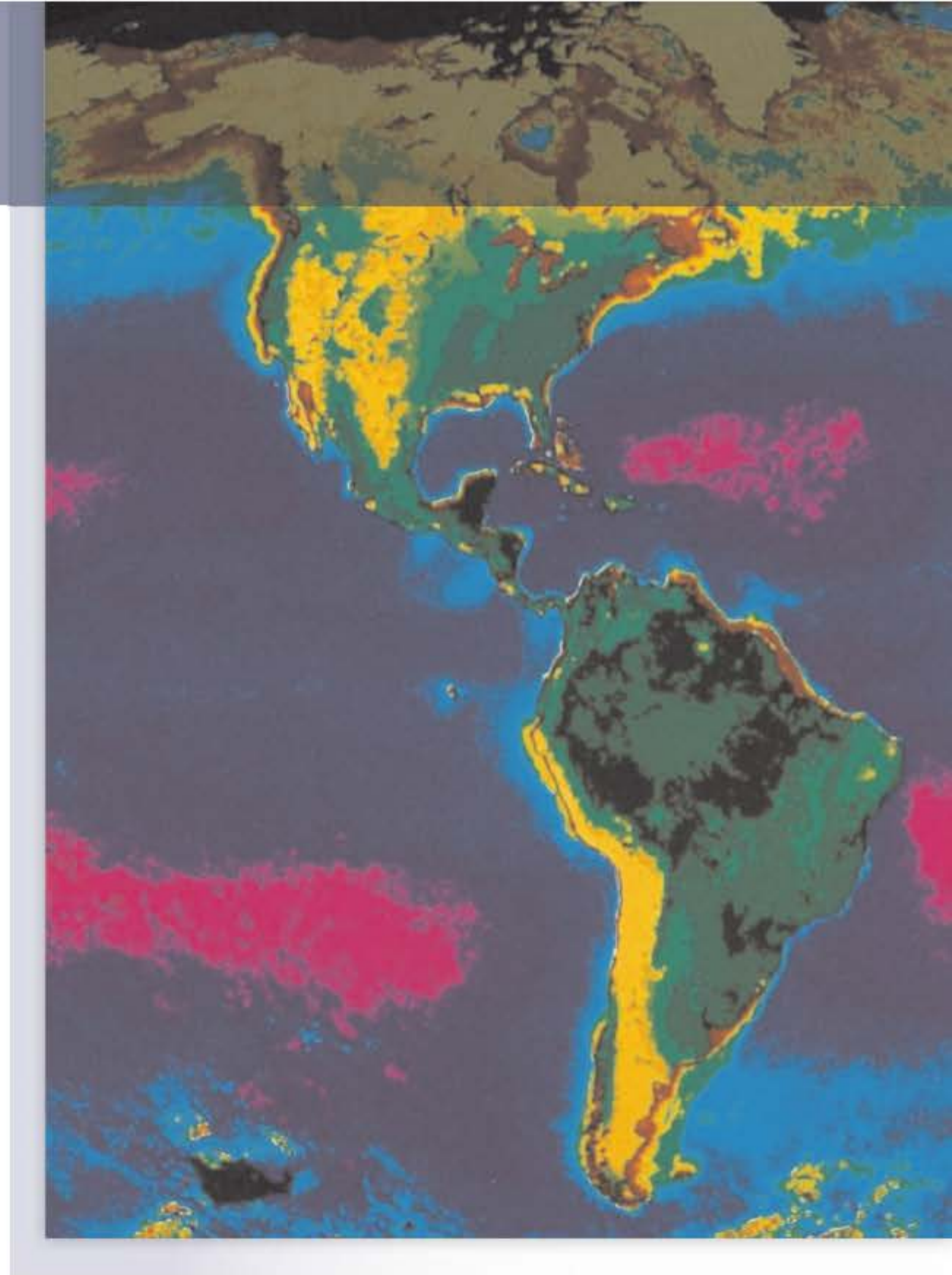


CHAPITRE 58

La biosphère

Aperçu du chapitre

- 58.1 Influence du soleil, du vent et de l'eau sur les écosystèmes
- 58.2 Les biomes terrestres
- 58.3 Les habitats d'eau douce
- 58.4 Les habitats marins
- 58.5 Impact humain sur la biosphère : pollution et épuisement des ressources
- 58.6 Impact humain sur la biosphère : le changement climatique



Introduction

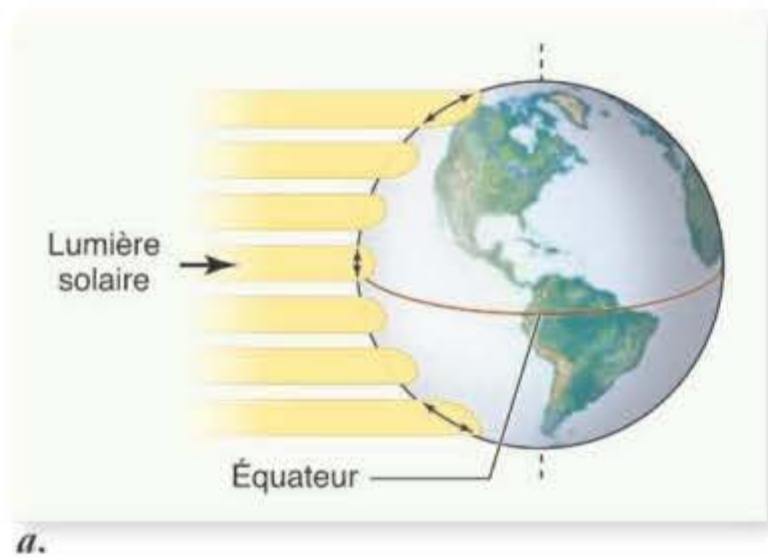
La biosphère comprend toutes les communautés vivant sur la terre, depuis la profusion de la vie dans les forêts pluviales tropicales jusqu'aux communautés planctoniques de tous les océans. Dans son sens le plus large, la répartition de la vie sur la terre traduit les variations dans les environnements des milieux abiotiques du globe, comme les variations de la température et de la disponibilité en eau. La figure de cette page est une image satellite des Amériques basée sur des données réunies pendant huit ans. Les couleurs sont en relation avec l'abondance relative de la chlorophylle, indicateur de la richesse des communautés biologiques. Le phytoplancton et les algues donnent les zones rouge foncé dans les océans et le long des côtes. Les zones en vert et en vert foncé sur la terre ferme ont une forte productivité primaire (comme les forêts prospères), tandis que les zones jaunes comprennent les déserts des Amériques et les toundras de l'extrême nord, beaucoup moins productifs.

58.1 Influence du Soleil, du vent et de l'eau sur les écosystèmes

Objectifs

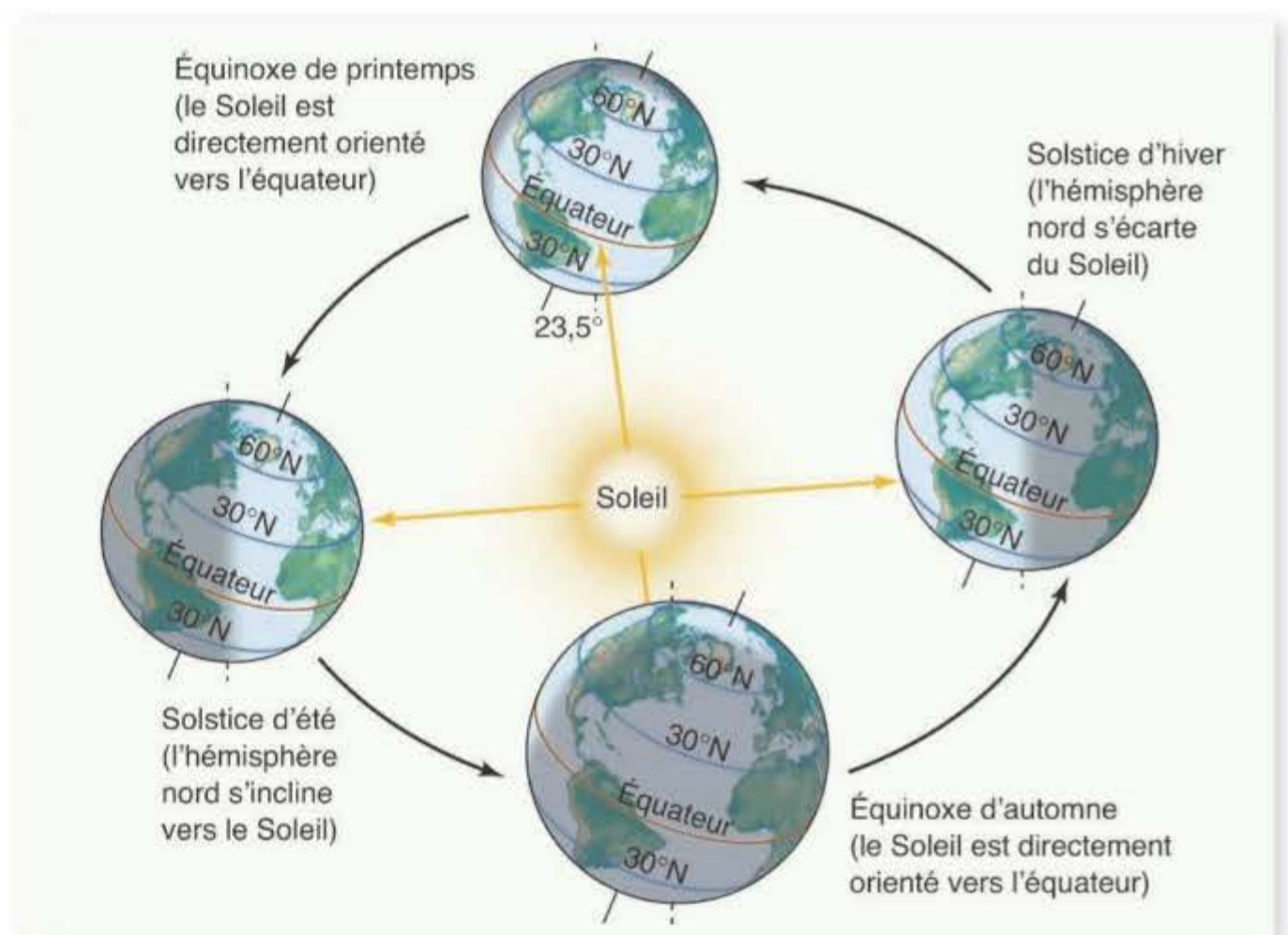
1. Décrire les changements de direction du vent et des courants en fonction de la latitude.
2. Expliquer l'effet Coriolis.
3. Montrer comment la température change avec l'altitude et la latitude.

La répartition générale de la vie sur la Terre est fortement influencée par (1) la quantité de rayonnement solaire qui atteint les différentes parties du globe et ses variations saisonnières et (2) la circulation atmosphérique globale et les types de circulation océaniques qui en résultent. Des caractéristiques locales, comme le type de sol et l'altitude, interagissent avec la répartition globale de la lumière solaire, des vents et des courants marins pour déterminer les conditions auxquelles la vie est soumise et donc la répartition des écosystèmes.



a.

Figure 58.1 Les relations entre la Terre et le Soleil sont essentielles pour déterminer la nature et la répartition de la vie terrestre. *a.* Un faisceau d'énergie solaire frappant la Terre aux latitudes moyennes s'étale sur une surface plus grande que le même faisceau arrivant près de l'équateur. *b.* La rotation de la Terre autour du Soleil affecte profondément le climat. Dans les hémisphères nord et sud, les températures se modifient selon un cycle annuel parce que l'axe de la Terre n'est pas perpendiculaire au plan de l'orbite et, par conséquent, chaque hémisphère est incliné vers le Soleil pendant certains mois et s'en écarte pendant les autres.



b.

L'énergie solaire et la rotation de la Terre influencent la circulation atmosphérique

La Terre reçoit du Soleil une grande quantité d'énergie sous la forme de rayonnement électromagnétique dans les longueurs d'onde visibles et proches du visible. Chaque mètre carré de la haute atmosphère reçoit quelque 1400 joules par seconde (J/sec), équivalant à quatorze ampoules de 100 watts.

Pendant la traversée de l'atmosphère, l'intensité et les longueurs d'onde de la lumière solaire sont modifiées. Environ la moitié de l'énergie est absorbée et la moitié atteint la surface terrestre. Les gaz de l'atmosphère absorbent fortement certaines longueurs d'onde, tandis que d'autres peuvent passer librement. Par conséquent, la composition en longueurs d'onde de la lumière solaire arrivant à la surface terrestre diffère de celle qui est émise par le Soleil. Par exemple, la bande des UV-B est fortement absorbée par l'ozone (O_3) de l'atmosphère et cette longueur d'onde est grandement réduite dans l'énergie solaire qui atteint la surface de la Terre.

Comment le rayonnement solaire affecte le climat

Certaines parties de la surface terrestre reçoivent plus d'énergie solaire que d'autres. Ces différences ont une grande influence sur le climat.

La principale raison de ces différences provient du fait que la Terre est une sphère, ou à peu près (figure 58.1a). Les tropiques sont particulièrement chauds parce que les rayons du Soleil arrivent presque perpendiculairement à la surface terrestre dans les régions proches de l'équateur. Plus près des pôles, l'angle d'incidence des rayons solaires répartit l'énergie sur une surface plus grande et fournit moins d'énergie par unité de surface. La figure 58.2 montre que c'est près de l'équateur (0° de latitude) que la température annuelle est la plus élevée.

L'orbite annuelle de la Terre autour du Soleil et sa rotation quotidienne sur son axe sont aussi des facteurs importants déterminant la répartition du rayonnement solaire et ses effets sur le climat (figure 58.1b). L'axe de rotation de la Terre n'est pas perpendiculaire à son plan de révolution autour du Soleil. Cet axe étant incliné d'environ $23,5^\circ$, les saisons se succèdent sur l'ensemble du globe, surtout aux latitudes éloignées de l'équateur. Par exemple, l'hémisphère nord s'incline vers le Soleil pendant certains mois, mais s'en écarte pendant d'autres, ce qui est à l'origine

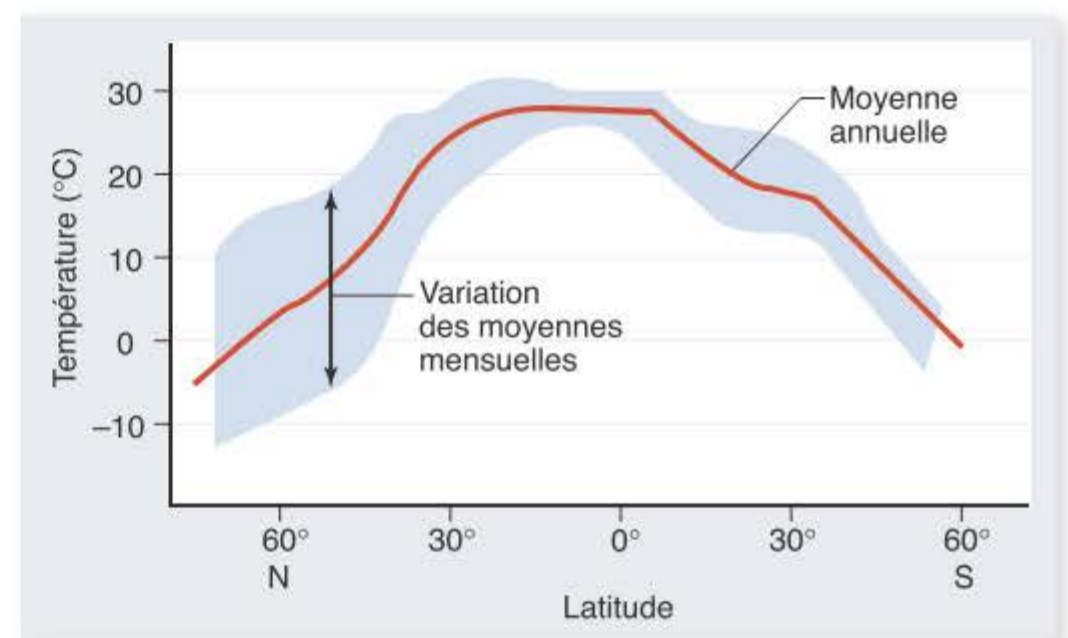


Figure 58.2 La température annuelle moyenne varie avec la latitude. Le trait rouge représente la température annuelle moyenne à différentes latitudes allant du pôle nord à gauche vers l'Antarctique à droite ; l'équateur est à 0° de latitude. À chaque latitude, le bord supérieur de la zone bleue est la température mensuelle moyenne la plus élevée observée sur tous les mois de l'année et le bord inférieur est la température mensuelle moyenne la plus basse.



Analyse de données Quelles sont les relations entre les variations saisonnières de température et la latitude ? Comment les expliquer ?

de l'été et de l'hiver ; plus on s'éloigne de l'équateur, plus est grande la différence entre l'été et l'hiver (figure 58.2).

Circulation globale dans l'atmosphère

L'air chaud a tendance à s'élever par rapport à l'air froid parce que l'agitation de ses molécules augmente avec la température et sa densité diminue. Ainsi, le réchauffement solaire intense de la surface terrestre aux latitudes équatoriales fait remonter l'air à partir de la surface vers la haute atmosphère. Cet air contient normalement beaucoup de vapeur d'eau ; l'air contient en effet plus d'eau quand il est chauffé et, en outre, le rayonnement solaire intense à l'équateur fournit la chaleur nécessaire à l'évaporation de grandes quantités d'eau. Après s'être élevé au-dessus de la surface (figure 58.3), l'air chaud et humide arrivant à haute altitude (au-dessus de 10 km) s'éloigne de l'équateur vers les hémisphères nord et sud. Prenant la place de l'air qui s'élève, un air plus frais venant du nord et du sud s'écoule en surface vers l'équateur. Ces déplacements d'air sont à l'origine d'une des plus importantes caractéristiques de la circulation globale : l'air s'écoule vers l'équateur dans les deux hémis-

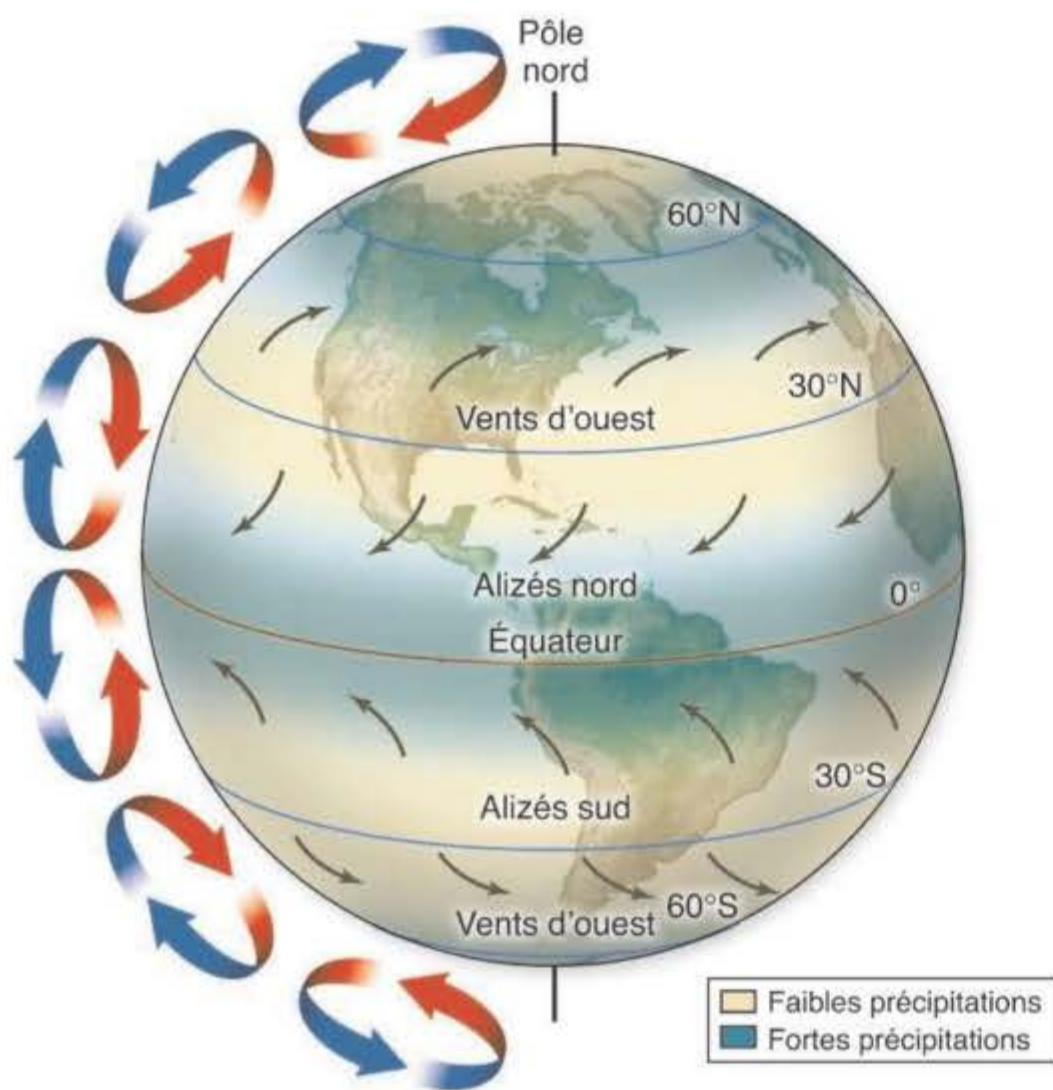


Figure 58.3 Mode général de circulation atmosphérique. Ce schéma représente la circulation de l'air qui prévaut en moyenne pendant des semaines et des mois (sur un jour, les différences peuvent être très grandes par rapport à ce schéma moyen). En s'élevant, l'air se refroidit et crée une bande de fortes précipitations à l'équateur et à 60° de latitude nord et sud. L'air qui a perdu la plus grande partie de son humidité a tendance à redescendre vers la surface terrestre aux environs de 30°N et 30°S, créant des bandes à précipitations relativement faibles. Les flèches rouges montrent les vents soufflant à la surface de la terre ; les bleues montrent la direction des vents soufflant à haute altitude. Les vents suivent des trajets incurvés par rapport à la surface terrestre parce que la Terre tourne sous eux autour de son axe (l'effet Coriolis). Il y a un problème de terminologie : les noms donnés aux vents concernent la direction dont ils viennent et non celle vers laquelle ils soufflent ; entre 30° et 60°, on parle de vents d'ouest parce qu'ils viennent de l'ouest. Malheureusement, les océanographes font l'inverse et désignent les courants marins par la direction vers laquelle ils vont.

phères en surface, arrive à l'équateur, s'élève et s'en écarte à haute altitude. Nous verrons bientôt comment l'inclinaison de la terre sur son axe influence précisément les courants.

Pour des raisons complexes, l'air qui s'élève à l'équateur et s'en écarte à haute altitude dans les deux hémisphères a tendance à redescendre vers la surface de la Terre à 30° de latitude nord et sud (voir figure 58.3). Pendant ce déplacement, la teneur en humidité de l'air se modifie radicalement à cause des changements de température. Le refroidissement diminue drastiquement la capacité de contenir la vapeur d'eau. La plus grande partie de la vapeur d'eau de l'air qui s'élève à l'équateur se condense donc et est à l'origine des nuages et de la pluie. Cette pluie tombe aux latitudes proches de l'équateur, où les précipitations sont les plus abondantes sur Terre.

Quand l'air commence à redescendre vers le sol aux latitudes proches de 30°, il est froid et a donc perdu la plus grande partie de sa vapeur d'eau. Il se réchauffe en descendant, mais il ne récupère pas beaucoup de vapeur d'eau pendant sa descente. Beaucoup de grands déserts se trouvent aux latitudes proches de 30° parce que l'air sec descend vers la surface à ces latitudes. Le Sahara est l'exemple le plus clair.

L'air qui descend aux latitudes de 30° environ ne s'écoule que partiellement vers l'équateur après avoir atteint la surface terrestre. Une partie va vers les pôles et, dans chaque hémisphère, il est à l'origine des vents qui soufflent à la surface terrestre de 30° à 60° de latitude. Aux latitudes proches de 60°, l'air a tendance à s'élever vers les hautes altitudes.

Question Pourquoi fait-il plus chaud aux latitudes proches de 0° ?

L'effet Coriolis

Si la Terre ne tournait pas autour de son axe, les déplacements globaux de l'air obéiraient aux modèles simples que nous venons de décrire. Mais les courants d'air – les vents – sont au-dessus d'une surface en rotation. À cause de la rotation de la Terre, les trajets suivis par les vents en surface ne sont pas rectilignes, mais courbes. Cette courbure des chemins due à la rotation de la Terre est l'effet Coriolis, décrit au dix-neuvième siècle par le mathématicien français Gaspard-Gustave Coriolis.

Si vous vous trouviez au pôle nord, la Terre paraîtrait tourner autour de son axe dans le sens opposé aux aiguilles d'une montre. Cette rotation d'une sphère dans un sens opposé quand on l'observe des deux pôles, explique pourquoi le sens de l'effet Coriolis est opposé dans les deux hémisphères. Dans l'hémisphère nord, les vents s'incurvent toujours vers la droite du sens de leur déplacement ; dans l'hémisphère sud, c'est toujours vers la gauche.

Les vents ont cette particularité parce que la circonférence d'une section d'une sphère, la Terre, change avec la latitude. Elle est nulle aux pôles et de 38 000 km à l'équateur. La vitesse d'un point de la surface terrestre passe donc d'environ 0 à 1500 km par heure des pôles à l'équateur. L'air qui descend à 30° de latitude nord peut atteindre à peu près la même vitesse que la surface qui se trouve en dessous. Mais, s'il va vers l'équateur, il est beaucoup plus lent que la surface et il est infléchi vers la droite dans l'hémisphère nord et vers la gauche dans l'hémisphère sud. Autrement dit, dans les deux hémisphères, les vents soufflent vers l'ouest aussi bien que vers l'équateur. Il en résulte (voir figure 58.3) que, des deux côtés de l'équateur, ces vents – les alizés – soufflent d'est en ouest.

Inversement, les masses d'air allant vers le nord à partir de 30° sont plus rapides que les surfaces terrestres sous-jacentes et sont donc

de nouveau infléchies vers leur droite, dans ce cas vers l'est. De même, dans l'hémisphère sud, les masses d'air situées entre 30° et 60° sont infléchies vers l'est, vers leur gauche. Dans les deux hémisphères donc, les vents soufflent d'ouest vers l'est entre 30° et 60° : ce sont les vents d'ouest.

Les courants globaux sont en grande partie entraînés par les vents

Les principaux courants océaniques sont entraînés par les vents à la surface de la Terre, ce qui signifie qu'ils dépendent indirectement de l'énergie solaire. La chaleur irradiée par le soleil met l'atmosphère en mouvement, puis les vents mettent l'océan en mouvement.

Dans l'Océan Atlantique nord (figure 58.4), les vents suivent cette direction : les vents de surface ont tendance à souffler d'est en ouest à l'équateur, mais d'ouest vers l'est aux latitudes moyennes (entre 30 et 60°). Par conséquent, les eaux de surface de l'Océan Atlantique nord ont tendance à former une courbe fermée géante – appelé **gyre** – allant de l'Amérique du Nord vers l'Europe aux latitudes moyennes et revenant de l'Europe et de l'Afrique vers l'Amérique aux latitudes proches de l'équateur.

Les courants d'eau sont soumis à l'effet Coriolis. Cet effet contribue donc à ce mouvement giratoire dans le sens des aiguilles d'une montre. L'eau s'écoulant à travers l'Atlantique vers l'Europe aux latitudes moyennes a tendance à s'incurver vers la droite et engage le courant d'est en ouest près de l'équateur. Celui-ci a tendance à d'incurver vers la droite et engage le courant d'ouest en est aux latitudes moyennes. Dans l'Océan Atlantique sud, le processus est le même ; les mêmes gyres suivent le sens des aiguilles d'une montre et l'inverse respectivement dans les hémisphères nord et sud, et se retrouvent également dans l'Océan Pacifique nord et sud.

Des différences régionales et locales affectent les écosystèmes terrestres

À tout endroit, les conditions environnementales sont influencées par les conséquences régionales et locales du rayonnement solaire, des circulations de l'air et de l'eau, et pas seulement par les conséquences globales de ces processus. Dans cette section, nous examinons seulement quelques exemples d'effets régionaux et locaux, en nous concentrant sur les systèmes terrestres. Ce sont l'effet de foehn, les vents de mousson, l'altitude et la présence de facteurs microclimatiques.

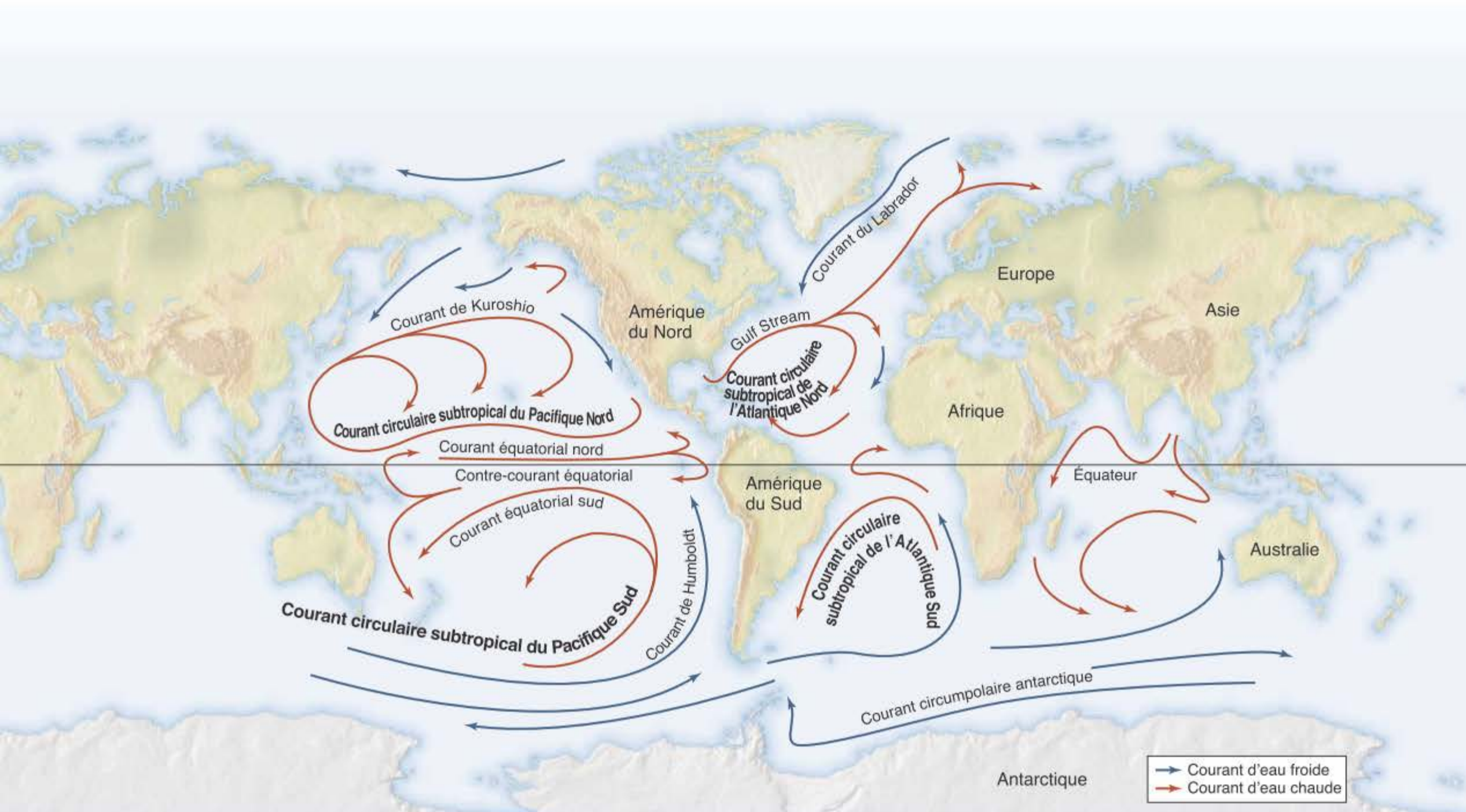


Figure 58.4 La circulation dans les océans. Au centre des plusieurs grands bassins océaniques, les eaux superficielles se déplacent en formant de grandes boucles fermées, les gyres. Ces mouvements de l'eau affectent la productivité biologique des océans et influencent parfois profondément le climat des masses continentales voisines, comme le Gulf Stream qui amène de l'eau chaude dans la région des Îles Britanniques

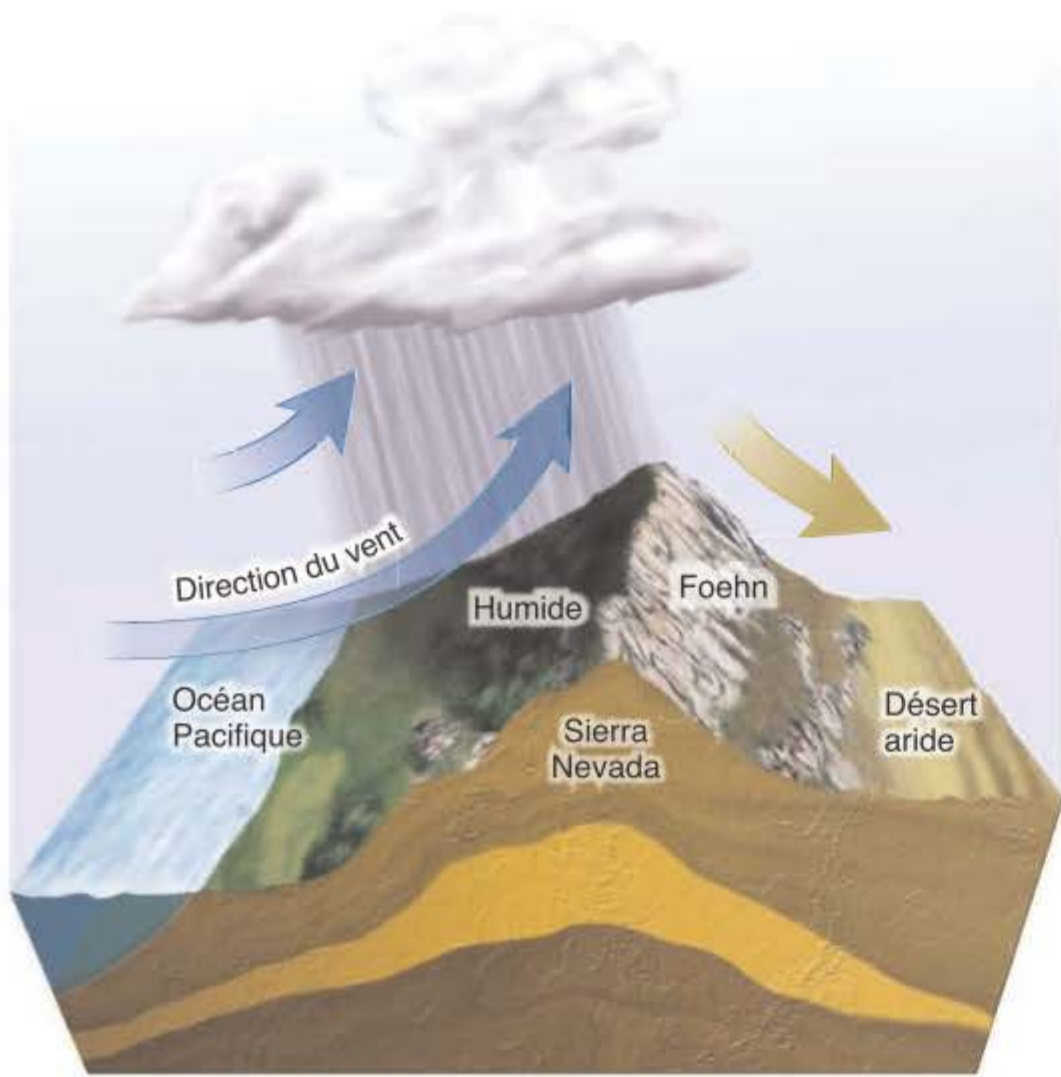


Figure 58.5 Exemple de l'effet de foehn en Californie. Les vents chargés d'humidité soufflant de l'Océan Pacifique s'élèvent et se refroidissent au contact de la Sierra Nevada. Leur capacité de rétention de l'eau diminue avec le refroidissement aux hautes altitudes, entraînant des précipitations : les versants des montagnes orientés vers l'océan sont humides ; ils sont occupés par de grandes forêts, entre autres celles qui abritent les fameux séquoias géants. (*Sequoiadendron giganteum*). En descendant du côté oriental du massif, l'air augmente à nouveau sa capacité de rétention de l'eau et absorbe l'humidité de son environnement. C'est pourquoi les pentes orientales de ces montagnes sont arides et qu'il existe parfois des déserts de foehn.

L'effet de foehn

Les déserts proviennent parfois de l'interception, par des chaînes de montagnes, des vents chargés d'humidité venant de la mer. Quand l'air venant des océans rencontre une chaîne de montagnes (figure 58.5), il s'élève et sa capacité à retenir l'humidité diminue parce qu'il se refroidit à haute altitude et provoque des précipitations sur les pentes de la montagne face à la mer.

Quand l'air – ayant perdu une grande partie de son humidité – redescend de l'autre côté de la chaîne de montagnes, il reste sec après s'être réchauffé et, comme il est plus chaud, sa capacité de rétention de l'humidité augmente, ce qui signifie qu'il peut plus facilement se charger de l'humidité du sol et des plantes.

Par conséquent, l'humidité est souvent très différente sur les deux versants d'une chaîne de montagne ; en Californie par exemple, les versants orientaux de la Sierra Nevada – à l'écart de l'Océan Pacifique – sont beaucoup plus secs que les versants occidentaux. Une autre conséquence est le développement éventuel de déserts du côté sec, comme le désert de Mojave. On dit que les montagnes produisent un effet de foehn.

Les moussons

Le continent asiatique est si vaste que son réchauffement et son refroidissement au cours des saisons entraînent des modifications régionales massives du régime des vents. En été, les masses terrestres se réchauffent

plus que les océans environnants mais, en hiver, les terres se refroidissent plus que les océans. Par conséquent, les vents ont tendance à souffler de la mer vers le continent asiatique en été, particulièrement dans la région de l'Océan Indien et du Pacifique tropical occidental. Ces vents s'inversent pour souffler du continent vers les océans en hiver. Ces changements de direction du vent sont les moussons. Le régime des pluies est affecté, leur durée et leur force peuvent faire la différence entre suffisance alimentaire et famine pour des centaines de millions de personnes de la région chaque année.

L'altitude

Un autre facteur régional important est l'existence de grandes différences régionales dans les régions montagneuses : la température et d'autres facteurs varient avec l'altitude. Pour une même latitude, la température de l'air tombe d'environ 6 °C quand l'altitude s'élève de 1000 m. Les conséquences écologiques du changement de la température avec l'altitude sont les mêmes que pour la latitude (figure 58.6).

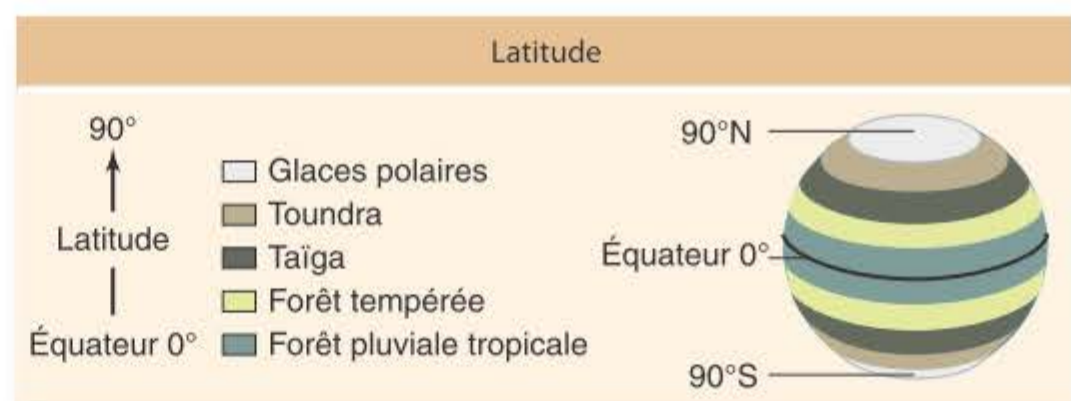
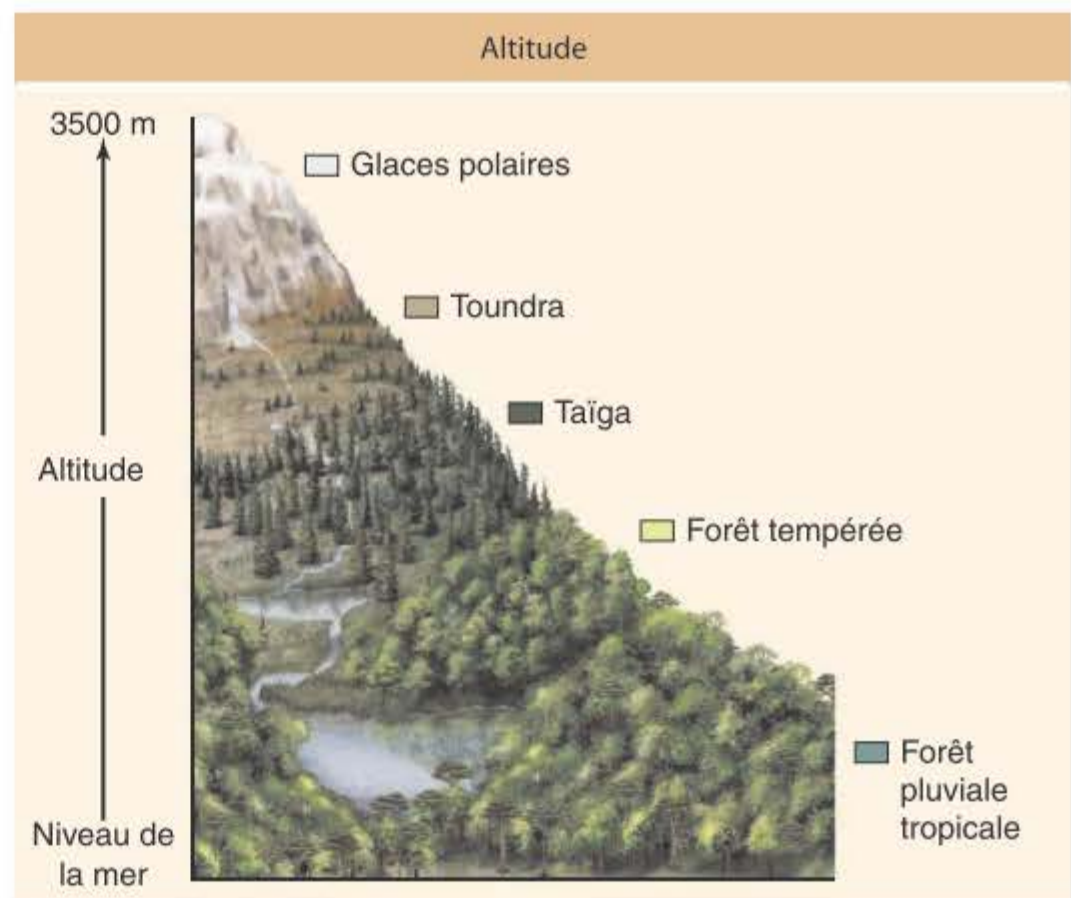


Figure 58.6 L'altitude a la même influence que la latitude sur la répartition des biomes. Des biomes qui apparaissent normalement loin de l'équateur, vers le nord au niveau de la mer, se retrouvent aussi dans les régions tropicales sur les hautes montagnes. Sur une haute montagne tropicale, on peut donc observer une succession de biomes comme celle qui est représentée ci-dessus. En Amérique du Nord, une augmentation de l'altitude de 1000 m entraîne la même chute des températures qu'une augmentation de 880 km de la latitude.

Les microclimats

Les conditions varient aussi de façon significative sur une très petite échelle spatiale. Dans une forêt, par exemple, un oiseau se trouvant dans une plage ouverte est soumis à un rayonnement solaire intense, une température élevée et une faible humidité, alors qu'une souris cachée sous un tronc à 3 m de là peut se trouver à l'ombre, à une température fraîche et dans un air saturé en vapeur d'eau. Ces ensembles de conditions climatiques très localisées sont des microclimats.

Dans certains cas, les espèces échappent à la compétition en s'adaptant à des microclimats différents. Des salamandres sympatriques, par exemple, peuvent être spécialisées pour des niveaux différents d'humidité dans des parties différentes de l'habitat.

Synthèse 58.1

Le réchauffement plus intense par le Soleil de certaines régions du globe par rapport à d'autres est à l'origine des courants atmosphériques globaux qui, à leur tour, entraînent les courants marins globaux des océans. L'effet Coriolis est provoqué par la rotation de la Terre sous les masses d'air de l'atmosphère. Ces modèles – et les changements saisonniers – affectent profondément les conditions auxquelles sont soumis les organismes vivants dans des parties différentes du monde. En général, la température décroît quand l'altitude ou la latitude augmente.

- Comment les déplacements globaux de l'air seraient-ils affectés si la Terre tournait dans la direction opposée ?

58.2 Les biomes terrestres

Objectifs

1. Définir un biome.
2. Décrire les facteurs primaires responsables de la présence d'un type de biome à un endroit donné.

Les **biomes** sont les principaux types d'écosystèmes de la Terre. Chacun possède sa propre physionomie et se répartit sur de vastes surfaces terrestres caractérisées par un ensemble de conditions climatiques régionales. Les biomes portent un nom correspondant à leur type de végétation, mais les animaux présents en font aussi partie.

En raison de la large définition des biomes, on peut imaginer qu'il existe de nombreux moyens de classer les écosystèmes terrestres. Huit biomes principaux sont présentés ici : (1) la forêt pluviale tropicale, (2) la savane, (3) le désert, (4) la prairie tempérée, (5) la forêt décidue tempérée, (6) la forêt sempervirente tempérée, (7) la taïga, (8) la toundra.

Six autres biomes sont reconnus par certains écologistes : les glaces polaires, les zones montagneuses, le maquis, la forêt sempervirente chaude et humide, la forêt tropicale de mousson et le semi-désert. D'autres écologues les réunissent aux huit biomes principaux. La répartition de ces 14 biomes est représentée à la figure 58.7.

Les biomes ne sont pas définis par la présence d'espèces végétales particulières, mais plutôt par leur végétation caractéristique et les conditions climatiques associées. Les espèces dominantes du paysage peuvent

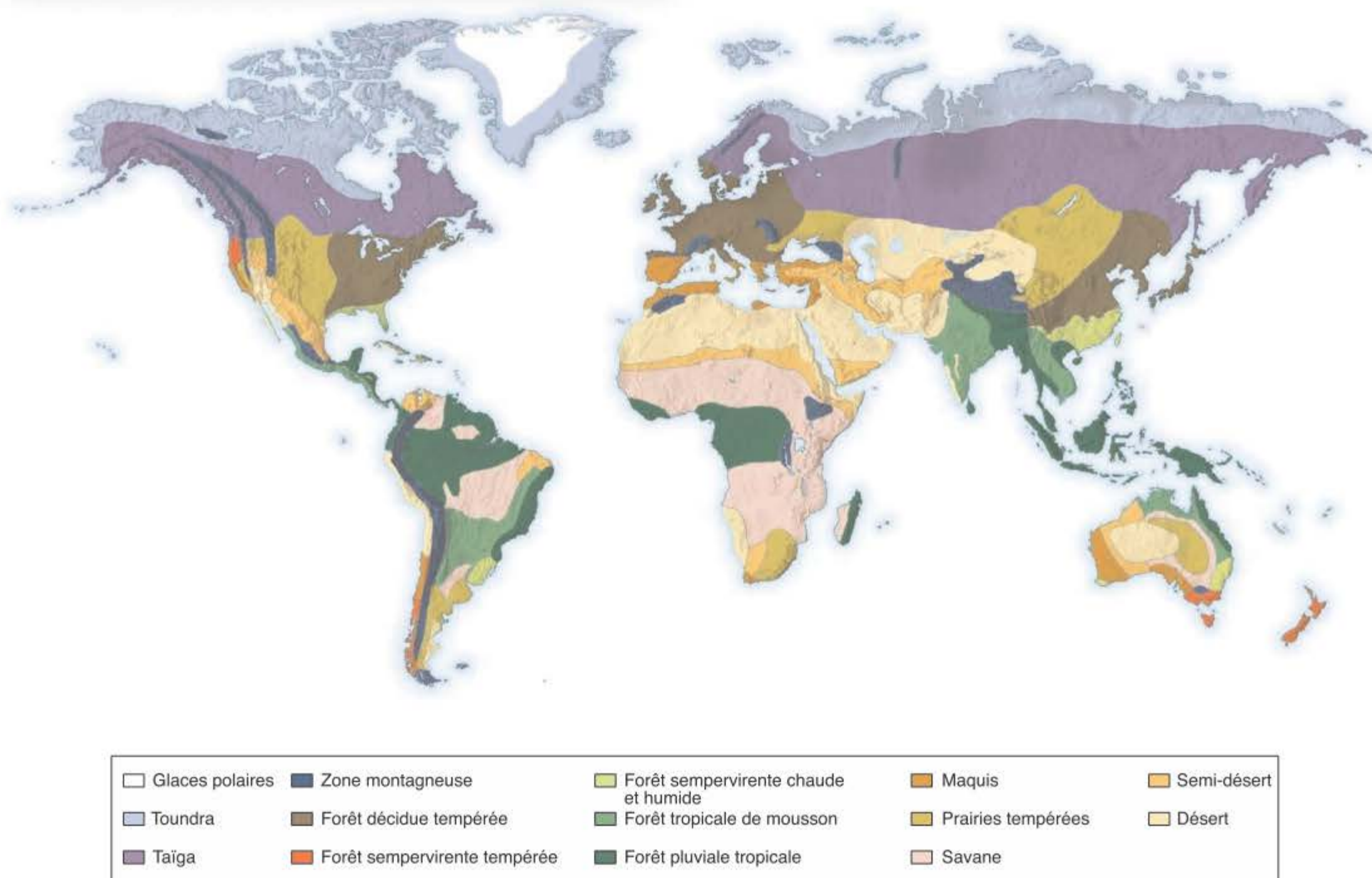


Figure 58.7 Répartition des biomes. Chaque biome possède un type de végétation et un aspect semblables où qu'il se trouve.

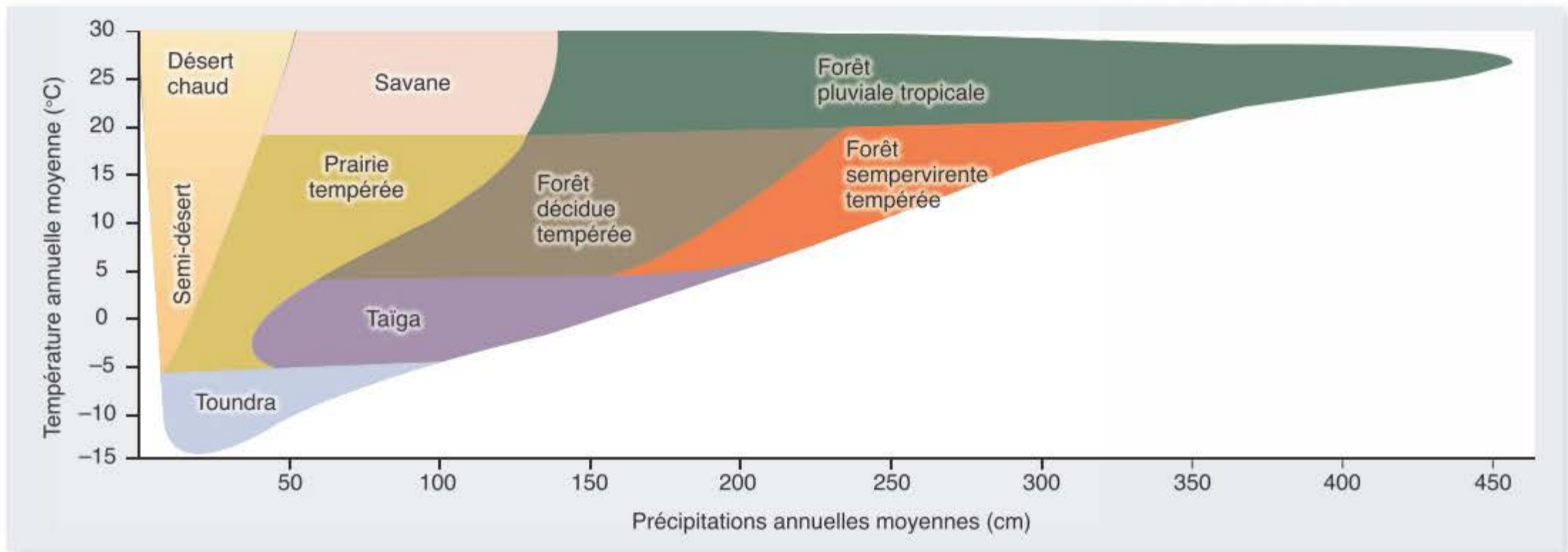


Figure 58.8 Répartition prévue des biomes. La température et les précipitations sont très utiles pour prévoir la répartition des biomes, mais d'autres facteurs ont aussi un rôle critique.

donc différer dans deux régions attribuées au même biome. Par exemple, les forêts pluviales tropicales du globe sont toutes composées de grands arbres, mais les espèces dominantes dans une forêt pluviale tropicale sont différentes en Amérique du Sud et en Indonésie. Ces forêts se ressemblent à cause d'une évolution convergente (voir chapitre 21).

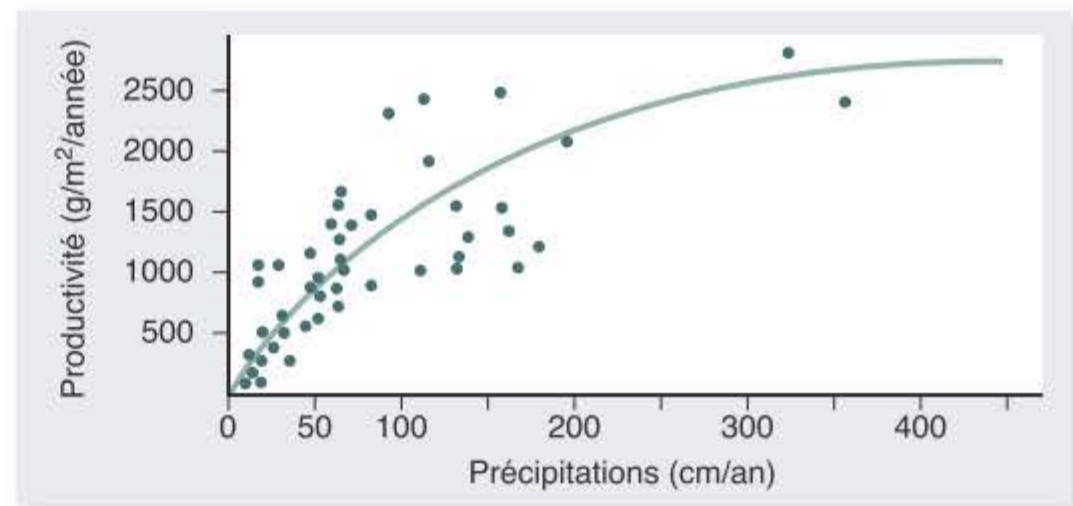
La température et l'humidité déterminent souvent les biomes

Pour déterminer la nature des biomes à tout endroit, les deux facteurs clés sont la température et l'humidité. La figure 58.8 montre que, si vous connaissez la température moyenne annuelle et les précipitations annuelles moyennes d'une région terrestre, vous pouvez souvent prédire le biome prédominant. La température et l'humidité affectent les écosystèmes de plusieurs façons. Une telle influence s'explique par le fait que la productivité primaire leur est fortement liée, comme on l'a vu au chapitre 57 (figure 58.9).

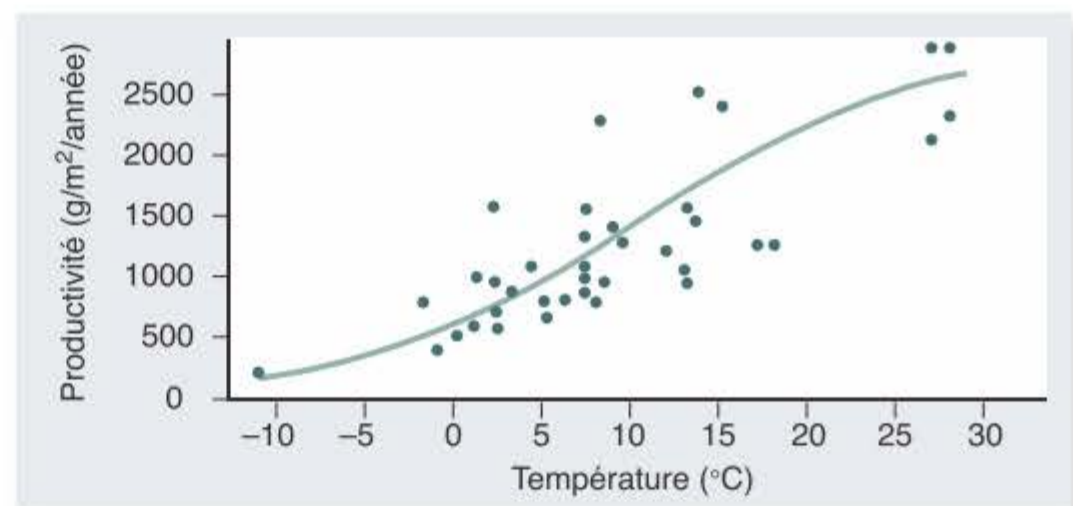
Des localités qui se ressemblent aux points de vue température et précipitations annuelles ont parfois des biomes différents : la température et l'humidité ne sont donc pas les seuls facteurs importants. La structure du sol et sa composition minérale (voir chapitre 38) sont d'autres facteurs susceptibles d'intervenir. La présence d'un biome peut aussi dépendre de conditions de température et de précipitations très saisonnières ou relativement constantes.

Les forêts pluviales tropicales sont des systèmes équatoriaux très productifs

Les **forêts pluviales tropicales** (ou forêts ombrophiles), qui reçoivent typiquement de 140 à 450 cm de pluie par an, sont les écosystèmes terrestres les plus riches (figure 58.10). Elles sont très productives parce qu'elles profitent en même temps de températures élevées et de fortes précipitations (voir figure 58.9). Leur biodiversité est également très grande, abritant au moins la moitié des espèces de plantes et d'animaux terrestres du globe – plus de 2 millions d'espèces ! Sur 2,5 km² de la forêt tropicale brésilienne, il peut exister 1200 espèces de papillons – deux fois



a.



b.

Figure 58.9 Corrélation entre productivité primaire et précipitations et la température. La productivité primaire nette des écosystèmes à 52 endroits du globe dépend significativement (*a*) des précipitations annuelles moyennes et (*b*) de la température annuelle moyenne.

Question Pourquoi pensez-vous que la productivité augmente avec les précipitations et la température ?

Analyse de données La figure 58.9a montre que la productivité des écosystèmes est très variable pour des précipitations intermédiaires (~125 cm/an). Comment peut-on expliquer les données des figures 58.9b et 58.8 ?



Figure 58.10 La forêt pluviale tropicale.

plus que dans toute l'Amérique du Nord. Les forêts pluviales tropicales recyclent rapidement les nutriments, et leurs sols sont souvent dépourvus de réserves importantes de nutriments.

Les savanes sont des prairies tropicales à pluies saisonnières

Les savanes sont des prairies tropicales ou subtropicales avec souvent des arbres ou des arbustes dispersés. Au niveau du globe, ce sont souvent des écosystèmes de transition entre les forêts pluviales tropicales et les déserts ; elles sont caractéristiques des régions chaudes où les pluies (50-125 cm par an) sont trop faibles pour faire vivre une forêt pluviale, mais pas assez pour entraîner les conditions d'un désert.

Les pluies sont souvent très saisonnières dans les savanes. L'écosystème du Serengeti en Afrique Orientale est probablement l'exemple le plus connu au monde de ce type de biome. Dans la plus grande partie du Serengeti, aucune pluie ne tombe pendant plusieurs mois, mais les pluies sont abondantes pendant les autres mois. Les énormes troupeaux d'herbivores de l'écosystème répondent à la périodicité des pluies ; plusieurs espèces ne s'écartent des cours d'eau permanents que pendant les mois pluvieux.

Les déserts sont des régions avec peu de pluies

Les déserts sont des régions sèches où les pluies sont à la fois rares (souvent moins de 25-40 cm par an) et imprévisibles. Les pluies étant imprévisibles, les plantes et les animaux ne peuvent même pas compter sur une pluie chaque année. Comme on l'a déjà vu, les plus grands déserts se situent aux latitudes proches de 30°N et 30°S en raison des vents dominants (voir figure 58.3). D'autres déserts sont la conséquence de l'effet de foehn (voir figure 58.5).

La végétation des déserts est clairsemée, et la survie des plantes et des animaux repose sur la conservation de l'eau. Beaucoup d'organismes

des déserts passent par des stades d'inactivité pendant les périodes sans pluies. Pour éviter les températures extrêmes, les petits vertébrés du désert vivent souvent dans des terriers profonds, frais et parfois même humides. Certains ne sortent que la nuit. Parmi les grands animaux du désert, les chameaux boivent de grandes quantités d'eau quand ils en trouvent, puis ils la conservent et peuvent ainsi survivre pendant des semaines sans boire. Les oryx (grandes antilopes du désert) survivent en profitant de l'humidité des feuilles ou des racines qu'ils arrachent, ainsi que de l'eau quand c'est possible.

Les prairies tempérées ont des sols riches

À mi-chemin entre l'équateur et les pôles se situent les régions tempérées où se développent de riches prairies tempérées. Ces prairies couvraient autrefois la plus grande partie de l'intérieur de l'Amérique du Nord et elles étaient aussi répandues en Eurasie et en Amérique du Sud.

Les racines des graminées vivaces pénètrent en général profondément dans le sol, et les sols des prairies sont souvent profonds et fertiles. Les prairies tempérées sont souvent très productives après leur conversion vers l'agriculture et de vastes surfaces ont ainsi été modifiées. En Amérique du Nord, avant cette transformation en terres de culture, d'énormes troupeaux de bisons et d'antilopes ont autrefois habité les prairies, migrant selon les saisons pour suivre les modifications des ressources au cours de l'année. Les prairies tempérées naturelles représentent un biome adapté aux incendies périodiques et elles ont donc besoin de feux pour prospérer.

Les forêts décidues tempérées sont adaptées aux fluctuations saisonnières

Les climats modérés (étés chauds et hivers frais) et des pluies abondantes sont favorables au développement des forêts décidues tempérées dans l'est des États-Unis et du Canada et en Eurasie (figure 58.11). Les arbres décidus perdent leurs feuilles en hiver. Les cervidés, les ours, les castors et les rats-laveurs sont des animaux familiers de ces forêts.

Les forêts sempervirentes tempérées sont côtières

On trouve les forêts sempervirentes tempérées le long des côtes à climat tempéré, comme dans le nord-ouest des États-Unis. La végétation dominante comprend des arbres, comme les épicéas, les pins et les séquoias, qui ne perdent pas leurs feuilles (ils sont donc toujours verts, ou *sempervirents*).

La taïga est la forêt septentrionale des régions à hivers rudes

La taïga et la toundra (décrite ci-dessous) diffèrent des autres biomes par le fait qu'elles forment toutes deux de grands anneaux ininterrompus

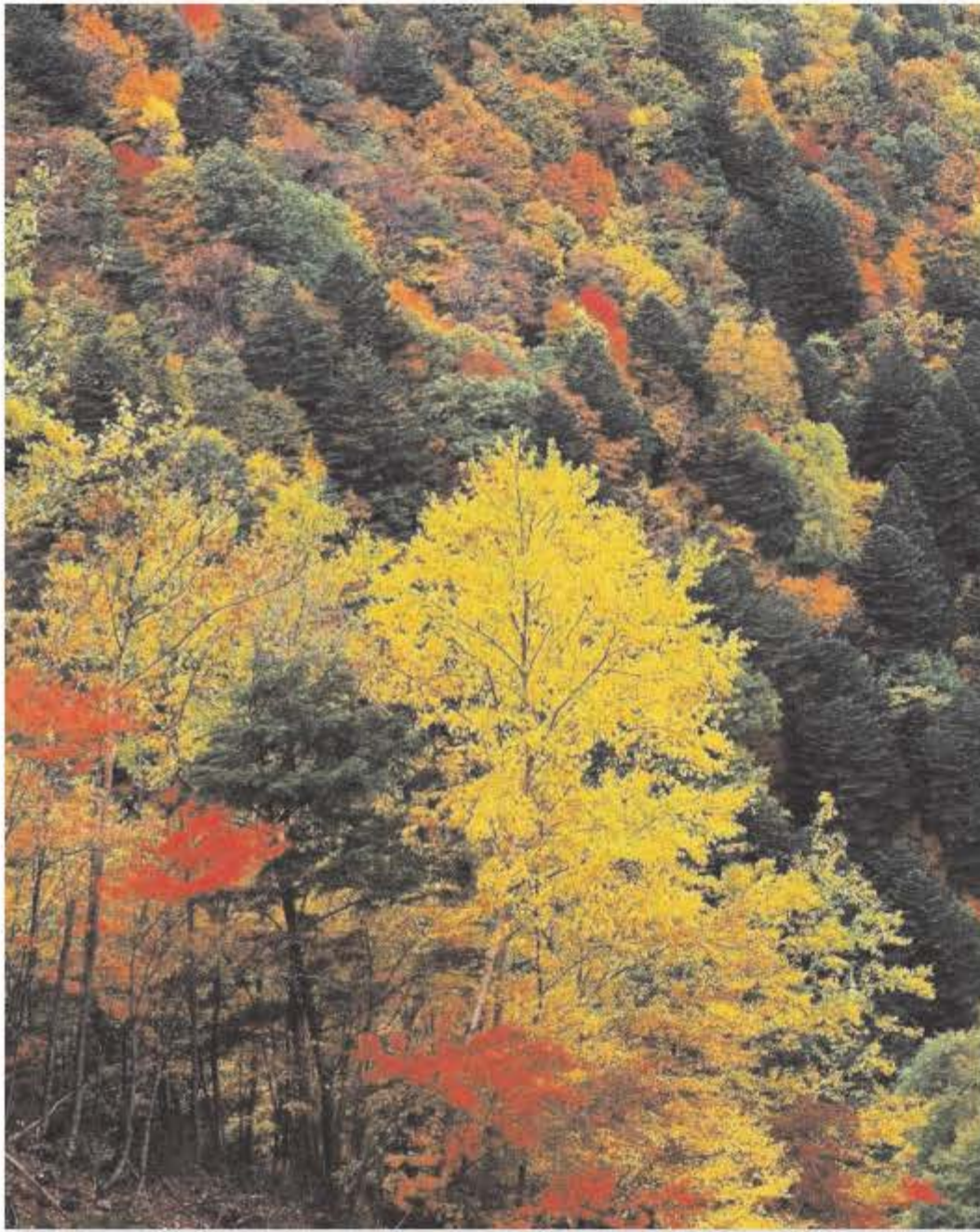


Figure 58.11 La forêt décidue tempérée

tout autour du globe (voir figure 58.7) La taïga est une vaste bande de forêt septentrionale dominée par des conifères (sapin, tsuga et épicéa) qui conservent toute l'année leurs feuilles en forme d'aiguilles.

La taïga est un des plus vastes biomes sur terre. Les hivers y sont très longs et froids, les précipitations sont faibles et surviennent surtout en été. Beaucoup de grands herbivores, comme le cerf, l'élan, le daim, et des carnivores comme les loups, les ours, les lynx et les gloutons, sont caractéristiques de la taïga.

La toundra est une région soumise au gel, pratiquement sans arbres, avec une courte saison de végétation

Dans le grand nord, aux latitudes supérieures à la taïga mais au sud des glaces polaires, il ne pousse que quelques arbres. Dans cette bande, la végétation, appelée toundra, est ouverte, balayée par le vent et souvent marécageuse. Ce biome très étendu couvre un cinquième de la surface des terres émergées. Il tombe peu de pluie ou de neige. Le **permafrost** – sol gelé en permanence – se trouve généralement à moins d'un mètre de la surface du sol.

Les arbres sont de petite taille et surtout confinés au bord des rivières et des lacs. De grands mammifères herbivores, comme le bœuf musqué et le renne, et carnivores, comme les loups, les renards et les lynx, vivent dans la toundra. Les populations de lemmings (petit rongeur originaire de l'arctique) augmentent et diminuent selon un cycle de longue durée, avec des conséquences importantes pour les animaux dont ils sont les proies.

Synthèse 58.2

On peut reconnaître de grands types d'écosystèmes, ou biomes, dans différentes régions climatiques terrestres. Ces biomes se ressemblent beaucoup, quel que soit l'endroit où ils se trouvent sur Terre. Les températures et les précipitations annuelles moyennes sont de bons critères pour prédire le type de biome ; cependant, le degré des variations saisonnières et les caractéristiques du sol de la région interviennent aussi.

- Pourquoi des biomes différents apparaissent-ils à des latitudes différentes ?

58.3 Les habitats d'eau douce

Objectifs

1. Définir la zone photique.
2. Expliquer ce qui cause les inversions de printemps et d'automne dans les lacs.
3. Distinguer les lacs eutrophes et oligotrophes.

Parmi les habitats principaux, l'eau douce ne couvre qu'une très petite surface : moins de 2 %, à comparer aux 27 % de la terre ferme et aux 71 % des océans. L'eau douce provient de l'évaporation de l'eau dans l'atmosphère, qui élimine la plupart des éléments dissous, un peu comme la distillation. Quand l'eau retombe à la surface de la Terre sous forme de pluie ou de neige, elle est à peu près pure, bien qu'elle puisse avoir ramassé des matériaux biologiques dissous ou sous forme de particules dans l'atmosphère.

Les terres humides – marécages et tourbières – sont des habitats intermédiaires entre l'eau douce et les domaines terrestres. Elles sont très productives (voir figure 57.11). Elles ont aussi d'autres rôles, comme bassins de rétention de l'eau atténuant les inondations.

La productivité primaire des plans d'eau douce provient d'algues unicellulaires (le phytoplancton) en suspension dans l'eau, d'algues se développant sous la forme de films au fond et de plantes enracinées comme les nénuphars. En outre, une quantité importante de matière organique – comme les feuilles mortes – arrive dans certains plans d'eau à partir de communautés végétales du voisinage.

Dans les eaux douces, les habitats dépendent de la disponibilité de l'oxygène

La concentration de l'oxygène dissous (O_2) est un facteur important pour les communautés d'eau douce. L'oxygène se dissout dans l'eau exactement comme le sucre ou le sel. Les poissons et les autres organismes aquatiques obtiennent l'oxygène dont ils ont besoin en le prélevant dans la solution.

En réalité, l'oxygène n'est pas très soluble dans l'eau. Par conséquent, même si l'eau douce est bien aérée et en équilibre avec l'atmosphère, sa concentration n'atteint au maximum que 5 % de celle de l'air. Cela signifie que, pour trouver l'oxygène nécessaire, les organismes d'eau douce ont une marge de sécurité moindre que ceux qui respirent l'air.

Dans toute pièce d'eau, l'oxygène s'ajoute et se perd constamment. L'oxygène est ajouté par la photosynthèse et l'aération à partir de l'atmosphère et éliminé par les animaux et autres hétérotrophes. Si, dans un plan d'eau, arrive une grande quantité de matière organique en décomposition, la demande d'oxygène provenant des microbes décomposeurs peut être importante et susceptible de réduire la quantité d'oxygène disponible pour d'autres espèces. Quand la perte d'oxygène de l'eau est plus rapide que son addition, la concentration d'oxygène dissous peut tomber si bas que beaucoup d'animaux aquatiques ne peuvent survivre.

Les habitats des lacs et des étangs changent avec la profondeur

Les petits plans d'eau douce sont des étangs et les grands sont des lacs. L'eau absorbe la lumière qui la traverse et l'intensité de la lumière solaire disponible pour la photosynthèse diminue fortement avec la profondeur. Dans les lacs profonds, seule l'eau relativement proche de la surface reçoit assez de lumière pour que le phytoplancton ait une productivité primaire nette positive (figure 58.12). Ces eaux constituent la **zone photique**.

La zone photique

L'épaisseur de la zone photique dépend des particules de matière organique présentes dans l'eau. Si l'eau est claire et contient relativement peu de particules organiques, elle permet à la lumière de pénétrer à une pro-

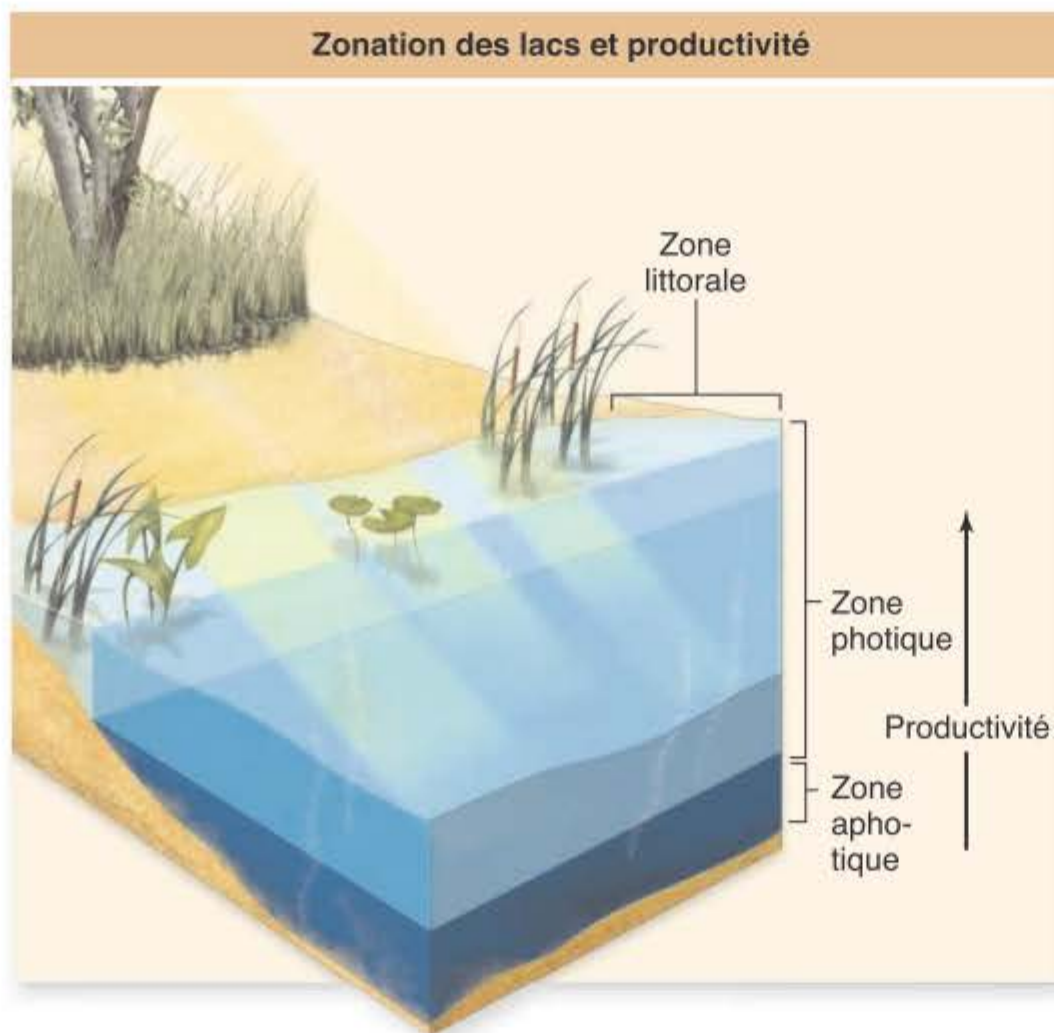


Figure 58.12 La lumière dans un lac. L'intensité de la lumière solaire disponible pour la photosynthèse diminue avec la profondeur dans un lac. Par conséquent, seules les eaux supérieures – la zone photique – reçoivent assez de lumière pour que la productivité primaire nette du phytoplancton soit positive. La profondeur de la zone photique dépend de la turbidité de l'eau. La zone littorale est la bordure peu profonde du lac. Elle est bien éclairée jusqu'au fond et les plantes enracinées, ainsi que les algues du fond peuvent y prospérer.

fondeur de 10 m avec une intensité suffisante pour le phytoplancton. L'eau qui contient des algues superficielles ou des particules terreuses provenant de l'érosion, ne permet pas à la lumière de pénétrer très loin avant que son intensité devienne trop faible pour la croissance des algues.

La teneur en oxygène dissous dans les eaux profondes d'un lac peut être un problème parce tout l'oxygène arrive dans les systèmes aquatiques près de leur surface, où les échanges gazeux se produisent avec l'atmosphère et la photosynthèse est effectuée dans les organismes aquatiques. Dans les eaux calmes d'un lac, les eaux superficielles et profondes ne se mélangent qu'occasionnellement, grâce à la stratification thermique ; par conséquent, l'oxygène n'arrive que rarement dans les eaux profondes à partir des eaux de surface.

La stratification thermique

La **stratification thermique** est une caractéristique de nombreux lacs et grands étangs. En été, comme le montre le bas de la figure 58.13, l'eau chauffée par le soleil forme une couche superficielle, l'*épilimnion* – parce que l'eau chaude est moins dense que l'eau froide et a tendance à flotter

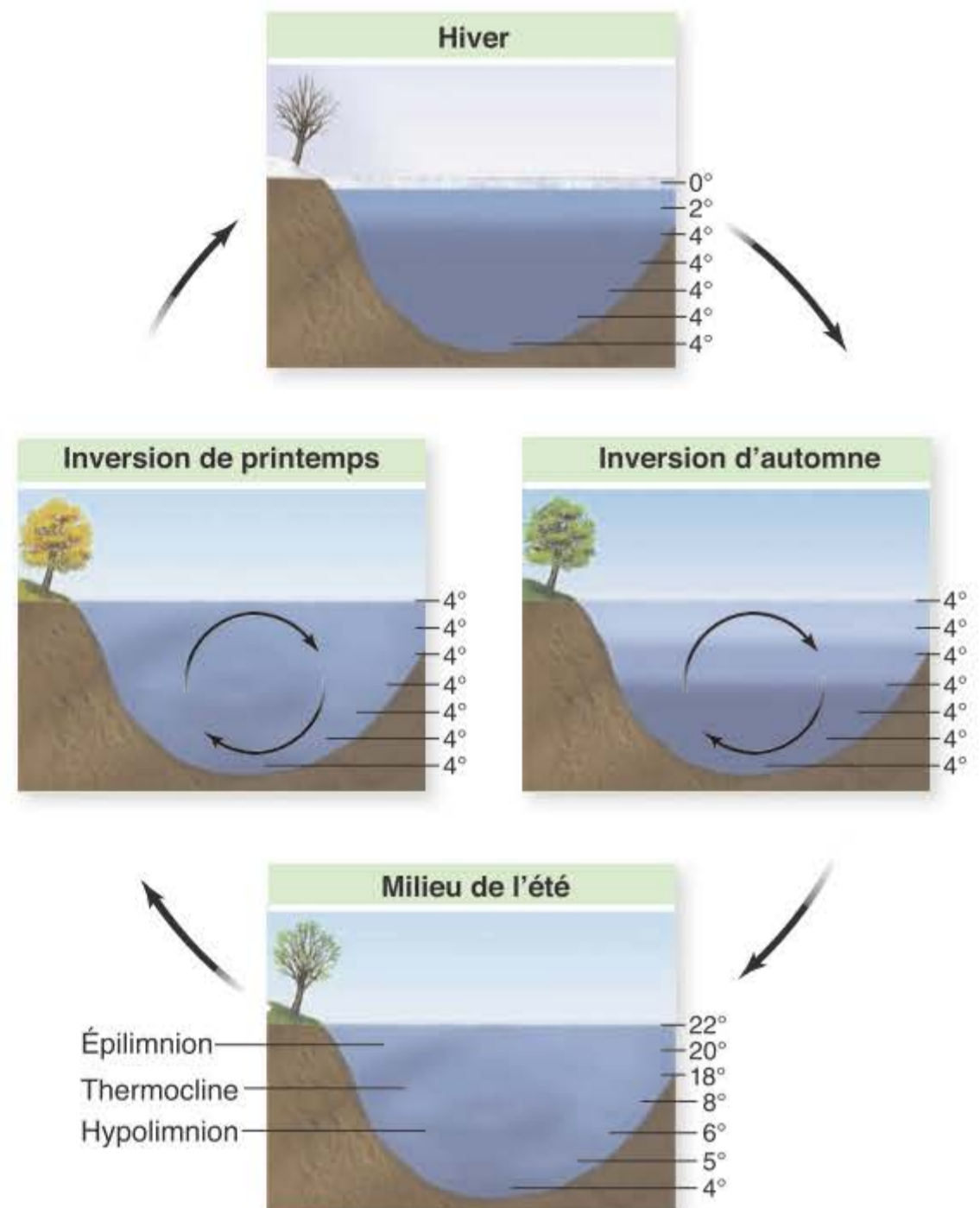


Figure 58.13 Cycle annuel de la stratification thermique dans un lac de la région tempérée. Pendant l'été (*en-dessous*), l'eau chauffée par le soleil (l'épilimnion) flotte sur l'eau froide, plus dense (l'hypolimnion). Le lac est aussi stratifié thermiquement en hiver (*schéma du haut*) quand l'eau proche de la congélation ou gelée se trouve au-dessus de l'eau à 4 °C (température correspondant à la plus forte densité de l'eau douce). La stratification est perturbée au printemps et en automne quand la température du lac est à peu près uniforme et que les vents mélangent les eaux de haut en bas.

au-dessus. L'eau plus froide et plus dense, l'*hypolimnion*, se trouve en-dessous. Entre les couches chaude et froide se trouve une zone de transition, la thermocline. Nous nous concentrons sur les eaux douces, mais on a la même structure thermique de la colonne d'eau dans de nombreuses parties de l'océan.

Dans un lac, la stratification thermique a tendance à empêcher l'accès de l'oxygène aux eaux du fond ; à cause de la stratification, les eaux supérieures qui reçoivent l'oxygène ne se mélangent pas à celles du fond. La concentration en oxygène en profondeur peut donc diminuer graduellement avec le temps, les organismes qui y vivent utilisant l'oxygène plus vite qu'il ne se remplace. Si la consommation d'oxygène est rapide, les eaux profondes peuvent en être dépourvues avant la fin de l'été. En l'absence d'oxygène, la plupart des animaux (mais pas tous) sont tués.

En automne, la température des eaux de surface d'un lac stratifié descend pour atteindre à peu près celle des eaux profondes. La densité devient semblable dans les deux couches et celles-ci ont moins tendance à rester distinctes. Les vents peuvent alors mélanger les couches : c'est l'inversion d'automne (figure 58.13). La concentration d'oxygène s'accroît dans les eaux profondes.

Au chapitre 2, on a parlé des propriétés spéciales de l'eau. La densité de l'eau douce est maximale à 4 °C et la glace, à 0 °C, flotte sur cette eau dense. Quand un lac se refroidit jusqu'au point de congélation, au début de l'hiver, tout le lac atteint d'abord 4 °C. Une partie de l'eau se refroidit ensuite encore, devient moins dense et remonte en surface. Un refroidissement supplémentaire de cette eau de surface entraîne sa congélation et la formation d'une couche de glace en surface. Au printemps, la glace fond, l'eau de surface se réchauffe et les vents peuvent à nouveau mélanger tout le lac – c'est l'inversion de printemps.

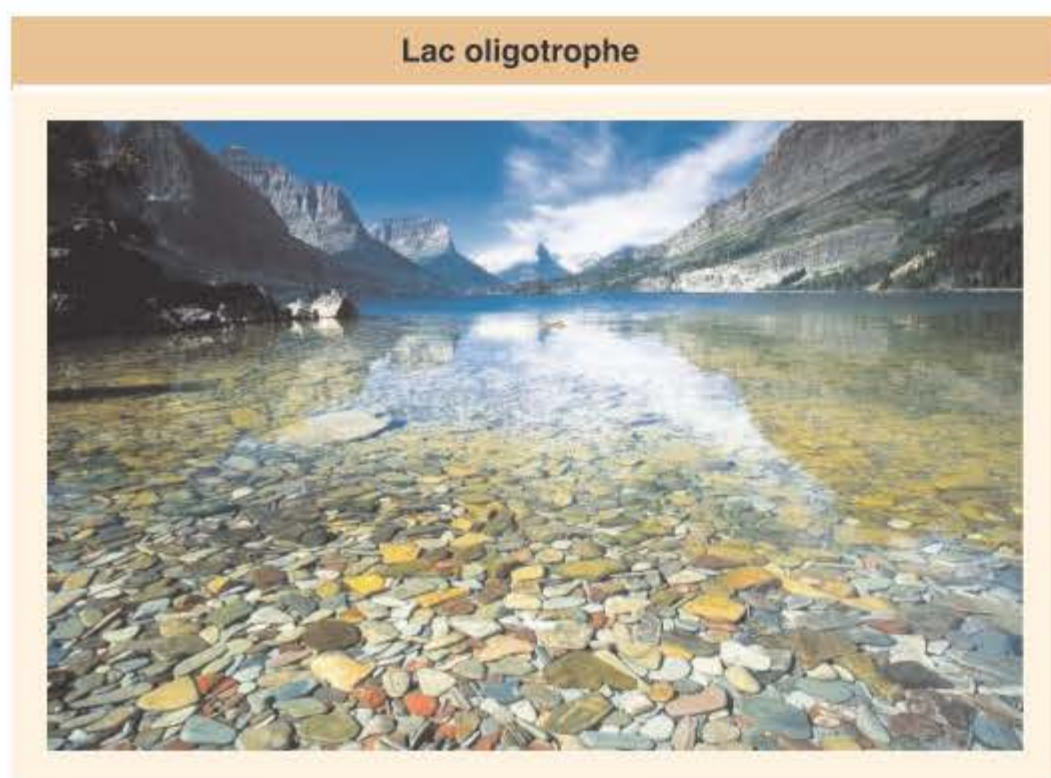
Dans les régions tropicales, la température change moins au cours de l'année et il n'existe pas de cycle dans beaucoup de lacs. Les lacs tropicaux peuvent donc avoir une thermocline permanente avec un épuisement de l'oxygène près du fond.

Les teneurs en oxygène et en nutriments différent selon les lacs

Les plans d'eau douce pauvres en nutriments (comme les nitrates et phosphates) et contenant peu d'algues par unité de volume sont désignés comme *oligotrophes*. Ces eaux sont souvent limpides. Les fleuves et rivières oligotrophes contiennent souvent beaucoup d'oxygène dissous parce qu'ils sont aérés par le mouvement de l'eau courante ; la faible quantité de matière organique dans l'eau signifie une utilisation relativement faible de l'oxygène. De même, les lacs et les étangs oligotrophes contiennent généralement beaucoup d'oxygène dissous à toutes les profondeurs et pendant toute l'année parce qu'il n'est guère utilisé. L'eau étant relativement claire, la lumière peut pénétrer facilement et la photosynthèse est possible dans une grande partie de la colonne d'eau, du haut en bas (figure 58.14).

Les plans d'eau **eutrophes** contiennent beaucoup de nutriments et souvent une population dense d'algues. La quantité d'oxygène en solution est généralement basse, surtout en été. Dans un plan d'eau eutrophe, les microbes décomposeurs sont à l'origine d'une forte demande en oxygène parce que, à la mort des populations denses d'algues, de grandes quantités de matière organique sont susceptibles d'être décomposées. En outre, la lumière ne pénètre pas bien dans les eaux eutrophes à cause de la présence de toute cette matière organique ; l'oxygène provenant de la photosynthèse reste donc dans une couche d'eau superficielle relativement mince.

Les activités humaines ont souvent transformé les lacs oligotrophes en lacs eutrophes. Dans de nombreux lacs, le phosphore est peu abondant et c'est lui qui limite la croissance. Par exemple, la fertilisation excessive des jardins et des champs entraîne un lessivage des nitrates et des phosphates des engrais vers les systèmes aquatiques locaux. Les lacs qui reçoivent ces nutriments deviennent plus eutrophes. Par conséquent, les eaux profondes sont souvent plus pauvres en oxygène en été. Beaucoup d'espèces de poissons typiques des eaux oligotrophes, comme la truite, sont très sensibles au manque d'oxygène. Si les lacs deviennent eutrophes, ces espèces disparaissent et sont remplacées par des espèces, comme les carpes, capables de mieux tolérer les faibles concentrations en oxygène. Les lacs peuvent redevenir oli-



a.



b.

Figure 58.14 Lacs oligotrophes et eutrophes. a. Les lacs oligotrophes sont pauvres en nutriments pour les algues, leur teneur en oxygène est élevée et ils sont clairs. b. Les lacs eutrophes contiennent beaucoup de nutriments pour les algues et peu d'oxygène dissous. La lumière ne pénètre pas profondément dans ces lacs.

gotrophes avec le temps si l'on supprime les excès de nitrates, phosphates et matières organiques étrangères, comme les eaux usées.

Synthèse 58.3

La zone photique est la couche proche de la surface, où la lumière pénètre. La photosynthèse n'est possible que dans cette zone. La stratification thermique est un facteur essentiel déterminant le taux d'oxygène. Dans les lacs tempérés, les différentes couches se mélangent quand elles sont à la même température au printemps et en automne, et les vents peuvent intervenir. Cette inversion empêche l'épuisement de l'oxygène au fond des lacs. Les lacs eutrophes contiennent beaucoup de nutriments pour les algues, mais peu d'oxygène dissous, les lacs oligotrophes sont pauvres en nutriments, mais riches en oxygène à toutes les profondeurs.

- Pourquoi n'y a-t-il généralement pas de cycle saisonnier dans les lacs tropicaux et quelles conséquences cela peut-il avoir pour les écosystèmes de ces lacs ?

58.4 Les habitats marins

Objectifs

1. Connaître les différents habitats marins.
2. Expliquer pourquoi les événements *El Niño* surviennent.

Environ 71 % de la surface terrestre sont couverts par les océans. Les plateaux continentaux se trouvent à proximité des côtes des continents : l'eau n'y est pas très profonde (figure 58.15) ; les plateaux représentent essentiellement des parties submergées des continents. À l'échelle du globe, leur largeur atteint en moyenne 80 km et la profondeur de l'eau va de 1 m à environ 130 m quand on va de la côte vers le large.

Au-delà du plateau continental, la profondeur augmente brusquement. La profondeur moyenne de l'océan est comprise entre 4000 et 5000 m et certaines parties – les fosses – sont beaucoup plus profondes, jusqu'à 11 000 m dans la fosse des Mariannes, dans l'ouest de l'Océan Pacifique.

Dans la majeure partie des océans, le principal producteur primaire est le phytoplancton flottant dans les eaux superficielles bien éclairées. Une révolution est en cours aujourd'hui dans la compréhension scientifique des facteurs qui limitent l'alimentation du phytoplancton océanique (voir chapitre 57). On considère actuellement que la production du phytoplancton est limitée par l'azote dans les deux tiers environ des océans, mais par le fer dans un tiers. Les principales zones que l'on sait limitées en fer sont tout l'Océan Austral entourant l'Antarctique, des parties de l'Océan Pacifique équatorial et des parties nord-est de l'Océan Pacifique subarctique. Quand l'eau est peu profonde le long des côtes, le phytoplancton n'est pas le seul producteur primaire, mais des plantes marines et des algues fixées, entre autres des algues brunes, interviennent aussi.

Les océans sont tellement vastes qu'ils comprennent de nombreux types différents d'écosystèmes. Certains, comme les récifs coralliens et les estuaires, ont une forte productivité primaire (voir

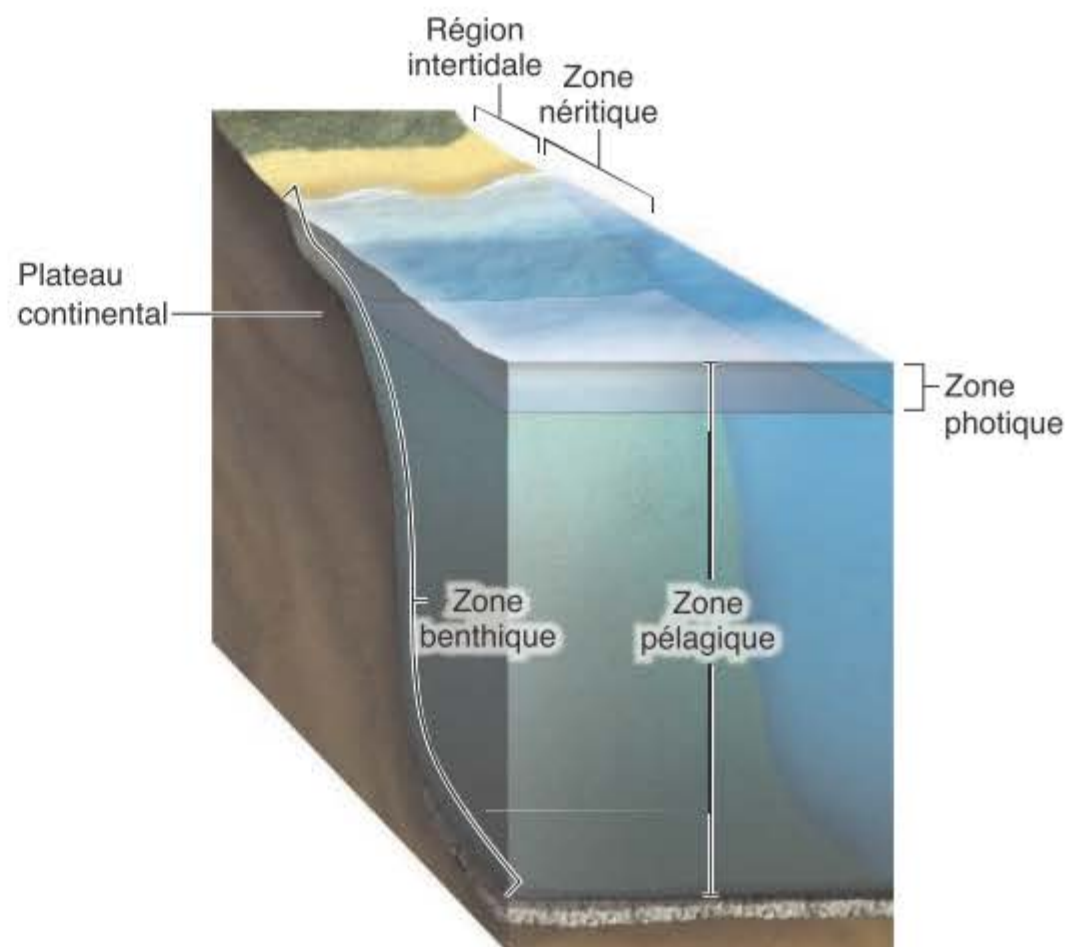


Figure 58.15 Concepts de base et terminologie pour décrire les écosystèmes marins. Le plateau continental est la marge submergée du continent. Les eaux correspondantes constituent la zone néritique et, à l'échelle du globe, leur profondeur ne dépasse pas 130 m. La région soumise aux flux et reflux des marées est la zone intertidale. Le fond est la zone benthique, tandis que la colonne d'eau de la pleine mer est la zone pélagique. La zone photique est la partie de la zone pélagique où la lumière est suffisante pour assurer au phytoplancton une productivité primaire nette positive. L'échelle verticale de ce dessin est comprimée ; alors que le bord externe du plateau continental est profond de 130 m, la pleine mer est en fait en moyenne 35 fois plus profonde (4000-5000 m)

figure 57.11), mais d'autres sont peu productifs. Il existe quatre grands types d'écosystèmes océaniques : la pleine mer, les écosystèmes du plateau continental, les régions d'upwelling et l'océan profond.

La pleine mer présente une faible productivité primaire

La pleine mer correspond aux eaux éloignées de la terre (au-delà du plateau continental) et suffisamment proche de la surface pour recevoir la lumière solaire ou interagir avec ces eaux dans la journée ou la semaine. Nous envisagerons les eaux profondes plus loin dans cette section.

Dans les océans ouverts, l'intensité de l'éclairage par le Soleil est importante en surface et pratiquement nulle à 200 m de profondeur ; la photosynthèse se limite à ce niveau de l'océan. Cependant, les nutriments du phytoplancton, comme les nitrates, sont présents à faible concentration dans la zone photique parce que, depuis très longtemps, les processus écologiques ont exporté les nitrates et autres nutriments des eaux supérieures vers les eaux profondes et, qu'en pleine mer, il n'existe aucune force suffisante pour ramener les nutriments vers les eaux éclairées.

À cause de la faible concentration des nutriments dans la zone photique, des portions étendues de la haute mer ont une faible productivité (voir figure 57.11) et peuvent être considérées comme un « désert biologique ». Ces zones – qui se trouvent au centre des gyres du milieu

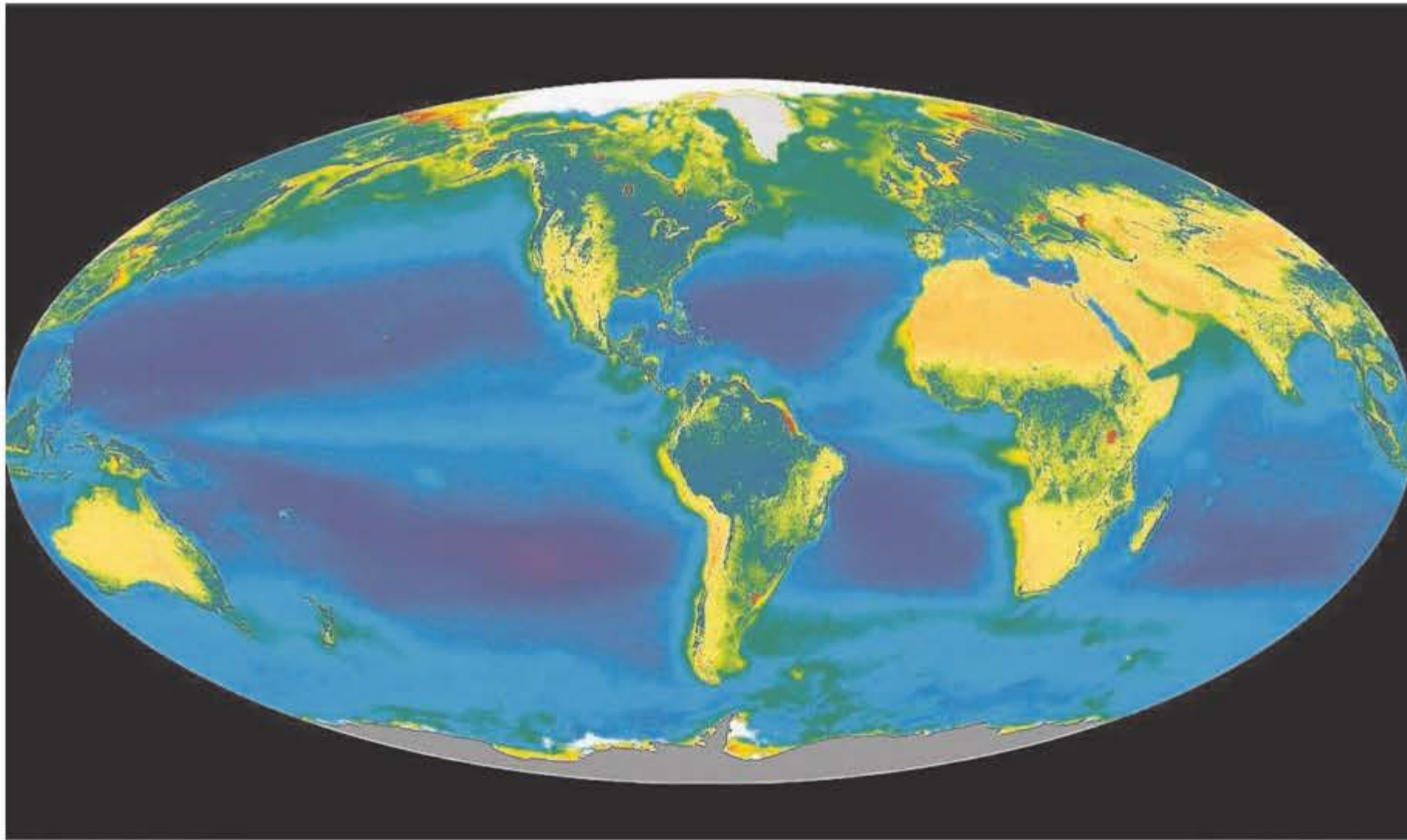


Figure 58.16 Les grandes régions fonctionnelles de l'océan. Les régions considérées comme oligotrophes (colorées en bleu foncé) sont des « déserts biologiques » à faible productivité. Les écosystèmes du plateau continental (bordure verte des continents) ont normalement une productivité moyenne à élevée. Les régions d'upwelling (remontée des eaux, bordure jaune des continents), comme le long des côtes occidentales de l'Amérique du Nord et du Sud, ainsi que de l'Afrique du Sud, ont la plus forte productivité et font partie des écosystèmes les plus productifs de toute la Terre.

des océans (voir figure 58.4) – sont souvent désignés globalement comme un *océan oligotrophe* (figure 58.16) en rapport avec leur faible taux de nutriments et leur faible productivité.

Aujourd'hui, on ne pêche que quelques espèces en pleine mer, comme les thons et certaines espèces de calmars et de baleines. La pêche dans ces zones se limite à quelques espèces pour deux raisons. D'abord parce que les animaux sont dispersés à cause de la faible productivité. La capture n'est commercialement rentable que pour les espèces dont les individus ont une grande taille ou tendent à s'assembler en bancs compacts. En second lieu, le coût des déplacements lointains est élevé. Tout le monde s'accorde à dire que si nous nous tournons vers la mer pour nourrir les populations humaines en expansion, nous ne pouvons pas attendre de la pleine mer un apport de grandes quantités de nourriture.

Les écosystèmes des plateaux continentaux fournissent d'abondantes ressources

Beaucoup des écosystèmes du plateau continental ont une productivité relativement élevée. C'est surtout parce que les eaux – les **eaux néritiques** (voir figure 58.15) – ont en général des concentrations élevées en nitrates et autres nutriments en moyenne annuelle.

Les eaux étant peu profondes sur le plateau continental, les nutriments ne sont pas tombés dans les fonds marins au cours du temps comme en pleine mer. Sur le plateau, les matériaux riches en nutriments tombent au fond d'une eau peu profonde et les éléments qu'ils contiennent sont agités dans la colonne d'eau lors des tempêtes. En

outre, des nutriments arrivent continuellement par l'érosion des terres voisines.

Environ 99 % des aliments collectés dans l'océan proviennent des écosystèmes du plateau continental. Ces écosystèmes sont aussi particulièrement importants pour l'humanité à d'autres points de vue. Les ressources minérales provenant de l'océan, comme le pétrole, proviennent presque exclusivement des plateaux. Enfin, presque toutes les activités récréatives de l'océan, de la voile à la plongée, se situent sur les plateaux. Ces rôles des plateaux continentaux s'expliquent surtout par leur proximité des côtes et leurs profondeurs relativement faibles.

Les estuaires

Les estuaires sont des types d'écosystèmes côtiers du plateau continental. Un estuaire est un endroit de la côte, comme une baie, partiellement entouré par la terre et dans lequel l'eau douce des cours d'eau se mélange à celle de l'océan, créant une salinité intermédiaire (eau saumâtre).

Les estuaires sont des plans d'eau, mais on y trouve aussi des marais intertidaux et des marécages. Un habitat *intertidal* est une zone exposée à l'air à marée basse, mais immergée à marée haute. Les marais de la zone intertidale sont des *marais salés*. On trouve des marais à *mangroves* (dominés par des arbres et arbustes) dans les régions tropicales et subtropicales du globe.

Les estuaires constituent un écosystème vital et très productif – ils procurent abri et nourriture à de nombreux animaux aquatiques, particulièrement aux larves et aux jeunes, que les gens récoltent pour leur nourriture. Les estuaires sont aussi importants pour beaucoup d'autres espèces animales, comme les oiseaux migrateurs.

Les bancs et les récifs coralliens

Parmi les autres écosystèmes du plateau continental, on trouve les bancs et les récifs coralliens. Les **bancs** sont des zones peu profondes localisées du plateau, extrêmement importantes comme lieux de pêche ; le Georges Bank, à 100 km au large de la côte du Massachusetts, fut à l'époque un des plus productifs et des plus fameux ; la plus grande partie de cette zone a été fermée à la pêche au milieu des années 1990 pour cause de surexploitation.

Les écosystèmes des **récifs coralliens** se trouvent aux latitudes tropicales et subtropicales. Ils sont caractérisés par des coraux qui sécrètent un squelette calcifié compact dont le réseau tridimensionnel forme un habitat particulier pour beaucoup d'autres organismes, comme les poissons des récifs et les coraux mous (figure 58.17).

Les quelque 700 espèces de coraux à l'origine des récifs sont des symbioses entre animaux et algues ; les animaux sont des cnidaires, et les dinoflagellés symbiotiques vivent dans les cellules de leur assise cellulaire interne (le gastroderme) ; voir chapitre 33. Ces coraux dépendent de la photosynthèse de l'algue symbiotique et demandent donc des eaux claires facilement traversées par la lumière. Ces coraux sont en danger dans le monde entier, comme on le verra plus loin.

Les régions d'upwelling (remontée des eaux) connaissent un mélange des nutriments et de l'oxygène

Les régions des océans où l'eau remonte sont des endroits localisés où des quantités notables d'eaux profondes sont entraînées vers la surface par des forces locales, comme les vents. L'eau profonde est souvent riche en nitrates et autres nutriments. Cette remontée entraîne donc constamment des nutriments vers les couches superficielles bien éclairées. Le phytoplancton répond à cette abondance de nutriments et de lumière par une croissance et une reproduction importantes. C'est dans ces zones que la productivité primaire est la plus forte de tous les océans.



Figure 58.17 Un écosystème des récifs coralliens. Les coraux constructeurs de récifs, qui sont des symbioses entre cnidaires et algues, édifient la structure tridimensionnelle du récif et leur production primaire est considérable. Les poissons et beaucoup d'autres sortes d'animaux y trouvent nourriture et abris et contribuent à la grande diversité de ces écosystèmes. Environ 20 % de toutes les espèces de poissons sont spécifiques des récifs coralliens.

La région de remontée la plus fameuse (voir figure 58.16) se trouve le long de la côte du Pérou et de l'Équateur, où la remontée se produit toute l'année. Une autre région importante est la côte de Californie, où la remontée des eaux survient en été, pendant la moitié de l'année, ce qui explique pourquoi les baigneurs trouvent l'eau froide sur les plages même en juillet et en août.

Dans les régions d'upwelling, la pêche est prolifique, mais vulnérable. La pêche à la sardine dans les remontées de Californie a chuté il y a quelques dizaines d'années, mais elle avait été extrêmement importante pour la région, comme l'avait rapporté le prix Nobel de littérature John Steinbeck dans plusieurs de ses livres, particulièrement dans *Cannery Row*.

L'oscillation australe El Niño (ENSO)

Le phénomène appelé El Niño a d'abord attiré l'attention des scientifiques à l'occasion de recherches sur la région d'upwelling du Pérou et de l'Équateur. Dans cette région, tous les 2 à 7 ans, et de façon irrégulière et assez imprévisible, les eaux se réchauffent fortement le long de la côte et, en même temps, la productivité se réduit anormalement.

À cause de cette faible productivité primaire, les populations de poissons ordinairement abondantes diminuent et les oiseaux et mammifères de mer dépendant des poissons sont soumis à des contraintes ou décimés. Les habitants de la région ont donné, au réchauffement modéré annuel, qui survient chaque année aux alentours de la Noël, le nom de « El Niño » (littéralement « l'enfant », pour l'Enfant Jésus). Les scientifiques ont adopté le terme d'oscillation australe El Niño (*El Niño Southern Oscillation*, ENSO) pour désigner ces réchauffements drastiques.

Il a fallu plusieurs décennies pour comprendre la cause immédiate d'El Niño, mais les recherches ont finalement montré qu'il s'agit d'une atténuation des alizés soufflant d'est en ouest dans la région. Les alizés poussent ordinairement les eaux superficielles chaudes vers l'ouest, loin de la côte du Pérou et de l'Équateur. La couche d'eau chaude superficielle se réduit de la sorte le long de la côte et l'eau profonde – froide, mais riche en nutriments – remonte en surface et entraîne une forte production primaire.

L'affaiblissement des alizés permet une augmentation de l'épaisseur de la couche chaude superficielle. L'upwelling se poursuit, mais, dans ces conditions, il met en circulation principalement l'épaisse couche chaude de surface, pauvre en nutriments.

Après la découverte de ces causes, les chercheurs ont constaté, dans les années 1980, que l'atténuation des vents alizés fait en réalité partie d'une modification d'un système de circulation des vents qui se reproduit irrégulièrement. Les alizés soufflent normalement d'est en ouest parce que les eaux superficielles du Pacifique équatorial sont plus chaudes à l'ouest qu'à l'est. L'air s'élève dans les régions occidentales chaudes, y crée une basse pression et l'air souffle de l'est vers la basse pression. Pendant El Niño, plus l'océan se réchauffe à l'est, plus il se rapproche de l'océan occidental et les différences s'atténuent dans l'océan. Quand les alizés s'atténuent un peu, la différence de pression qui les fait souffler diminue donc et affaiblit encore les alizés. L'eau chaude qui reste ordinairement à l'ouest à cause des alizés glisse progressivement vers l'est au niveau de l'équateur à cause de cette série de processus qui se renforcent. Finalement, les conséquences d'El Niño se font sentir dans une grande partie du système climatique du globe, affectant la température de la mer en Californie, les pluies dans le sud-ouest des États-Unis et même des systèmes aussi éloignés qu'en Afrique.

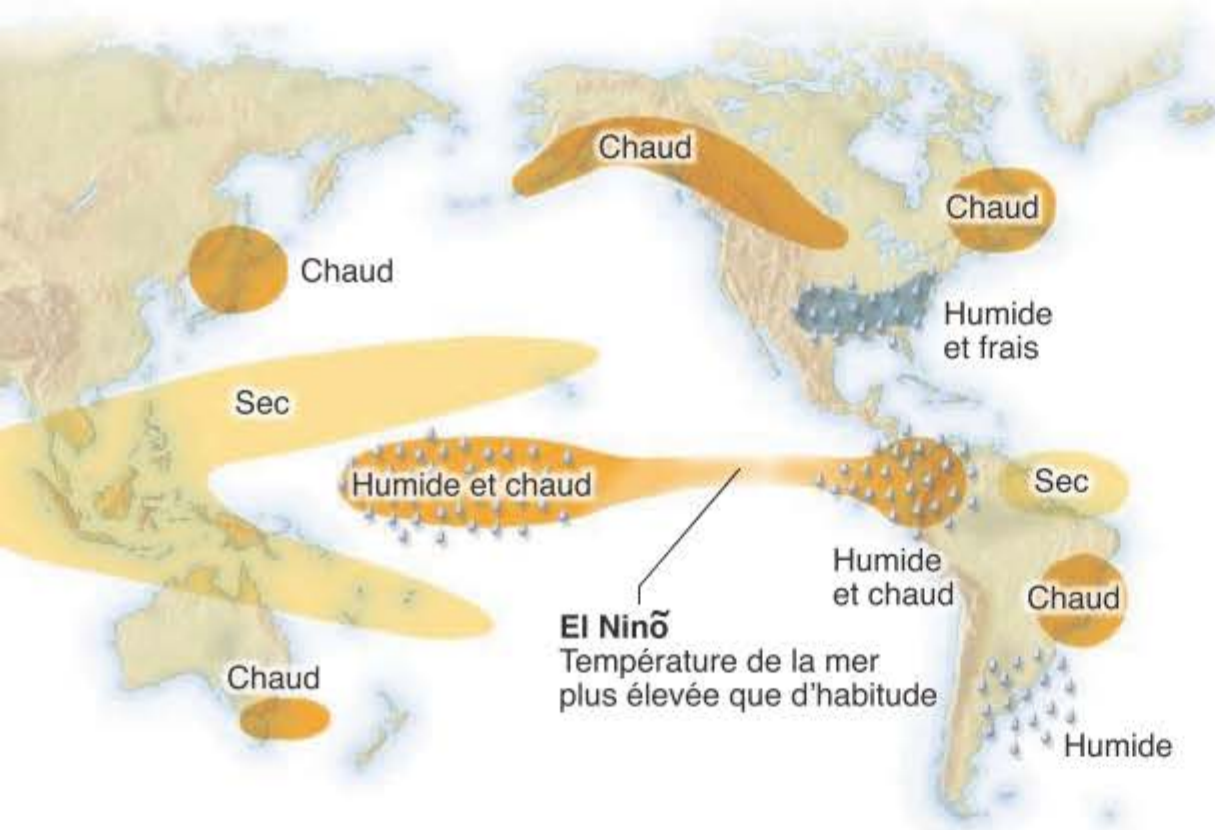


Figure 58.18 Un hiver El Niño. Ce schéma ne montre que quelques perturbations mondiales du temps souvent associées au phénomène El Niño.

Une conséquence spécifique est un déplacement de 6000 km des systèmes météorologiques de l'ouest de l'Océan Pacifique vers l'est. Les tempêtes tropicales qui inondent normalement l'Indonésie et les Philippines se produisent quand l'eau de mer chaude atteignant ces îles entraîne l'ascension de l'air qui se refroidit et condense son humidité sous forme de pluie. Quand l'eau chaude se dirige vers l'est, les nuages en font autant et des régions initialement pluvieuses restent sèches. À l'inverse, la partie occidentale du Pérou et de l'Équateur est arrosée, alors qu'elle reçoit normalement peu de précipitations.

El Niño peut provoquer des ravages dans les écosystèmes. Le plancton peut ne représenter que 5 % de sa quantité normale dans les eaux du Pérou et de l'Équateur et, à cause de cette chute de la productivité du plancton, les stocks de poissons disponibles disparaissent pratiquement (figure 58.18). Dans les Îles Galapagos, par exemple, les populations d'oiseaux marins et d'otaries chutent parce que ces animaux meurent de faim faute de poissons. Sur terre, par contre, les fortes pluies entraînent une abondance de graines et les oiseaux terrestres en profitent. Au Chili, les mêmes conséquences sur l'abondance des graines se prolongent dans la chaîne alimentaire, conduisant d'abord à une augmentation des populations de rongeurs, puis des prédateurs, bel exemple de cascade trophique ascendante, comme on l'a vu au chapitre 57.

Les eaux profondes sont un environnement froid et sombre, avec quelques communautés étonnantes

Les fonds marins représentent de loin l'habitat le plus vaste du globe, en ce sens qu'il s'agit d'une région très étendue, caractérisée par des conditions relativement uniformes sur l'ensemble du globe. Ces eaux n'ont pas de saisons, elles sont froides (2-5 °C), totalement obscures et soumises à des pressions élevées (400-500 atmosphères pour des fonds de 4000-5000 m).

Dans la plupart des régions des eaux profondes, les aliments proviennent de la photosynthèse des eaux éclairées, loin au-dessus. Ces aliments – sous forme de carcasses, de granules de déjections et de mucus – peuvent prendre un mois pour descendre de la surface au fond et, le long du trajet, 99 % environ sont consommés par les animaux vivant

dans la colonne d'eau. Les communautés du fond ne reçoivent donc que 1 % de la production finale et sont peu alimentées. Néanmoins, de nombreuses espèces animales – la plupart de petite taille et très dispersées – vivent dans les profondeurs de la mer. Certains de ces animaux sont bioluminescents (figure 58.19a) et donc capables de communiquer ou d'attirer des proies grâce à la lumière.

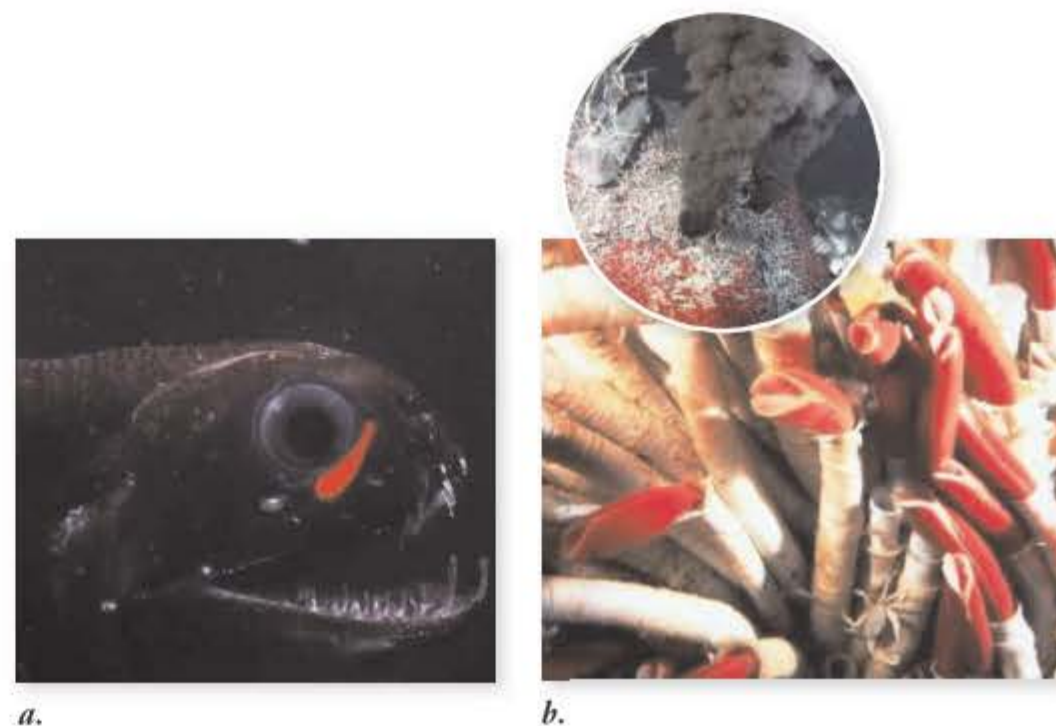
Les communautés des sources hydrothermales

Les communautés les plus étonnantes des profondeurs de la mer sont celles des sources hydrothermales. Contrairement au reste des eaux profondes, ces communautés sont pleines de vie (figure 58.19b), avec des animaux de grande taille comme des vers de la taille d'une batte de baseball. Cette profusion de vie est possible parce que ces communautés ne dépendent pas d'une zone photique lointaine, mais se trouvent à proximité d'une production primaire abondante.

Les communautés des sources hydrothermales se trouvent aux endroits où des plaques tectoniques s'écartent et l'eau de mer – circulant dans une roche poreuse – peut entrer en contact avec des roches très chaudes sous le fond de la mer. Cette eau est chauffée à plus de 350 °C et s'enrichit en sulfure d'hydrogène.

Quand l'eau s'échappe de la roche poreuse, des bactéries libres et symbiotiques oxydent le sulfure ; cette réaction leur procure une énergie qui, comme pour la photosynthèse, peut servir à la synthèse de leur propre substance cellulaire, à leur croissance et à leur reproduction. Ces bactéries qui oxydent le soufre sont des chimioautotrophes (voir chapitre 57). Les animaux de ces communautés se nourrissent des bactéries ou mangent d'autres animaux qui le font. Les communautés des sources hydrothermales font partie des rares communautés dont la production primaire ne dépend pas de l'énergie solaire.

Figure 58.19 La vie dans les profondeurs marines. *a.* La tache lumineuse sous l'œil de ce poisson d'eau profonde est la conséquence de la présence d'une colonie symbiotique de bactéries lumineuses. La bioluminescence est une caractéristique assez fréquente des animaux mobiles dans les parties de l'océan assez profondes pour être obscures. Elle est plus commune parmi les espèces vivant dans la masse d'eau que sur le fond lui-même. *b.* Ces grands vers (visibles sur la photo agrandie) vivent près des fumeurs où l'eau chaude riche en sulfure d'hydrogène est émise par des fissures de la croûte terrestre. La plus grande partie du corps de ces vers contient une colonie de bactéries symbiotiques qui oxydent le soufre et utilisent l'énergie produite pour la production primaire de nouveaux matériaux organiques, qu'elles partagent avec leurs hôtes.



Synthèse 58.4

Les océans oligotrophes comprennent la pleine mer, où la productivité primaire est faible. Les écosystèmes du plateau continental ont en général une productivité modérée à élevée ; on y trouve les estuaires, les marais salés, les bancs de pêche et les récifs coralliens. La productivité est surtout élevée dans les régions d'upwelling, comme le long des côtes occidentales de l'Amérique du Nord et du Sud, où se rencontrent des zones de pêche riches, mais vulnérables. L'atténuation périodique des vents alizés dans ces régions peut empêcher la remontée de l'eau froide et entraîner ainsi des modifications climatiques désignées comme El Niño.

- *Quels cycles de population peut-on s'attendre à trouver dans les régions soumises à l'ENSO ?*

58.5 Impact humain sur la biosphère : pollution et épuisement des ressources

Objectifs

1. *Citer les principales menaces pour les écosystèmes.*
2. *Montrer les différences entre pollution ponctuelle et pollution diffuse.*
3. *Expliquer les conséquences de la déforestation.*
4. *Montrer comment la fragmentation de l'habitat peut contribuer à accroître l'incidence des maladies chez les humains.*

Nous savons tous que les activités humaines peuvent entraîner des modifications négatives dans les écosystèmes. Quand on en parle, il est important de savoir que des scientifiques créatifs peuvent souvent trouver des solutions rationnelles à ces problèmes.

L'histoire du DDT aux États-Unis en est un bon exemple. Le DDT est un insecticide très efficace utilisé à grande échelle pendant des décennies après la seconde guerre mondiale, souvent dans des terrains humides pour le contrôle des moustiques. Pendant les années d'utilisation massive du DDT, les populations d'orfraies, d'aigles chauves et de pélicans bruns – oiseaux qui capturent tous de gros poissons – ont chuté. On a finalement mis en relation l'application du DDT avec la mort de ces oiseaux.

Les scientifiques ont constaté que le DDT et les produits de son métabolisme se concentraient de plus en plus dans les tissus des animaux lors de leur passage par les chaînes alimentaires (figure 58.20). Les animaux au bas des chaînes alimentaires accumulaient relativement peu dans leurs tissus graisseux. Mais les carnivores primaires qui s'en nourrissaient en accumulaient plus en en mangeant beaucoup, et les concentrations étaient encore plus élevées dans les carnivores secondaires. Les carnivores de fin de chaîne, comme les oiseaux consommant les grands poissons, étaient gravement affectés par le DDT. Chez ces oiseaux, les scientifiques ont constaté que le DDT empêchait la production des coquilles des œufs. La coquille des œufs pondus par les oiseaux était tellement mince qu'elle était souvent rompue avant l'éclosion.

Les chercheurs arrivèrent à la conclusion qu'il était possible de remédier à la disparition des oiseaux se nourrissant de poissons par un programme rationnel d'élimination du DDT des écosystèmes, et des lois ont été passées pour interdire son usage. Aujourd'hui, trente ans plus tard, les populations d'orfraies, d'aigles et de pélicans sont remontées de façon spectaculaire. Pour certains, le succès de ce type d'histoire est un des principaux motifs justifiant les études scientifiques.

Les habitats d'eau douce sont menacés par la pollution et l'épuisement des ressources

Les eaux douces ne représentent pas seulement le plus petit des principaux habitats, mais aussi le plus menacé. Une des menaces les plus simples, mais aussi des plus graves, est le fait que les populations humaines en croissance soutirent souvent des quantités excessives d'eau des rivières, des lacs et des fleuves. Par exemple, le Colorado est un des plus grands fleuves d'Amérique du Nord : il naît dans les Montagnes Rocheuses et traverse l'Utah, l'Arizona, le Nevada, la Californie et le nord du Mexique avant de se déverser dans l'océan. Aujourd'hui, l'eau de la rivière est pompée tout au long de son cours pour répondre aux besoins en eau des villes (même à grande distance, comme Los Angeles) et pour l'irrigation des cultures. Le fleuve est souvent à sec dans le désert et l'eau n'arrive plus à la mer. Au niveau mondial, beaucoup de problèmes d'approvisionnement en eau pointent à l'horizon.

Pollution : ponctuelle ou diffuse

La pollution des eaux douces est un problème mondial. La pollution ponctuelle provient d'un lieu identifiable – comme des usines émettant

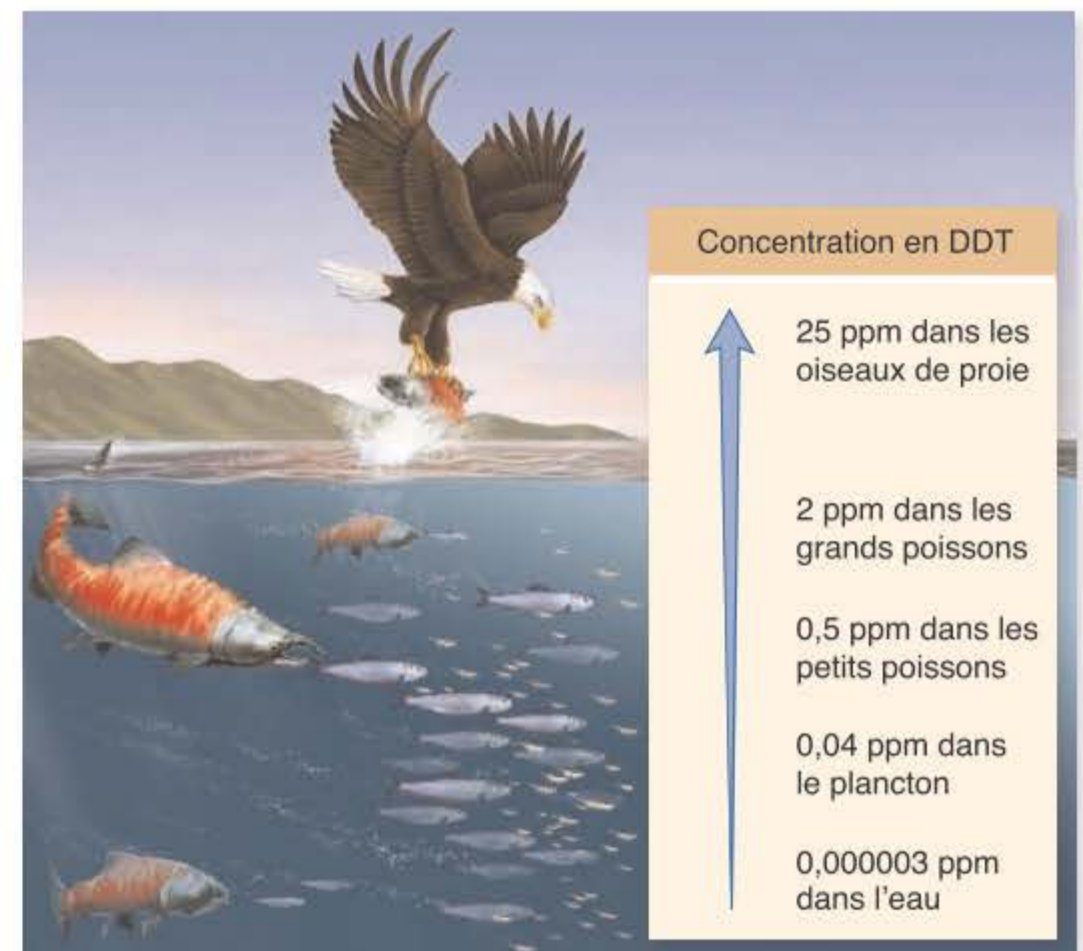


Figure 58.20 Amplification biologique de la concentration en DDT. Parce qu'il a tendance à s'accumuler dans ses tissus graisseux, le DDT consommé par l'animal avec sa nourriture se concentre de plus en plus aux niveaux supérieurs de la chaîne alimentaire. Les concentrations données à droite sont exprimées en parties par million (ppm). Avant son interdiction aux États-Unis, les populations d'oiseaux consommant beaucoup de poisson ont fortement décliné parce que les produits du métabolisme du DDT rendaient les coquilles de leurs œufs tellement minces qu'elles se brisaient pendant l'incubation.

des polluants à des endroits précis, comme un émissaire d'évacuation. Par exemple, les stations d'épuration déchargent des effluents dans les cours d'eau à des endroits spécifiques, ou parfois de l'eau contaminée par des métaux lourds ou des produits chimiques. Des lois et des technologies peuvent facilement être mises en œuvre pour réduire la pollution ponctuelle parce que la localisation exacte et le type de pollution sont bien connus. Dans beaucoup de pays, on a fait beaucoup de progrès mais, dans d'autres, surtout dans les pays en développement, la pollution de l'eau reste un problème majeur.

Un exemple de pollution diffuse est l'eutrophisation provoquée par le lessivage des nitrates et des phosphates en excès provenant des engrais épandus sur les pelouses et les cultures. Quand ces nitrates et phosphates arrivent dans les cours d'eau et les lacs, les propriétés des plans d'eau empirent ; la concentration de l'oxygène dissous décline, des espèces de poissons comme les carpes remplacent les espèces plus appréciées. Le problème est amplifié quand les cours d'eau se déversent dans l'océan. L'eutrophisation provenant de l'accumulation des substances chimiques peut éliminer l'oxygène d'énormes surfaces d'eau et entraîner la disparition massive des poissons et d'autres animaux. La plus connue de ces zones, couvrant environ 17 500 km² en 2011, se situe à l'endroit où le Mississippi se déverse dans le Golfe du Mexique, mais il y a d'autres « zones mortes » ailleurs dans le monde.

Les nitrates et les phosphates susceptibles de provoquer ces problèmes proviennent de milliers de fermes et de pelouses répandues dans tous les bassins versants et souvent, ils arrivent pratiquement de partout dans les eaux douces. En raison de son caractère diffus, il est difficile de corriger ce type de pollution par de simples régulations techniques. Les solutions résident souvent dans l'éducation du public et l'action politique.

Pollution par la combustion du charbon : les pluies acides

Une pollution intermédiaire entre les types ponctuels et diffus peut provenir de la combustion du charbon dans les centrales électriques. Chaque cheminée est une source ponctuelle, mais il y en a beaucoup, et la fumée et les gaz qui en sortent se répandent sur de vastes territoires.

La pluie acide est un aspect de ce problème. Lors de la combustion du charbon, le soufre qu'il contient est oxydé. S'ils ne sont pas contrôlés, les oxydes de soufre se répandent dans l'atmosphère à partir des cheminées et se combinent à la vapeur d'eau pour former de l'acide sulfurique. En tombant, la pluie et la neige emportent l'acide et deviennent extrêmement acides quand elles touchent le sol (figure 58.21).

Le mercure émis dans la fumée des cheminées est un second problème potentiel. La combustion du charbon peut être la principale source de mercure dans l'environnement ; c'est un problème grave de santé publique parce que de faibles quantités de mercure peuvent interférer avec le développement du cerveau des fœtus humains et des enfants.

Les précipitations acides et la pollution par le mercure affectent les écosystèmes aquatiques. Aux pH inférieurs à 5,0, beaucoup d'espèces de poissons et d'autres animaux aquatiques meurent et ne peuvent se reproduire. Dans le monde, des milliers de lacs et d'étangs ne contiennent plus de poissons à cause de l'abaissement du pH provoqué par les précipitations acides. Le mercure tombant de l'atmosphère dans les lacs et les étangs s'accumule dans les tissus des poissons. Dans la région des grands lacs des États-Unis, il est conseillé aux gens – particulièrement aux femmes enceintes – d'éviter autant que faire se peut le poisson pris sur place à cause de sa teneur en mercure.

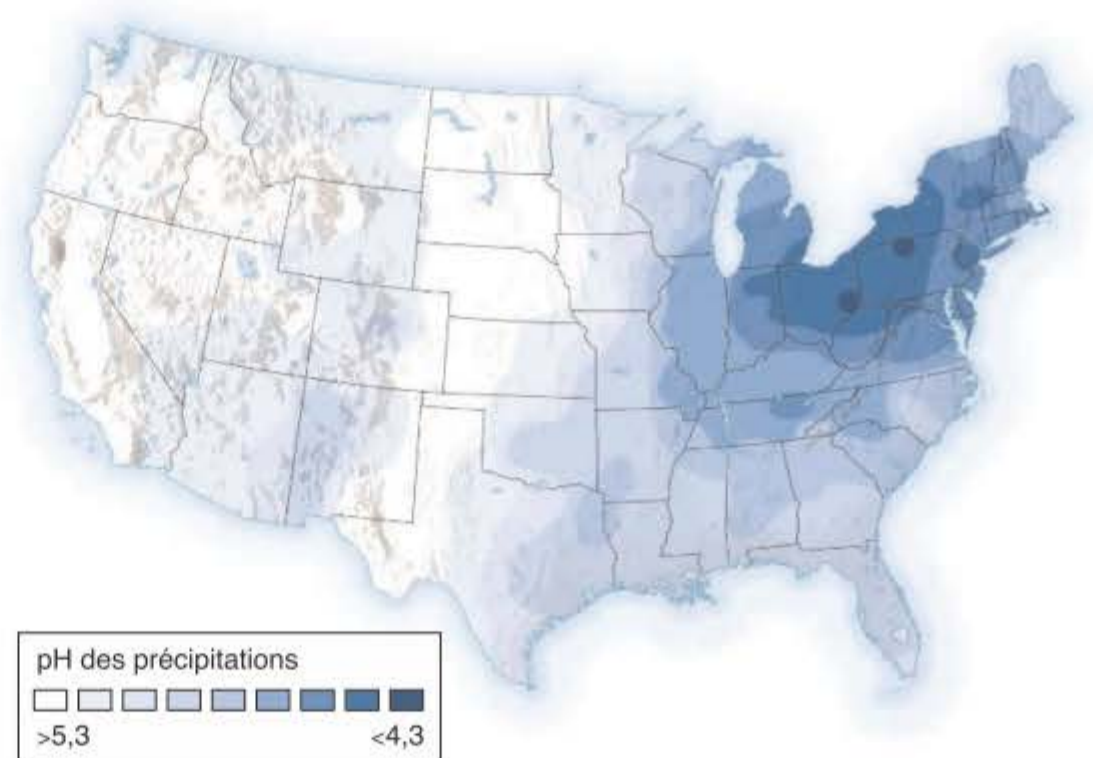


Figure 58.21 Valeurs du pH des pluies aux États-Unis. Les valeurs du pH inférieures à 7 représentent des conditions acides ; l'acidité est d'autant plus forte que les valeurs sont plus faibles. Dans certaines parties des États-Unis, particulièrement dans le nord-est, les précipitations sont généralement plus acides que l'eau de pluie naturelle, dont le pH est d'au moins 5,6.

Les écosystèmes forestiers sont menacés dans les régions tropicales et tempérées

Le seul problème vraiment important pour les habitats terrestres est probablement la déforestation par coupe et brûlis. Il y a beaucoup de motifs de déforestation. Dans les pays pauvres, la déforestation est souvent diffuse et due à l'ensemble de la population ; les gens brûlent le bois pour la cuisine ou le chauffage, et ils le prennent dans les forêts locales.

À l'autre extrémité, des compagnies coupent encore de larges bandes de forêts vierges de façon industrielle et expédient le bois à l'autre bout du monde aux acheteurs. Les bois tropicaux, comme l'acajou des forêts de l'Asie du Sud-Est, sont envoyés aux États-Unis pour en faire des meubles, et les bois tendres sont envoyés d'Alaska en Asie Orientale pour la production de pâte à papier. Les forêts sont parfois simplement brûlées pour ouvrir le pays à la culture ou à l'élevage (figure 58.22a).

Perte des habitats

La perte des habitats forestiers a des conséquences graves. Par exemple, des groupes d'espèces particulièrement variés dépendent des forêts pluviales tropicales pour leur habitat. La perte de biodiversité peut donc être particulièrement grave quand ces forêts sont coupées. Beaucoup de forêts tropicales ont été sévèrement dégradées, et les estimations récentes font penser que moins de la moitié ont conservé leur état premier. Au rythme actuel, toutes les forêts pluviales du monde seront dégradées ou en voie de disparition dans une trentaine d'années.

Outre la perte des habitats, la déforestation peut avoir de nombreuses conséquences secondaires, en fonction du contexte local. Dans la région du Sahel, au sud du Sahara, la déforestation a été la principale cause de l'augmentation de la désertification. Dans les forêts du nord-est des États-Unis, l'expérience de Hubbard Brook (voir figure 57.7) montre que la déforestation peut aboutir à la perte des nutriments des sols forestiers et, en même temps, à l'enrichissement des plans d'eau situés en aval.



a.

b.

Figure 58.22 Destruction des forêts pluviales tropicales. a. Ces feux détruisent une forêt pluviale au Brésil et la nettoient pour les pâturages de bovins. b. On peut voir les conséquences de la déforestation sur ces pentes d'altitude moyenne à Madagascar, qui ne portent plus que des pâtures de qualité médiocre, ce qui entraîne l'érosion du sol superficiel vers les rivières – remarquez la couleur de l'eau, colorée en brun par la forte érosion du sol. Ce type d'image s'observe dans de nombreux endroits autour du globe, comme en Équateur et en Haïti, aussi bien qu'à Madagascar.

Perturbation du cycle de l'eau

Comme on l'a vu au chapitre 57, l'abattage d'une forêt pluviale tropicale interrompt le cycle local de l'eau et altère le paysage de manière permanente. Après l'abattage de ces forêts, l'eau de pluie s'écoule ailleurs, au lieu de revenir dans l'atmosphère immédiatement au-dessus par transpiration. À cause de cette modification, les conditions peuvent ne plus convenir aux arbres de la forêt pluviale qui y vivaient. Les terrains portant une végétation appauvrie – qui sont exposés et ne sont plus stabilisés par des systèmes racinaires épais – peuvent être ravagés par l'érosion (figure 58.22b).

Les pluies acides

La déforestation peut être un problème dans les régions tempérées tout autant que sous les tropiques. En outre, les pluies acides affectent autant les forêts que les lacs et les cours d'eau ; dans les régions tempérées, de vastes régions arborées ont été affectées par les pluies acides. En changeant l'acidité du sol, ces pluies peuvent provoquer une grave mortalité parmi les arbres (figure 58.23).

Transmission des maladies des animaux aux humains

De nouveaux problèmes de santé sont apparus à cause des interactions entre les humains et les animaux de la forêt. Les maladies zoonotiques sont des maladies qui passent des animaux aux humains (et bien sûr aussi dans le sens inverse). Au cours de toute l'histoire de notre espèce, nous avons été les malheureux destinataires de beaucoup de ces maladies. La peste, le rhume, le choléra, la salmonellose et bien d'autres – 60 % de tous les pathogènes humains ont une origine zoonotique. Mais, depuis quelques années, beaucoup de nouvelles maladies sont passées à l'homme, comme la fièvre du Nil occidental, le syndrome respiratoire du



Figure 58.23 Dégâts subis par les arbres à la suite de précipitations acides à Clingman's Dome, Tennessee. Les précipitations acides affaiblissent les arbres et les rendent plus sensibles aux parasites et aux prédateurs.

Moyen-Orient (MERS) et le syndrome respiratoire aigu sévère (SRAS). Ebola est une autre maladie zoonotique connue depuis longtemps, mais qui a explosé en 2014, tuant plus de 11 000 personnes en Afrique occidentale.

De nombreuses raisons peuvent expliquer l'apparition récente de tant de ces nouvelles maladies, mais beaucoup proviennent de l'utilisation croissante des forêts par l'homme et de contacts avec leurs hôtes qui hébergent des agents infectieux. Le virus de l'immunodéficience humaine (VIH) a été transmis aux humains par des singes en Afrique de l'ouest, très probablement par le sang d'un animal à l'occasion de la chasse ou de la préparation de la viande (voir section 23.5).

Un autre exemple est le virus Nipah, que l'on trouve normalement chez les chauves-souris frugivores, mais qui a causé une épidémie tuant plus de 100 personnes en Malaisie en 1999. La cause directe de la transmission provient vraisemblablement de l'installation de grandes porcheries à proximité des arbres fréquentés par les chauves-souris. En mangeant, les chauves-souris laissent tomber quantité de fruits, leur salive contient le virus et peut se trouver dans les fruits entamés. On peut facilement imaginer comment un porc peut ramasser ce fruit, attraper la maladie, puis la passer à l'éleveur.

Les maladies zoonotiques peuvent aussi provenir d'une perturbation de l'écosystème forestier. Un exemple évident est l'explosion de la maladie de Lyme (voir tableau 28.1), diagnostiquée chaque année chez 300 000 personnes aux États-Unis, le plus souvent dans les états du nord-est. La maladie est provoquée par la bactérie *Borrelia burgdorferi*, que l'on trouve fréquemment chez la souris à pattes blanches (*Peromyscus leucopus*). La bactérie est transmise d'une souris à l'autre par la tique à pattes noires (*Ixodes scapularis*), qui peut aussi transmettre la maladie à l'homme.

La prévalence de la maladie dans les États-Unis du nord-est s'explique en partie par le morcèlement de la forêt en de nombreuses petites parcelles par des routes, des champs et des agglomérations. Dans les petites parcelles boisées il y a relativement peu de prédateurs et, par conséquent, la densité des populations de souris augmente. Il en résulte une augmentation du nombre de tiques (trois fois plus dans les parcelles de moins de 1,2 hectare que dans les plus grandes), mais aussi une infection plus fréquente des tiques (sept fois plus fréquente dans les petites

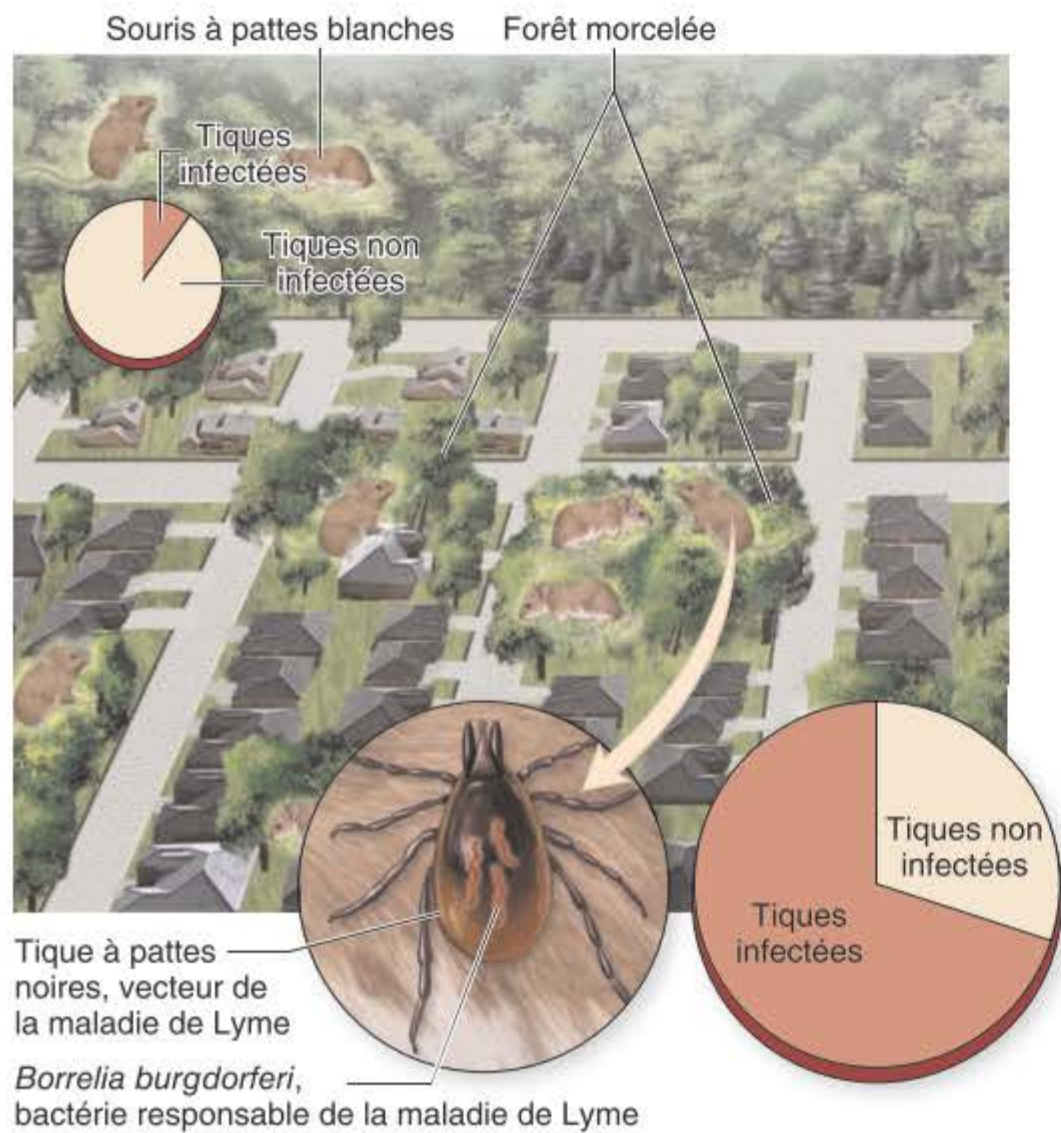


Figure 58.24 Comment la fragmentation des forêts entraîne des épidémies de la maladie de Lyme. Dans une forêt morcelée, il y a moins de prédateurs et les populations de souris s'accroissent. Il en résulte un nombre plus élevé de tiques et celles-ci sont plus souvent infectées par la bactérie responsable de la maladie de Lyme.

Source : National Science Foundation

parcelles). Les personnes vivant près de ces parcelles ont donc plus de chance d'être mordus par une tique et d'être atteintes de la maladie de Lyme (figure 58.24).

Les conditions favorisant le développement de nouvelles zoonoses sont malheureusement de plus en plus nombreuses, et de nouvelles maladies apparaissent. Le véritable problème est qu'une maladie facilement transmissible entre les humains – par exemple par contact ou par la toux – peut entraîner une épidémie majeure. Jusqu'à présent, nous avons eu de la chance, mais les responsables de la santé publique craignent que, sans une vigilance constante, une épidémie grave ne puisse être évitée.

Les habitats marins s'épuisent en poissons et autres espèces

La surexploitation des océans est devenue critique au cours des dernières décennies et représente probablement aujourd'hui l'unique problème vraiment important dans le domaine océanique. L'océan est tellement vaste qu'il a semblé mieux protégé que les eaux douces et les écosystèmes terrestres contre l'altération globale par l'homme. Néanmoins, les prises de poissons mondiales ont atteint un maximum depuis plus de deux décennies, alors même que la demande de poisson ne cesse de croître. La pression de la pêche est excessive au point que 25 à 30 % des stocks de poissons sont désormais considérés officiellement comme surexploités, épuisés ou en rétablissement ; 40 à 50 autres pour cent sont exploités au maximum.

Les vastes territoires de pêche à la morue au large de la Nouvelle-Écosse, du Massachusetts et de la Grande-Bretagne ont été fermés

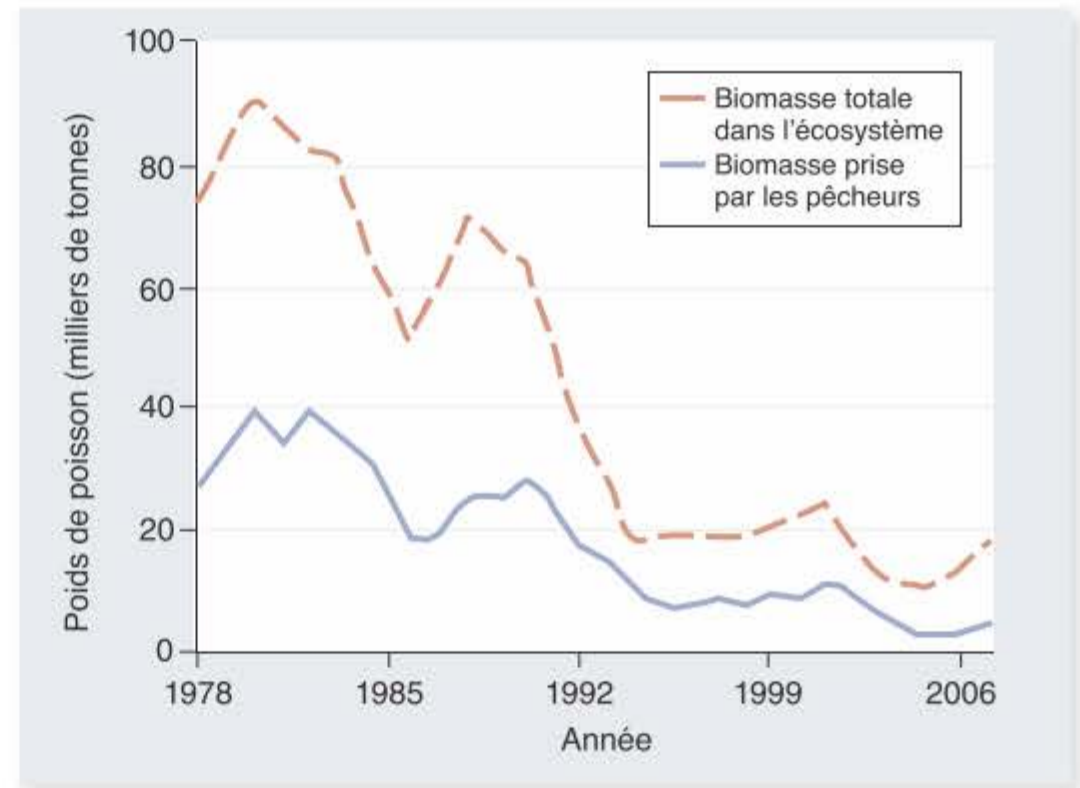


Figure 58.25 Effondrement de la pêche Le trait rouge montre la biomasse de morue (*Gadus morhua*) dans l'écosystème du Georges Bank, estimée par le service des pêches marines des États-Unis sur la base des données réunies par échantillonnage scientifique. La biomasse a diminué rapidement entre 1970 et 1990 à cause de la pression des pêches. Dans le même temps, les prises commerciales (*trait bleu*) sont restées à peu près constantes, en partie grâce à un travail de plus en plus rude, jusqu'à ce qu'elles tendent brusquement vers zéro et que la pêche périclite au milieu des années 1990. La pêche a été fermée au milieu des années 1990 pour permettre la restauration des poissons, mais, même en 2009, le rétablissement était négligeable et la pêche est loin de retrouver ses normes historiques.

dans les 20 dernières années pour cause d'effondrement. (figure 58.25). La surexploitation peut avoir des effets perturbateurs indirects. Dans les parties pauvres d'Afrique, le braconnage des primates et autres mammifères sauvages des parcs nationaux augmente quand les prises de poissons déclinent.

L'aquaculture : une solution miracle seulement ponctuelle

La production de poisson par aquaculture s'est fortement développée au cours des deux dernières décennies et elle est souvent considérée comme une solution simple au problème de la pêche. Mais les protéines alimentaires nécessaires à beaucoup de poissons d'élevage, comme le saumon, proviennent en grande partie de la capture de poissons sauvages. Dans ce cas, l'exploitation est simplement passée à des espèces différentes.

De plus, les pratiques actuelles en aquaculture sont souvent dommageables pour les écosystèmes océaniques sauvages. Un exemple est l'élimination des mangroves le long des côtes au profit des étangs de crevettes et de poissons, abandonnés quand leur productivité diminue. Une recherche est nécessaire pour résoudre ces problèmes.

Conséquences de la pollution

Si vaste que soit l'océan, il a reçu, en ce début du 21^e siècle, suffisamment de polluants pour qu'on puisse facilement les détecter au niveau du globe. Une expédition dans les îles inhabitées les plus lointaines du vaste Océan Pacifique a récemment signalé, par exemple, la présence de quantités considérables de plastiques sur les plages. Même les eaux de l'Océan Arctique contiennent des produits chimiques toxiques ; la biopsie de tissus de l'orque (*Orsinus orca*) a montré des niveaux extrêmement élevés de nombreuses substances chimiques, comme des pesticides et des pro-

duits souvent utilisés pour ignifuger les moquettes. Cependant, en raison de l'étendue des océans, la concentration des polluants n'atteint pas un niveau critique au large.

Exactement comme dans les eaux douces, la pollution provenant de la combustion du charbon et d'autres sources entraîne une augmentation de l'acidité des océans mais, dans ce cas, le coupable est le dioxyde de carbone. Ce n'est que récemment que les scientifiques ont constaté qu'une conséquence de l'apport massif de dioxyde de carbone dans l'atmosphère (voir section 58.6) est qu'il finit par se dissoudre dans l'océan. Il se combine alors à l'eau pour former des ions hydrogène (H^+) et bicarbonate (HCO_3^-). Selon certaines mesures, le résultat a été une augmentation de l'acidité de l'océan de 30 % depuis les années 1950, le pH étant plus bas que pendant les 20 derniers millions d'années ; on s'attend à une augmentation de 150 % avant la fin de ce siècle.

Les conséquences biologiques de cette acidification ne sont pas claires, mais un problème majeur est le fait que les organismes marins – comme les coraux, les échinodermes, les larves d'huîtres, et bien d'autres – ont besoin de carbonate de calcium pour construire leur squelette et d'autres structures. L'océan devenant plus acide, le carbonate de calcium ($CaCO_3$) de l'eau se combine aux ions hydrogène pour produire le bicarbonate : les animaux ont ainsi plus de peine à construire les structures nécessaires à leur survie et à leur croissance. En fait, c'est plutôt le contraire, et le carbonate de calcium déjà incorporé à leur squelette ou à d'autres structures peut en réalité se dissoudre. L'ampleur de ces effets n'est pas encore claire, mais beaucoup de scientifiques redoutent une menace pour les récifs coralliens et beaucoup d'autres éléments des écosystèmes océaniques.

Destruction des écosystèmes côtiers

La détérioration des écosystèmes côtiers pose aussi un problème important. Les estuaires souffrent souvent d'une eutrophisation grave ; depuis 1970 environ, par exemple, les eaux profondes de la Baie de Chesapeake, près de Washington, sont dépourvues d'oxygène pendant l'été à cause de la décomposition de quantités excessives de matière organique.

Un autre problème des côtes est la destruction des marais salés qui (comme les terres humides d'eau douce) sont souvent considérés comme inexploités. On pense généralement que la disparition des marais salés au 20^e siècle a été la principale cause de la destruction de la Nouvelle-Orléans par le cyclone Katrina en 2005. Si les marais salés et à cyprès chauves étaient restés intacts, ils auraient absorbé une grande partie des inondations et protégé partiellement la ville de la violence de la tempête.

L'appauvrissement de l'ozone stratosphérique a provoqué un « trou » d'ozone

Les couleurs de la photo satellite de la figure 58.26a représentent les différentes concentrations de l'ozone (O_3) entre 20 et 25 km au-dessus de la surface terrestre dans la stratosphère. L'ozone stratosphérique s'est raréfié au-dessus de l'Antarctique (région pourpre sur la figure) pour atteindre entre la moitié et le tiers de sa concentration normale : on parle du trou d'ozone.

La raréfaction de l'ozone est surtout grave en Antarctique, mais il s'agit d'un phénomène mondial. Au-dessus des États-Unis, la concentration de l'ozone a diminué d'environ 4 %, selon l'agence américaine pour la protection de l'environnement.

Ozone stratosphérique et UV-B

L'ozone stratosphérique est important parce qu'il absorbe des ultraviolets – plus particulièrement les UV-B – du rayonnement solaire incident. Les UV-B ont plusieurs effets dangereux pour les organismes vivants ; par exemple, ils augmentent les risques de cataracte et du cancer de la peau. La raréfaction de l'ozone stratosphérique permet à plus d'UV-B d'arriver à la surface de la terre et augmente donc les risques. On estime par exemple que chaque diminution d'un pour cent de cet ozone entraîne une augmentation de 6 % de l'incidence du cancer de la peau. Dans l'hé-

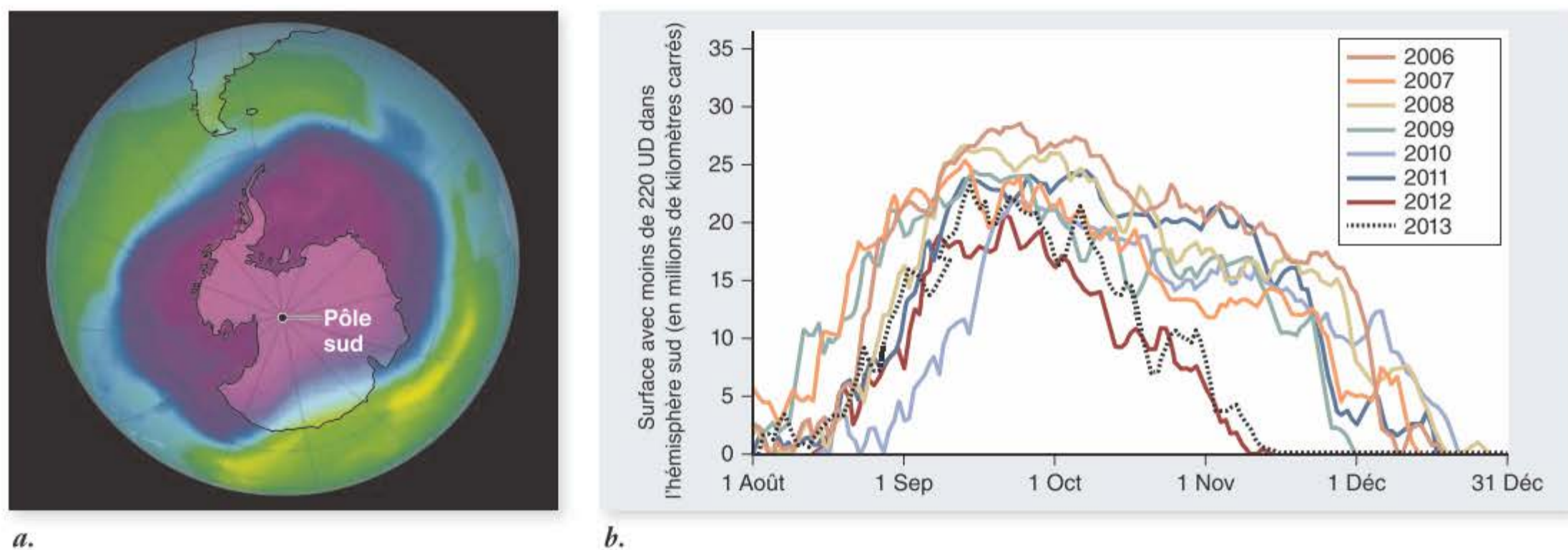


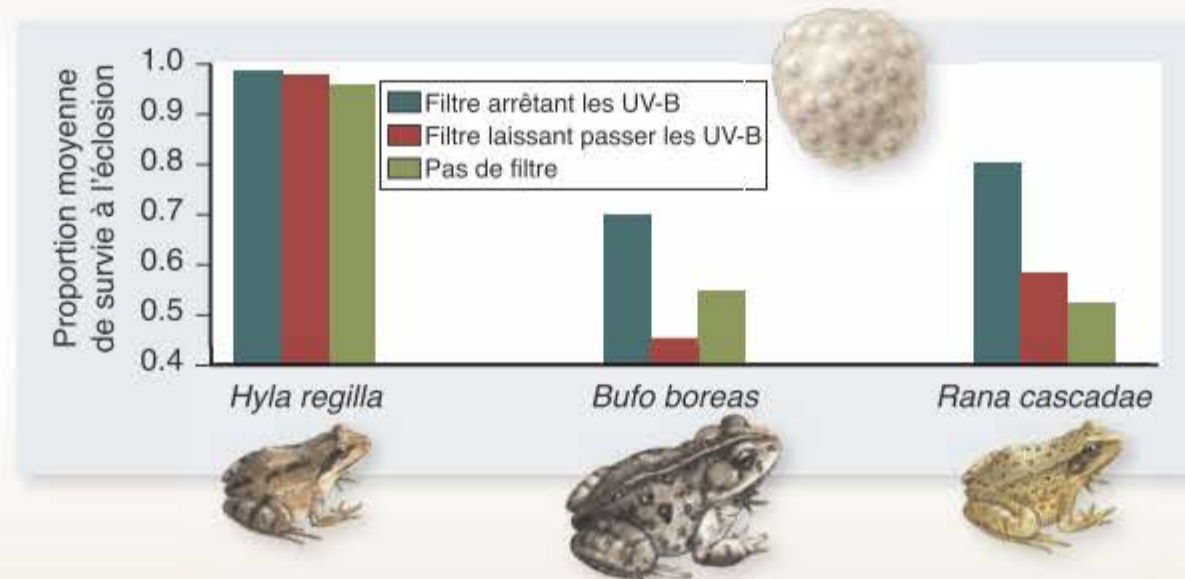
Figure 58.26 Le trou d'ozone au-dessus de l'Antarctique. La NASA suit régulièrement l'étendue de l'appauvrissement de l'ozone dans la stratosphère au-dessus de l'Antarctique. Chaque année depuis 1980 environ, une zone très appauvrie en ozone, le trou d'ozone, est apparue en août (début du printemps dans l'hémisphère austral) quand les rayons solaires déclenchent des réactions chimiques dans l'air froid concentré au-dessus du pôle sud pendant l'hiver antarctique. Le trou s'agrandit en septembre avant de disparaître quand les températures remontent en novembre et décembre. *a.* En septembre 2006 le trou de 30 millions de kilomètres carrés (en pourpre sur l'image satellite) couvrait une surface supérieure à celle des États-Unis, du Canada et du Mexique ; c'était le plus grand trou jamais signalé. *b.* Les concentrations dans l'atmosphère des composés chimiques responsables de la disparition de l'ozone ont probablement atteint un pic dans ces quelques dernières années et l'on s'attend à une diminution lente dans les prochaines décennies.

DÉMARCHE SCIENTIFIQUE

Question : l'exposition au rayonnement UV affecte-t-il la survie des œufs d'amphibiens ?

Hypothèse : l'exposition directe aux UV est nuisible aux œufs.

Expérience : des œufs fécondés de plusieurs espèces de grenouilles sont placés dans des enclos en pleine lumière. Tous les enclos ont des écrans, certains arrêtent les UV, alors que d'autres n'affectent pas leur transmission. Les œufs sont vérifiés pour voir s'ils éclosent ou meurent.



Résultat : la survie des œufs était fortement réduite pour deux des trois espèces dans les enclos où les filtres n'arrêtaient pas le rayonnement UV, en comparaison des enclos filtrés. L'hypothèse est donc confirmée : l'exposition aux UV est néfaste aux œufs d'amphibiens.

Autres questions : quels facteurs pourraient expliquer pourquoi certaines espèces sont affectées par l'exposition aux UV et d'autres ne le sont pas ? Comment tester vos hypothèses ?

Figure 58.27 Conséquences des rayonnements UV pour les œufs d'amphibiens.

misphère austral, où la perte d'ozone est la plus forte, le cancer de la peau est beaucoup plus fréquent que partout ailleurs dans le monde ; en Australie, par exemple, deux personnes sur trois seront atteintes d'un cancer de la peau à l'âge de 70 ans. L'exposition aux UV peut aussi être nuisible à beaucoup de types d'animaux, comme les amphibiens (figure 58.27).

Appauvrissement de l'ozone et CFC

La principale cause de la raréfaction de l'ozone stratosphérique est la présence dans l'atmosphère de composés industriels dérivés du chlore et du brome. Sont particulièrement concernés les chlorofluorocarbures (CFC) utilisés jusqu'il y a peu comme réfrigérants dans les climatiseurs et les réfrigérateurs et dans l'industrie. Les CFC répandus dans l'atmosphère peuvent finalement libérer des atomes de chlore libres qui, dans la stratosphère, catalysent la rupture des molécules d'ozone (O_3) pour donner l'oxygène ordinaire (O_2). L'ozone est continuellement construit et brisé, et les atomes de chlore libres déplacent l'équilibre en faveur de sa destruction.

La raréfaction extrême de l'ozone dans le trou d'ozone est une conséquence des conditions climatiques particulières au-dessus de l'Antarctique. Pendant l'hiver constamment sombre, un fort vent stratosphérique, le courant-jet (*jet stream*) polaire, souffle tout autour du globe et isole la stratosphère de l'Antarctique du reste de l'atmosphère. La stratosphère antarctique reste ainsi extrêmement froide (au maximum $-80^\circ C$) pendant de nombreuses semaines, ce qui permet la formation de types particuliers de nuages de glace. Les réactions liées aux particules de ces nuages entraînent l'accumulation de chlore diatomique, Cl_2 . Quand le soleil revient au début du printemps antarctique, le chlore diatomique est chimiquement rompu en nombreux atomes libres, d'où découlent les réactions qui raréfient l'ozone.

Élimination des CFC

Quand les recherches ont révélé les causes de la réduction de l'ozone stratosphérique, des réglementations ont été décidées au niveau mondial pour arrêter la production des CFC et d'autres composés responsables

du problème. Leur fabrication a cessé aux États-Unis en 1996 et le public a bien pris conscience de l'importance d'utiliser des produits alternatifs « ozone safe ». L'atmosphère ne se débarrassera de lui-même que très lentement des substances nuisibles à l'ozone à cause de leur stabilité chimique. Le problème de la raréfaction de l'ozone s'atténue cependant et l'on s'attend à une correction notable pour la seconde moitié du 21^e siècle (figure 58.26b).

L'histoire des CFC est un excellent exemple de la façon dont surviennent les problèmes environnementaux et dont ils peuvent être résolus. À l'origine, les CFC étaient présentés comme un moyen de refroidissement efficace et peu coûteux, une amélioration évidente par rapport aux technologies précédentes. À cette époque, on ne connaissait pas leurs conséquences nuisibles. Quand on a identifié les problèmes, les accords internationaux ont abouti à une solution efficace, et des progrès technologiques créatifs ont permis de les remplacer et de résoudre le problème à faible coût.

Synthèse 58.5

La pollution et l'épuisement des ressources sont les effets principaux dus à l'homme, sur l'environnement, les habitats d'eau douce étant les plus menacés. La pollution ponctuelle provient de lieux identifiables, comme les usines, tandis que la pollution diffuse provient de sources nombreuses, comme l'épandage d'engrais sur les pelouses. La déforestation est un problème majeur parce qu'elle détruit l'habitat, disloque les communautés, épuise les ressources et modifie localement le cycle de l'eau et les conditions climatiques. La fragmentation et d'autres perturbations de l'environnement ont joué un rôle dans la transmission de nouvelles maladies des animaux aux humains. La surpêche est problème majeur pour les océans.

- Les CFC étaient-ils un exemple de pollution ponctuelle ou diffuse ? De façon générale, comment les efforts faits pour lutter contre la pollution dépend-elle de sa source ?

58.6 Impacts humains sur la biosphère : le changement climatique

Objectifs

1. Expliquer les relations entre dioxyde de carbone atmosphérique et réchauffement global.
2. Décrire les conséquences du réchauffement global sur les écosystèmes et la santé humaine.

En étudiant l'histoire de la Terre et en la comparant à d'autres planètes, les scientifiques ont constaté que la concentration des gaz de l'atmosphère, et particulièrement du dioxyde de carbone, maintient la température moyenne sur terre environ 25 °C au-dessus de ce qu'elle serait en l'absence de ces gaz. On comprend ainsi que la composition de notre atmosphère est essentielle pour la vie sur Terre. Malheureusement, les activités humaines sont en train de modifier la composition de cette atmosphère d'une manière que la plupart des observateurs jugent dommageable ou, à long terme, désastreuse.

À cause des changements de la composition de l'atmosphère, la température moyenne à la surface de la Terre s'accroît : c'est le phénomène du réchauffement global. Comme vous pouvez vous en douter d'après ce que nous avons vu au début de ce chapitre, les changements de température modifient le régime des vents et des circuits de l'eau de manière complexe. Cela signifie qu'avec l'augmentation globale des températures moyennes, certaines régions du monde se réchauffent plus ou moins (figure 58.28). Cela signifie aussi que le régime des pluies est modifié parce qu'il dépend des vents globaux. On utilise d'énormes modèles informatiques pour calculer les effets prévisibles dans toutes les parties du monde.

Des modèles informatiques indépendants prédisent des changements globaux

Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), qui a partagé le prix Nobel de la Paix de 2007 avec Al Gore pour leur travail sur les changements climatiques globaux, a récemment présenté son cinquième rapport d'évaluation. En se basant sur divers scénarios, les modèles informatiques prévoient une augmentation des températures de 2,5 à 7,8 °C pour la fin de ce siècle.

Les prévisions sont peut-être pires pour les précipitations que pour les températures. Par exemple, on s'attend à plus de précipitations qu'aujourd'hui en Europe du Nord, mais une autre étude prévoit que des parties de l'Europe méridionale en recevront moins, au détriment des écosystèmes naturels, de l'agriculture et de l'approvisionnement en eau pour les humains. L'économie de certains pays d'Europe peut en profiter, mais ce sera l'inverse pour d'autres, et les relations politiques entre les pays seront vraisemblablement modifiées, des exportateurs de produits alimentaires devenant demandeurs d'importations.

Le dioxyde de carbone est le principal gaz à effet de serre

Le dioxyde de carbone est le gaz généralement mis en avant dans les discussions concernant les causes du réchauffement global (figure 58.29), bien que d'autres gaz de l'atmosphère interviennent aussi. Une station de contrôle située au sommet du volcan Mauna Loa, dans l'île de Hawaï, a contrôlé la concentration de l'atmosphère en CO₂ depuis les années 1950. Cette station est particulièrement importante parce qu'elle se trouve au milieu de l'Océan Pacifique, loin de la grande masse continentale occupée par la majorité de la population, et qu'elle peut contrôler l'état de l'atmosphère globale sans interférence avec des événements locaux.

En 1958, l'atmosphère contenait 0,031 % de CO₂. En 2009, la concentration atteignait 0,039 %. Pour tous les spécialistes, la cause de

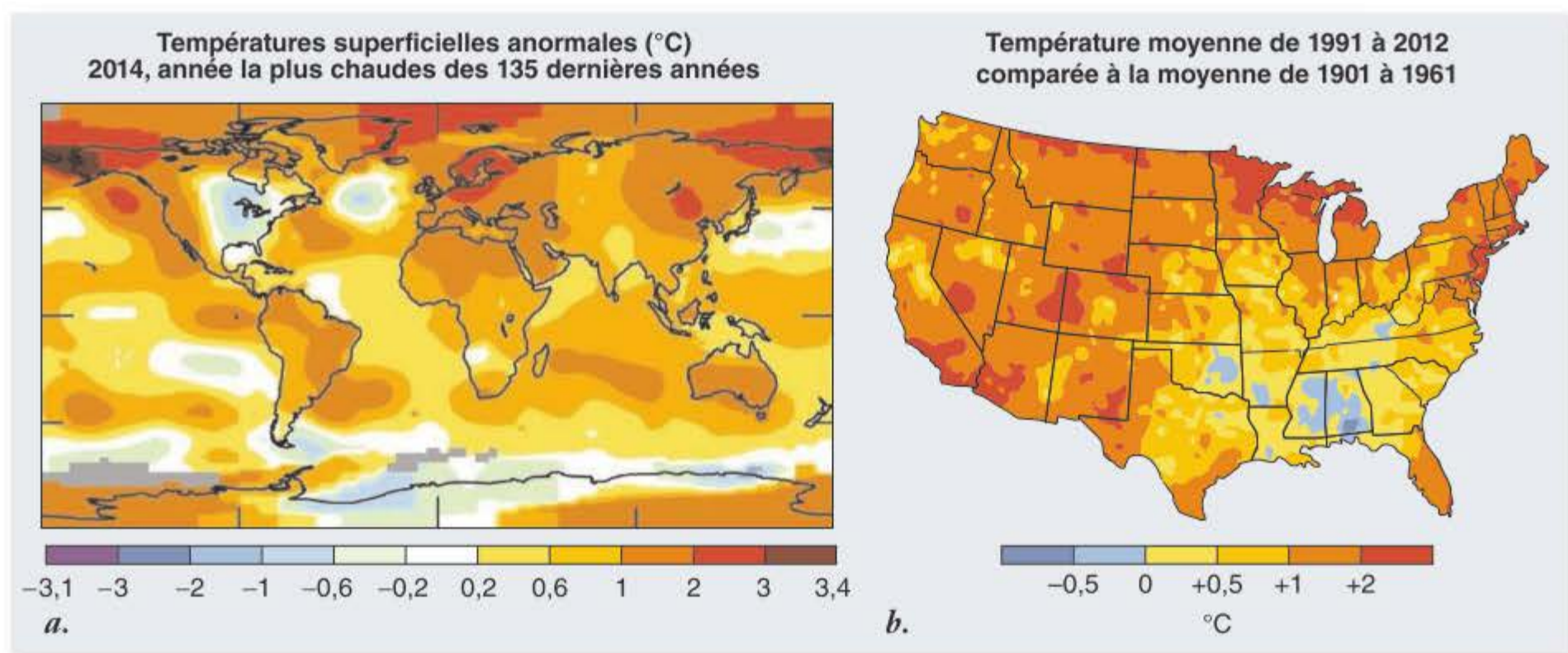


Figure 58.28 Variation géographique du réchauffement global. L'année 2014 a été la plus chaude depuis les premiers relevés en 1880 et les 15 années les plus chaudes ont été observées depuis 1998. (a) certaines régions du globe se sont réchauffées plus que d'autres. Les couleurs montrent comment le réchauffement a évolué en 2014 par rapport à la température moyenne pendant une période de référence (1901-1960), avant le plein effet de serre moderne. (b) Certaines régions des États-Unis se sont également réchauffées plus que d'autres. Cette figure compare les températures moyennes de 1991-2012 aux moyennes de 1901-1960.

Source: National Climatic Data Center

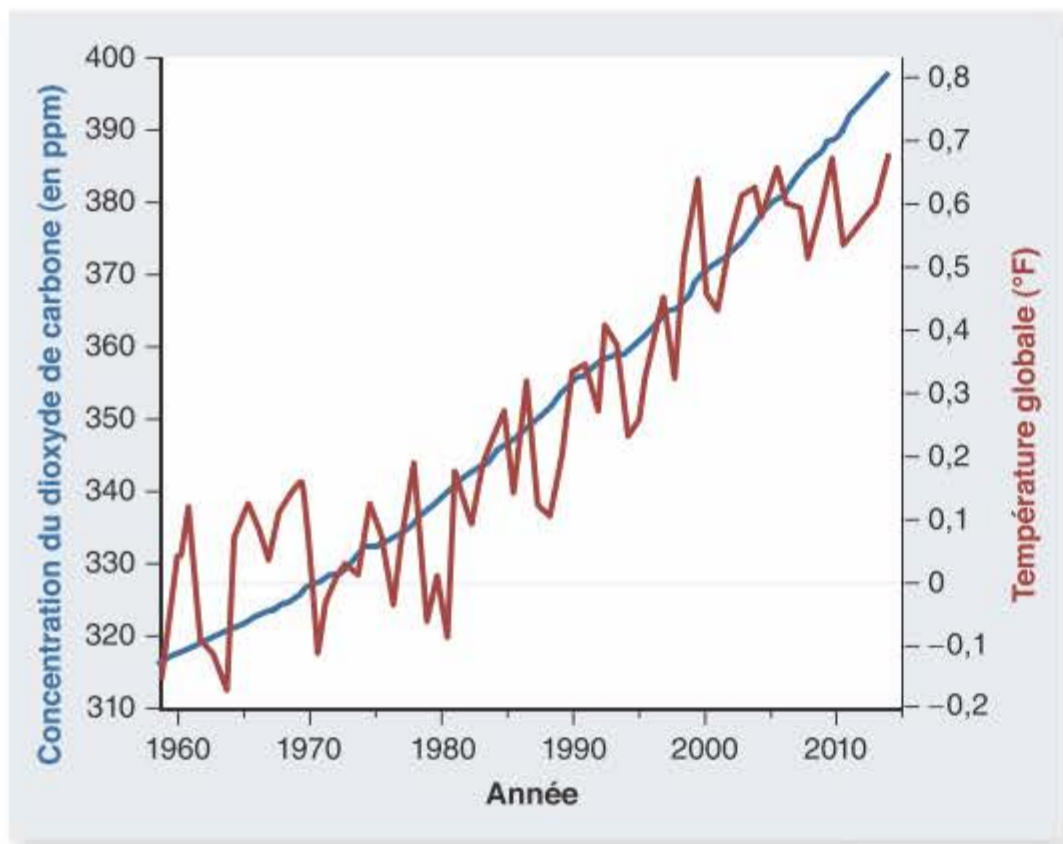


Figure 58.29 L'effet de serre. La concentration du dioxyde de carbone dans l'atmosphère a fortement augmenté depuis les années 1950, comme le montre le trait bleu. Le trait rouge montre la modification globale moyenne de la température pendant la même période.

cette forte augmentation du CO_2 dans l'atmosphère est la combustion du charbon et des produits pétroliers par l'accroissement de la population humaine (et la demande croissante en énergie).

Comment le dioxyde de carbone affecte la température

La concentration du CO_2 dans l'atmosphère affecte la température globale parce que le dioxyde de carbone absorbe fortement les rayonnements aux longueurs d'onde critiques pour l'équilibre calorique global. Comme on l'a vu au chapitre 57, non seulement la Terre reçoit le rayonnement provenant du soleil, mais elle émet aussi de l'énergie vers l'espace extérieur. La température de la Terre ne restera constante que si ces deux processus se compensent.

L'énergie solaire incidente est représentée par des longueurs d'onde relativement courtes du spectre électromagnétique : elles sont visibles ou proches du visible. Les longueurs d'onde de l'énergie émise par la Terre sont différentes, plus grandes. Le dioxyde de carbone absorbe l'énergie dans certaines longueurs d'onde de l'infrarouge. Cela signifie qu'il n'interfère pas avec l'arrivée de l'énergie de courte longueur d'onde, mais retarde l'émission par la Terre vers l'espace de l'énergie de grande longueur d'onde.

On parle souvent d'effet de serre pour le dioxyde de carbone parce qu'il agit comme une serre. Le verre des serres garde la chaleur à l'intérieur parce que les vitres sont transparentes à la lumière, mais les sont peu pour les rayonnements infrarouges de grande longueur d'onde. L'énergie lumineuse qui arrive à la serre la traverse librement. À l'intérieur, l'énergie est absorbée sous la forme de chaleur, puis émise sous la forme d'un rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde. Ce rayonnement infrarouge peut difficilement traverser le verre et l'énergie s'accumule ainsi à l'intérieur.

Autres gaz à effet de serre

Le dioxyde de carbone n'est pas le seul gaz à effet de serre. C'est aussi le cas du méthane et de l'oxyde nitreux. L'effet de tout gaz à effet de serre

dépend de ses propriétés moléculaires et de sa concentration. Par exemple, par molécule, le méthane a une vingtaine de fois plus d'effet que le dioxyde de carbone ; mais il est moins concentré et sa durée de vie dans l'atmosphère est moindre.

Dans le monde, le méthane est produit en quantités importantes dans les sols anaérobies et par les réactions de fermentation des ruminants, comme les vaches. D'énormes quantités de méthane sont actuellement bloquées dans le permafrost arctique. La fonte du permafrost pourrait provoquer une perturbation brutale et importante de la température globale en libérant rapidement le méthane.

L'emploi des engrais en agriculture est la principale source des émissions d'oxyde nitreux, la consommation de l'énergie est la deuxième et l'industrie est la troisième.

Les changements globaux de température ont affecté les écosystèmes dans le passé et sont en train de le faire actuellement

On peut prouver le réchauffement de plusieurs manières. Par exemple, en se basant sur les statistiques à l'échelle du globe, la glace se forme plus tard sur les lacs et les rivières et fond plus tôt que précédemment ; les saisons sans glaces se sont allongées de 2,5 semaines depuis un siècle. La surface des glaces au Pôle Nord s'est aussi notablement réduite et les glaciers reculent à travers le monde (figure 58.29).

Il y a eu des réchauffements – et des refroidissements – globaux dans le passé, entre autres récemment, pendant les périodes glaciaires et les périodes chaudes intermédiaires. Les espèces ont souvent réagi en modifiant leur répartition géographique, en suivant leur environnement. Par exemple, plusieurs espèces d'arbres d'Amérique du Nord adaptées au froid que l'on ne retrouve aujourd'hui que dans le grand nord ou à



Figure 58.30 Disparition des glaciers. Le Mont Kilimandjaro en Tanzanie en 1970 (au-dessus) et en 2014 (en-dessous). Notez la diminution de la couverture des glaciers en trente ans.



Figure 58.31 Déplacement de l'aire d'un papillon. Répartition du papillon *Pararge aegeria* en Grande-Bretagne en 1970-1997 (en vert) et en 1915-1939 (en noir) : certaines aires sont maintenant beaucoup plus septentrionales.

haute altitude, vivaient beaucoup plus au sud ou plus bas il y a 10 000 à 20 000 ans, quand le climat était plus froid. Le réchauffement global actuel a les mêmes effets. Par exemple, beaucoup d'espèces de papillons et d'oiseaux sont remontés plus au nord dans les dernières décennies (figure 58.31).

Beaucoup d'oiseaux migrateurs arrivent plus tôt sur leurs territoires de reproduction en été qu'il y a quelques dizaines d'années. Beaucoup d'insectes et d'amphibiens se reproduisent plus tôt dans l'année et beaucoup de plantes fleurissent plus tôt. En Australie, un travail récent montre des modifications de la fréquence des gènes dans les populations sauvages d'insectes des fruits au cours des 20 dernières années, les populations des régions fraîches du pays ressemblant maintenant génétiquement à celles des régions chaudes.

Les coraux constructeurs de récifs semblent avoir une marge de sécurité étroite, entre les températures de la mer auxquelles ils sont adaptés et les températures maximales auxquelles ils peuvent survivre. Le réchauffement global semble déjà menacer certains coraux en provoquant un « blanchissement » de masse, une rupture de la symbiose normale et indispensable entre les cnidaires et les cellules d'algues.

Il y a des raisons de penser que les conséquences du réchauffement global sur les écosystèmes peuvent, aujourd'hui, être globalement plus graves que dans le passé. Un problème provient de la rapidité plus grande du réchauffement actuel : les adaptations évolutives devraient se produire sur quelques générations pour assurer la survie des espèces. Un autre problème provient du fait que les aires naturelles ne sont plus continues, mais prennent souvent la forme de parcs totalement entourés par des villes et des fermes. Les parcs se trouvent à des endroits géographiques déterminés et il n'est généralement pas possible de les déplacer. Si les conditions climatiques ne conviennent plus aux habitants d'un parc, les espèces ne peuvent s'en échapper parce que le parc est entouré d'habitats inhospitaliers ; elles peuvent donc disparaître et la biodiversité du parc sera réduite.

De même, avec l'élévation de la température, beaucoup d'espèces des montagnes sont passées à des altitudes supérieures pour retrouver leur habitat préféré. Finalement, cependant, elles ne peuvent aller plus haut parce qu'elles ont atteint le sommet de la montagne. On pense que plusieurs espèces de grenouilles du Costa Rica ont disparu pour cette raison. Beaucoup d'espèces arctiques peuvent subir le même sort avec la fonte de leur habitat.

Le réchauffement global affecte aussi les populations humaines

Le réchauffement global peut affecter de différentes manières la santé et le bien-être des humains. Certaines de ces modifications peuvent être bénéfiques mais, même si elles sont néfastes, certains pays – en particulier les plus riches – seront capables de s'y adapter. Mais les pays pauvres ne pourront pas se transformer aussi rapidement et certains changements exigeront des contre-mesures extrêmement coûteuses que même les pays riches auront du mal à assumer.

Élévation du niveau des mers

Depuis la fin du 20^e siècle, le niveau des mers s'est élevé de 2 à 3 cm par décennie. L'agence des États-Unis pour la protection de l'environnement prévoit une élévation du niveau des eaux deux ou trois fois plus rapide pendant le 21^{me} siècle, à cause de deux conséquences du réchauffement global : (1) la fonte des glaces polaires et des glaciers, ajoutant de l'eau aux océans et (2) l'augmentation moyenne de la température des océans entraînant une augmentation du volume par dilatation. Cette élévation entraînerait une érosion accrue et des inondations dans les régions basses et les marais côtiers, et d'autres habitats pourraient aussi être en péril. Jusqu'à 200 millions de personnes seraient affectées par une aggravation des inondations. Si le niveau des mers continuait à s'élever, les villes côtières et des îles entières, comme les Maldives dans l'Océan Indien, risqueraient d'être submergées.

Autres conséquences climatiques

Outre l'augmentation des températures, on prévoit que le réchauffement global aura diverses autres conséquences. En particulier, on s'attend à une augmentation de la fréquence ou de la sévérité de certains phénomènes – comme les vagues de chaleur, les sécheresses, les tempêtes graves et les ouragans – et les événements El Niño, avec leurs conséquences sur le climat, peuvent devenir plus fréquents.

En outre, le régime des pluies peut se modifier et des régions qui ont déjà des problèmes d'eau, hébergeant aujourd'hui près de deux milliards d'habitants, risquent de subir des pénuries encore plus graves dans les années à venir. Certaines données font penser que ces conséquences se traduisent déjà par une augmentation des tempêtes, des tornades et de la fréquence des événements El Niño au cours des quelques dernières années.

Conséquences pour l'agriculture

Le réchauffement global peut avoir des conséquences positives et négatives pour l'agriculture. Du côté positif, les températures plus élevées et l'augmentation de la teneur en dioxyde de carbone ont tendance à accroître le développement de certaines plantes cultivées et peuvent donc améliorer les rendements. D'autres cultures seront cependant affectées négativement. En outre, la plupart des cultures souffriront de sécheresses plus fréquentes. De plus, si les cultures des régions tempérées du nord peuvent profiter de températures plus élevées, beaucoup de cultures tropicales poussent déjà à leur température maximale et une augmentation des températures peut entraîner une réduction de la production.

Pour l'aspect négatif aussi, les modifications du régime des pluies, de la température, de la répartition des parasites et de divers autres facteurs demanderont de nombreuses adaptations. Ces changements peuvent être assez facilement gérés par les agriculteurs du monde développé, mais les coûts associés peuvent être catastrophiques pour ceux des pays en développement.

Conséquences pour la santé humaine

Les fréquences accrues des tempêtes, des inondations et des sécheresses auront des conséquences néfastes pour la santé humaine. À côté de leur impact direct, ces phénomènes perturbent souvent l'infrastructure fragile des pays en développement, entraînant une interruption de la fourniture d'eau potable et d'autres problèmes. On peut s'attendre, de ce fait, à une fréquence accrue d'épidémies de choléra et d'autres maladies.

De plus, avec l'élévation des températures, les régions appropriées pour les organismes tropicaux s'étendront vers le nord. Les organismes responsables de maladies humaines sont particulièrement inquiétants. Beaucoup de maladies actuellement limitées aux régions tropicales peuvent se répandre et poser problème en dehors des tropiques. Les maladies transmises par les moustiques, comme la malaria (voir chapitre 29), la dengue et plusieurs types d'encéphalites en sont des exemples. La répartition des moustiques est limitée par le froid ; le gel hivernal tue beaucoup de moustiques et leurs œufs. La malaria ne sévit donc que dans les régions où la température est en général supérieure à 16 °C ; la fièvre jaune et la dengue, transmises par une autre espèce de moustique, sévissent dans les régions où les températures sont normalement supérieures à 10 °C. De plus, aux températures élevées, le parasite de la malaria arrive plus vite à maturité.

La malaria tue déjà un million de personnes chaque année ; certaines projections font penser que le pourcentage de la population humaine risquant la malaria peut augmenter de 33 % pour la fin de ce 21^{me} siècle. Comme on l'avait prédit, la malaria semble d'ailleurs déjà se déplacer. En 1980, elle avait été éradiquée de tous les États-Unis, sauf de la Californie mais, au cours des dernières années, elle est apparue dans divers états du sud et même dans quelques états du nord.

La dengue se répand aussi. Jadis limitée aux régions tropicales et subtropicales, où elle infecte de 50 à 100 millions de personnes, la maladie est aujourd'hui présente aux États-Unis, dans le sud de l'Amérique du Sud et dans le nord de l'Australie.

Un des aspects les plus alarmants de ces maladies est l'absence de vaccins. Il existe des médicaments (contre la malaria), mais les parasites

deviennent rapidement résistants et les médicaments deviennent inefficaces. Il n'existe pas de médicament contre la dengue.

Solution du problème

On peut considérer la publication du cinquième rapport du GIEC en 2013 comme un tournant dans la réponse de l'humanité au changement climatique. Le changement climatique global est aujourd'hui reconnu, même par les sceptiques d'autrefois, comme un phénomène causé en grande partie par l'activité humaine. Même les gouvernements les plus rétifs semblent maintenant prêts à entrer en action, et les autorités reconnaissent les opportunités offertes par la nécessité d'inverser les impacts sur l'humanité. Les technologies et les pratiques « vertes » qui en résultent sont de plus en plus communes. Avec les efforts concertés des citoyens, des autorités et des gouvernements, on peut espérer éviter les conséquences plus graves du changement climatique, comme ce fut le cas pour la raréfaction de l'ozone au siècle dernier.

Synthèse 58.6

Le dioxyde de carbone est un gaz à effet de serre important, ce qui signifie qu'il empêche la chaleur de s'échapper de la terre et que la température s'élève. Le réchauffement global provoqué par les modifications de la composition de l'atmosphère – surtout l'accumulation du CO₂ – peut amplifier la désertification et entraîner la disparition de certains habitats et de certaines espèces. Il peut aussi faire fondre les banquises et les glaciers, modifier les côtes avec l'élévation du niveau des eaux. On peut avoir aussi des phénomènes climatiques violents, une pénurie d'eau et des inondations dans les régions basses, ainsi qu'une augmentation des maladies tropicales.

- *Quelles sont les différences entre les problèmes posés par le changement climatique global et la raréfaction de l'ozone ?*



Résumé

58.1 Influence du soleil, du vent et de l'eau sur les écosystèmes

L'énergie solaire et la rotation de la Terre influencent la circulation atmosphérique.

La quantité de rayonnement solaire qui atteint la surface terrestre est très importante pour le climat. Les saisons résultent des changements de position de la Terre par rapport au Soleil (figure 58.1). L'air chaud avec une teneur élevée en eau s'élève à l'équateur, se refroidit ensuite et perd son humidité, créant les forêts pluviales équatoriales (figure 58.3).

Quand l'air froid de la haute atmosphère s'éloigne de l'équateur puis redescend vers la Terre, il prélève l'humidité de la surface terrestre et est à l'origine des déserts quand il revient vers l'équateur.

Le trajet des vents est incurvé par rapport à la surface terrestre à cause de la rotation de la Terre sur son axe (l'effet Coriolis, voir figure 58.3).

Les courants globaux sont en grande partie entraînés par les vents (figure 58.4).

On peut trouver quatre grands gyres entraînés par la direction des vents. Ils sont aussi influencés par l'effet Coriolis.

Des différences régionales et locales affectent les écosystèmes terrestres.

On observe un effet de foehn quand une chaîne de montagnes retient l'humidité de l'air qui passe au-dessus d'elle sur le versant exposé au vent, créant un environnement plus sec du côté opposé (figure 58.5).

La température diminue d'environ 6 °C tous les 1000 m d'altitude (figure 58.6).

Les microclimats sont des différences de faible échelle dans les conditions.

58.2 Les biomes terrestres

La température et l'humidité déterminent souvent les biomes.

Les températures et les pluies annuelles, ainsi que leurs variations saisonnières, déterminent les différents biomes. On reconnaît huit grands types de biomes

Les forêts pluviales tropicales sont des systèmes équatoriaux très productifs.

Les savanes sont des prairies tropicales à pluies saisonnières.

Les déserts sont des régions avec peu de pluies.

Les prairies tempérées ont des sols riches.

Les forêts décidues tempérées sont adaptées aux fluctuations saisonnières.

Les forêts sempervirentes tempérées sont côtières.

La taïga est la forêt septentrionale des régions à hivers rudes.

La toundra est une région soumise au gel, pratiquement sans arbres, avec une courte saison de végétation.

58.3 Les habitats d'eau douce

Dans les eaux douces, les habitats dépendent de la disponibilité de l'oxygène.

L'oxygène n'est pas très soluble dans l'eau. La photosynthèse des plantes aquatiques en ajoute constamment, et il est utilisé par les hétérotrophes.

Les habitats des lacs et des étangs changent avec la profondeur.

La zone photique, proche de la surface, est celle de la productivité primaire ; sa profondeur varie avec la clarté de l'eau (figure 58.12).

En été, l'eau plus chaude (épilimnion) flotte au-dessus de l'eau froide (hypolimnion). Les lacs d'eau douce se modifient deux fois par an lorsque la température est la même en surface et en profondeur et que les deux couches sont mises en mouvement par le vent (figure 58.13).

Les teneurs en oxygène et en nutriments diffèrent selon les lacs.

Les lacs oligotrophes ont beaucoup d'oxygène et peu de nutriments ; c'est l'inverse pour les lacs eutrophes.

58.4 Les habitats marins

On divise l'océan en plusieurs zones : intertidale, néritique, photique, benthique et pélagique (figure 58.15).

La pleine mer présente une faible productivité primaire.

Le phytoplancton est le producteur primaire en pleine mer, et la production primaire est faible parce qu'il y a peu de nutriments.

Les écosystèmes des plateaux continentaux fournissent des ressources abondantes.

Les eaux néritiques sont au-dessus du plateau continental et elles sont riches en nutriments (figure 58.15). Dans les estuaires se trouvent souvent de riches zones intertidales. D'autres écosystèmes sont des bancs productifs du plateau continental et les récifs coralliens symbiotiques.

Les régions d'upwelling connaissent un mélange des nutriments et de l'oxygène.

Dans les régions de remontée des eaux, des vents locaux soulèvent les eaux profondes riches en nutriments et sont à l'origine des taux les plus élevés de production primaire. Le phénomène El Niño survient quand les vents alizés

faiblissent et réduisent la remontée vers la surface des eaux profondes riches en nutriments.

Les eaux profondes sont un environnement froid et sombre, avec quelques communautés étonnantes.

Les eaux profondes de la mer sont l'habitat le plus étendu. Les communautés des sources hydrothermales se trouvent là où des plaques tectoniques se séparent. Les chimioautotrophes qui y vivent obtiennent leur énergie de l'oxydation du soufre.

58.5 Impact humain sur la biosphère : pollution et épuisement des ressources

Des composés dangereux comme le DDT sont biologiquement amplifiés quand l'énergie remonte dans la chaîne alimentaire (figure 58.20).

Les habitats d'eau douce sont menacés par la pollution et l'épuisement des ressources.

Les pollutions ponctuelles et diffuses, les précipitations acides et la surexploitation menacent les habitats d'eau douce (figure 58.21).

Les écosystèmes forestiers sont menacés dans les régions tropicales et tempérées.

La déforestation conduit à la perte des habitats, à la perturbation du cycle de l'eau et à la perte des nutriments. Les pluies acides ont des conséquences néfastes pour les forêts comme pour les lacs et les cours d'eau (figure 58.23).

Transmission des maladies des animaux aux humains.

Les habitats marins s'épuisent en poissons et autres espèces.

Beaucoup de zones de pêche, comme l'écosystème du Georges Bank, se sont dégradées et ne se sont pas restaurées.

L'appauvrissement de l'ozone stratosphérique a provoqué un « trou » d'ozone.

Les rayonnements UV-B sont dangereux pour la vie. La régulation globale des CFC semble avoir inversé l'épuisement de l'ozone.

58.6 Impacts humains sur la biosphère : le changement climatique

Des modèles informatiques indépendants prédisent des changements globaux.

Le dioxyde de carbone est le principal gaz à effet de serre.

Le dioxyde de carbone permet le passage du rayonnement solaire au travers de l'atmosphère, mais il empêche la chaleur de s'échapper de la terre et entraîne un réchauffement.

Les changements globaux de température ont affecté les écosystèmes dans le passé et sont en train de le faire actuellement.

Si les températures changent rapidement, la sélection naturelle ne peut être assez rapide pour empêcher l'extinction de nombreuses espèces.

Le réchauffement global affecte aussi les populations humaines.

Le changement du niveau des mers, la fréquence accrue des perturbations climatiques graves, les effets directs et indirects sur l'agriculture et l'expansion des maladies tropicales peuvent affecter la vie des humains.

Les perturbations de l'environnement humain entraînent la transmission de nouvelles maladies des animaux à l'homme.

COMPRÉHENSION

- L'effet Coriolis
 - contrôle la rotation de la terre.
 - est responsable de l'absence relative des saisons à l'équateur.
 - contrôle le régime global des vents.
 - contrôle le régime global des vents et des océans.
- Quels sont les deux facteurs les plus importants pour la répartition des biomes ?
 - Température et latitude
 - Pluies et température
 - Latitude et pluies
 - Température et type de sol
- Dans l'effet de foehn, l'air se refroidit en s'élevant et se réchauffe en descendant, produisant souvent un versant humide et un sec parce que la capacité de rétention de l'eau dans l'air
 - est directement liée à la température de l'air.
 - est inversement liée à la température de l'air.
 - n'est pas affectée par la température de l'air.
 - modifie la température de l'air.
- Dans un lac, la stratification thermique
 - n'est pas modifiée par les inversions d'automne et de printemps.
 - aboutit à une teneur plus élevée en oxygène en profondeur qu'en surface.
 - aboutit à une teneur plus élevée en oxygène en surface qu'en profondeur.
 - est réduite quand la glace se forme à la surface du lac.
- Les lacs oligotrophes disposent
 - de moins d'oxygène et de plus de nutriments.
 - de plus d'oxygène et de plus de nutriments.
 - de plus d'oxygène et de moins de nutriments.
 - de moins d'oxygène et de moins de nutriments.
- Les communautés des sources hydrothermales profondes
 - obtiennent leur énergie de la photosynthèse dans la zone photique proche de la surface.
 - utilisent la bioluminescence pour produire la nourriture.
 - sont basées sur l'énergie produite par l'activité des chimioautotrophes oxydant le soufre.
 - ne renferment que des bactéries et d'autres micro-organismes.
- On a une accumulation biologique quand
 - la concentration des polluants augmente dans les tissus aux niveaux trophiques supérieurs.
 - l'effet d'un polluant est amplifié par des interactions chimiques dans les organismes.
 - un organisme est placé sous un microscope de dissection.
 - un polluant a plus d'effet qu'attendu après son ingestion par un organisme.
- Où trouve-t-on une source ponctuelle de pollution ?
 - Pelouses
 - Cheminées de centrales au charbon
 - Canalisation de déversement d'une usine dans un cours d'eau
 - Les pluies acides

APPLICATION

- Si la Terre n'était pas inclinée sur son axe de rotation, le cycle annuel des saisons dans les hémisphères nord et sud
 - serait inversé.
 - resterait le même.
 - serait réduit.
 - n'existerait pas.
- Les lacs oligotrophes peuvent devenir eutrophes à la suite des activités humaines comme
 - la surexploitation d'espèces sensibles, qui perturbe les communautés de poissons.
 - l'introduction de nutriments dans l'eau, qui stimule la croissance des plantes et des algues.
 - la perturbation de la végétation terrestre près des rives, qui entraîne l'écoulement du sol dans le lac.
 - la pulvérisation d'insecticides dans l'eau pour le contrôle des populations d'insectes.
- Si un pesticide est sans danger à faible concentration (comme le DDT) et utilisé correctement, comment peut-il devenir un risque pour les organismes non ciblés ?
 - Parce qu'après l'exposition au DDT, certaines espèces développent des réactions allergiques même aux faibles niveaux d'exposition
 - Parce que les molécules de DDT peuvent se combiner et leur concentration augmenter avec le temps
 - Parce que la concentration de substances chimiques comme le DDT augmente progressivement aux niveaux trophiques supérieurs
 - Parce que le réchauffement global et l'exposition aux rayonnements UV-B augmentent l'efficacité de molécules comme le DDT
- S'il existe des gaz à effet de serre, pourquoi seul le dioxyde de carbone est-il considéré comme une cause du réchauffement global ?
 - Les autres gaz ne causent pas de réchauffement global.
 - Les scientifiques s'intéressent à d'autres causes ; par exemple, la libération de méthane provenant de la fonte du permafrost pourrait avoir des effets importants sur le réchauffement global.
 - La concentration des autres gaz est tellement faible que leur influence sur le climat est limitée.
 - Le dioxyde de carbone est le seul gaz qui absorbe les rayons infrarouges de grande longueur d'onde.

RÉVISION

- Montrez comment la figure 58.1 explique les résultats observés à la figure 58.2.
- Pourquoi trouve-t-on plus de déserts aux environs de 30° de latitude ?
- Si le monde a subi un réchauffement global plusieurs fois dans le passé, pourquoi se faire du souci pour ce qui se passe de nouveau aujourd'hui ?