

# La biologie de la conservation et les changements à l'échelle planétaire

# 56



## VOS OUTILS INTERACTIFS



Consultez votre MANUEL NUMÉRIQUE, qui vous donne accès aux animations, aux exercices et à la plateforme d'anatomie interactive.

▲ **Figure 56.1** Quel sera le sort de cette espèce de lézard nouvellement découverte ?

## CONCEPTS CLÉS

- 56.1** Les activités humaines menacent la biodiversité de la Terre
- 56.2** La conservation des populations est axée sur leur taille, leur diversité génétique et leur habitat essentiel
- 56.3** La conservation des paysages et la conservation à l'échelle régionale contribuent à maintenir la biodiversité
- 56.4** La Terre change rapidement sous l'effet des activités humaines
- 56.5** Le développement durable permet à la fois d'améliorer la condition humaine et de conserver la biodiversité

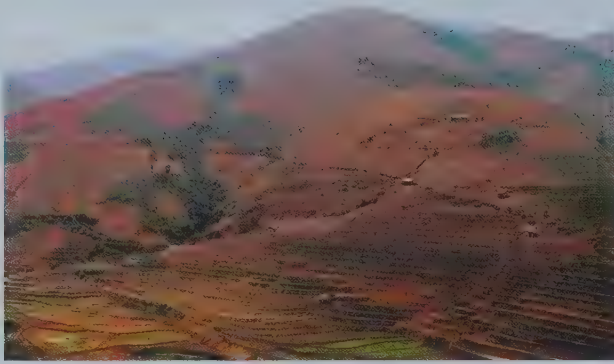


## Un trésor psychédélique

Un lézard défile sur un affleurement rocheux et s'immobilise brusquement sous le soleil. Un biologiste de la conservation le regarde, ravi d'observer ce gecko bigarré dont l'orangé des pattes, du ventre et de la queue tranche sur le bleuté de son dos, surmonté par un cou et une tête jaune et vert. Ce lézard, le gecko psychédélique (*Cnemaspis psychedelica*), a été découvert en 2010 au cours d'une expédition dans la région du Grand Mékong en Asie du Sud-Est (**figure 56.1**). L'habitat qu'on lui connaît se limite à celui d'une île ne dépassant pas 8 km<sup>2</sup> située dans le Sud du Vietnam. La même expédition a permis de découvrir d'autres nouvelles espèces, dont la ravissante orchidée Daklak (*Dendrobium daklakense*), du nom de la province vietnamienne où on l'a observée. Entre 2000 et 2010, les biologistes ont identifié plus de 1 000 nouvelles espèces, et ce, dans la seule région du Grand Mékong.

À ce jour, les scientifiques ont décrit et nommé officiellement environ 1,8 million d'espèces d'organismes. Il en reste une multitude à découvrir. Certains biologistes croient qu'il existe actuellement environ 5 millions d'espèces ; d'autres encore estiment ce nombre à 100 millions. Les plus grandes concentrations d'espèces se situent dans les régions tropicales. Malheureusement, on déboise les forêts tropicales humides à une vitesse alarmante pour faire place à la population humaine en pleine croissance et la faire vivre. Le rythme du déboisement au Vietnam est l'un des plus élevés au monde (**figure 56.2**). Qu'advient-il du gecko psychédélique et des autres espèces récemment découvertes au Vietnam si la déforestation se poursuit à ce rythme ?

◀ Orchidée Daklak.



▲ **Figure 56.2** Le déboisement de la forêt tropicale du Vietnam. Autrefois recouvertes de forêt tropicale, ces collines ont été déboisées pour y établir des cultures en terrasse, comme les rizières qui s'étendent sur la partie inférieure des pentes.

Dans toute la biosphère, les activités humaines modifient les perturbations naturelles, les structures trophiques, le flux d'énergie et les cycles biogéochimiques. Or, comme les autres espèces, nous dépendons des processus qui se déroulent dans les écosystèmes. Nous avons modifié près de 50 % des terres émergées de la planète et nous utilisons plus de la moitié de l'eau douce de surface accessible. Dans les océans, les stocks des principales ressources halieutiques sont en train de s'épuiser à cause de la surpêche. Selon certaines estimations, nous infligeons plus de dommages à la biosphère et entraînons plus d'espèces vers la disparition que ne l'a fait l'énorme astéroïde vraisemblablement responsable des extinctions de masse vers la fin de la période du Crétacé, il y a 66 millions d'années (voir la figure 25.18).

Dans le présent chapitre, nous examinerons les changements qui touchent notre planète du point de vue de la **biologie de la conservation**. Cette discipline, qui intègre l'écologie, la physiologie, la biologie moléculaire, la génétique et la biologie de l'évolution, a pour but de préserver la diversité biologique à tous les niveaux. De plus, les mesures prises pour maintenir les processus naturels des écosystèmes et freiner la perte de biodiversité établissent un lien entre les sciences de la vie et les sciences sociales, économiques et humaines.

Nous commencerons par étudier plus en détail la crise de la biodiversité et examiner quelques stratégies de conservation et de restauration que les biologistes utilisent dans leurs tentatives pour ralentir la disparition d'espèces. Nous verrons aussi les transformations qu'infligent les activités humaines à l'environnement par les changements climatiques, l'appauvrissement de l'ozone et d'autres processus planétaires. Enfin, nous nous demanderons comment les décisions prises actuellement au sujet des priorités de la conservation à long terme pourraient se répercuter sur la planète.

## CONCEPT 56.1

### Les activités humaines menacent la biodiversité de la Terre

L'extinction est un phénomène naturel qui se produit depuis que la vie est apparue. Cependant, le taux *élevé* d'extinction

est à l'origine de la crise actuelle de la biodiversité. Plus de 1 000 espèces ont disparu au cours des 400 dernières années, soit un taux de 100 à 1 000 fois plus élevé que le taux d'extinction « naturel » dont témoignent les registres fossiles (voir le concept 25.4). Cette différence donne à penser que le taux d'extinction est actuellement élevé et que les activités humaines menacent la biodiversité terrestre à tous les niveaux.

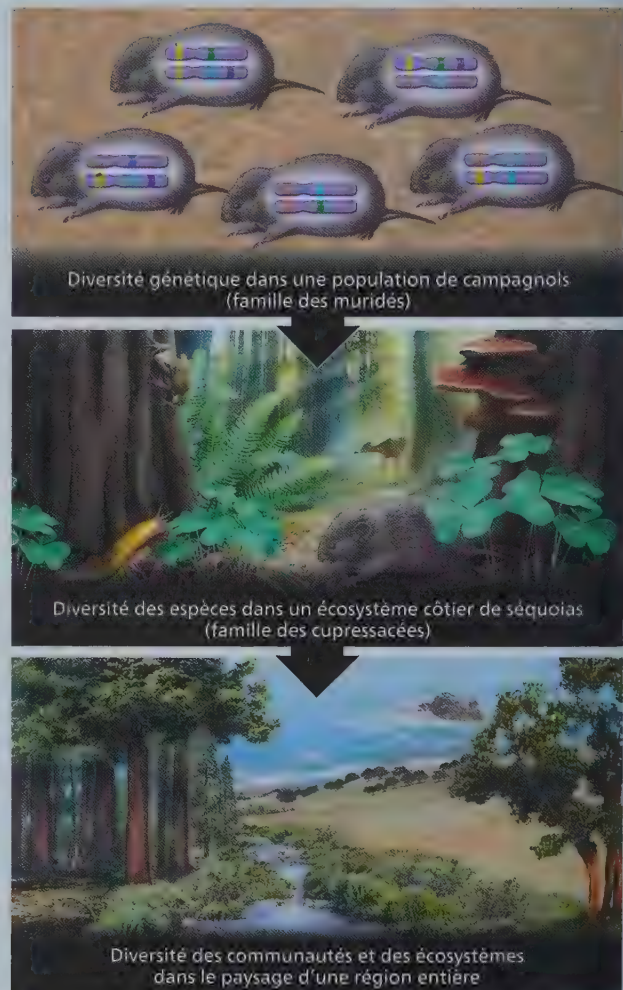
### Les trois niveaux de la biodiversité

La biodiversité, ou diversité biologique, est étudiée à trois niveaux: la diversité génétique, la diversité des espèces et la diversité des écosystèmes (**figure 56.3**).

#### La diversité génétique

La diversité génétique englobe non seulement la variation génétique individuelle *au sein* d'une population, mais aussi la variation génétique *entre* les populations, laquelle est souvent associée à des adaptations aux conditions locales. La disparition

▼ **Figure 56.3** Les trois niveaux de la biodiversité. Les gros chromosomes illustrés dans le schéma du haut symbolisent la variation génétique au sein d'une population.



d'une population locale entraîne chez l'espèce la perte d'une partie de la diversité génétique responsable de la microévolution. Cette érosion de la diversité génétique nuit, bien entendu, aux perspectives d'adaptation de l'espèce.

### La diversité des espèces

Une grande partie du débat public suscité par la crise de la biodiversité est centrée sur la diversité des espèces, c'est-à-dire le nombre d'espèces et leur abondance relative dans un écosystème ou dans toute la biosphère. On s'inquiète tout particulièrement des espèces en voie de disparition ou menacées. Une **espèce en voie de disparition** est une espèce qui risque de disparaître dans l'ensemble ou dans une partie de son aire de répartition (**figure 56.4**). Toute espèce qui sera vraisemblablement en voie de disparition dans un avenir prévisible dans l'ensemble ou dans une partie de son aire de répartition est considérée comme une **espèce menacée**. Au Canada, la *Loi sur la protection d'espèces animales ou végétales sauvages* et la réglementation de leur commerce international et interprovincial ont pour but de protéger les espèces en voie de disparition et les espèces menacées. Cette loi est en vigueur depuis 1996. Les quelques statistiques suivantes illustrent le problème que soulève la disparition d'espèces :

- Selon l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN), 12 % des quelque 10 000 espèces d'oiseaux connues dans le monde et 21 % des quelque 5 500 espèces de mammifères connues sont menacées.
- Une enquête menée par le Center for Plant Conservation a démontré que, parmi les 20 000 espèces végétales connues aux États-Unis, 200 ont disparu depuis qu'on enregistre des données, et 730 autres espèces végétales sont en voie de disparition ou menacées.

#### ▼ Figure 56.4 À 100 battements de cœur de l'extinction.

Voici deux exemples parmi les nombreuses espèces comptant moins de 100 individus. Elles font partie de ce que E. O. Wilson, un biologiste de l'Université Harvard, appelle lugubrement le Hundred Heartbeat Club (le Club des 100 battements de cœur). Le dauphin d'eau douce de Chine est peut-être déjà disparu, mais il semble qu'on ait signalé la présence de quelques individus en 2007.

► L'aigle des singes (*Pithecophaga jefferyi*).



▼ Le dauphin de Chine (*Lipotes vexillifer*).



? Quels facteurs devriez-vous examiner pour documenter la disparition d'une espèce ?

- Depuis 1900, 123 espèces animales dulcicoles ont disparu en Amérique du Nord, et des centaines d'autres sont menacées. Le taux d'extinction pour la faune dulcicole d'Amérique du Nord est environ cinq fois supérieur à celui des animaux terrestres.
- Selon la revue *Science*, qui a publié en 2004 un rapport s'appuyant sur une évaluation globale effectuée par plus de 500 scientifiques, 32 % de toutes les espèces d'amphibiens connues sont à l'heure actuelle en voie de disparition, et un grand nombre sont très proches de l'extinction.

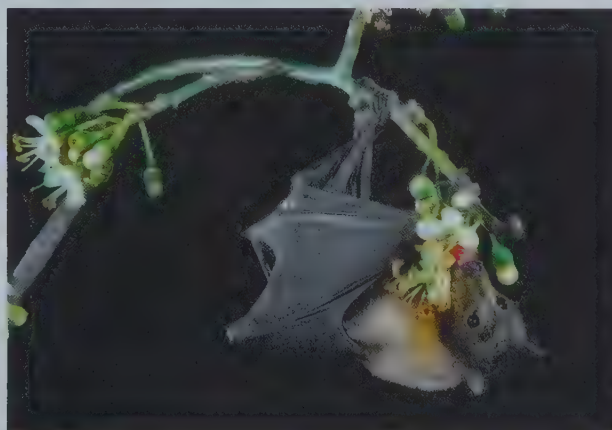
Les populations locales d'une espèce peuvent également être victimes d'extinction. Par exemple, les populations d'une espèce peuvent disparaître d'un réseau hydrographique, mais survivre dans un réseau voisin. L'extinction à l'échelle planétaire d'une espèce signifie qu'elle a disparu de *tous* les écosystèmes où elle vivait et que ceux-ci en sont privés définitivement.

### La diversité des écosystèmes

La variété des écosystèmes de la planète constitue le troisième niveau de la biodiversité. Dans tout écosystème, la communauté présente un réseau d'interactions reliant les populations des différentes espèces. L'extinction de populations d'une espèce peut donc avoir des effets négatifs sur d'autres espèces de l'écosystème (voir la figure 54.18). Le renard volant des Mariannes (*Pteropus mariannus*), par exemple, est une chauve-souris des îles du Pacifique qui joue un rôle important sur le plan de la pollinisation et de la dissémination des graines. Or, cette espèce est de plus en plus considérée comme un aliment de luxe et fait l'objet d'une chasse intense (**figure 56.5**). Les biologistes de la conservation craignent que la disparition du renard volant nuise également aux plantes indigènes des îles Samoa, puisqu'il pollinise et dissémine les graines de la très grande majorité des arbres (les quatre cinquièmes des espèces).

Certains écosystèmes ont déjà été gravement perturbés par les humains, et d'autres sont actuellement transformés à un rythme effréné. Depuis la colonisation européenne des États continentaux de l'Amérique du Nord, plus de la moitié des milieux humides ont été asséchés et convertis à des fins agricoles ou autres. En Californie, en Arizona et au Nouveau-Mexique,

#### ▼ Figure 56.5 Le renard volant des Mariannes (*Pteropus mariannus*), une espèce en voie de disparition, est un important agent de pollinisation.



ainsi que dans les prairies de l'Ouest canadien (Manitoba, Alberta et Saskatchewan), approximativement 90 % des communautés riveraines naturelles ont été transformées par le surpâturage, la lutte contre les inondations, la dérivation des cours d'eau, l'abaissement du niveau des nappes phréatiques et l'invasion par des plantes non indigènes.

## La biodiversité et le bien-être des humains

Pourquoi s'inquiéter de la perte de biodiversité ? D'abord pour la *biophilie*, c'est-à-dire notre sentiment d'appartenance à la nature et notre conscience de ce qui nous lie à tous les organismes vivants. En outre, l'idée selon laquelle les autres espèces sont importantes et devraient être protégées est un grand thème dans de nombreuses religions. C'est aussi le fondement de l'éthique qui nous dicte de protéger la biodiversité. Nous devons nous préoccuper également des générations futures. Voici une citation d'un vieux proverbe par l'écrivain Antoine de Saint-Exupéry : « Nous n'héritons pas de la terre de nos parents, nous l'empruntons à nos enfants. » Outre ces raisons philosophiques et morales, la biodiversité présente aussi pour nous de nombreux avantages pratiques.

### Les bienfaits de la diversité des espèces et de la diversité génétique

Parmi les espèces menacées, nombreuses sont celles qui pourraient fournir des aliments, des fibres et des médicaments aux humains, ce qui fait de la biodiversité une ressource naturelle primordiale. Une foule de produits nous viennent des végétaux et d'autres organismes vivants, par exemple l'aspirine et les antibiotiques. La perte de populations de végétaux sauvages qui sont proches parentes d'espèces agricoles signifie la perte de ressources génétiques qui pourraient servir à améliorer la qualité des récoltes, notamment par la résistance aux maladies. Dans les années 1970, par exemple, devant les épidémies dévastatrices du virus du rabougrissement herbeux du riz (*Oryza sativa*), les phytogénéticiens ont scruté 7 000 populations de cette espèce et de ses proches parentes pour trouver une forme résistante au virus. Une population d'un riz indien (*Oryza nivara*) s'est avérée la bonne, et les chercheurs ont réussi à reproduire le caractère de résistance dans des variétés commerciales de riz. Aujourd'hui, la population résistante d'origine semble avoir disparu de la nature.

Aux États-Unis, 25 % de toutes les ordonnances préparées dans les pharmacies contiennent des substances issues de végétaux. Des chercheurs ont découvert que la pervenche de Madagascar (*Catharanthus roseus*) renfermait des alcaloïdes qui inhibaient la croissance de cellules cancéreuses (figure 56.6). Cette découverte a permis la mise au point de traitements contre deux formes de cancer parmi les plus mortelles – la maladie de Hodgkin et la leucémie infantile –, avec rémission dans la plupart des cas. Il existe cinq autres espèces de pervenches à Madagascar, et l'une d'entre elles est en voie de disparition. Or, si ces espèces disparaissaient, la possibilité de profiter de leurs propriétés médicinales disparaîtrait avec elles.

Chaque nouvelle disparition d'espèce signifie la perte de gènes uniques dont certains codent peut-être pour des protéines d'une prodigieuse utilité. La Taq polymérase, une enzyme, a été extraite pour la première fois d'une bactérie, *Thermus aquaticus*, que l'on trouve dans les sources chaudes du parc national de Yellowstone. Cette enzyme est essentielle à l'amplification

► **Figure 56.6**  
La pervenche de Madagascar (*Catharanthus roseus*): une plante qui sauve des vies.



en chaîne par polymérase (PCR) en raison de sa stabilité aux hautes températures requises pour la PCR automatisée (voir la figure 20.8). Par ailleurs, on utilise l'ADN de nombreuses autres espèces de procaryotes vivant dans divers environnements pour la production de masse de protéines destinées à la création de nouveaux médicaments, produits alimentaires, substituts du pétrole, produits chimiques industriels, etc. Toutefois, comme une foule d'espèces de procaryotes et d'autres organismes disparaîtront avant même que nous ayons pris connaissance de leur existence, nous risquons de perdre de façon irréversible le précieux potentiel génétique que renferment leurs génothèques respectives, qui sont uniques.

### Les écoservices

Les bienfaits que des espèces particulières apportent aux humains sont substantiels. Mais la sauvegarde de certaines espèces n'est qu'une des raisons pour lesquelles il faut préserver les écosystèmes. Les humains ont évolué dans les écosystèmes de la Terre, et notre survie tient à ces écosystèmes et à leurs habitants. Les **écoservices** englobent tous les processus par lesquels les écosystèmes naturels contribuent à maintenir la vie humaine. Les écosystèmes purifient notre eau et notre air. Ils détoxiquent et décomposent nos déchets, et réduisent la gravité des sécheresses et des inondations. Les organismes des écosystèmes pollinisent nos cultures, limitent les parasites et préservent nos sols. De plus, les écosystèmes nous rendent ces services gratuitement.

S'il nous fallait payer pour les services des écosystèmes naturels, combien coûteraient-ils ? En 1997, des scientifiques ont estimé la valeur des écoservices à 33 000 milliards de dollars par année, soit près du double du produit national brut de tous les pays de la planète à ce jour (18 000 milliards de dollars). Il est peut-être plus réaliste d'en faire la comptabilité à petite échelle. En 1996, la Ville de New York investissait plus de 1 milliard de dollars dans l'achat de terres et la restauration d'habitats dans les montagnes Catskill, principale source d'eau douce de la métropole. Cet investissement était motivé par la pollution croissante de l'eau par les égouts, les pesticides et les engrais. En misant sur les écoservices pour purifier son eau naturellement,

New York a économisé 8 milliards de dollars, ce qu'aurait coûté la construction d'une nouvelle usine de traitement de l'eau, et 300 millions de dollars par année pour la gestion de l'usine.

On dispose de plus en plus de preuves montrant que le fonctionnement des écosystèmes, et donc leur capacité à fournir des services, joue un rôle clé dans la biodiversité. Plus les activités humaines réduisent la biodiversité, plus nous réduisons la capacité des écosystèmes à accomplir des processus essentiels à notre survie.

## Les menaces pour la biodiversité

Un grand nombre d'activités humaines menacent la biodiversité tant à l'échelle locale qu'à l'échelle régionale et planétaire. Les menaces que posent ces activités sont de quatre types, soit la disparition d'habitats, l'introduction d'espèces, la surexploitation et les changements à l'échelle planétaire.

### La disparition des habitats

La transformation des habitats par les activités humaines constitue à elle seule la plus grande menace pour la biodiversité, dans toute la biosphère. La disparition des habitats est causée par des activités comme l'agriculture, le développement urbain, la foresterie, l'exploitation minière et la pollution de l'environnement. Comme nous le verrons sous peu, les changements climatiques à l'échelle planétaire modifient déjà les habitats, et leurs effets seront beaucoup plus importants plus tard dans ce siècle. Lorsqu'une espèce ne dispose d'aucun habitat de remplacement ou qu'elle est incapable de se déplacer, la disparition d'un habitat peut mener à la disparition de cette espèce. Selon l'UICN, la destruction des habitats serait responsable de la situation de 73 % des espèces disparues, en voie de disparition, ou devenues vulnérables ou rares au cours des derniers siècles.

La disparition et la fragmentation des habitats peuvent se produire sur de grands territoires. Ainsi, approximativement 98 % des forêts tropicales sèches de l'Amérique centrale et du Mexique ont été déboisées. Le déboisement de la forêt tropicale humide autour de Veracruz, au Mexique, surtout pour l'élevage des bovins, a entraîné la perte d'environ 90 % de la forêt originale et n'a laissé qu'un archipel de petits îlots forestiers. Beaucoup d'autres habitats naturels ont également été fragmentés par les activités humaines (figure 56.7).

▼ **Figure 56.7** La fragmentation des habitats dans les contreforts de Los Angeles, aux États-Unis. Le développement dans les vallées peut confiner les organismes habitant les bandes étroites des collines.



La fragmentation d'habitats cause souvent la disparition d'espèces, car les petites populations des habitats fragmentés sont davantage exposées à l'extinction. Quand les premiers Européens sont arrivés dans le Sud du Wisconsin, la prairie couvrait environ 800 000 hectares de cet État, contre 800 seulement aujourd'hui ; la majeure partie des prairies originales sert désormais à l'agriculture. De 1948 à 1954, puis de 1987 à 1988, on a effectué des relevés sur la diversité végétale dans 54 vestiges de prairies du Wisconsin. Au cours des quelques décennies qui séparent les deux études, les parcelles de prairies étudiées ont perdu entre 8 et 60 % de leurs espèces végétales.

La disparition d'habitats constitue une menace importante pour la biodiversité aquatique, surtout le long des côtes continentales et près des récifs de corail. Environ 70 % des récifs coralliens, qui comptent parmi les communautés aquatiques possédant la plus grande richesse spécifique de la planète, ont été endommagés par les activités humaines. Si la destruction se poursuit au rythme actuel, jusqu'à 50 % des récifs, qui abritent le tiers des espèces de poissons marins, pourraient disparaître au cours des 30 à 40 prochaines années. Les habitats dulcicoles sont aussi menacés, notamment par les barrages et les réservoirs, la modification du lit et la régularisation du débit qui touchent aujourd'hui la plupart des fleuves et des rivières du monde. Par exemple, les quelque 30 barrages et écluses construits sur le bassin fluvial du Mobile, dans le Sud-Est des États-Unis, ont modifié la profondeur et le débit du fleuve. Ces barrages et écluses ont procuré de l'hydroélectricité et facilité la circulation des bateaux, mais ils ont également contribué à la disparition de plus de 40 espèces de moules et d'escargots (embranchement des mollusques).

### L'introduction d'espèces

Les **espèces introduites**, aussi appelées espèces non indigènes ou exotiques, sont les espèces que les humains déplacent intentionnellement ou accidentellement de leur aire de répartition normale jusque dans de nouvelles régions géographiques. Les déplacements par bateau et par avion ont accéléré la transplantation d'espèces. En l'absence des prédateurs, des parasites et des agents pathogènes qui limitent leurs populations dans leurs habitats naturels, les espèces transplantées peuvent se répandre rapidement dans leur nouvelle région.

Certaines espèces introduites perturbent la communauté soit parce qu'elles se nourrissent des espèces indigènes, soit parce qu'elles rivalisent avec ces dernières pour les ressources. On a introduit accidentellement dans l'île de Guam le serpent brun arboricole (*Boiga irregularis*), provenant d'autres régions du Pacifique Sud, comme « passager clandestin » de cargos militaires après la Seconde Guerre mondiale. L'île de Guam, qui n'abritait aucun serpent jusqu'alors, a perdu depuis 12 espèces d'oiseaux et 6 espèces de lézards, devenues les proies de ce serpent. En 1988, la moule zébrée (*Dreissena polymorpha*), un mollusque filtreur dévastateur, a été pour sa part découverte dans les Grands Lacs de l'Amérique du Nord, fort probablement rejetée accidentellement avec l'eau de lestage de navires en provenance d'Europe. Cette moule, qui atteint de fortes densités de population, a profondément perturbé des écosystèmes dulcicoles et menace la survie d'espèces aquatiques indigènes. En outre, elle a bouché des prises d'eau, ce qui a compromis des réserves d'eau domestiques et industrielles, et causé des milliards de dollars de dommages.

Beaucoup d'espèces introduites par les humains avec de bonnes intentions ont également produit des effets désastreux. Une plante grimpante japonaise appelée kudzu (*Pueraria lobata*), que le ministère de l'Agriculture des États-Unis a introduite dans le Sud du pays pour contrer l'érosion, a envahi de grandes étendues du paysage (figure 56.8). En 1890 à New York, un groupe de citoyens désireux d'introduire dans Central Park tous les végétaux et les animaux que mentionnent les pièces de Shakespeare y a libéré l'étourneau sansonnet (*Sturnus vulgaris*). Celui-ci s'est répandu rapidement dans toute l'Amérique du Nord, si bien que sa population y dépasse maintenant 100 millions d'individus, chassant une multitude d'espèces d'oiseaux chanteurs indigènes.

Les espèces introduites constituent un problème international. Elles sont responsables d'environ 40% des espèces disparues enregistrées depuis 1750. De plus, le coût des dommages qu'elles occasionnent et des mesures prises pour les combattre atteint chaque année des milliards de dollars. La France compte un peu plus de 300 espèces introduites, comparativement à plus de 275 au Canada; aux États-Unis seulement, il y a plus de 50 000 espèces introduites.

### La surexploitation

La surexploitation est l'exploitation d'organismes sauvages à une vitesse qui dépasse la capacité de rétablissement des populations visées. Les espèces dont les habitats sont restreints, comme celles habitant les petites îles, sont particulièrement vulnérables à la surexploitation. C'est le sort qu'a connu le grand pingouin (*Pinguinus impennis*), un oiseau de mer incapable de voler et vivant sur des îles de l'Atlantique Nord. Recherché pour ses plumes, ses œufs et sa chair, le grand pingouin avait déjà disparu dans les années 1840.

Les grands organismes dont le taux de reproduction est faible, tels les éléphants, les baleines et les rhinocéros, sont également vulnérables à la surexploitation. Le déclin des populations d'éléphants d'Afrique (*Loxodonta africana*), les plus grands animaux terrestres qui existent encore, est un exemple classique des conséquences de la chasse excessive. Principalement à cause du commerce de l'ivoire, les populations d'éléphants ont diminué dans presque toute l'Afrique au cours des 50 dernières années. Une interdiction internationale relative à la vente de nouvel ivoire a provoqué une augmentation du braconnage, de sorte que cette mesure a eu peu d'effet dans la majorité des pays du

▼ **Figure 56.8** Le kudzu, une espèce introduite qui prospère dans le Sud-Est des États-Unis.

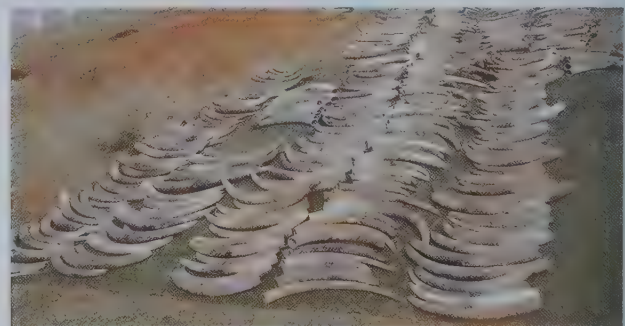


centre et de l'Est de l'Afrique. Il n'y a qu'en Afrique du Sud, où les troupeaux jadis décimés ont été bien protégés pendant presque un siècle, que les populations d'éléphants sont demeurées stables ou ont augmenté (voir la figure 53.9).

Les biologistes de la conservation misent de plus en plus sur les outils de la génétique moléculaire pour retracer l'origine de tissus prélevés sur des espèces en voie de disparition. Par exemple, des chercheurs ont dressé une carte de référence génétique de l'éléphant d'Afrique à partir d'ADN isolé d'excréments d'éléphant. En comparant cette carte de référence et de l'ADN isolé d'échantillons d'ivoire prélevé illégalement ou par braconnage, les chercheurs peuvent déterminer, à quelques centaines de kilomètres près, l'endroit où les éléphants ont été tués (figure 56.9). Réalisés en Zambie, ces travaux donnent à penser que les taux de braconnage étaient 30 fois supérieurs à ce qui avait été estimé, un constat qui a incité le gouvernement zambien à améliorer les mesures anti-braconnage. De même, à partir des analyses phylogénétiques de l'ADN mitochondrial (ADNmt), des biologistes ont montré que certains vendeurs des marchés poissonniers japonais vendaient de la chair de baleine provenant d'espèces chassées illégalement, notamment du rorqual commun (*Balaenoptera physalus*) et de la baleine à bosse (*Megaptera novaeangliae*), tous deux en voie de disparition (voir la figure 26.6).

De nombreuses populations de poissons marins d'importance commerciale, qu'on croyait inépuisables, ont été décimées par la surpêche. En effet, en raison de la demande croissante de protéines pour une population humaine en pleine explosion démographique et des nouvelles techniques, comme la pêche à la palangre (ligne de fond) et les chalutiers modernes, leurs populations atteignent aujourd'hui des niveaux qui ne peuvent pas supporter une exploitation plus poussée. Le thon rouge de l'Atlantique (*Thunnus thynnus*) en est un exemple. Il y a encore quelques décennies, on considérait le thon rouge comme un

▼ **Figure 56.9** L'écologie médicolégitime et le braconnage des éléphants. Cet étalage de défenses d'éléphant fait partie d'une cargaison illégale d'ivoire interceptée en 2002, en route vers Singapour depuis l'Afrique. Les analyses d'ADN ont montré que les milliers d'éléphants abattus pour leurs défenses en ivoire ne provenaient pas d'un peu partout en Afrique, mais d'une bande étroite s'étendant d'est en ouest de la Zambie.



**FAITES DES LIENS** ► La figure 26.6 décrit une utilisation semblable des analyses d'ADN pour comparer des échantillons de chair de baleine avec une base de données de référence. En quoi ces exemples se ressemblent-ils, et qu'est-ce qui les distingue? Quelles contraintes ces méthodes d'enquête médicolégitimes peuvent-elles présenter dans d'autres cas soupçonnés de braconnage?

poisson de pêche sportive de faible valeur commerciale (il valait quelques cents le kilogramme et servait de nourriture pour chats). Puis, au début des années 1980, des grossistes ont commencé à transporter par avion, vers le Japon, du thon rouge frais conservé dans la glace, pour les sushis et les sashimis. Dans ce marché, le thon rouge rapporte maintenant jusqu'à 100 \$ le kilogramme (figure 56.10). Propulsée par ces prix élevés, il n'a fallu à la surpêche que 10 ans pour réduire la population du thon rouge de la partie ouest de l'Atlantique à moins de 20% de sa taille de 1980.

### Les changements à l'échelle planétaire

La quatrième menace pour la biodiversité, les changements à l'échelle planétaire, transforme la trame des écosystèmes régionaux sur toute la planète. Les changements à l'échelle planétaire sont notamment les modifications du climat, de la chimie atmosphérique et des grands systèmes écologiques qui réduisent la capacité de la Terre à assurer le maintien de la vie.

L'un des premiers types de changements planétaires préoccupants a été les *précipitations acides*, c'est-à-dire la pluie, la neige, la bruine ou le brouillard présentant un pH inférieur à 5,2. La combustion du bois et l'utilisation de combustibles fossiles libèrent des oxydes de soufre et d'azote qui, lorsqu'ils entrent en contact avec l'eau contenue dans l'air, forment des acides sulfuriques et nitriques. Ceux-ci finissent par retomber sur la Terre, où ils provoquent des réactions chimiques qui diminuent les réserves de nutriments et augmentent les concentrations de métaux toxiques. Évidemment, ces changements qui se produisent dans le sol et l'eau nuisent à certains organismes aquatiques et terrestres.

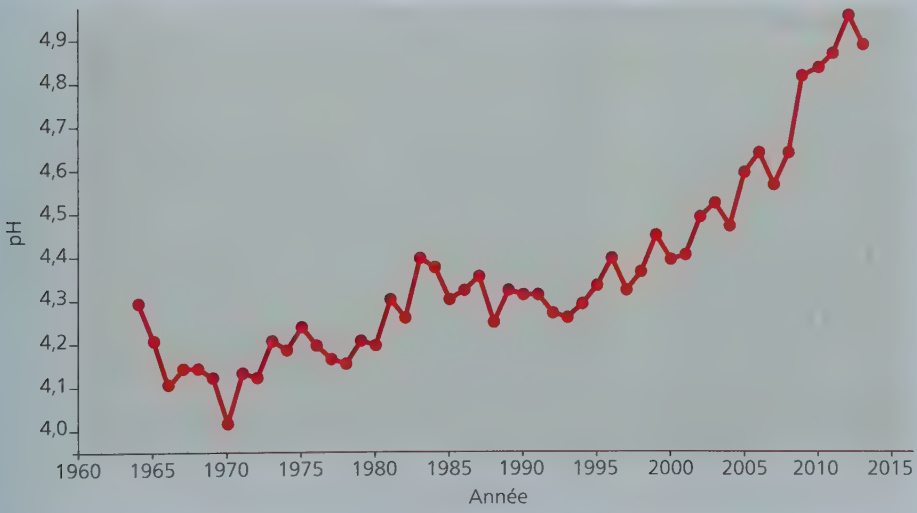
Dans les années 1960, des écologistes ont déterminé que des organismes dulcicoles de l'Est du Canada mouraient des suites de la pollution de l'air causée par les usines du Midwest des États-Unis. Les jeunes touladis (*Salvelinus namaycush*), par exemple, meurent lorsque le pH descend au-dessous de 5,4. Dans le Sud de la Suède et de la Norvège, les populations de poissons des lacs et des ruisseaux diminuaient en raison de la pollution produite en Grande-Bretagne et en Europe centrale. En 1980, le pH moyen

des précipitations que recevaient de vastes régions d'Amérique du Nord et d'Europe oscillait entre 4,0 et 4,5, et descendait parfois à 3,0. (Le concept 3.3 explique en détail le pH.)

Au cours des dernières décennies, la réglementation environnementale et les nouvelles technologies ont permis à de nombreux pays de réduire leurs émissions de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>). Aux États-Unis, elles ont diminué de 75% entre 1990 et 2013, ce qui a graduellement réduit l'acidité des précipitations (figure 56.11). Cependant, les écologistes estiment que les écosystèmes aquatiques mettront des décennies à s'en remettre. Pendant ce temps, les émissions d'oxyde d'azote (NO<sub>x</sub>) augmentent aux États-Unis, et celles de SO<sub>2</sub> ainsi que les précipitations acides continuent d'endommager les forêts d'Europe centrale et d'Europe de l'Est.

Le concept 56.4 traite de l'importance, pour la biodiversité, des changements à l'échelle planétaire; il y sera question de facteurs comme les changements climatiques et l'appauvrissement de l'ozone. Dans la section suivante, nous verrons plus en détail comment les scientifiques travaillent à protéger les populations et les espèces menacées.

▼ **Figure 56.10** La surexploitation. Thon rouge de l'Atlantique vendu aux enchères sur un marché japonais.



◀ **Figure 56.11** Le changement du pH des précipitations dans la forêt expérimentale de Hubbard Brook, dans l'État du New Hampshire.

**FAITES DES LIENS** ► Décrivez la relation entre le pH et l'acidité. (Voir le concept 3.3.) Dans l'ensemble, les précipitations que reçoit cette forêt deviennent-elles plus acides ou moins acides ?

1. Expliquez pourquoi il est trop restrictif de définir la crise de la biodiversité comme une simple disparition d'espèces.
2. Indiquez les quatre principales menaces pour la biodiversité et précisez les effets dommageables de chacune sur celle-ci.
3. **ET SI ?** ► Imaginez deux populations d'une espèce de poisson, l'une vivant dans la Méditerranée, et l'autre, dans la mer des Caraïbes. Imaginez maintenant deux scénarios : (1) les populations se reproduisent séparément ; (2) les adultes des deux populations migrent chaque année vers l'Atlantique Nord pour se reproduire. Quel scénario entraînerait une plus grande perte de diversité génétique si la population méditerranéenne faisait l'objet d'une surpêche jusqu'à l'extinction ? Expliquez votre réponse.

Voir les réponses proposées à l'appendice A.

## CONCEPT 56.2

### La conservation des populations est axée sur leur taille, leur diversité génétique et leur habitat essentiel

Les biologistes qui s'intéressent à la conservation des populations et des espèces ont recours à deux grandes approches. La première cible les populations qui sont petites et, donc, vulnérables dans bien des cas, tandis que la seconde cible les populations qui déclinent rapidement, même si elles ne sont pas encore petites.

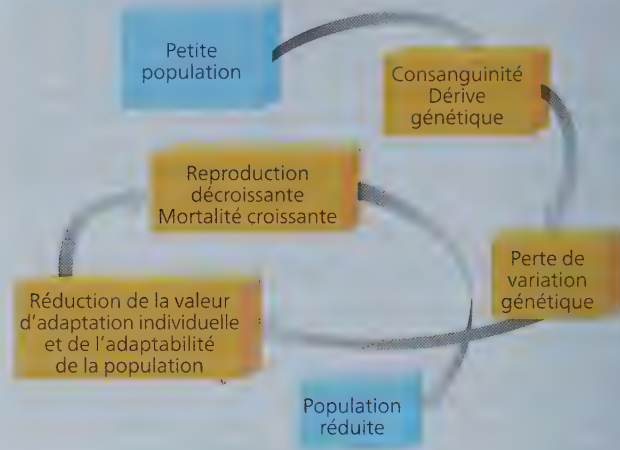
#### L'approche des petites populations

Les petites populations sont particulièrement vulnérables à la surexploitation, à la disparition d'habitats et aux autres menaces pour la biodiversité dont traite le concept 56.1. C'est la petite taille même d'une population qui conduit finalement à sa disparition, une fois que des facteurs comme ceux mentionnés plus haut ont réduit la population à un petit nombre d'individus. L'approche des petites populations met en évidence les divers processus qui peuvent causer la disparition des populations dont la taille a été gravement réduite.

#### La spirale d'extinction : les conséquences de la petite taille des populations sur l'évolution

**ÉVOLUTION** Une petite population est sujette à la consanguinité et à la dérive génétique. Celles-ci l'entraînent dans une **spirale d'extinction** au cours de laquelle sa taille et sa diversité génétique se réduisent progressivement, jusqu'à ce qu'il n'existe plus aucun individu (**figure 56.12**). Le facteur déterminant de la spirale d'extinction est la perte de variation génétique, c'est-à-dire de la capacité de la population d'évoluer de façon à s'adapter aux changements du milieu, comme l'arrivée de nouveaux agents pathogènes. La consanguinité et la dérive génétique peuvent toutes les deux causer une perte de variation génétique (voir le concept 23.3), et ces deux processus s'accroissent tandis que la population diminue. La consanguinité réduit souvent la valeur d'adaptation parce que les rejetons sont plus susceptibles de présenter des caractères récessifs nuisibles qui sont homozygotes.

▼ **Figure 56.12** Le processus menant à une spirale d'extinction.



Toutes les petites populations ne sont pas condamnées à une faible diversité génétique, et une variation génétique faible ne signifie pas nécessairement que la population sera petite de façon permanente. Ainsi, la chasse excessive de l'éléphant de mer boréal (*Mirounga angustirostris*), dans les années 1890, a réduit la population de l'espèce à seulement 20 individus. Il s'agit manifestement d'un effet de goulot d'étranglement qui a entraîné une faible variation génétique. Mais depuis, les populations d'éléphants de mer boréaux ont connu une forte augmentation et comptent aujourd'hui environ 150 000 individus. La variation génétique demeure relativement faible dans ces populations.

#### Étude de cas : le tétras des prairies et la spirale d'extinction

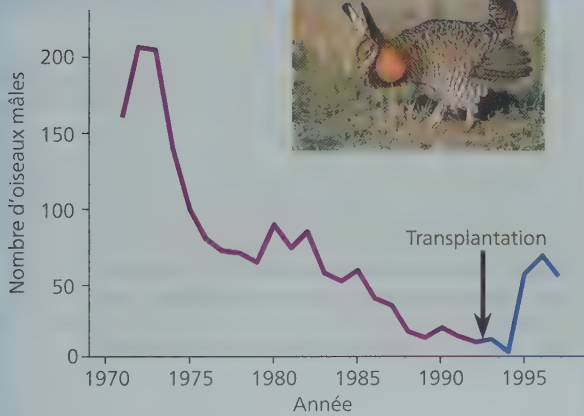
Quand les Européens sont arrivés en Amérique du Nord, le tétras des prairies (*Tympanuchus cupido*) était une espèce répandue de la Nouvelle-Angleterre à la Virginie et dans toutes les prairies de l'Ouest du continent nord-américain. L'agriculture a fragmenté les populations de tétras des prairies, qui ont rapidement décliné en abondance (voir la figure 23.11). À lui seul, l'Illinois abritait des millions de tétras au 19<sup>e</sup> siècle, alors qu'il n'en restait plus que 50 en 1993. Les chercheurs ont découvert que la diminution de la population de tétras dans la prairie de l'Illinois était liée à une variation génétique moindre et à une diminution de la fécondité. Pour vérifier l'hypothèse de la spirale d'extinction, les scientifiques ont introduit une variation génétique en transplantant 271 oiseaux provenant de populations de plus grande taille (**figure 56.13**). La population de tétras de l'Illinois a connu une importante augmentation, ce qui indiquait qu'elle s'acheminait vers la disparition avant qu'on la sauve par l'introduction d'une variation génétique provenant d'autres populations.

#### La taille minimale viable d'une population

Combien d'individus une population doit-elle perdre avant que sa taille ne l'entraîne dans une spirale d'extinction ? La réponse varie selon divers facteurs, dont le type d'organisme. Les grands prédateurs qui se trouvent au sommet de la chaîne alimentaire ont généralement besoin d'une aire de répartition étendue, et présentent donc une faible densité de population. Par

Qu'est-ce qui a causé la forte diminution de la population de téttras des prairies de l'Illinois ?

■ **HYPOTHÈSE** ■ Les chercheurs ont découvert que l'effondrement de la population de téttras des prairies dans l'État de l'Illinois (États-Unis) correspondait à une réduction de la fécondité, mesurée par le taux d'éclosion des œufs. En comparant des échantillons d'ADN provenant de la population de Jasper County, en Illinois, avec de l'ADN extrait des plumes de spécimens de musée, les biologistes sont arrivés à la conclusion que la variation génétique avait effectivement diminué dans la population étudiée (voir la figure 23.11). Pour ces chercheurs, la réduction de la variation génétique serait responsable de la forte diminution de la population.



(a) Dynamique de la population.

Source des données: R. L. Westemeier et coll., Tracking the long-term decline and recovery of an isolated population, *Science* 282: 1695-1698 (1998).

conséquent, la rareté chez les espèces n'est pas toujours un sujet d'inquiétude, bien que toutes les populations aient besoin d'un nombre minimal d'individus pour rester viables.

La taille minimale à laquelle une espèce arrive à maintenir son nombre et à survivre est appelée **population minimum viable (PMV)**. Pour une espèce donnée, on évalue habituellement la PMV à l'aide de modèles informatiques combinant de nombreux facteurs. Par exemple, le calcul peut inclure une estimation du nombre d'individus d'une petite population susceptibles d'être tués par une catastrophe naturelle comme une tempête. Une fois la spirale d'extinction amorcée, deux ou trois années de suite de climat défavorable peuvent achever une population dont la taille est déjà inférieure à sa PMV.

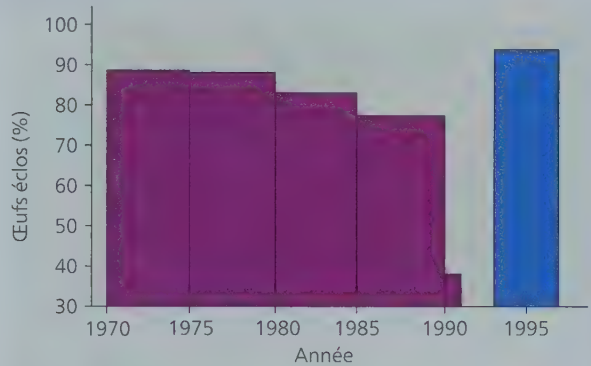
La taille efficace d'une population

La variation génétique est l'enjeu principal de l'approche des petites populations. La taille *totale* d'une population peut être trompeuse, parce que seuls certains membres se reproduisent

■ **EXPÉRIENCE** ■ En 1992, pour vérifier leur hypothèse, Ronald Westemeier, Jeffrey Brawn et leurs collègues ont entrepris de transplanter des téttras des prairies provenant du Minnesota, du Kansas et du Nebraska en vue d'accroître la variation génétique.

■ **RÉSULTATS** ■ Après la transplantation (indiquée par la flèche noire), la viabilité des œufs s'est rapidement améliorée, et la population a connu une importante augmentation.

■ **CONCLUSION** ■ La diminution de la variation génétique pourrait avoir entraîné la population de téttras des prairies de Jasper County dans une spirale d'extinction puisqu'une augmentation de la variation génétique a permis à la population de retrouver sa fécondité.



(b) Taux d'éclosion des œufs. La hauteur de chaque bande représente le taux moyen pour les années contenues dans la bande.

ET SI ? ► Comme la transplantation de téttras des prairies s'est montrée efficace pour accroître le pourcentage d'œufs éclos en Illinois, pourquoi n'y transplanterait-on pas dès maintenant plus d'individus ? Expliquez.

avec succès et transmettent leurs allèles à leur progéniture. Par conséquent, pour faire une estimation significative de la PMV, les chercheurs doivent déterminer la **taille efficace d'une population**, fondée sur le potentiel de reproduction.

POUR APPROFONDIR ■ La formule ci-dessous montre une des méthodes utilisées pour estimer la taille efficace d'une population, symbolisée par  $N_e$ :

$$N_e = \frac{4 N_f N_m}{N_f + N_m}$$

où  $N_f$  et  $N_m$  sont respectivement le nombre de femelles et le nombre de mâles qui se reproduisent avec succès. Si on applique cette formule à une population théorique comptant au total 1 000 individus, on obtient également 1 000 pour  $N_e$  si chaque individu se reproduit et si la proportion des sexes est de 500 femelles pour 500 mâles. En effet, dans ce cas :  $N_e = (4 \times 500 \times 500) / (500 + 500) = 1\,000$ . Tout écart par rapport à ces conditions (si tous les individus ne se reproduisent pas ou si

la proportion des sexes n'est pas de 1:1) réduit  $N_e$ . Par exemple, si la taille totale de la population est de 1 000 individus, mais que seules 400 femelles se reproduisent avec 400 mâles, alors :  $N_e = (4 \times 400 \times 400) / (400 + 400) = 800$ .  $N_e$  équivaut ainsi à 80% de la taille totale de la population. De nombreux facteurs peuvent influencer sur  $N_e$ . Ainsi, d'autres formules pour l'évaluation de  $N_e$  tiennent compte de facteurs comme l'âge de la maturation, la parenté génétique entre les membres de la population, les effets du flux génétique et les fluctuations de la population.

Dans les études réelles de populations,  $N_e$  est toujours une fraction de la population totale. Par conséquent, la simple détermination du nombre total d'individus d'une petite population ne permet pas forcément de savoir si elle est suffisamment importante pour éviter l'extinction. Dans la mesure du possible, les programmes de conservation visent à soutenir des tailles de population totale qui comprennent au moins le nombre minimal viable d'individus qui sont des *reproducteurs actifs*. Il faut se rappeler qu'on veut maintenir une taille efficace de population ( $N_e$ ) supérieure à la PMV afin de s'assurer que les populations conservent une diversité génétique suffisante pour s'adapter aux changements que subit leur environnement. ■

On se base souvent sur la PMV d'une population pour effectuer une analyse de la viabilité de cette population. Le but de cette analyse est de prévoir ses chances de survie, laquelle est généralement exprimée en tant que probabilité spécifique de survie, comme 95 % des chances, sur un intervalle précis, par exemple 100 ans. Une telle approche de modélisation permet aux biologistes de la conservation d'étudier les conséquences possibles de divers plans de gestion. Étant donné que la modélisation s'appuie sur des informations précises à propos de la population à l'étude, la biologie de la conservation est plus efficace lorsque la modélisation est combinée à des études sur le terrain.

### Étude de cas : l'analyse de populations de grizzlis

En 1978, Mark Shaffer a effectué l'une des premières analyses de viabilité d'une population dans le cadre d'une étude à long terme sur les grizzlis (*Ursus arctos horribilis*) du parc national de Yellowstone, dans le Wyoming (États-Unis), et de ses environs (**figure 56.14**). Espèce menacée aux États-Unis, le grizzli n'habite que 4 des 48 États continentaux. De plus, sa population y a subi une réduction et une fragmentation majeures. En 1800, 100 000 grizzlis vivaient dans un habitat d'environ 500 millions d'hectares, alors qu'aujourd'hui 6 populations presque isolées d'à peine 1 000 individus au total occupent un territoire de moins de 5 millions d'hectares.

Dans sa tentative pour déterminer la taille viable des populations de grizzlis de Yellowstone, Shaffer a utilisé des données sur leur cycle biologique couvrant une période de 12 ans. Il a ensuite simulé les effets des facteurs écologiques sur la survie et la reproduction du grizzli. Selon ses modèles, une population totale de grizzlis comptant de 70 à 90 individus dans un habitat favorable a 95 % de chances de survivre pendant 100 ans. À peine plus grosse, une population de 100 individus aurait 95 % de chances de survivre deux fois plus longtemps, soit pendant près de 200 ans.

La population réelle de grizzlis dans le parc national de Yellowstone est-elle comparable aux estimations de la PMV faites par Shaffer ? Selon l'estimation actuelle, la population totale

▼ **Figure 56.14** La surveillance à long terme d'une population de grizzlis. Cet écologiste installe un émetteur radio à un grizzli anesthésié, afin de pouvoir comparer ses déplacements à ceux d'autres grizzlis de la population du parc national de Yellowstone.



de grizzlis dans l'ensemble de l'écosystème de Yellowstone compterait environ 400 individus. La relation entre cette estimation de la population totale de grizzlis et la taille efficace d'une population,  $N_e$ , repose sur plusieurs facteurs. En général, seuls quelques mâles dominants se reproduisent. Or, ils peuvent avoir de la difficulté à trouver des femelles parce que la population est dispersée sur un très grand territoire. En outre, il se peut que les femelles ne se reproduisent que lorsque la nourriture est abondante. Par conséquent,  $N_e$  ne représente qu'environ 25 % de la taille totale de la population, soit environ 125 individus.

Étant donné que la variation génétique des petites populations tend à s'affaiblir avec le temps, des chercheurs ont utilisé les séquences de protéines, de l'ADN mitochondrial et des répétitions courtes en tandem (voir le concept 21.4) pour évaluer la variation génétique chez la population de grizzlis de Yellowstone. À ce jour, tous les résultats indiquent que cette population possède une variation génétique moindre que d'autres populations de grizzlis d'Amérique du Nord. Toutefois, l'isolement et la diminution de la variation génétique de la population de grizzlis de Yellowstone, qui se sont effectués progressivement au cours du 20<sup>e</sup> siècle, ne sont pas aussi prononcés qu'on le craignait. Les spécimens de musée analysés au début des années 1900 montrent que la variation génétique des grizzlis de Yellowstone a toujours été faible.

Comment les biologistes de la conservation peuvent-ils arriver à augmenter la taille efficace et la variation génétique de la population de grizzlis de Yellowstone ? La taille efficace et la taille totale pourraient augmenter s'il y avait des migrations entre les populations isolées de grizzlis. Les modèles informatiques prédisent que l'introduction, tous les 10 ans, de 2 ours non apparentés dans des populations de 100 individus réduirait de près de la moitié la perte de variation génétique. Pour le grizzli, et probablement pour beaucoup d'autres espèces dont les populations sont très petites, l'un des besoins les plus urgents en matière de conservation est de trouver des façons de favoriser l'expansion des populations.

Cette étude de cas ainsi que celle portant sur le tétras des prairies font le lien entre la théorie des petites populations et les applications pratiques en biologie de la conservation.

Nous allons maintenant examiner une autre approche biologique permettant de comprendre le phénomène qu'est l'extinction d'espèces.

## L'approche des populations en déclin

L'approche des populations en déclin s'intéresse aux populations menacées ou en voie de disparition dont la taille tend à diminuer même si elle est bien supérieure à sa population minimum viable. La distinction entre une population en déclin, qui n'est pas toujours petite, et une petite population, qui peut ne pas être en déclin, est moins importante que les différences entre les priorités des deux approches. Alors que l'approche des petites populations fait valoir que la petite taille même est la cause première de la disparition des populations, l'approche des populations en déclin met surtout l'accent sur les facteurs environnementaux qui causent le déclin d'une population. Si, par exemple, un secteur est déboisé, l'abondance des espèces qui dépendent des arbres diminuera et ces dernières disparaîtront localement, qu'elles conservent ou non une variation génétique.

L'approche des populations en déclin nécessite que les chercheurs analysent minutieusement les causes avant d'entreprendre des mesures correctives. Une des étapes clés de cette démarche consiste à étudier le cycle biologique de l'espèce en déclin, notamment à l'aide de comptes rendus de recherches, pour déterminer ses besoins environnementaux. Ensuite, les chercheurs se basent sur les données obtenues pour formuler et vérifier des hypothèses permettant d'expliquer toutes les causes possibles du déclin, dont les activités humaines et les événements naturels. L'étude de cas qui suit est un exemple d'application de l'approche des populations en déclin à une espèce en voie de disparition.

### Étude de cas : le déclin des populations de pics à face blanche

On ne trouve le pic à face blanche (*Picoides borealis*) que dans le Sud-Est des États-Unis. Cette espèce a besoin d'une forêt de pins arrivée à maturité et de préférence dominée par le pin des marais (*Pinus palustris*). En matière d'habitat, il existe un facteur déterminant pour le pic à face blanche : la végétation du sous-bois autour des troncs de pins des marais doit être de faible hauteur (**figure 56.15a**). Les pics à face blanche nicheurs abandonnent leur nid quand la végétation autour des pins est dense et dépasse 4,5 m (**figure 56.15b**). Ces oiseaux semblent avoir besoin d'une trajectoire de vol dégagée entre l'arbre où ils nichent et les aires d'alimentation voisines. Par le passé, des incendies périodiques nettoyaient les forêts de pins des marais, ce qui maintenait le sous-bois à une hauteur adéquate.

En outre, contrairement à la plupart des pics qui nichent dans des arbres morts, le pic à face blanche creuse une cavité dans des arbres vivants et matures. Il creuse aussi de petites cavités autour de l'entrée du nid. La résine coule alors et finit par enduire le tronc, ce qui semble décourager certains prédateurs, tel le serpent des blés (*Pantherophis guttatus*), qui dévore les œufs et les oisillons.

L'un des facteurs ayant conduit au déclin des populations de pics à face blanche est la destruction ou la fragmentation des habitats qui lui conviennent par l'exploitation forestière et l'agriculture. La reconnaissance des facteurs clés en matière

▼ **Figure 56.15** Le pic à face blanche a des besoins particuliers en matière d'habitat.



(a) Dans les forêts pouvant abriter les pics à face blanche la végétation de sous-bois est de faible hauteur.



(b) Dans les forêts qui ne peuvent abriter de pics à face blanche, la végétation de sous-bois est haute et dense, ce qui empêche les oiseaux d'accéder aux aires d'alimentation.

❓ Pourquoi la perturbation de l'habitat du pic à face blanche est-elle essentielle à la survie à long terme de cette espèce ?

d'habitat et la protection d'un certain nombre de forêts de pins des marais, ainsi que le recours à des incendies contrôlés pour réduire la végétation du sous-bois, ont permis de restaurer des habitats où les populations peuvent atteindre une taille viable.

Parfois, les gestionnaires des programmes de protection de la nature aident des espèces à coloniser des habitats restaurés. Dans la mesure où il peut falloir des mois à un pic à face blanche pour creuser les cavités où il nichera, des chercheurs ont réalisé une expérience pour déterminer si le fait de creuser de telles cavités les inciterait à nicher dans un habitat restauré. Les chercheurs ont donc creusé des cavités dans des pins des marais répartis dans 20 sites. Les résultats ont été remarquables : les pics à face blanche ont colonisé 18 des 20 sites, et de nouveaux groupes reproducteurs se sont formés uniquement aux endroits où on avait creusé des cavités artificielles. À la suite de cette expérience, des agents de protection de la nature ont mis en place un programme d'entretien des habitats comprenant le déclenchement d'incendies contrôlés et le creusage de nouvelles cavités de

nidification. Ces mesures ont permis aux populations d'une espèce en voie de disparition de connaître un accroissement et de se rétablir peu à peu.

## L'évaluation de besoins incompatibles

Déterminer l'effectif des populations et les besoins en matière d'habitat n'est qu'un aspect de l'effort visant à préserver des espèces. Les scientifiques doivent également évaluer, d'une part, les besoins biologiques et écologiques de chaque espèce et, d'autre part, les besoins incompatibles des humains. La biologie de la conservation met souvent au premier plan la relation entre les sciences, les technologies et la société. Par exemple, dans les États du Nord-Ouest des États-Unis bordés par le Pacifique a lieu un débat parfois animé : il oppose la préservation des habitats pour les populations de loups gris (*Canis lupus*), de grizzlis (*Ursus arctos horribilis*) et d'ombles à tête plate (*Salvelinus confluentus*) et les besoins en matière d'emploi dans le domaine de l'élevage du bétail et celui de l'extraction des ressources naturelles. De plus, quelques amateurs de plein air et de nombreux éleveurs s'opposent aux programmes qui ont reconstitué les populations de loups gris à Yellowstone et soutenu celles des grizzlis et d'autres grands mammifères : les premiers s'inquiètent pour leur sécurité, tandis que les seconds craignent d'éventuelles pertes de bétail hors du parc.

Les grands vertébrés vedettes ne sont pas toujours au centre des conflits, mais l'utilisation des habitats est presque toujours en cause. Faut-il poursuivre les travaux de construction d'un pont pour une nouvelle route s'ils menacent de détruire le seul habitat restant d'une espèce de moule d'eau douce ? Si vous étiez propriétaire d'une plantation de café où croissent des variétés qui ont besoin de beaucoup de lumière, croyez-vous que vous seriez disposé à changer pour des variétés tolérant l'ombre qui sont moins productives et moins payantes, mais qui poussent sous des arbres abritant de nombreux oiseaux chanteurs ?

Le rôle écologique des espèces représente aussi un facteur important. Étant donné notre incapacité à sauver toutes les espèces en voie de disparition, nous devons déterminer lesquelles sont les plus importantes pour la conservation de la biodiversité dans son ensemble. En déterminant les espèces clés de voûte et en trouvant des moyens pour maintenir leurs populations, on assure la survie de communautés et d'écosystèmes. Toutefois, dans la plupart des situations, la conservation ne doit pas limiter ses préoccupations à des espèces prises séparément, mais prendre en considération une communauté ou un écosystème en entier comme unité importante de la biodiversité.

### RETOUR SUR LE CONCEPT 56.2

1. En quoi la diversité génétique réduite des petites populations les rend-elle plus vulnérables à l'extinction ?
2. Si une population de téttras des prairies compte 100 individus et que 30 femelles et 10 mâles s'accouplent, quelle sera la taille efficace de la population ( $N_e$ ) ?
3. **ET SI ?** ► En 2005, au moins 10 grizzlis de l'ensemble de l'écosystème de Yellowstone ont été tués par les humains. La plupart des décès sont survenus selon l'un des trois scénarios suivants : il s'est produit une collision avec une voiture ; des chasseurs (d'autres animaux)

ont abattu une femelle qui les avait attaqués parce que ses petits se trouvaient à proximité ; des gestionnaires de la conservation des ressources ont tué des ours qui s'attaquaient continuellement au bétail. Si vous étiez gestionnaire de la conservation des ressources, quelles mesures pourriez-vous prendre pour réduire de telles rencontres dans le parc de Yellowstone et ses environs ?

Voir les réponses proposées à l'appendice A.

### CONCEPT 56.3

## La conservation des paysages et la conservation à l'échelle régionale contribuent à maintenir la biodiversité

Si presque tous les efforts de conservation se sont traditionnellement concentrés sur la sauvegarde de certaines espèces, de nos jours, la biologie de la conservation vise de plus en plus à assurer la biodiversité de communautés, d'écosystèmes et de paysages entiers. Un objectif aussi large demande non seulement l'application des principes écologiques, mais aussi ceux qui se rapportent à la dynamique et à l'économie des populations humaines.

### La structure des paysages et la biodiversité

La biodiversité d'un paysage est fortement influencée par ses caractéristiques physiques, c'est-à-dire par sa *structure*. Comprendre la structure des paysages est d'une importance capitale pour la conservation, car de nombreuses espèces utilisent plus d'un type d'écosystème, et un grand nombre d'espèces vivent à la limite de deux écosystèmes.

### La fragmentation et les lisières

Les zones de transition, aussi appelées *lisières* (ou *écotones*), entre les écosystèmes (entre un lac et la forêt environnante, par exemple, ou entre une terre cultivée et une zone d'habitation en banlieue) sont des caractéristiques qui définissent les paysages (**figure 56.16**). Une lisière possède son propre ensemble de conditions physiques, qui diffèrent de celles existant de part et d'autre. Dans une zone de transition entre une parcelle de forêt et un secteur incendié, la surface du sol reçoit plus de rayonnement solaire et est généralement plus chaude et plus sèche que l'intérieur de la forêt, mais est par ailleurs plus fraîche et plus humide que la surface du sol incendié.

Certains organismes se développent dans des communautés de lisières parce qu'ils ont besoin de ressources provenant des deux zones adjacentes. Ainsi, la gélinotte huppée (*Bonasa umbellus*) a besoin d'un habitat forestier pour nicher, se nourrir en hiver et s'abriter, mais elle a également besoin d'éclaircies dans la forêt, occupées par des arbustes et des herbes denses pour se nourrir en été.

Les écosystèmes où les lisières sont le résultat de l'intervention des humains ont souvent une biodiversité réduite et une prépondérance des espèces adaptées aux lisières. Par exemple, le cerf de Virginie (*Odocoileus virginianus*) vit dans des habitats de zones de transition, où il peut brouter les buissons. Les populations de cerfs de Virginie s'accroissent souvent quand les forêts sont exploitées, car les zones de transition sont alors plus

▼ **Figure 56.16** Lisières naturelles entre des écosystèmes en Sibérie.



**HABILITÉS VISUELLES** ► Quelles lisières distinguez-vous sur cette photo ?

nombreuses. De même, le vacher à tête brune (*Molothrus ater*) est une espèce adaptée aux lisières qui pond ses œufs dans les nids d'autres oiseaux, souvent ceux de certains oiseaux chanteurs migrateurs. Les vachers à tête brune ont besoin de forêts pour parasiter les nids d'autres oiseaux et aussi de champs pour trouver les graines et les insectes dont ils se nourrissent. Le nombre de vachers à tête brune augmente là où les forêts sont exploitées et fragmentées, des endroits où il y a beaucoup d'habitats de lisières et de champs. Le parasitisme croissant du vacher à tête brune et la disparition d'habitats expliquent le déclin des populations de plusieurs espèces hôtes de cet oiseau.

L'influence de la fragmentation sur la structure des communautés a été examinée de près depuis 1979 dans le cadre d'une étude à long terme appelée Biological Dynamics of Forest Fragments Project. Située au cœur du bassin fluvial de l'Amazonie, la région étudiée se compose de fragments de forêt tropicale humide séparés de la forêt non morcelée par des distances de 80 à 1 000 m (figure 56.17). De nombreux chercheurs de partout dans le monde ont clairement démontré les effets tant physiques que biologiques de cette fragmentation sur des organismes aussi variés que des bryophytes, des coléoptères et des oiseaux. Ils ont constaté à maintes reprises que les espèces adaptées aux habitats de l'intérieur de la forêt présentent les plus importantes diminutions de population lorsque les fragments sont les plus petits, ce qui semble indiquer que les paysages dominés par de petits fragments abritent un moins grand nombre d'espèces.

### Les corridors entre les fragments d'habitats

Dans les habitats fragmentés, la présence d'un **corridor de déplacement**, soit une bande de terre étroite ou une série de petits massifs d'habitats naturels ou aménagés faisant le lien entre des parcelles autrement isolées, peut être un facteur déterminant pour la conservation de la biodiversité. Les habitats riverains, c'est-à-dire les habitats situés le long d'un cours d'eau, servent souvent de corridors de déplacement, et les politiques gouvernementales de certains pays interdisent la destruction de ces aires riveraines. Dans les zones où les activités humaines sont

importantes, des corridors artificiels sont parfois construits. Ainsi, des ponts ou des tunnels peuvent réduire le nombre d'animaux tués alors qu'ils tentent de traverser une autoroute (figure 56.18).

Les corridors de déplacement peuvent également favoriser l'expansion et réduire la consanguinité dans des populations en déclin. On sait aussi qu'ils facilitent les échanges d'individus entre les populations de nombreux organismes comme les papillons, les campagnols (des rongeurs) et divers végétaux aquatiques. Ils sont particulièrement importants pour les espèces qui se déplacent entre différents habitats au fil des saisons. Toutefois, ils peuvent également être nuisibles. En effet, ils favorisent par exemple la propagation de maladies. Selon une étude menée en 2003 par un chercheur de l'Université de Saragosse, en Espagne, les corridors naturels facilitent les déplacements des tiques, vectrices de microorganismes pathogènes, dans des parcelles de forêt situées dans le Nord de l'Espagne. On ne comprend pas encore très bien tous les effets des corridors, mais ils font l'objet d'actives recherches en biologie de la conservation.

▼ **Figure 56.17** Des fragments de la forêt tropicale humide de l'Amazonie créés dans le cadre du Biological Dynamics of Forest Fragments Project.



▼ **Figure 56.18** Un corridor de déplacement artificiel. Ce pont construit aux Pays-Bas permet aux animaux de traverser un obstacle créé par les humains.



## L'établissement de zones protégées

Pour l'heure, les gouvernements ont mis en réserve, sous différentes formes, environ 7 % des terres émergées de la planète. Lorsqu'ils choisissent des endroits et la façon d'aménager des réserves naturelles, les biologistes de la conservation ont de nombreux défis à relever. Faut-il gérer la réserve de façon à réduire au minimum les risques d'incendie et de prédation pour les espèces menacées ? Ou doit-on garder la réserve la plus naturelle possible et laisser des processus comme les incendies allumés par la foudre jouer leur rôle ? Ce n'est qu'un des problèmes qui se posent pour les gens ayant à cœur la santé écologique des parcs nationaux et des autres zones protégées.

### La préservation des points chauds de biodiversité

Quand vient le moment de déterminer les priorités en matière de conservation, les biologistes concentrent souvent leur attention sur les **points chauds de biodiversité** (aussi appelés zones critiques de biodiversité), c'est-à-dire sur des zones relativement petites dans lesquelles vivent de nombreuses espèces endémiques (des espèces qui n'existent nulle part ailleurs) et un grand nombre d'espèces menacées ou en voie de disparition (figure 56.19). Près de 30 % de toutes les espèces d'oiseaux se trouvent dans des points chauds qui n'occupent que 2 % de la zone émergée du globe. Dans l'ensemble, les régions terrestres les plus « chaudes » comptent pour moins de 1,5 % des terres de la planète, mais abritent le tiers de toutes les espèces de végétaux, d'amphibiens, de reptiles (dont les oiseaux) et de mammifères. Les écosystèmes aquatiques comptent aussi des points chauds, tels les récifs coralliens et certains réseaux hydrographiques.

Les points chauds de biodiversité constituent de bons choix pour des réserves naturelles. Cependant, il n'est pas toujours simple de reconnaître quelles sont ces zones. En effet, une région peut être un point chaud pour un groupe taxinomique donné, comme les oiseaux, mais pas pour un autre groupe, comme les papillons (ordre des lépidoptères). Le fait de désigner une zone comme un point chaud favorise souvent un groupe taxinomique comme les vertébrés ou les végétaux, aux dépens des invertébrés et des microorganismes, auxquels on accorde moins d'attention. Certains biologistes craignent par ailleurs que la stratégie des

points chauds draine tout l'effort de conservation sur une très petite partie de la surface terrestre.

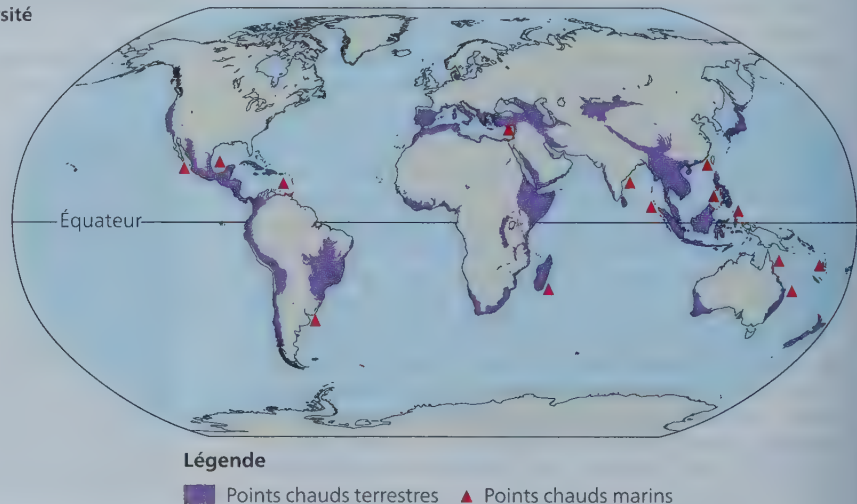
Les changements climatiques compliquent d'autant plus la préservation des points chauds que les conditions qui favorisent une communauté particulière peuvent disparaître de cet endroit plus tard. Le point chaud de biodiversité de la pointe Sud-Ouest de l'Australie (voir la figure 56.19) recèle des milliers d'espèces végétales endémiques et de nombreux vertébrés également endémiques. Les chercheurs ont récemment conclu qu'entre 5 et 25 % des espèces végétales qu'ils ont étudiées risquaient de disparaître d'ici 2080 parce qu'elles ne pourront tolérer l'aridité accrue qui menace cette région.

### L'optique des réserves naturelles

Les réserves naturelles sont des îlots protégés de biodiversité dans une mer d'habitats modifiés ou dégradés par l'activité humaine. Une ancienne politique préconisait qu'on tienne à l'écart les zones protégées pour les garder indéfiniment intactes. Elle était fondée sur le concept selon lequel un écosystème est une unité possédant son équilibre et son autorégulation propres. Cependant, la perturbation est une composante naturelle de tous les écosystèmes (voir le concept 54.3). C'est pourquoi les politiques de gestion qui ne tiennent pas compte des perturbations naturelles ou tentent de les empêcher ont généralement échoué. Par exemple, mettre en réserve l'aire d'une communauté tributaire du feu, comme une partie d'une prairie d'herbes hautes, d'un chaparral ou d'une pinède sèche, avec l'intention de la préserver n'est pas réaliste si on empêche les incendies périodiques. Faute de perturbation dominante, les espèces qui sont adaptées au feu sont éliminées par la compétition avec les autres espèces. La biodiversité se trouve donc réduite.

En biologie de la conservation, la question suivante est importante : vaut-il mieux aménager un grand nombre de petites réserves ou un petit nombre de grandes réserves ? L'un des arguments en faveur des petites réserves est que ce type de réserve peut ralentir la propagation de maladies entre les populations. L'un des arguments en faveur des grandes réserves est que les grands animaux qui se déplacent sur de longues distances et dont les populations sont de faible densité, comme le grizzli, ont besoin de vastes habitats. En outre, les grandes réserves

► **Figure 56.19** Les points chauds de biodiversité terrestre et marine de la Terre.



possèdent des périmètres proportionnellement plus petits que les petites réserves; les lisières les touchent donc moins.

Au fur et à mesure que les biologistes de la conservation ont appris à connaître les exigences rattachées aux populations minimums viables des espèces en voie de disparition, ils se sont rendu compte que la plupart des parcs nationaux et des réserves sont beaucoup trop petits. L'aire nécessaire à la survie à long terme de la population de grizzlis de Yellowstone est plus de 11 fois supérieure à l'aire du parc national de Yellowstone. Les terres publiques et privées qui entourent les réserves devront donc contribuer à la conservation de la biodiversité.

### Les réserves zonées

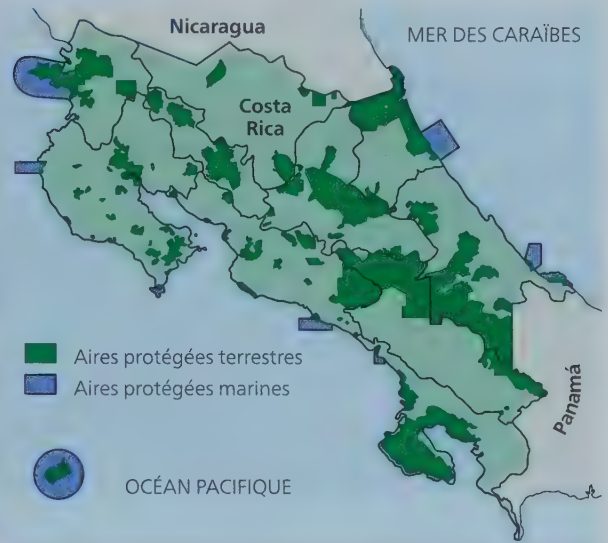
Plusieurs pays ont adopté une approche de la gestion des paysages fondée sur les réserves zonées. Une **réserve zonée** est une région qui a généralement une grande superficie et qui comprend au moins une zone non perturbée par les humains. Cette dernière est entourée de zones modifiées par l'activité humaine et servant à des fins économiques. Le défi principal du concept des réserves zonées est l'instauration d'un climat social et économique dans les terres environnantes qui soit compatible avec la viabilité à long terme de la zone centrale protégée. Les zones environnantes continuent de servir les activités humaines, mais des règlements empêchent les types de modifications qui pourraient endommager la zone protégée. Par conséquent, les habitats environnants servent de zones tampons empêchant une intrusion au cœur de la zone non perturbée.

Le Costa Rica, petit pays d'Amérique centrale, est devenu un chef de file mondial dans l'établissement de réserves zonées. Une entente négociée en 1987 a réduit la dette internationale du Costa Rica en échange de la préservation de terres. Le pays est maintenant divisé en 11 zones de conservation qui contiennent des parcs nationaux et d'autres aires protégées, tant terrestres que marines (**figure 56.20**). Le Costa Rica améliore constamment la gestion de ses réserves zonées. De plus, les zones tampons assurent un approvisionnement stable et durable en produits forestiers, en eau et en énergie hydroélectrique, tout en favorisant une agriculture et un tourisme durables, deux secteurs d'emploi importants pour la population locale.

Le Costa Rica compte sur son système de réserves zonées pour garder au moins 80 % de ses espèces indigènes, mais ce système entraîne tout de même des problèmes. En 2003, une analyse portant sur les changements dans la couverture végétale entre 1960 et 1997 a révélé que le déboisement était négligeable à l'intérieur des parcs nationaux du Costa Rica et que la couverture forestière s'était accrue dans la zone tampon de 1 km autour des parcs. On a néanmoins découvert d'importantes pertes de couverture forestière dans les zones tampons de 10 km qui entourent tous les parcs nationaux, ce qui risque de faire de ces derniers des habitats isolés.

Bien que les écosystèmes marins soient profondément touchés par l'exploitation humaine, on trouve beaucoup moins de réserves dans les océans que sur la terre ferme. Partout dans le monde, de nombreuses populations de poissons se sont effondrées en raison de l'utilisation d'un matériel de plus en plus perfectionné permettant l'accès à presque tous les lieux de pêche potentiels. Devant cette situation, des scientifiques de la University of York, en Angleterre, ont proposé d'établir un peu partout dans le monde des réserves marines où la pêche serait interdite. Selon eux, il existe de fortes indications que ces

▼ **Figure 56.20** Les aires protégées du Costa Rica.



(a) Les lignes noires indiquent les limites des zones de conservation.

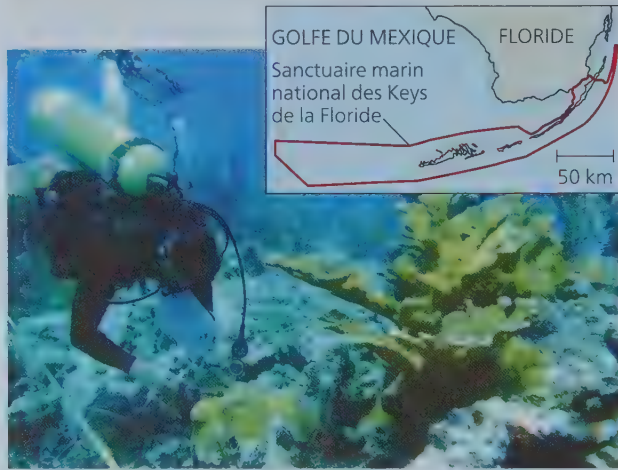


(b) Des touristes s'émerveillent de la diversité de la vie dans une aire protégée du Costa Rica.

réserves marines seraient un moyen d'augmenter les populations de poissons et d'améliorer le rendement de la pêche dans les zones adjacentes. Le système qu'ils proposent est une application contemporaine d'une pratique vieille de plusieurs siècles aux îles Fidji, où certaines zones ont traditionnellement été interdites à la pêche. Cet exemple démontre que le concept des réserves zonées ne date pas d'hier.

Les États-Unis ont adopté un tel système en créant un ensemble de 13 sanctuaires marins, dont le Florida Keys National Marine Sanctuary (sanctuaire marin national des Keys de la Floride), fondé en 1990 (**figure 56.21**). Les populations d'organismes marins, y compris celles de poissons et de homards, se sont rapidement rétablies une fois que la pêche a été interdite dans une réserve de 9 500 km<sup>2</sup>. Aujourd'hui, des poissons plus gros et plus nombreux produisent des larves qui contribuent à repeupler les récifs coralliens et à améliorer la pêche à l'extérieur du sanctuaire. Ce regain de la vie marine dans le sanctuaire en fait aussi une destination prisée pour la plongée, ce qui accroît la valeur économique de cette réserve zonée.

▼ **Figure 56.21** Cette plongeuse mesure la taille du corail dans le sanctuaire marin national des Keys, en Floride.



## L'écologie urbaine

Les réserves zonées que nous venons de décrire combinent des habitats relativement peu perturbés par l'activité humaine avec des habitats abondamment utilisés par les humains pour des raisons économiques. C'est pourquoi de plus en plus de projets de préservation des espèces prennent en compte les zones urbaines. Ce champ d'études, appelé **écologie urbaine**, se penche sur les organismes et leurs habitats en milieu urbain.

Pour la première fois de l'histoire, plus de la moitié de la population mondiale vit dans des villes. On estime qu'en 2030, 5 milliards de personnes vivront en milieu urbain. À mesure que les villes augmentent en nombre et s'agrandissent, les aires protégées qui se trouvaient à l'origine à l'extérieur des limites des villes deviennent partie intégrante des paysages urbains. À l'heure actuelle, les milieux urbains sont des laboratoires écologiques que les scientifiques étudient en recherchant l'équilibre entre les besoins des gens et la préservation des espèces et les autres impératifs écologiques.

Les cours d'eau urbains sont l'objet de recherches importantes, notamment celles qui touchent la qualité et la circulation de leur eau et des organismes qui y vivent. Sous l'effet des pluies, le niveau des cours d'eau urbains a tendance à monter et à descendre plus rapidement que les cours d'eau naturels. Cette fluctuation rapide du niveau de l'eau est due à l'imperméabilisation des surfaces qu'on trouve dans les villes ainsi qu'aux systèmes de drainage qui acheminent l'eau le plus vite possible hors des villes pour éviter les inondations. Les cours d'eau urbains ont également tendance à contenir beaucoup de nutriments et de contaminants, et ils sont souvent détournés ou redirigés dans des réseaux souterrains.

Près de Vancouver, en Colombie-Britannique, des écologistes et une équipe de volontaires ont travaillé ensemble à la restauration d'un ruisseau appelé Guichon Creek. Après avoir stabilisé les berges, ils ont retiré les végétaux envahissants et planté des arbres et des arbustes indigènes le long du ruisseau (**figure 56.22**). Grâce à leurs efforts, l'écoulement de l'eau et les communautés d'invertébrés et de poissons vivant dans ce ruisseau ont retrouvé, à peu de choses près, le niveau qu'ils avaient il y a une cinquantaine d'années, avant la dégradation du ruisseau. Il y a quelques

▼ **Figure 56.22** Des bénévoles éliminent des plantes invasives le long des rives du ruisseau urbain Guichon Creek.



années, les écologistes ont également réussi à réintroduire la truite fardée (*Oncorhynchus clarkii*) dans ce cours d'eau. On l'y trouve maintenant en abondance.

À mesure que les villes s'étendent, notre compréhension des effets écologiques de cette expansion se fera plus pressante, de même que la recherche sur les habitats urbains et sur la conservation de ces habitats.

## RETOUR SUR LE CONCEPT 56.3

1. En quoi consiste un point chaud de biodiversité ?
2. Comment les réserves zonées offrent-elles des incitations économiques pour la préservation à long terme des zones protégées ?
3. **ET SI ?** ► Imaginons qu'un promoteur suggère de déboiser une forêt qui tient lieu de corridor entre deux parcs. Le promoteur propose de compenser la disparition de la forêt en ajoutant une aire de forêt équivalente à l'un des deux parcs. En tant qu'écologiste de la conservation, comment défendriez-vous le maintien du corridor ?

Voir les réponses proposées à l'appendice A.

## CONCEPT 56.4

### La Terre change rapidement sous l'effet des activités humaines

Nous avons vu que la conservation des paysages et la conservation à l'échelle régionale contribuent à protéger les habitats et à préserver les espèces. Cependant, les modifications de l'environnement qu'entraînent les activités humaines posent de nouveaux défis. À cause des changements climatiques d'origine humaine, par exemple, certaines espèces vulnérables pourraient devoir vivre ailleurs, pour survivre, que dans les habitats qu'elles occupent actuellement. Que se produirait-il si un *grand nombre* d'habitats changeaient tellement vite que l'emplacement des réserves actuelles devenait inadéquat dans 10, 50 ou 100 ans pour les espèces qu'elles abritent ? Ce scénario est de plus en plus envisageable.

La présente section décrit quatre types de modifications de l'environnement causées par les activités humaines : l'enrichissement en nutriments, l'accumulation de toxines, le changement climatique et l'appauvrissement de l'ozone. Les conséquences de ces modifications et de bien d'autres sont observables non seulement dans les écosystèmes dominés par les humains, comme les villes et les régions agricoles, mais aussi dans les écosystèmes les plus reculés de la Terre.

## L'enrichissement en nutriments

L'activité humaine retire souvent des nutriments d'une zone de la biosphère et les introduit ailleurs. Une personne qui mange du brocoli à Montréal, au Québec, consomme des nutriments qui se trouvaient peu de temps auparavant dans le sol d'une autre région. Quelques jours plus tard, une partie de ces nutriments se retrouvera dans les eaux du fleuve Saint-Laurent, après être passée dans le système digestif de la personne et dans l'usine d'épuration municipale. De la même façon, les nutriments contenus dans le sol des terres agricoles peuvent atteindre par ruissellement des cours d'eau et des lacs, provoquant ainsi un appauvrissement dans une région et un excès dans l'autre, et perturbant les cycles biogéochimiques naturels dans les deux.

L'exemple de l'agriculture permet de comprendre comment des activités humaines peuvent entraîner un enrichissement en nutriments. Lorsqu'on vient de retirer la végétation d'une parcelle de terre en culture, celle-ci perd une très grande partie des nutriments qu'elle contenait, car ils sont exportés vers la biomasse des récoltes. Après une période qui varie beaucoup d'un milieu à l'autre, il devient nécessaire d'amender le sol en y ajoutant des engrais. Ainsi, au début de la colonisation des prairies d'Amérique du Nord, les agriculteurs ont obtenu de bonnes récoltes pendant des décennies, car les grandes réserves de matière organique du sol continuaient à fournir des nutriments grâce à la décomposition. À l'opposé, les terres agricoles des tropiques ne sont productives que pendant une ou deux années, parce que le sol contient peu de nutriments. Malgré ces différences, la réserve de nutriments naturels finit par s'épuiser partout où on pratique la culture intensive.

Pensons à l'azote, le nutriment qui se perd le plus à cause des pratiques agricoles modernes (voir la figure 55.14). En mélangeant la terre, le labourage du sol accélère la vitesse de décomposition de la matière organique. L'azote libéré pendant la décomposition est retiré des écosystèmes au moment de la récolte. Pour compenser cette perte d'azote, il faut recourir à des engrais contenant des nitrates ou d'autres formes d'azote que les végétaux sont capables d'absorber (figure 56.23). Après la récolte, toutefois, il ne reste pas assez de végétaux pour absorber ces nitrates, si bien que ceux-ci sont entraînés hors de l'écosystème avec les eaux de ruissellement, comme le montre la figure 55.15.

Des études récentes indiquent que les activités humaines ont plus que doublé la réserve mondiale d'azote fixé disponible pour les producteurs. Les engrais industriels fournissent l'apport d'azote le plus important. L'utilisation de combustibles fossiles libère aussi des oxydes d'azote qui pénètrent dans l'atmosphère et se dissolvent dans l'eau de pluie; l'azote finit par pénétrer dans les écosystèmes sous forme de nitrates. L'augmentation de la culture des légumineuses avec leurs symbiotes fixateurs d'azote est également une cause importante de l'enrichissement en azote des sols.

▼ **Figure 56.23** La fertilisation d'un champ de maïs. Pour remplacer les nutriments retirés par les cultures, les agriculteurs doivent épandre des engrais organiques – du fumier ou du compost, par exemple – ou pulvériser des engrais synthétiques, comme ci-dessous.

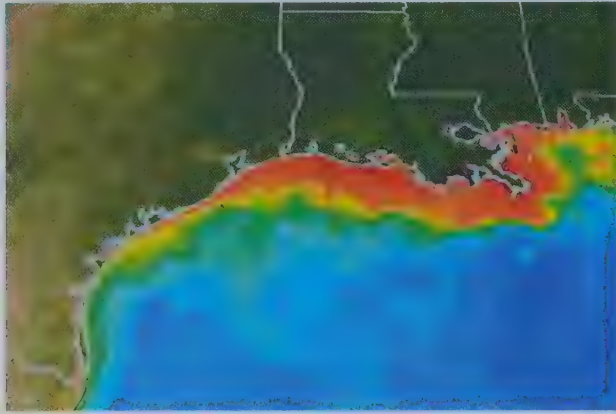


Les choses se compliquent lorsque la quantité d'un nutriment dans un écosystème dépasse la **charge critique**, c'est-à-dire la quantité du nutriment ajouté – en général l'azote ou le phosphore – que les végétaux peuvent absorber sans que cela nuise à l'intégrité des écosystèmes. Par exemple, lorsque les minéraux azotés contenus dans le sol dépassent la charge critique, ils finissent par se retrouver dans les eaux souterraines ou par atteindre les écosystèmes dulcicoles ou marins par ruissellement; ils contaminent alors les réserves d'eau et tuent les poissons. Dans la plupart des zones agricoles, les concentrations de nitrates des eaux souterraines sont aussi de plus en plus élevées et atteignent parfois des teneurs qui rendent l'eau impropre à la consommation.

De nombreux fleuves contaminés par les nitrates et l'ammonium contenus dans les eaux de ruissellement et les égouts se déversent à leur tour dans l'océan Atlantique. Les plus importantes contributions à cet égard proviennent du Nord de l'Europe et des États centraux des États-Unis. L'azote qui se déverse dans le Mississippi se retrouve dans le golfe du Mexique et entraîne chaque été une prolifération du phytoplancton. Lorsque le phytoplancton meurt, sa décomposition par les détritivores crée une vaste zone morte (ou anoxique) le long de la côte (figure 56.24). Dans ces conditions, les poissons et autres animaux marins disparaissent de zones marines comptant parmi les plus importantes des États-Unis sur le plan économique. Pour réduire l'étendue de la zone morte, les agriculteurs ont commencé à faire un usage plus éclairé des engrais, et les gestionnaires de la conservation des ressources restaurent les milieux humides du bassin versant du Mississippi.

Les nutriments contenus dans les eaux de ruissellement entraînent aussi l'eutrophisation des lacs (voir le concept 55.2). La prolifération des algues et des cyanobactéries ainsi que l'anoxie qui survient lorsqu'elles meurent ressemblent étroitement à ce qui se produit dans les zones marines mortes. Ces conditions menacent la survie de nombreux organismes. Ainsi, dès les années 1960, l'eutrophisation du lac Érié, combinée à la surpêche, a causé la disparition d'espèces de poissons à valeur commerciale telles que le doré bleu (*Stizostedion vitreum glaucum*), le grand corégone (*Coregonus clupeaformis*) et le touladi

▼ **Figure 56.24** La prolifération du phytoplancton causée par l'excès d'azote dans le bassin du Mississippi crée une zone morte. Dans ces images satellites datant de 2004, le rouge et l'orange représentent des concentrations élevées de phytoplancton dans le golfe du Mexique.

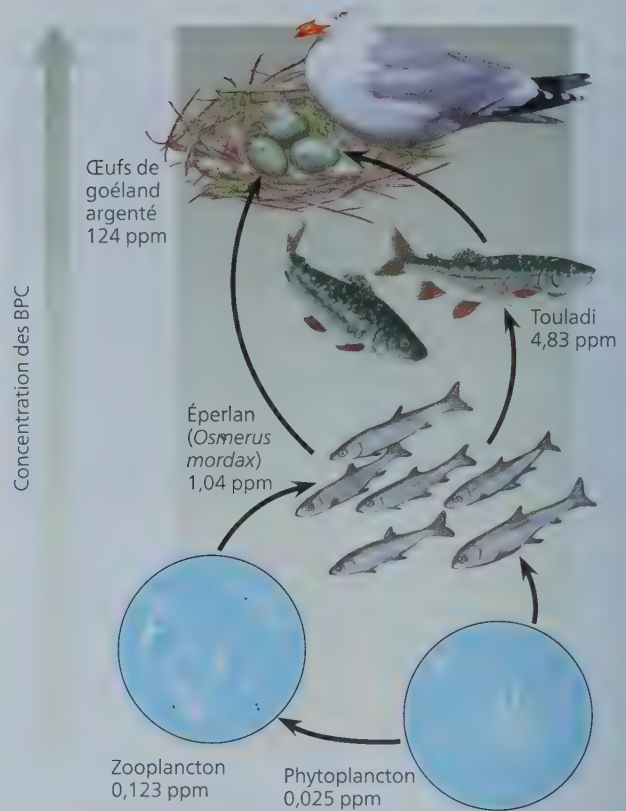


(*Salvelinus namaycush*). Depuis, les règlements relatifs au rejet de déchets dans le lac sont devenus plus sévères. Quelques populations de poissons ont connu une importante augmentation. Cependant, plusieurs des espèces indigènes de poissons et d'invertébrés ne se sont pas rétablies.

### La présence de produits toxiques dans l'environnement

Les humains produisent une extraordinaire variété de substances toxiques, notamment des milliers de composés synthétiques qui n'ont jamais existé à l'état naturel. Ils déversent ces substances dans la nature sans s'inquiéter des conséquences écologiques de leur geste. Les organismes absorbent les substances toxiques en même temps que l'eau et les nutriments. Ils en métabolisent ou en excrètent certaines, mais en accumulent d'autres dans leurs tissus, souvent dans les tissus adipeux. Ces substances sont particulièrement nocives, notamment parce que leur concentration tissulaire augmente à chaque niveau d'un réseau trophique. Ce phénomène de **bioamplification** s'explique par le fait que la biomasse d'un niveau trophique donné est produite à partir de la biomasse beaucoup plus grande du niveau inférieur (voir le concept 55.3). Ainsi, les organismes carnivores des niveaux supérieurs du réseau trophique sont ceux qui subissent le plus les méfaits des composés toxiques libérés dans le milieu.

Les hydrocarbures chlorés, un groupe de composés synthétisés à l'échelle industrielle, fournissent un bon exemple de bioamplification. Ces composés comprennent des substances chimiques industrielles appelées BPC (biphényles polychlorés) et de nombreux pesticides, comme le DDT (dichlorodiphényltrichloroéthane). Des recherches en cours mettent en cause beaucoup de ces composés dans les troubles du système endocrinien chez un grand nombre d'espèces animales, notamment l'humain. La bioamplification des BPC a été observée dans le réseau trophique des Grands Lacs, où les concentrations de BPC dans les œufs de goéland argenté (*Larus argentatus*), qui occupe le niveau supérieur du réseau trophique, sont presque 5 000 fois plus élevées que dans le phytoplancton, qui se trouve à la base du réseau (**figure 56.25**).



▲ **Figure 56.25** La bioamplification des BPC dans un réseau trophique des Grands Lacs. (ppm = parties par million)

? Calculez par quel facteur la concentration de BPC a augmenté à chaque niveau du réseau trophique.

Le DDT offre un exemple tristement célèbre de bioamplification ayant porté atteinte à des carnivores des niveaux supérieurs. Le DDT servait à éliminer des insectes piqueurs, comme les moustiques (famille des culicidés), ou des parasites des cultures. Dans la décennie qui a suivi la Seconde Guerre mondiale, son utilisation s'est répandue rapidement alors que l'on ne comprenait pas encore bien ses conséquences écologiques. Dès le début des années 1950, les scientifiques ont commencé à comprendre la persistance du DDT dans l'environnement et son transport dans l'eau loin des zones d'épandage. L'un des premiers indices des graves effets écologiques du DDT a été le déclin des populations de pélicans (*Pelecanus spp.*), de balbuzards pêcheurs (*Pandion haliaetus*), de pygargues (*Haliaeetus spp.*) et d'aigles royaux (*Aquila chrysaetos*), des consommateurs quaternaires qui se trouvent au sommet de divers réseaux trophiques. L'accumulation de DDT (et de DDE, un produit de sa dégradation) dans les tissus de ces consommateurs quaternaires entravait la calcification des coquilles d'œufs. En effet, ces oiseaux brisaient leurs œufs en les couvant, et leur taux de reproduction diminuait de façon catastrophique. La publication de *Printemps silencieux*, de Rachel Carson, a contribué à alerter l'opinion publique dans les années 1960 (**figure 56.26**). Ainsi le DDT a-t-il été banni aux États-Unis en 1971. On a alors observé un spectaculaire rétablissement des populations d'espèces d'oiseaux touchées.

► **Figure 56.26 Rachel Carson.** Grâce à son livre et à son témoignage devant le Congrès américain, la biologiste et auteure Rachel Carson a favorisé l'émergence d'une nouvelle éthique en environnement. Ses démarches ont entraîné l'interdiction du DDT aux États-Unis et la mise en place d'une réglementation plus sévère à l'égard de l'utilisation des substances chimiques.



Dans la plupart des régions tropicales, on utilise encore le DDT pour contrôler les moustiques responsables de la transmission du paludisme et d'autres maladies. Dans ces régions, les sociétés doivent choisir entre sauver des vies humaines ou protéger d'autres espèces. L'usage parcimonieux du DDT, combiné à l'utilisation de toiles moustiquaires et d'autres moyens de protection reposant sur une technologie simple, semble constituer la meilleure approche. Le passé sombre du DDT illustre l'importance de comprendre les liens écologiques entre les maladies et les communautés (voir le concept 54.5).

Les produits pharmaceutiques forment un autre groupe de produits toxiques pour l'environnement, ce qui soulève l'inquiétude des écologistes. L'utilisation de médicaments d'ordonnance et en vente libre s'est accrue au cours des dernières années, particulièrement dans les pays industrialisés, si bien que les écosystèmes dulcicoles de la planète contiennent de nombreux produits pharmaceutiques en faibles concentrations. En effet, les gens qui utilisent ces produits éliminent naturellement les résidus dans leurs matières fécales et leurs urines, sans compter qu'ils jettent parfois les médicaments non utilisés de manière inappropriée, par exemple dans la toilette ou l'évier. Ces médicaments et ces résidus non dégradés dans les usines de traitement des eaux usées sont alors entraînés dans les rivières et les lacs en même temps que l'eau quittant ces usines. Par ailleurs, les médicaments qu'on donne aux animaux de ferme pour stimuler leur croissance peuvent également s'introduire dans les rivières et les lacs par lessivage des terres cultivées (figure 56.27).

Parmi les produits pharmaceutiques étudiés par les écologistes actuellement, citons les hormones stéroïdes sexuelles,

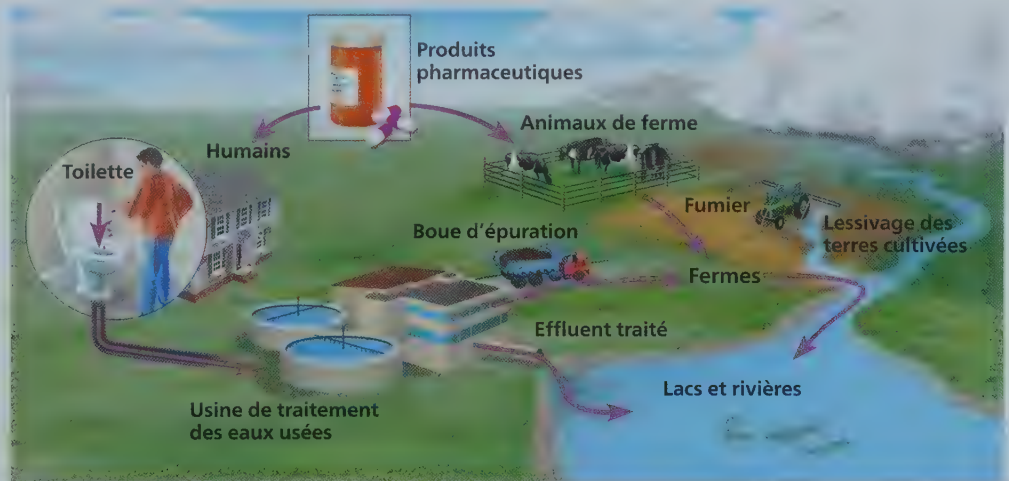
notamment les œstrogènes utilisés dans les contraceptifs. Plusieurs espèces de poissons sont si sensibles à certains œstrogènes que des concentrations d'à peine quelques parties par trillion dans leur eau suffisent pour altérer leur différenciation sexuelle et augmenter la proportion femelles-mâles de la population. Des chercheurs en Ontario, au Canada, ont réalisé une expérience d'une durée de sept ans au cours de laquelle ils ont ajouté de l'œstrogène synthétique de type contraceptif dans un lac, à des concentrations très faibles (5 ou 6 ng/L). Résultat : dans le lac étudié, l'exposition chronique des têtes-de-boule (une sorte de méné, *Pimephales promelas*) à cet œstrogène a entraîné la féminisation des mâles et la presque extinction de la population de cette espèce.

De nombreuses substances toxiques qui ne peuvent être dégradées par les microorganismes demeurent dans l'environnement pendant des années, voire des décennies. Dans d'autres cas, les composés chimiques introduits dans l'environnement sont relativement inoffensifs ; toutefois, leur réaction avec d'autres substances, l'exposition à la lumière ou le métabolisme des microorganismes les transforment en produits plus toxiques. Le mercure, un sous-produit de la fabrication du plastique et des centrales thermiques au charbon, a été systématiquement évacué dans les cours d'eau et la mer sous une forme insoluble. Or, les bactéries présentes dans les sédiments convertissent ce déchet en méthylmercure ( $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ ), un composé soluble dans l'eau extrêmement toxique qui s'accumule dans les tissus de certains organismes, dont les humains qui consomment des poissons provenant des eaux contaminées.

## Les gaz à effet de serre et les changements climatiques

De nombreuses activités humaines produisent des déchets gazeux, que nous pensions autrefois pouvoir impunément libérer dans l'immensité de l'atmosphère. Aujourd'hui, évidemment, nous savons que ces déchets peuvent entraîner des **changements climatiques**, c'est-à-dire une modification directionnelle que subit le climat planétaire et qui dure au moins trois décennies (par opposition aux changements météorologiques de courte durée).

► **Figure 56.27 Sources et déplacements des produits pharmaceutiques dans l'environnement.**



## L'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique

Pour comprendre comment les activités humaines peuvent causer des changements climatiques, considérons la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Au cours des 150 dernières années, la concentration de CO<sub>2</sub> n'a cessé d'augmenter, à cause de l'utilisation des combustibles fossiles et du déboisement. Les scientifiques estiment que la concentration atmosphérique moyenne de CO<sub>2</sub> était d'environ 274 ppm avant 1850. En 1958, on commença à prendre des mesures très précises dans une station située au sommet du mont Mauna Loa, à Hawaï, à une altitude où l'air ne présente pas de variations attribuables aux grands centres urbains. Comme le montre la **figure 56.28**, la concentration était alors de 316 ppm. À l'heure actuelle, elle dépasse 400 ppm, ce qui représente une augmentation de plus de 45 % depuis la moitié du 19<sup>e</sup> siècle. Dans la rubrique **Habiletés scientifiques**, vous représenterez graphiquement et vous interpréterez la variation des concentrations de CO<sub>2</sub> sur une année et sur de plus longues périodes.

Si l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> des 150 dernières années préoccupe les scientifiques, c'est en raison de son lien avec l'élévation des températures sur la planète. La majeure partie du rayonnement solaire qui atteint la planète est réfléchi et renvoyée dans l'espace sous forme de rayonnement infrarouge. Mais bien que le CO<sub>2</sub>, la vapeur d'eau et d'autres gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère laissent passer la lumière visible, ils interceptent, absorbent et renvoient vers la Terre une bonne partie du rayonnement infrarouge préalablement réfléchi par cette dernière. Une partie de la chaleur solaire se trouve ainsi emprisonnée, un phénomène appelé **effet de serre** (**figure 56.29**). Sans l'effet de serre, la température annuelle moyenne de l'air à la surface de la Terre ne dépasserait pas -18 °C, et la vie telle que nous la connaissons n'existerait pas.

À mesure que les concentrations de CO<sub>2</sub> et d'autres gaz à effet de serre augmentent, une plus grande quantité de chaleur solaire est emprisonnée, ce qui élève la température de notre planète. Depuis 1900, la température de la Terre a augmenté

de 0,9 °C. Selon les modèles planétaires, si le CO<sub>2</sub> et les autres gaz à effet de serre continuent d'augmenter au même rythme, la Terre se sera réchauffée d'au moins 3 °C encore d'ici la fin du 21<sup>e</sup> siècle.

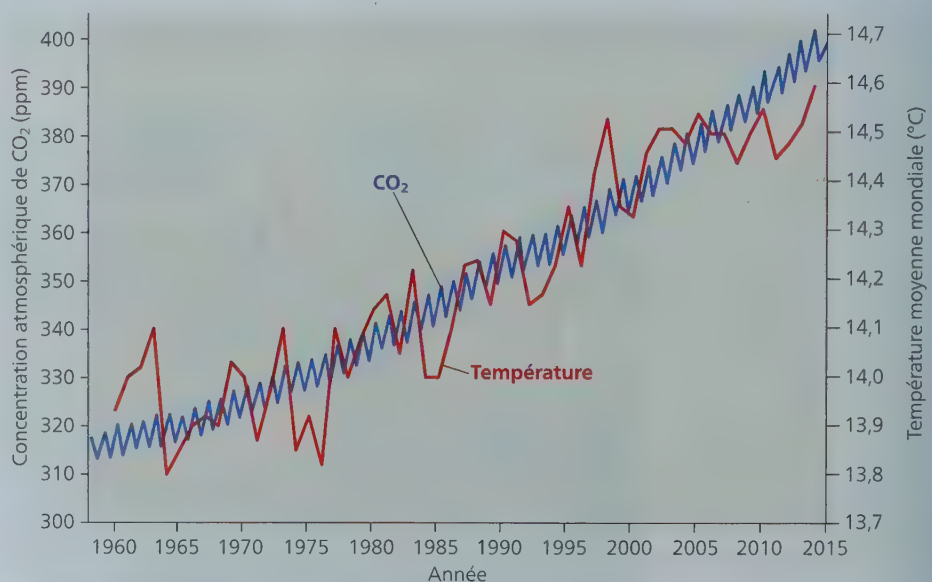
Sous l'effet de ce réchauffement, le climat subit d'autres modifications : les vents et les régimes de précipitations sont chamboulés, et les événements météorologiques extrêmes (sécheresses, tempêtes, etc.) sont de plus en plus fréquents. Quelles sont les conséquences de ces changements sur le climat de la Terre ?

## Les effets biologiques des changements climatiques

De nombreux organismes, notamment les végétaux qui ne peuvent pas se disperser rapidement sur de grandes distances ne survivront probablement pas aux rapides changements climatiques qui découleront du réchauffement planétaire. De plus, de nombreux habitats sont aujourd'hui plus fragmentés que jamais, ce qui réduit d'autant plus la capacité actuelle et future de nombreux organismes à migrer. De fait, les changements climatiques qui se sont produits jusqu'à maintenant ont *déjà* modifié les aires de répartition géographique de centaines d'espèces, entraînant parfois une diminution de la taille des populations et des aires elles-mêmes (voir le concept 52.1). Par exemple, une étude réalisée en 2015 sur 67 espèces de bourdons a montré que la distribution géographique de ces importants pollinisateurs a rétréci proportionnellement au réchauffement climatique.

Les écosystèmes du Grand Nord, particulièrement les forêts de conifères (taïgas) et la toundra sont les écosystèmes où le climat a le plus changé. La fonte de la neige et des glaces expose des surfaces plus sombres et plus absorbantes, qui renvoient moins de rayons vers l'atmosphère, ce qui accentue le réchauffement (voir la figure 56.29). À l'été 2012, un record de fonte a été enregistré : les glaces de l'océan couvraient la plus petite surface jamais mesurée ; ce record a été brisé plusieurs fois depuis, en 2016, en 2018, et bien que les glaces de l'Antarctique

► **Figure 56.28** L'augmentation de la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub>, à Mauna Loa (Hawaï), et températures moyennes mondiales. En plus des fluctuations saisonnières normales, la concentration de CO<sub>2</sub> (en bleu) a augmenté de façon constante de 1958 à 2015. Bien que les températures moyennes fluctuent grandement (en rouge) au cours de la même période, il y a une nette tendance au réchauffement.



Représenter graphiquement des données cycliques

■ COMMENT LA CONCENTRATION ATMOSPHÉRIQUE DE CO<sub>2</sub> VARIE-T-ELLE AU COURS D'UNE MÊME ANNÉE ET D'UNE DÉCENNIE À L'AUTRE ? ■

La courbe bleue de la figure 56.28 montre la variation de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère de la Terre sur une période de plus de 50 ans. Pour chaque année de cette période, deux coordonnées sont représentées graphiquement, soit celle de mai et celle de novembre. On peut obtenir une représentation plus détaillée de la variation de la concentration de CO<sub>2</sub> avec des mesures prises à intervalles plus fréquents. Dans le présent exercice, vous représenterez graphiquement les concentrations mensuelles de CO<sub>2</sub> pour chacune des trois périodes d'un an.

■ RÉSULTATS ■ Le tableau ci-dessous présente les concentrations moyennes de CO<sub>2</sub> (en parties par million) mesurées à l'Observatoire du Mauna Loa pour chaque mois des années 1990, 2000 et 2010.

Mois	1990	2000	2010
Janvier	353,79	369,25	388,45
Février	354,88	369,50	389,82
Mars	355,65	370,56	391,08
Avril	356,27	371,82	392,46
Mai	359,29	371,51	392,95
Juin	356,32	371,71	392,06
Juillet	354,88	369,85	390,13
Août	352,89	368,20	388,15
Septembre	351,28	366,91	386,80
Octobre	351,59	366,91	387,18
Novembre	353,05	366,99	388,59
Décembre	354,27	369,67	389,68

Source des données: National Oceanic & Atmospheric Administration, Earth System Research laboratory, Global Monitoring Division.

soient relativement stables, celles de l'Arctique continuent de diminuer au cours d'étés qui se prolongent. Les modèles climatiques prévoient que d'ici quelques décennies, les glaces fondront complètement l'été venu, privant ainsi les ours polaires (*Ursus maritimus*), les phoques (famille des phocidés) et les oiseaux marins d'une partie de leur habitat. En outre, comme nous l'avons appris précédemment (voir le concept 55.2), l'augmentation des températures a fait en sorte que plusieurs régions arctiques qui étaient des bassins de carbone (qui absorbaient plus de CO<sub>2</sub> atmosphérique qu'elles n'en libéraient dans l'atmosphère) sont devenues des sources de carbone (qui libèrent plus de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère qu'elles n'en absorbent). Il s'agit là d'un changement préoccupant qui pourrait aggraver le réchauffement du climat.

Les forêts de conifères de l'Ouest de l'Amérique du Nord sont également gravement touchées, notamment par les températures plus chaudes, par les hivers moins neigeux et par de plus longs épisodes de sécheresse en été. Il en résulte qu'au cours

► Un chercheur prélève un échantillon d'air à l'Observatoire du Mauna Loa, à Hawaï.



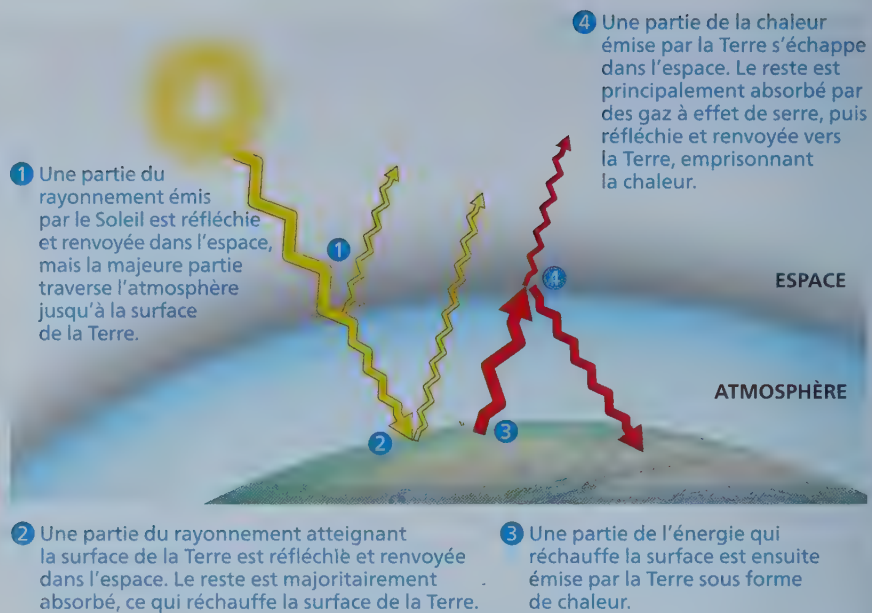
INTERPRÉTEZ LES DONNÉES ▼

1. Représentez graphiquement les données de chaque année dans un seul diagramme (ce qui donnera trois courbes, soit une courbe pour chaque année). Choisissez un type de diagramme qui convient à ces données. Pour l'axe vertical, choisissez une échelle qui vous permet de bien mettre en évidence la tendance de la variation de la concentration de CO<sub>2</sub>, tant sur une année que d'une décennie à l'autre. (Pour en savoir davantage sur les diagrammes, consultez l'appendice F.)
2. Pour chaque année, comment varie la concentration de CO<sub>2</sub>? Comment expliqueriez-vous cette tendance?
3. Les mesures prises à l'Observatoire du Mauna Loa sont les concentrations atmosphériques moyennes de CO<sub>2</sub> dans l'hémisphère Nord. Supposons que vous mesuriez les concentrations de CO<sub>2</sub> dans des conditions semblables, mais dans l'hémisphère Sud. D'après vous, quelle tendance se dégagerait des concentrations mesurées au cours d'une année? Expliquez votre réponse.
4. En plus des changements survenus au cours d'une même année, quel changement remarquez-vous dans la concentration de CO<sub>2</sub> entre 1990 et 2010? Calculez la concentration moyenne de CO<sub>2</sub> pour les 12 mois de chaque année. Par quel pourcentage cette moyenne a-t-elle changé de 1990 à 2000 et de 1990 à 2010?

de la seconde moitié du 20<sup>e</sup> siècle, les arbres sont morts en plus grand nombre chaque année dans des forêts par ailleurs en bonne santé. Les températures plus chaudes et les sécheresses plus longues et plus fréquentes ont également augmenté le risque de feux de forêt. Au cours des récentes décennies, le feu a détruit le double de la superficie habituelle des forêts boréales de l'Ouest de l'Amérique du Nord et de la Russie. Comme le climat continue de se réchauffer, il est à prévoir que la distribution géographique des précipitations connaîtra d'autres changements et que les régions agricoles du centre des États-Unis deviendront beaucoup plus sèches.

Les changements climatiques ont causé des bouleversements dans beaucoup d'autres écosystèmes. En Europe et en Asie, par exemple, la feuillaison se produit plus tôt au printemps, tandis que dans les régions tropicales, la croissance et la survie de certaines espèces de corail connaissent un déclin depuis que la température de l'eau a commencé à s'élever. La figure 56.30 décrit plusieurs autres effets des changements climatiques.

► **Figure 56.29 L'effet de serre.** Le CO<sub>2</sub> et les autres gaz à effet de serre contenus dans l'atmosphère absorbent la chaleur émise par la surface de la Terre, puis ils la réfléchissent, de sorte qu'une bonne partie de cette chaleur est renvoyée vers la Terre.



Ce que nous devons en retenir, c'est que chacun des effets des changements climatiques peut à son tour causer une série de changements biologiques. La nature exacte de ces répercussions en cascade n'est pas toujours facile à prédire. Chose certaine, plus notre planète se réchauffera, plus ses écosystèmes s'en ressentiront.

### La recherche de solutions aux changements climatiques

Nous ne pourrions ralentir le réchauffement planétaire et les autres changements climatiques qu'au prix de nombreux efforts selon différentes approches. Les progrès les plus rapides passent par l'utilisation plus efficace de l'énergie et le remplacement des combustibles fossiles par des sources d'énergie renouvelable comme l'énergie solaire, éolienne et nucléaire, bien que cette dernière soit controversée. Le charbon, le pétrole, le bois et d'autres combustibles de source organique occupent toujours une place de choix dans les sociétés industrialisées, et leur combustion libère invariablement du CO<sub>2</sub>. La concertation internationale et des changements radicaux tant des modes de vie que des procédés industriels sont nécessaires pour stabiliser les émissions de CO<sub>2</sub>. La concertation internationale n'a pas encore permis d'arriver à un accord mondial sur la façon de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

La réduction du déboisement dans le monde, particulièrement dans les tropiques, constitue une autre approche importante pour ralentir le réchauffement planétaire. À l'heure actuelle, 10% des émissions de gaz à effet de serre sont imputables au déboisement. Une recherche récente a montré qu'il était possible de réduire la vitesse du déboisement de moitié en 10 à 20 ans en payant les pays concernés afin qu'ils cessent de déboiser. En plus de réduire l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, la diminution du déboisement permet aussi de sauvegarder les forêts indigènes et de préserver la biodiversité, ce dont tout le monde profiterait.

### L'appauvrissement de l'ozone atmosphérique

Comme le CO<sub>2</sub> et d'autres gaz à effet de serre, la concentration d'ozone atmosphérique (O<sub>3</sub>) a également changé en raison des activités humaines. La couche d'ozone protège la vie sur Terre contre les effets nocifs du rayonnement ultraviolet (UV). Elle se situe dans la stratosphère, à une altitude variant entre 17 et 25 km. Or, des études de l'atmosphère faites par satellite révèlent que la couche d'ozone observée au printemps au-dessus de l'Antarctique s'est amincie considérablement depuis le milieu des années 1970 (figure 56.31). La destruction de l'ozone atmosphérique découle principalement de l'accumulation de chlorofluorocarbones (CFC), des substances auparavant très utilisées dans les appareils réfrigérants et dans certains procédés industriels. Les atomes de chlore que libèrent les CFC dans la stratosphère réagissent avec d'autres molécules d'ozone et réduisent celles-ci en molécules d'oxygène (O<sub>2</sub>) (figure 56.32). D'autres réactions chimiques libèrent ensuite le chlore, qui réagit alors avec d'autres molécules d'ozone dans une réaction catalytique en chaîne.

L'amincissement de la couche d'ozone est particulièrement visible au-dessus de l'Antarctique au printemps, alors que l'air froid et stable favorise ces réactions atmosphériques en chaîne (figure 56.33). L'appauvrissement en ozone ainsi que la dimension du trou de la couche d'ozone ont légèrement diminué depuis quelques années par rapport à la moyenne des 20 dernières années, mais le trou s'étend encore quelquefois jusqu'au-dessus des régions de l'extrême sud de l'Australie, de la Nouvelle-Zélande et de l'Amérique du Sud. Dans les régions plus peuplées se trouvant à des latitudes moyennes, la concentration de l'ozone a subi une diminution variant de 2 à 10% au cours des 20 dernières années.

La diminution de la concentration d'ozone dans la stratosphère accroît l'intensité des rayons UV qui atteignent la Terre et pourrait avoir de graves conséquences pour la vie terrestre, particulièrement pour les végétaux, les animaux et les microorganismes.

# FAITES DES LIENS

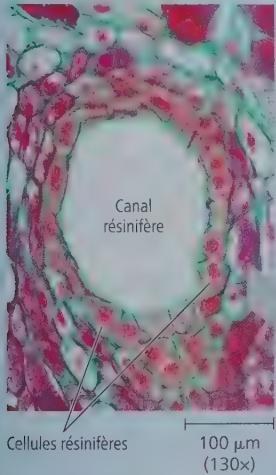
## Les changements climatiques ont des effets à tous les niveaux de l'organisation biologique

L'utilisation de combustibles fossiles a entraîné une dangereuse augmentation des concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub> et d'autres gaz à effet de serre (voir la figure 56.28), et cette hausse transforme progressivement le climat de la planète. Depuis 1900, la température moyenne de la Terre a augmenté d'environ 1 °C, et les événements météorologiques extrêmes sont de plus en plus fréquents dans certaines régions du globe. Quels sont les effets de ces changements sur le monde vivant ?

### Les effets sur les cellules

La température influe sur la vitesse des réactions enzymatiques (voir la figure 8.17) et, par conséquent, sur la vitesse à laquelle s'effectuent la réplication de l'ADN, la division cellulaire et d'autres processus primordiaux qui se déroulent dans la cellule.

Le réchauffement de la planète et les autres changements climatiques altèrent également les réactions de défense à l'échelle cellulaire chez certains organismes. Par exemple, dans les vastes forêts de conifères de l'Ouest de l'Amérique du Nord, les changements climatiques ont affaibli la capacité des pins de se défendre contre les attaques du dendroctone du pin ponderosa (*Dendroctonus ponderosae*).



► Les pins ponderosa se défendent à l'aide de cellules résinifères spécialisées qui sécrètent une substance collante (résine) qui emprisonne et tue les dendroctones. Malheureusement, les cellules résinifères produisent moins de résine quand l'arbre est stressé par des températures de plus en plus chaudes et des sécheresses.

► Après avoir vaincu les défenses cellulaires d'un arbre, les dendroctones produisent un grand nombre de descendants qui creusent des tunnels dans le bois et blessent gravement l'arbre. De plus, les températures plus chaudes favorisent le développement des dendroctones. Ceux-ci parviennent à maturité et se reproduisent plus rapidement, si bien qu'ils deviennent de plus en plus nombreux à attaquer l'arbre. Les dendroctones peuvent également infecter l'arbre par l'intermédiaire d'un champignon nuisible qui apparaît sur le bois sous la forme de taches bleutées.



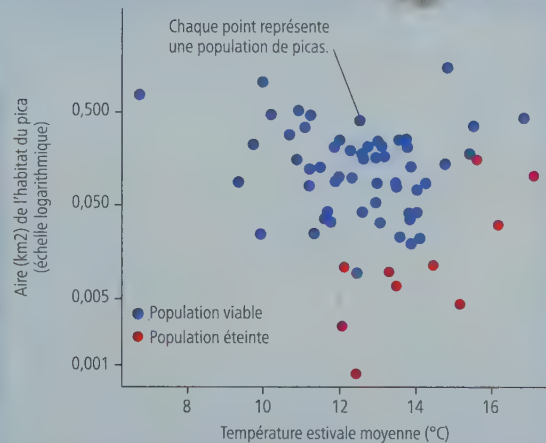
► Cette vue aérienne montre l'ampleur des dommages causés par les dendroctones dans une seule forêt nord-américaine. Les arbres orangés et rouges sont morts.

### Les effets sur les organismes

Pour survivre, les organismes doivent maintenir des conditions internes relativement constantes (voir le concept 40.2). Ainsi, un individu meurt si sa température corporelle devient trop élevée. Le réchauffement de la planète augmente ce risque chez certaines espèces, ce qui entraîne une diminution de l'apport alimentaire et l'échec de reproduction.

Par exemple, le pica d'Amérique (*Ochotona princeps*) meurt si sa température corporelle augmente d'à peine 3 °C au-dessus de sa température au repos, et cela peut se produire rapidement dans les régions où les changements climatiques ont déjà causé un réchauffement notable des températures.

► À cause de l'augmentation des températures estivales, les picas d'Amérique passent plus de temps dans leurs tanières pour se protéger de la chaleur, de sorte qu'ils disposent de moins de temps pour trouver de la nourriture. Ce manque de nourriture a causé une augmentation du taux de mortalité et une baisse du taux de natalité. Les populations de picas ont chuté, et certaines sont en voie de disparaître. (La figure 1.12 montre un autre exemple.)



# Les changements climatiques ont des effets à tous les niveaux de l'organisation biologique (suite)

## FAITES DES LIENS

### Les effets sur les populations

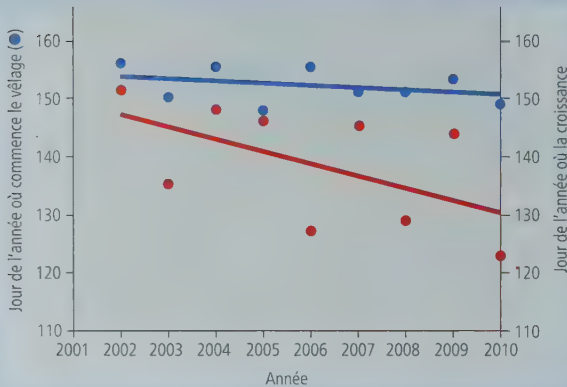
Les changements climatiques ont contribué soit à augmenter la taille de certaines populations, soit à la réduire (voir les concepts 1.1 et 46.1). En effet, certaines espèces se sont adaptées aux changements climatiques en ce qui concerne leur croissance, leur reproduction ou leur migration, mais d'autres ne se sont pas adaptées, de sorte que leurs populations font face à des pénuries de nourriture et à une réduction de leur taux de survie et de leur succès reproducteur.

Par exemple, les chercheurs ont montré qu'il existe un lien entre l'augmentation des températures et la diminution des populations de caribous (*Rangifer tarandus*) dans l'Arctique.



▲ Les populations de caribous migrent vers le nord au printemps pour donner naissance et pour se nourrir des nouvelles pousses des végétaux.

► Le céraiste des Alpes (*Cerastium alpinum*) est une plante à floraison hâtive dont dépend le caribou.

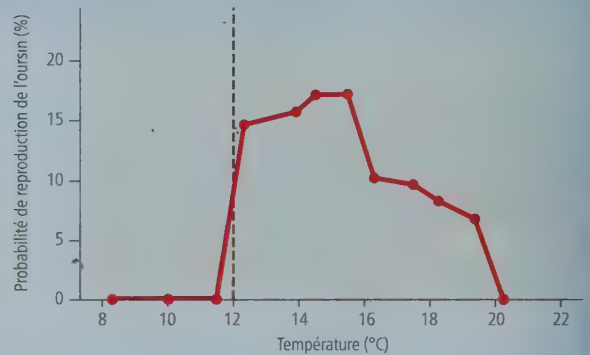


▲ Avec le réchauffement du climat, les végétaux dont dépendent les caribous émergent plus tôt au printemps. Les caribous n'ont pas modifié de façon similaire le moment où ils migrent et donnent naissance. En raison du manque de nourriture, la production de descendants a chuté par un facteur de quatre.

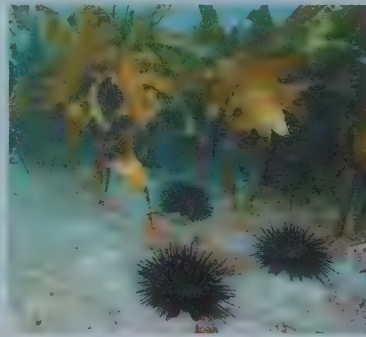
### Les effets sur les communautés et les écosystèmes

Le climat influe sur le milieu de vie d'une espèce (voir la figure 52.9). Il n'est donc pas étonnant que les changements climatiques aient obligé des centaines d'espèces à trouver de nouveaux habitats et entraîné des modifications radicales dans les communautés écologiques. Les changements climatiques ont également altéré la productivité primaire (voir la figure 28.30) de même que le recyclage des nutriments dans les écosystèmes.

Dans l'exemple montré ici, les températures plus chaudes ont permis à une espèce d'oursin de mer d'envahir des régions au sud des côtes australiennes, si bien que les communautés marines qui occupaient les lieux ont subi des changements catastrophiques.



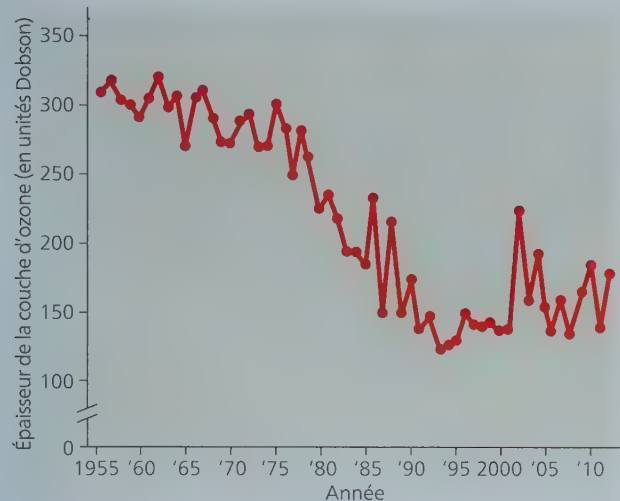
▲ Pour se reproduire avec succès, l'oursin de mer *Centrostephanus rodgersii* doit vivre dans une eau dont la température est supérieure à 12°C, comme le montre le diagramme. Depuis que la température des eaux océaniques s'est élevée au-dessus de cette température critique, l'aire de répartition géographique de l'oursin s'est étendue vers le sud, ravageant à mesure les peuplements d'algues brunes.



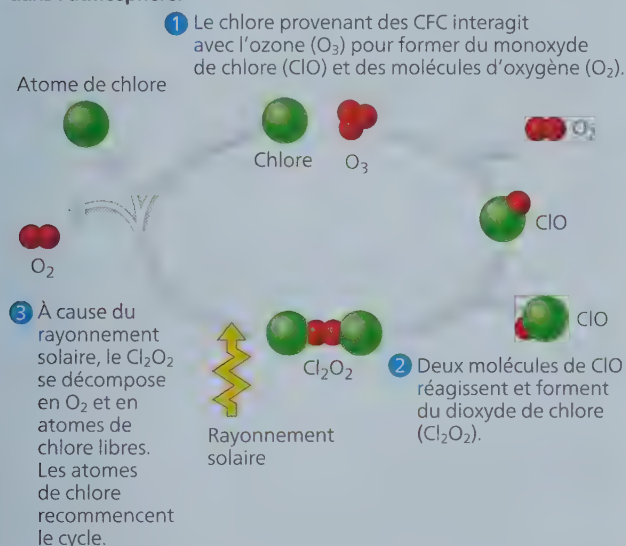
◀ Cette colonisation progressive des régions du sud a causé la destruction des communautés d'algues hautement diversifiées, laissant derrière elle des régions stériles.

**FAITES DES LIENS** ► En plus de causer des changements climatiques, l'augmentation des concentrations de CO<sub>2</sub> contribue à l'acidification des océans (voir la figure 3.12). Expliquez comment l'acidification des océans peut nuire aux organismes et comment cela peut, à son tour, provoquer des bouleversements catastrophiques dans les communautés écologiques.

▼ **Figure 56.31** L'épaisseur de la couche d'ozone, en octobre, au-dessus de l'Antarctique, en unités Dobson.



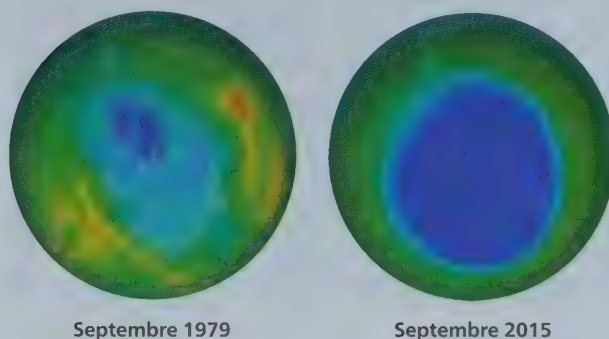
▼ **Figure 56.32** La destruction de l'ozone par le chlore libéré dans l'atmosphère.



Certains scientifiques prévoient une augmentation des cataractes et de certaines formes non létales de cancers de la peau chez les humains. Ils s'attendent aussi à ce que les cultures et les communautés naturelles, particulièrement le phytoplancton qui est à l'origine d'une forte proportion de la productivité primaire, subissent des dommages difficiles à prévoir.

Afin d'étudier les conséquences de l'appauvrissement de l'ozone, des écologistes ont mené des expériences sur le terrain dans lesquelles ils ont utilisé des filtres pour réduire ou bloquer les rayons UV du soleil. L'une de ces expériences a été réalisée dans un écosystème formé de broussailles situé près de la pointe de l'Amérique du Sud. Elle a permis de constater que la quantité de rayons UV atteignant la Terre augmentait brusquement lorsque le trou de la couche d'ozone se trouvait au-dessus de

▼ **Figure 56.33** L'amincissement de la couche protectrice d'ozone. La tache bleue qui apparaît dans ces images est le résultat d'analyses de l'atmosphère. Elle correspond à un trou dans la couche d'ozone au-dessus de l'Antarctique.



la région, entraînant une hausse des dommages à l'ADN chez les végétaux qui n'étaient pas protégés par un filtre. Des scientifiques ont rapporté des dommages à l'ADN semblables et une réduction de la croissance du phytoplancton au moment de l'année où le trou de la couche d'ozone se situe au-dessus de l'océan Antarctique.

Heureusement, de nombreux gouvernements ont réagi promptement à l'égard du trou de la couche d'ozone. Depuis 1987, au moins 197 pays, dont le Canada, la France et les États-Unis, ont ratifié le Protocole de Montréal, qui régit l'utilisation des substances chimiques responsables de l'appauvrissement de la couche d'ozone. La majorité des pays, y compris le Canada, ont cessé la production de CFC. Depuis l'application de ces mesures, les concentrations de chlore dans la stratosphère se sont stabilisées, et l'appauvrissement de l'ozone a ralenti. Cependant, même si les émissions de CFC sont maintenant quasi nulles, les molécules de chlore déjà présentes dans l'atmosphère continueront d'influer sur la concentration d'ozone stratosphérique pendant au moins 50 ans.

La destruction partielle de la couche d'ozone n'est qu'un autre exemple montrant à quel point les activités humaines peuvent perturber la dynamique des écosystèmes et la biosphère. Elle montre aussi notre capacité à résoudre des problèmes environnementaux lorsque nous nous y attaquons sérieusement.

## RETOUR SUR LE CONCEPT 56.4

1. Comment la présence d'un excès de nutriments minéraux dans un lac peut-elle menacer les populations de poissons qui y vivent ?
2. **FAITES DES LIENS** ► Les sols des forêts de conifères (taïgas) et de la toundra contiennent de vastes réserves de matière organique. Expliquez pourquoi les scientifiques qui étudient le réchauffement planétaire surveillent étroitement ces réserves (voir la figure 55.14).
3. **FAITES DES LIENS** ► Les mutagènes sont des agents chimiques ou physiques qui provoquent des mutations génétiques (voir le concept 17.5). Comment la réduction de la concentration d'ozone atmosphérique augmente-t-elle la probabilité de mutations chez divers organismes ?

Voir les réponses proposées à l'appendice A.

## Le développement durable permet à la fois d'améliorer la condition humaine et de conserver la biodiversité

Devant la disparition et la fragmentation croissantes des habitats, les changements que subit l'environnement physique de la planète, les changements climatiques et l'accroissement de la population humaine (voir le concept 53.6), nous n'avons d'autres choix que de faire de difficiles compromis en matière de gestion des ressources mondiales. Il est impossible de préserver toutes les parcelles d'habitat, si bien que les biologistes doivent aider les sociétés à établir des priorités en matière de conservation en déterminant les parcelles les plus cruciales. Idéalement, le respect de ces priorités devrait améliorer la qualité de vie des populations locales. Les écologistes utilisent le concept de *durabilité* pour définir des priorités de conservation à long terme.

### Le développement durable

Pour sauver des espèces de l'extinction et améliorer la qualité de la vie humaine, nous devons comprendre les relations d'interdépendance au sein de la biosphère. À cette fin, un grand nombre de pays, sociétés scientifiques et autres regroupements ont adopté le concept de **développement durable**, c'est-à-dire un développement économique qui répond aux besoins des sociétés humaines actuelles sans diminuer la capacité des générations futures de combler les leurs. Par exemple, l'Ecological Society of America, qui est la plus grande association d'écologistes professionnels au monde, a adopté un programme de recherche appelé Sustainable Biosphere Initiative (Initiative pour une biosphère durable). L'objectif est de définir et d'acquiescer les connaissances écologiques fondamentales nécessaires à la gestion, à la conservation et au développement des ressources de la Terre de manière aussi responsable que possible. Il est question d'effectuer des études sur les changements à l'échelle planétaire, notamment sur les rapports entre le climat et les processus écologiques, sur la biodiversité et sur son rôle dans le maintien des processus écologiques, ainsi que sur les moyens de maintenir la productivité des écosystèmes naturels et artificiels. Le programme exige un engagement ferme de ressources humaines et économiques.

Le développement durable est un ambitieux projet. Pour maintenir les processus des écosystèmes et freiner la perte de biodiversité, nous devons faire le lien entre les sciences de la vie et les sciences sociales, économiques et humaines. Nous devons également réévaluer nos valeurs personnelles. Les personnes qui vivent dans les pays les plus riches ont une empreinte écologique plus grande que les populations des pays en voie de développement (voir le concept 53.6). En tenant compte, dans nos décisions, de ce que coûte la consommation à long terme, nous pouvons redécouvrir la valeur des écosystèmes qui assurent notre survie. L'étude de cas qui suit illustre comment, en alliant les efforts scientifiques et les efforts personnels, on peut apporter les importants changements indispensables à la création d'un monde véritablement durable.

## Étude de cas : le développement durable au Costa Rica

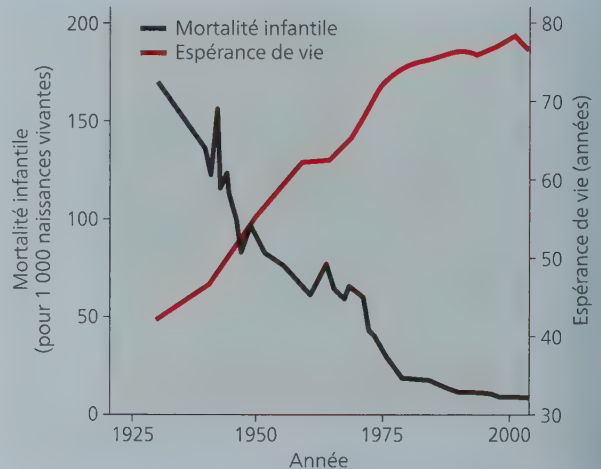
Le succès du projet de conservation réalisé au Costa Rica (voir le concept 56.3) a nécessité un partenariat entre le gouvernement du pays, des organismes non gouvernementaux (ONG) et de simples citoyens. De nombreuses réserves naturelles établies par des particuliers ont été officiellement reconnues par le gouvernement et bénéficient d'importants avantages fiscaux. Toutefois, la conservation et la restauration de la biodiversité ne représentent qu'une dimension du développement durable; l'autre facteur clé est l'amélioration de la condition humaine.

Comment les conditions de vie des habitants du Costa Rica ont-elles évolué alors que le pays poursuivait ses objectifs de conservation? Deux des plus importants indicateurs des conditions de vie sont la mortalité infantile et l'espérance de vie (voir le concept 53.6). Comme le montre la **figure 56.34**, de 1930 à 2009, la mortalité infantile du Costa Rica est passée de 170 à 9 décès pour 1 000 naissances vivantes; durant la même période, l'espérance de vie est passée de 43 à 79 ans. Le taux d'alphabétisme est un autre indicateur des conditions de vie. En 2011, ce taux était de 96 % au Costa Rica, comparativement à 82 % dans les six autres pays d'Amérique centrale. Ces statistiques montrent que les conditions de vie au Costa Rica se sont grandement améliorées pendant la période au cours de laquelle le pays s'est consacré à la conservation et à la restauration. Bien que ces résultats ne prouvent pas que la conservation entraîne l'amélioration du bien-être des humains, on peut affirmer que le développement de ce pays a été axé à la fois sur la nature et sur les personnes.

### L'avenir de la biosphère

La vie moderne est très différente de celle des humains primitifs, qui étaient chasseurs-cueilleurs. Les premières murales peintes sur les parois des cavernes (**figure 56.35a**) et les représentations stylisées de la vie qu'ils sculptaient dans les os ou l'ivoire (**figure 56.35b**) témoignent de leur lien étroit avec la nature.

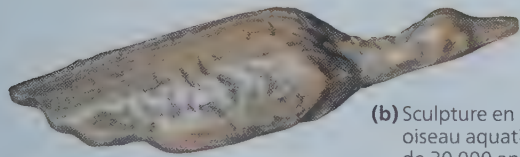
▼ **Figure 56.34** La mortalité infantile et l'espérance de vie à la naissance au Costa Rica.



▼ **Figure 56.35** La biophilie passée et présente.



(a) Détail des animaux d'une peinture rupestre réalisée il y a 17 000 ans, à Lascaux, en France

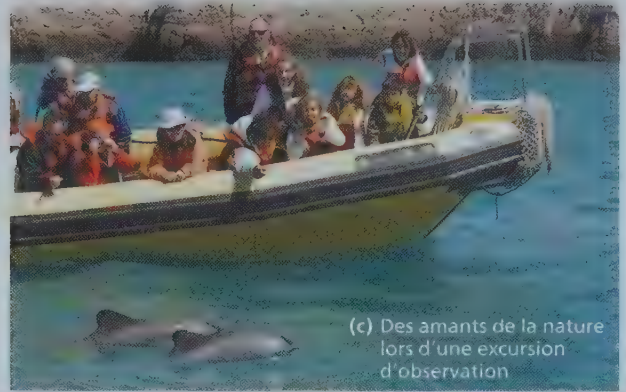


(b) Sculpture en ivoire d'un oiseau aquatique datant de 30 000 ans, trouvée en Allemagne

Nos habitudes de vie reflètent l'attachement ancestral que nous avons pour la nature et la biodiversité, attachement que décrit le concept de *biophilie* que nous avons abordé au début du chapitre. Notre évolution s'est faite dans des milieux naturels riches en biodiversité, auxquels nous sommes toujours attachés (**figure 56.35c et d**). En fait, notre biophilie pourrait bien être innée. Elle est un produit qui a évolué avec la sélection naturelle et qui a agi sur des espèces intelligentes dont la survie dépendait d'un lien étroit avec l'environnement et de la connaissance pratique des végétaux et des animaux.

Notre amour de la vie guide le domaine de la biologie d'aujourd'hui. Nous célébrons la vie lorsque nous déchiffrons le code génétique propre à chaque espèce. Nous embrassons la vie lorsque nous utilisons les fossiles et l'ADN pour documenter l'évolution dans le temps. Nous préservons la vie lorsque nous classifions et protégeons les millions d'espèces de la Terre. Nous respectons la vie lorsque nous faisons un usage responsable et respectueux de la nature pour améliorer notre mieux-être.

La biologie est l'expression scientifique de notre désir de connaître la nature. Nous préserverons très probablement ce que nous apprécions, et apprécierons très probablement ce que nous comprenons. En étudiant les processus et la diversité de



(c) Des amateurs de la nature lors d'une excursion d'observation



(d) Un jeune biologiste et un oiseau chanteur

la vie, nous ne pourrions faire autrement qu'approfondir notre connaissance de nous-mêmes et de notre place dans la biosphère. Nous espérons que ce manuel vous aidera dans cette aventure de toute une vie.

RETOUR SUR LE CONCEPT **56.5**

1. Qu'entend-on par *développement durable* ?
2. Comment la biophilie peut-elle nous pousser à conserver les espèces et à restaurer les écosystèmes ?
3. **ET SI ?** ► Imaginons qu'on découvre une nouvelle activité de pêche et qu'on vous désigne responsable de son développement durable. Quelles données écologiques relatives à la population de poissons concernée souhaitez-vous connaître ? Selon quels critères définirez-vous le développement de cette pêche ?

Voir les réponses proposées à l'appendice A.

