...

#### Les changements d'état

Pour faire passer un corps de l'état solide à l'état liquide (liquéfaction), de l'état liquide à l'état gazeux (vaporisation), de l'état solide à l'état gazeux (sublimation), il faut lui fournir de la "chaleur latente", ou diminuer la pression. Examinons ce dernier cas : les relations entre la pression et la température sont commodément représentées par un diagramme (figure 1 de la présente annexe, pour le cas de l'eau). Le point triple est celui où une très faible variation de température ou de pression peut faire passer le corps de l'état solide à l'état liquide ou à l'état gazeux, et inversement.

Pour comprendre ce qu'est le "point critique", il suffit de reprendre l'expérience classique du baromètre mouillé, en introduisant lentement de l'eau dans le tube d'un baromètre à mercure (figure 2a), et en laissant la température constante (transformation isotherme, au cours de laquelle l'air ambiant fournit de la chaleur au système observé, à raison de 539 calories pour évaporer 1 g d'eau).

Les premières gouttes d'eau qui arriveront dans le vide situé en haut du tube se vaporiseront immédiatement, puisque la pression est très faible (point l sur la figure 1). La vapeur d'eau ainsi produite exerce alors une pression, qui fait légèrement baisser le mercure (figure 2b), et le point figuratif remonte vers m sur la figure 1.

Si on continue à introduire de l'eau, la pression monte jusqu'à la pression d'équilibre entre l'état liquide et l'état gazeux, et le point figuratif vient exactement en m. A partir de ce moment, l'eau supplémentaire ne se vaporise plus, et la pression reste constante (figure 2c) : la pression d'équilibre ainsi atteinte est la "tension de vapeur saturante" de l'eau, à la température considérée. Si on augmente la pression, en descendant le tube, la quantité de vapeur va diminuer, et l'eau se liquéfiera totalement (point n sur la figure 1).

En combinant les variations de pression et les variations de température, il est possible de suivre le trajet q-r-s-t ; l'eau passe alors en bloc de l'état liquide à l'état gazeux sans que l'observateur puisse voir à aucun moment une séparation entre des gouttes d'eau et la vapeur d'eau. Cette transition insensible peut se produire pour d'infimes variations de pression ou de température autour du point C (figure 1), qui est le "point critique" de l'eau.

La représentation complète de ces phénomènes se fait dans un espace à trois dimensions (T, P et V = volume), qui peut être schématisé sur la figure 3, où cinq courbes d'équilibre entre la pression et le volume sont tracées, chacune d'elles correspondant à une température. La courbe T1 correspond à l'expérience du baromètre mouillé, où l'on va du point l au point p ; le point m correspond à l'instant où apparaît la première goutte de condensation de la vapeur d'eau dans le haut du tube ; la pression et la température se stabilisent alors et le point figuratif va jusqu'à n, où toute l'eau est sous forme liquide ; la courbe qui va de n à p correspond ensuite à la compression de l'eau : pour diminuer un peu le volume de l'eau liquide, il faut exercer une très forte pression.

Les courbes T2 et T3 représentent la même succession de phénomènes que la courbe T1, mais à des températures plus élevées. La courbe T4 correspond exactement au passage par le "point critique". Pour la courbe T5, à une température encore supérieure, l'eau n'apparaît jamais à l'état liquide, mais la courbe de compression de la vapeur d'eau est encore irrégulière. La courbe T5 représente la compression de la vapeur d'eau à une température supérieure à celle du "point critique" ; elle est voisine de l'hyperbole qui correspond à la loi de Mariotte :

$$P \cdot V = \text{constante}$$

Application à la climatologie

Sur la Terre, l'eau se trouve sous forme de glace, d'eau liquide et de vapeur d'eau. Le système thermodynamique de l'atmosphère met donc en jeu les 6 changements d'état :

- - l'évaporation de l'eau liquide, à la surface des océans, des sols et des feuilles des plantes (on parle alors souvent d'évapo-transpiration (§ 315) ; l'eau s'évapore seulement si elle prélève dans son environnement une importante chaleur "latente" de vaporisation
- - la condensation de la vapeur d'eau (qui est transparente) en particulier pour produire les nuages ; elle produit la même quantité de chaleur latente de condensation;
- - la liquéfaction de la glace des banquises, des glaciers et des icebergs, qui exige la chaleur "latente" de liquéfaction ;
- - la solidification de l'eau liquide dans les nuages de haute altitude (les cirrus), dans les montagnes et à la surface des océans ;
- - la sublimation de la glace pour produire de la vapeur d'eau sur les banquises, les névés et les glaciers ;
- - la solidification directe de la vapeur d'eau dans les nuages.

#### ANNEXE 1-4

#### LES STRUCTURES DISSIPATIVES CHIMIQUES

Les structures dissipatives chimiques ont été étudiées par I. Prigogine et, en France, par le Centre Paul Pascal (Courrier du CNRS 1978, supplément au n°27 : 74 -76). Les chimistes ont ainsi observé que des réactions telles que celle obtenue en mettant en présence l'iodate de potassium et l'eau oxygénée produisent des oscillations régulières lorsque certaines "contraintes" sont maintenues. Ces contraintes peuvent être la température, l'agitation, les concentrations des réactifs, etc. Dans un espace ayant pour coordonnées les contraintes (espace des contraintes) on peut déterminer le (ou les) domaines d'existence de ces états oscillants.

Lorsque toutes les contraintes sont convenablement maîtrisées, la période est stable à mieux que  $10^{-2}$  près. Aussi peut-on confier à la réaction chimique la fonction de régulateur dans une véritable "horloge chimique". L'intérêt n'est évidemment pas de constituer un nouveau type de garde-temps, bien incapable de concurrencer les horloges atomiques ou même mécaniques, mais de matérialiser le temps thermodynamique, conceptuellement distinct du temps de la mécanique.

Quelquefois, pour un même jeu de contraintes, le système chimique peut se trouver dans deux états différents, suivant les données de son histoire. Un cycle de variation de la contrainte s'accompagne alors de deux transitions, ayant lieu l'une à l'aller et l'autre au retour, pour des valeurs différentes de la contrainte. C'est là un phénomène typique d'hystérésis. Le système chimique possède alors une mémoire.

Certains états stationnaires, situés dans le voisinage immédiat du domaine des états oscillants, réagissent de façon très particulière à une perturbation. Celle-ci consiste par exemple en l'addition brusque d'une espèce chimique intermédiaire telle que l'iode. Tant que cette addition ne dépasse pas un certain seuil, l'état initial se restaure rapidement. En revanche, au-delà, le retour à l'état initial est non seulement beaucoup plus long, mais surtout s'accompagne d'une variation de composition du milieu indépendante de l'amplitude de la perturbation appliquée et nettement plus importante qu'elle. Pour fixer les idées, la concentration d'iode peut se trouver réduite temporairement d'un facteur 6 à la suite d'une perturbation de l'ordre de 10%. On assiste donc à une amplification considérable de la perturbation chimique, vis-à-vis de laquelle le milieu est qualifié pour cette raison, d'excitable.

L'état stationnaire étant établi, on peut appliquer au système une contrainte supplémentaire sous forme d'un flux constant d'une espèce intermédiaire, l'iode dans ce cas. Tant que ce flux reste faible, il se produit une légère augmentation de la concentration d'iode dans le réacteur, comme on s'y attend. Mais, fait peu ordinaire, cette concentration diminue brutalement lorsque le flux dépasse un seuil critique, et se fixe même à une valeur inférieure à celle de la quantité injectée. Une multistabilité est certainement à l'origine de ce résultat paradoxal.

En prenant en compte l'effet de la diffusion dans un tel système, on démontre qu'une structuration de l'espace particulièrement stable peut naître, dans certaines conditions, de la compétition entre réaction chimique et diffusion.

La loi la plus générale qui règle les phénomènes qui viennent d'être décrits est que le flux d'énergie qui traverse le système se maximise spontanément (il reste à voir si la production d'entropie se maximise aussi).

Le franchissement de la frontière séparant deux domaines s'accompagne évidemment d'une modification de la dynamique du système. Tant que l'on reste assez loin d'une telle frontière, les équations macroscopiques déterministes suffisent pour rendre compte du comportement du système. Au contraire, plus on s'en rapproche, plus les fluctuations prennent d'importance, à tel point même que les éléments stochastiques finissent par devenir prépondérants. Ipso facto, la description déterministe est inopérante et ne permet plus alors de prévoir le comportement du système (le problème du déterminisme est longuement discuté dans le paragraphe 93).

A tous les niveaux, qu'il s'agisse de populations, de molécules, de cellules ou d'individus, le monde vivant nous offre de multiples exemples d'organisation spatio-temporelle et de multistabilité. Le rapprochement avec les phénomènes décrits ci-dessus s'impose tout naturellement à l'esprit, mais il ne donne que des analogies, et non pas des explications.

#### Bibliographie partielle

- (1) Sadi Carnot, *Réflexions sur la puissance motrice du feu* (1824) (Gabay, 1990)
- (2) Alfred Lotka, *Contribution to the energetics of evolution* (Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 1922).
- (3) Alfred Lotka, *Natural Selection as a Physical Principle* (Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 1922).
- (4) Ilya Prigogine, *Introduction to Non-equilibrium Thermodynamics* (Wiley, Intl. 1962).
- (5) Appelée Gaïa par l'environnementaliste James Lovelock en 1969
- (6) Garth Paltridge, *Climate and thermodynamic systems of maximum dissipation* (Nature 279, p. 630, 1979).
- (7) Un résultat semblable a été obtenu pour Mars et Titan.
- (8) Roderick Dewar, *Maximum Entropy Production and Non-equilibrium Statistical Mechanics* (in *Non-equilibrium Thermodynamics and the Production of Entropy*, Springer Verlag, 2006).
- (9) En théorie des jeux, le "dilemme du prisonnier" montre que deux individus qui ne peuvent pas communiquer n'ont pas intérêt à coopérer.
- (10) Voir par exemple: Suzan Blackmore, *The meme machine* (Oxford Univ. Press, 1999).
- (11) Eric Chaisson, *Cosmic Evolution: The Rise of Complexity in Nature* (Harvard Univ. Press, 2002).
- (12) Jared Diamond, *Effondrement: Comment les sociétés décident de leur disparition ou de leur survie* (Gallimard, 2006).
- (13) Per Bak, *How nature works, the science of self-organized criticality* (Springer Verlag, 1999).
- (15) André Leroi-Gourhan, *Mécanique vivante* (Fayard, 1983).
- (16) Scott Camazine et al., *Self-Organisation in Biological Systems* (Princeton Univ. Press, 2003).

Ce document est régulièrement mis à jour par le Groupe de la Graineterie (18410 Brinon), qui comprend 7 personnes de compétences très diverses (Institut d'études politiques de Paris, ESSEC, École supérieure de commerce de Montpellier, DEA Institut d'études politiques de Paris, Expert-comptable, École supérieure de commerce Tours, Ingénieur civil des Eaux et Forêts, Doctorat ès sciences, Licence de philosophie.

A titre de comparaison, les ondes sonores sont des vibrations mécaniques de l'air (et non pas des ondes électro-magnétiques), et leur longueur d'onde est comprise entre 200 hectoherz et 20 kiloherz. Les ultrasons ont des fréquences supérieures à 20 kiloherz et les infrasons des fréquences inférieures à 200 hectoherz.

En outre, la Terre tourne autour du Soleil (dans le plan de l'écliptique) à la vitesse de 108.000 km/h, soit 27,8 km/sec ; la Voie lactée, notre galaxie, fait un tour autour de son centre en 250 millions d'années, soit 972.000 km/h pour le Soleil et ses planètes ; elle a ainsi effectué environ 18 tours depuis sa naissance ; par rapport à ses voisines, elle fonce dans le cosmos à 2.160.000 km/h et s'approche de la belle nébuleuse d'Andromède, qu'elle percutera dans 5 milliards d'années ; notre groupe local de galaxies file vers l'amas

de la Vierge, qui regroupe un millier de galaxies et vers le super amas de l'Hydre et du Centaure. Plus près de nous, la Lune tourne sur elle-même en 27 jours, très exactement, à la suite d'un phénomène de résonance et c'est pourquoi elle nous présente toujours la même face.

De l'âme, Livre II, ch 1 : 412 a-b

Table des matières

## CHAPITRE 1

Introduction

### LE RAYONNEMENT SOLAIRE ET SES ROLES MAJEURS EN ECOLOGIE

#### 11 LE RAYONNEMENT SOLAIRE

111 La quantité d'énergie solaire qui atteint la Terre

111.1 La constante solaire

111.2 L'origine des photons solaires

111.3 Les variations locales de l'énergie reçue

112 La qualité de l'énergie radiative : sa longueur d'onde

113 La gamme du rayonnement « visible »

114 L'alternance des jours et des nuits

#### 12 LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

121 Le bilan énergétique global de la Terre et de l'atmosphère

122 Les profils verticaux de température dans la haute atmosphère

123 La stabilité et l'instabilité de l'air dans la basse atmosphère

123.1 Explication générale

123.2 Les nuages

123.3 Les gradients atmosphériques

124 Les mouvements horizontaux de la basse atmosphère

#### 13 LES PRINCIPAUX CLIMATS DU MONDE

131 La zone équatoriale

132 Les zones tropicales

133 Les zones des grands déserts

134 Les zones méditerranéennes

135 Les zones tempérées

136 Les zones polaires

137 Vue d'ensemble : une classification générale des climats

#### 14 LES PHENOMENES CLIMATIQUES REGIONAUX ET LOCAUX

141 Les moussons

142 La brise de terre et la brise de mer

143 Les brises de montagne

144 Le foehn

145 Les cyclones

#### 15 LES TYPES DE TEMPS

#### 16 LA NATURE DE LA VIE : UNE TRANSMISSION D'INFORMATION

161 Qu'est-ce que la vie ? (le paradoxe de Schrödinger)

162 La vie est régie par les lois de la physique

162.1 Aspects biochimiques

162.2 Aspects thermodynamiques

162.3 Entropie, néguentropie et information

162.31 UN RETOUR DE PENDULE

162.32 L'EVOLUTION SPONTANEE DES SYSTEMES ISOLES

162.33 INDETERMINATION ET INFORMATION

162.33 NEGUENTROPIE ET INFORMATION

163 Évolution des systèmes et stabilité

163.1 Entropie maximale et structuration

163.2 La lenteur des transformations énergétiques

163.3 L'inertie des systèmes énergétiques et les chemins anastomosés

164 Stabilité et probabilité : la résistance aux perturbations

164.1 Ce qui caractérise la vie

164.2 Stabilité et structures spatiales

164.3 Rappel de quelques définitions relatives à la stabilité

164.4 Déflexion et rétablissement 51

164.5 Types et degrés de stabilité : le modèle des "montagnes russes"

164.6 Les plantes menacées et les montagnes russes

164.7 La vulnérabilité et la sensibilité de la végétation

165 Stabilité des systèmes et "organisation"

ANNEXE 1-1

**RUDIMENTS DE PHYSIQUE DU RAYONNEMENT**

1 Principes (cf. en particulier, G. BRUHAT, 1962)

2 Loi de Stefan-Boltzmann (1879 ou 1869)

2.1 Énoncé

2.2 Application

3 Loi de Wien (1894 ou 1874)

4 LOI DE KIRCHOFF (CORPS NON NOIR)

5 Pression de radiation et densité d'énergie

6 Application à la télédétection

ANNEXE 1-2

**RUDIMENTS DE THERMODYNAMIQUE**

(CF., EN PARTICULIER, G. BRUHAT, 1962)

1 Typologie des systèmes thermodynamiques et des transformations

1.1 Systèmes isolés

1.2 Systèmes fermés et non-isolés

1.3 Systèmes ouverts

1.4 Réversibilité

1.5 Tableau d'ensemble

2 Le premier principe de la thermodynamique

3 Formulation fine du premier principe - Définition de l'énergie interne (G. Bruhat, 1962, op. cit., chap. VIII)

4 Le deuxième principe de la thermodynamique

5 Définition thermodynamique de l'entropie

6 Entropie et irréversibilité

7 Échauffement ou refroidissement d'un système non isolé

8 Extension au domaine macroscopique

9 Le rayonnement du corps noir

10 Entropie et nombre de complexions

11 Entropie et information

12 Fluctuations et stabilité

13 Le hasard et la nécessité

14 Quelques remarques finales

ANNEXE 1-3

**LES TROIS ETATS PRINCIPAUX DE LA MATIERE**

Les changements d'état

Application à la climatologie

ANNEXE 1-4

**LES STRUCTURES DISSIPATIVES CHIMIQUES**

**BIBLIOGRAPHIE PARTIELLE**