

La structure et la fonction chez les animaux: principes fondamentaux

40



VOS OUTILS INTERACTIFS



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

▲ **Figure 40.1** En quoi ses longues pattes aident-elles ce minuscule charognard à survivre dans la chaleur infernale du désert ?

CONCEPTS CLÉS

- 40.1** Il y a une corrélation entre les structures et les fonctions animales à tous les niveaux d'organisation
- 40.2** De nombreux animaux maintiennent leur milieu interne à l'aide de mécanismes de rétroaction
- 40.3** Les processus homéostatiques qui président à la thermorégulation font intervenir la forme, la fonction et le comportement
- 40.4** Les besoins énergétiques sont fonction de la taille, de l'activité et de l'environnement

Formes diverses, défis communs

La fourmi du désert (du genre *Cataglyphis*) que l'on voit à la **figure 40.1** se nourrit d'insectes qui ont succombé à la chaleur diurne du désert du Sahara. Elle doit sortir de son nid et chercher leurs cadavres durant les heures torrides de la journée, alors que la température du sable dépasse les 60 °C, une chaleur mortelle pour presque tous les animaux. Comment expliquer que la fourmi du désert arrive à survivre dans la fournaise du Sahara ? Pour répondre à cette question, il faut examiner son **anatomie**, ou structure biologique, au regard de la survie de l'espèce.

En étudiant la fourmi du désert, les chercheurs ont constaté qu'elle a des pattes démesurément longues. Ainsi juché sur des échasses de 4 mm, le corps de la fourmi est exposé à une température de 6 °C inférieure à celle du sable. Les chercheurs ont également noté que la fourmi du désert peut utiliser ses hautes pattes pour courir très vite, jusqu'à 1 m/s, soit une vitesse presque aussi grande que la vitesse maximale jamais enregistrée pour des arthropodes capables de courir. (Le record de vitesse est détenu par la cicindèle, *Cicindela hudsoni*, qui peut parcourir 2,49 m en 1 s.) La capacité de sprinter abrège les sorties de la fourmi hors de son nid et réduit son exposition au soleil et à la chaleur du sable. Les longues pattes de la fourmi du désert sont donc une adaptation qui lui permet d'être active durant les heures brûlantes de la journée, quand la concurrence pour la nourriture et le risque de rencontrer un prédateur sont à leur minimum.

Au cours de sa vie, la fourmi du désert doit relever des défis identiques à ceux des autres animaux, qu'il s'agisse d'une hydre, d'un faucon ou d'un humain. Tous les animaux doivent se procurer des molécules d'oxygène (O₂) et des nutriments, lutter contre les infections et tenter de se reproduire. Comme ces besoins sont



communs à tous les animaux, pourquoi les espèces varient-elles autant du point de vue de l'organisation et de la morphologie ? La réponse réside dans l'adaptation : la sélection naturelle favorise les variations qui, au sein d'une population, améliorent la valeur d'adaptation d'un individu (voir le concept 23.4). Les adaptations évolutives qui permettent la survie varient d'un environnement à l'autre et d'une espèce à l'autre, mais elles relèvent souvent de l'adéquation entre la structure et la fonction, comme c'est le cas pour les pattes de la fourmi du désert.

Il existe une corrélation entre la structure et la fonction. Aussi l'anatomie renseigne-t-elle sur la **physiologie**, c'est-à-dire sur la fonction biologique. Dans le présent chapitre, nous étudierons la structure et la fonction chez les animaux. Pour commencer, nous traiterons des niveaux d'organisation corporelle des animaux ainsi que des systèmes qui coordonnent les activités des diverses parties du corps. Ensuite, nous examinerons la thermorégulation pour comprendre comment s'effectue la régulation du milieu interne. Enfin, nous verrons comment l'anatomie et la physiologie interviennent dans le rapport de l'animal à son milieu et dans la façon dont il utilise son énergie.

CONCEPT 40.1

Il y a une corrélation entre les structures et les fonctions animales à tous les niveaux d'organisation

La taille, la morphologie et la symétrie d'un animal sont des caractéristiques fondamentales de la structure et des fonctions qui détermineront le mode d'interaction de cet animal avec son milieu. Pour les biologistes, il y a lieu de parler de *plan d'organisation corporelle*. L'emploi de ce terme ne suppose pas que les formes corporelles d'un animal sont le produit d'une invention consciente. Ce plan résulte des modalités de développement programmées par le génome, qui est lui-même le produit de millions d'années d'évolution.

L'évolution de la taille et de la forme des animaux

ÉVOLUTION De nombreux plans d'organisation corporelle ont vu le jour au cours de l'évolution, mais les variations possibles ne sont pas infinies. En effet, les lois de la physique, qui régissent la puissance, la diffusion, le mouvement et l'échange d'énergie, limitent la diversité des formes animales.

Pour illustrer comment les lois de la physique limitent l'évolution, voyons de quelle manière les lois de l'hydrodynamique restreignent les formes possibles des animaux capables de nager très vite. Il faut savoir que la masse volumique de l'eau est environ 1 000 fois plus grande que celle de l'air ; c'est pourquoi toute irrégularité à la surface du corps qui accentue la friction nuit beaucoup plus à un animal nageur qu'à un animal qui court ou qui vole. La vitesse maximale des thons et des autres poissons rapides à nageoires rayonnées (actinoptérygiens) peut atteindre 80 km/h. Les requins, les pingouins (des oiseaux), les dauphins et les phoques sont aussi des nageurs rapides. Comme on peut le remarquer dans la **figure 40.2**, ces animaux sont fusiformes, c'est-à-dire effilés à leurs deux extrémités. Le fait que ces nageurs

▼ **Figure 40.2** L'évolution convergente des organismes se déplaçant rapidement dans l'eau.



rapides possèdent une telle morphologie est un exemple d'évolution convergente (voir le concept 22.3). La sélection naturelle produit des adaptations semblables quand divers organismes doivent faire face aux mêmes contraintes environnementales, par exemple s'opposer à la résistance de l'eau lorsqu'ils nagent.

Les lois de la physique influent aussi sur la taille maximale de l'animal. Plus la taille d'un animal est grande, plus son squelette doit être robuste afin de lui fournir un soutien adéquat. Cette solidité a cependant des limites, ce qui vaut autant pour le squelette interne, comme celui des vertébrés, que pour le squelette externe, comme celui des insectes et des autres arthropodes. Par ailleurs, à mesure que la taille du corps augmente, les muscles nécessaires à la locomotion doivent représenter une fraction toujours plus élevée de la masse corporelle totale. Or, cette augmentation de la masse musculaire ne peut pas se poursuivre indéfiniment, puisqu'elle finirait par réduire la mobilité de l'animal. En examinant la fraction de la masse corporelle représentée par les muscles des jambes et l'efficacité du travail produit par ces muscles, les scientifiques arrivent à estimer la vitesse maximale à la course associée à une grande diversité de plans d'organisation corporelle. Ainsi, le dinosaure *Tyrannosaurus rex*, qui mesurait 6 m de haut, pouvait probablement courir à une vitesse de 30 km/h, soit à peu près celle du plus rapide des humains.

Les échanges avec l'environnement

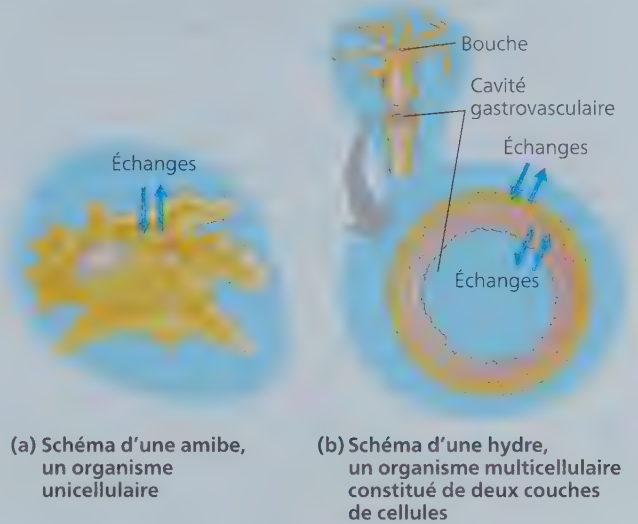
Les animaux doivent échanger des nutriments, des déchets et des gaz avec leur environnement, et ces échanges imposent des limites à leur plan d'organisation corporelle. Les échanges avec l'environnement se déroulent à travers la membrane plasmique de chaque cellule par le transport actif ou passif de substances. Les organismes unicellulaires, comme l'amibe de la **figure 40.3a**, possèdent une membrane dont la surface de contact avec le milieu environnant est suffisamment grande pour permettre tous les échanges nécessaires. Par comparaison, les organismes multicellulaires sont composés de nombreuses cellules, et chacune est dotée de sa propre membrane plasmique à travers laquelle les échanges doivent survenir. La vitesse des échanges est proportionnelle à la surface membranaire, tandis que la quantité de substances qu'un animal doit échanger pour vivre est proportionnelle au volume de la cellule. Chez un organisme multicellulaire, les échanges ne sont possibles que si chaque cellule de l'animal peut accéder à un milieu aqueux approprié, à l'intérieur ou à l'extérieur de son corps.

Beaucoup d'animaux dotés d'une organisation interne simple ont un plan d'organisation corporelle qui permet des échanges directs entre presque toutes leurs cellules et le milieu externe. Ainsi, l'hydre, un invertébré sacciforme (en forme de sac), possède une mince enveloppe corporelle formée de deux couches cellulaires (figure 40.3b). Comme sa cavité gastrovasculaire s'ouvre sur l'extérieur, les couches cellulaires externe et interne sont en contact direct avec l'eau de l'étang. La forme corporelle plane de certains organismes constitue une autre façon d'optimiser le contact avec le milieu externe. Par exemple, le ténia, un ver parasite, peut mesurer plusieurs mètres de longueur (voir la figure 33.12), mais il est très mince, de sorte que la majorité de ses cellules baignent dans le liquide intestinal de son hôte vertébré (qui lui procure des nutriments).

Le corps des humains et celui de la plupart des animaux sont formés de masses compactes de cellules, et leur organisation interne est beaucoup plus complexe que celle d'une hydre ou d'un ténia. Le fait d'être formés d'une masse compacte de cellules diminue leur surface externe, laquelle est relativement petite comparativement à leur volume total. Par exemple, le rapport entre la surface et le volume d'une baleine (ou rorqual) est des centaines de milliers de fois plus faible que celui d'une puce d'eau (*Daphnia*). Pourtant, chaque cellule de la baleine doit être entourée de liquide et recevoir de l'O₂, des nutriments et d'autres ressources. Comment cela se passe-t-il ?

Les baleines et la plupart des autres animaux possèdent des surfaces internes comportant de nombreux replis ou des ramifications étendues (figure 40.4). Il s'agit d'adaptations évolutives qui leur permettent d'entretenir des échanges suffisants

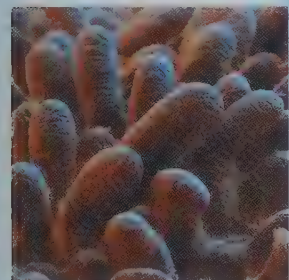
▼ **Figure 40.3** Les échanges directs avec le milieu.



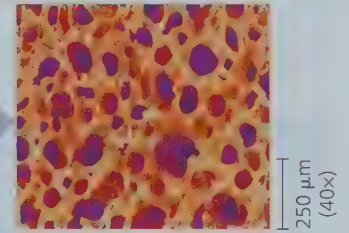
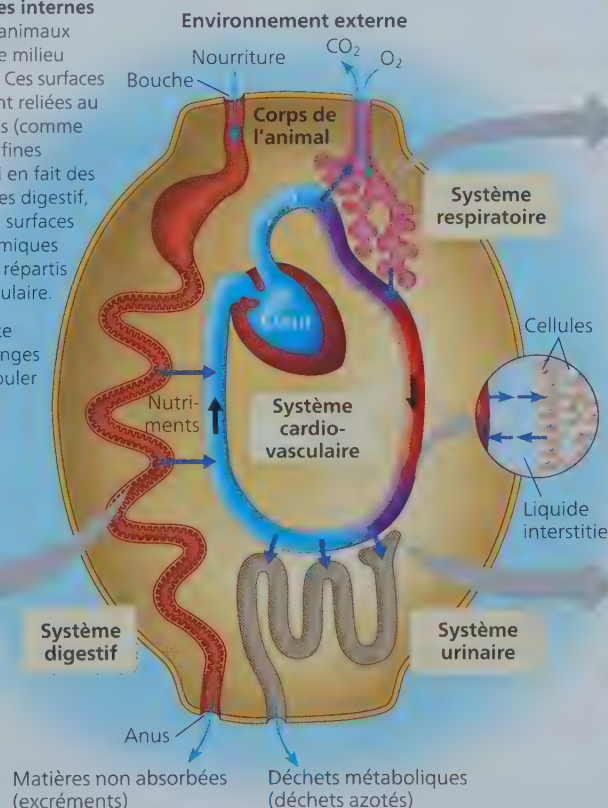
▼ **Figure 40.4** Les surfaces d'échanges internes des animaux complexes.

La plupart des animaux échangent des éléments chimiques avec le milieu par l'intermédiaire de surfaces spécialisées. Ces surfaces sont généralement internes, mais elles sont reliées au milieu externe par des ouvertures du corps (comme la bouche). Elles sont caractérisées par de fines ramifications ou de multiples replis, ce qui en fait des zones extrêmement étendues. Les systèmes digestif, respiratoire et urinaire sont tous munis de surfaces spécialisées de ce genre. Les éléments chimiques transportés à travers celles-ci sont ensuite répartis dans le corps grâce au système cardiovasculaire.

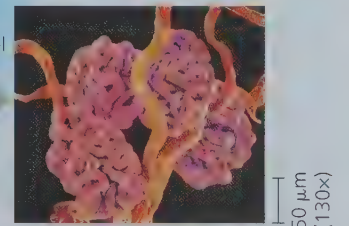
HABILITÉS VISUELLES ► Servez-vous de ce schéma pour expliquer comment les échanges effectués par les animaux peuvent se dérouler tant à l'intérieur qu'à l'extérieur du corps.



La paroi de l'intestin grêle comporte de nombreuses saillies (les villosités), qui augmentent considérablement la surface d'absorption des nutriments (MEB).



Cette micrographie permet de constater que la structure d'un poumon ressemble plus à une éponge qu'à celle d'un ballon. Cette organisation permet d'exposer une importante surface humidifiée servant notamment aux échanges gazeux avec le milieu (MEB).



Dans le rein, le sang est filtré par la surface des vaisseaux sanguins longs et étroits qui sont entassés dans des structures globulaires (MEB).

entre leurs cellules et le milieu. En règle générale, ces surfaces d'échange se trouvent à l'intérieur du corps. Ainsi, les tissus délicats se trouvent protégés de l'abrasion ou de la déshydratation et le corps peut prendre une forme profilée propice à la nage. Grâce aux replis et aux ramifications, la surface d'échange totale est considérablement plus grande (voir la figure 33.9). Chez les humains, par exemple, les surfaces d'échange internes des systèmes digestif, respiratoire et circulatoire sont chacune 25 fois plus grandes que celles de la peau.

Le milieu interne renferme des liquides qui mettent indirectement en communication les surfaces d'échange et chacune des cellules. Chez de nombreux animaux, les espaces entre les cellules sont remplis d'un liquide appelé **liquide interstitiel** (d'un mot latin qui signifie « espace »). En outre, les animaux dotés d'un plan d'organisation corporelle complexe possèdent aussi un liquide circulatoire tel que le sang. Les échanges entre les liquides interstitiel et circulatoire permettent aux cellules de tout le corps d'obtenir des nutriments et de se débarrasser des déchets (voir la figure 40.4).

Bien que les échanges avec le milieu extérieur soient plus laborieux, les plans d'organisation corporelle complexes présentent des avantages dont les plans plus simples sont dépourvus. Par exemple, un squelette externe peut protéger un animal contre les prédateurs, tandis que ses organes sensoriels peuvent le renseigner de façon détaillée sur son environnement. De leur côté, les organes de digestion interne permettent de décomposer graduellement les aliments et de libérer progressivement l'énergie emmagasinée. Quant aux systèmes de filtration spécialisés, ils règlent constamment la composition de la solution dans laquelle baignent les cellules. Ce faisant, les animaux sont en mesure de maintenir un milieu interne relativement stable,

indépendamment des variations que subit le milieu externe dans lequel ils se trouvent. En somme, un plan d'organisation corporelle complexe s'avère particulièrement avantageux pour les animaux vivant sur la terre ferme où le milieu externe peut fluctuer énormément.

La hiérarchie des niveaux d'organisation

C'est grâce à leurs propriétés émergentes que les cellules forment un animal fonctionnel. Les propriétés émergentes résultent de niveaux d'organisation structurale et fonctionnelle de complexité croissante (voir le concept 1.1). Les cellules sont groupées en **tissus**, qui sont des ensembles de cellules dotées d'une structure et d'une fonction communes. Les différents types de tissus se combinent à leur tour pour former des unités fonctionnelles appelées **organes**. (Les animaux les plus simples, telles les éponges, n'ont pas d'organes ou même de tissus véritables.) Les groupes d'organes qui travaillent en synergie constituent des **systèmes** (**tableau 40.1**). Ainsi, la peau est un organe du système tégumentaire qui protège contre les infections et aide à la régulation de la température corporelle.

Plusieurs organes remplissent plus d'une fonction physiologique. Lorsque les fonctions d'un organe sont suffisamment distinctes, on considère qu'il appartient à plus d'un système. Par exemple, le pancréas produit des enzymes essentielles au fonctionnement du système digestif, mais il participe également à la régulation du taux de sucre dans le sang, ce qui fait aussi de cet organe un élément vital du système endocrinien.

De la même façon que l'étude de l'organisation corporelle « de bas en haut » (des cellules aux systèmes) révèle les propriétés émergentes, une étude « de haut en bas » de la hiérarchie révèle

Tableau 40.1 Les principales composantes et les principales fonctions des systèmes chez les mammifères

Systèmes	Principales composantes	Principales fonctions
Digestif	Bouche, pharynx, œsophage, estomac, intestins, foie, pancréas et anus (voir la figure 41.8)	Transformation des aliments (ingestion, digestion, absorption et élimination)
Cardiovasculaire	Cœur, vaisseaux sanguins et sang (voir la figure 42.5)	Collecte, transport et distribution interne de substances
Respiratoire	Poumons, trachée et autres conduits respiratoires (voir la figure 42.24)	Échanges gazeux (absorption d'O ₂ et rejet de CO ₂)
Immunitaire et lymphatique	Moelle osseuse, nœuds lymphatiques, thymus, rate, vaisseaux lymphatiques (voir la figure 43.6)	Défense de l'organisme (lutte contre les infections et les cancers)
Urinaire	Reins, uretères, vessie et urètre (voir la figure 44.12)	Excrétion de déchets métaboliques; régulation de l'équilibre osmotique du sang
Endocrinien	Hypothalamus, hypophyse, thyroïde, pancréas et autres glandes productrices d'hormones (voir la figure 45.8)	Régulation des activités corporelles (par exemple digestion et métabolisme)
Reproducteur	Ovaires, testicules et autres organes connexes (voir les figures 46.9 et 46.10)	Production de gamètes; stimulation de la fécondation; implantation de l'embryon et soutien à son développement
Nerveux	Encéphale, moelle épinière, nerfs et organes sensoriels (voir la figure 49.6)	Régulation des activités corporelles; perception et intégration des stimulus, et production des réponses à ceux-ci
Tégumentaire	Peau et annexes cutanées (notamment poils, ongles, griffes et glandes) (voir la figure 50.5)	Protection contre les blessures, les infections et la déshydratation; thermorégulation
Squelettique	Squelette (os, tendons, ligaments et cartilages) (voir la figure 50.37)	Soutien corporel, protection des organes internes, mouvement
Musculaire	Muscles squelettiques (voir la figure 50.26)	Mouvement, déplacement et posture

la nature multicouches de la spécialisation. Les systèmes comprennent des organes spécialisés qui sont eux-mêmes composés de tissus et de cellules spécialisés. Par exemple, pensons au système digestif humain : la bouche, le pharynx, l'œsophage, l'estomac, l'intestin grêle et le gros intestin, les organes annexes et l'anus. Chaque organe accomplit des fonctions distinctes dans la digestion. Une des fonctions de l'estomac, par exemple, est d'amorcer la dégradation des protéines. Ce processus requiert une phase de malaxage par les muscles de l'estomac, de même que la sécrétion des sucs digestifs par la muqueuse de l'estomac. La production de ces sucs exige l'intervention de trois types de cellules hautement spécialisées : certaines fabriquent une enzyme qui digère les protéines, d'autres produisent de l'acide chlorhydrique concentré et d'autres encore sécrètent un mucus qui protège la muqueuse de l'estomac.

Les systèmes spécialisés et complexes observés chez les animaux sont issus d'un ensemble limité de types de cellules et de tissus. Par exemple, les poumons et les vaisseaux sanguins remplissent des fonctions distinctes, mais ils sont recouverts de tissus du même type et aux propriétés semblables.

Les tissus sont classés en quatre grandes catégories : le tissu épithélial, le tissu conjonctif, le tissu musculaire et le tissu nerveux. Ils sont présentés à la **figure 40.5**, de même que leurs structures et leurs fonctions. Dans les chapitres ultérieurs, nous verrons comment ces différents types de tissus contribuent au fonctionnement des différents systèmes.

La coordination et la régulation

Pour que les tissus, les organes et les systèmes des animaux accomplissent efficacement leurs fonctions spécialisées, ils doivent agir de concert. Par exemple, quand le loup de la figure 40.5 chasse, sa circulation sanguine est régulée de façon à acheminer suffisamment de nutriments et d'O₂ aux muscles de ses pattes. Ces muscles sont à leur tour activés par le cerveau qui reçoit des signaux détectés par le museau. Mais quels signaux sont émis pour assurer la coordination de ces activités ? Et comment se transmettent-ils à l'intérieur du corps ?

Les animaux possèdent deux grands systèmes de régulation et de coordination des réactions aux stimulus : le système endocrinien et le système nerveux (**figure 40.6**). Dans le **système endocrinien**, les signaux sont des molécules que les cellules endocrines libèrent dans la circulation sanguine qui les emporte partout dans le corps. Dans le **système nerveux**, ce sont les neurones qui transmettent des signaux le long de voies qui relient des régions spécifiques du corps. Dans chacun de ces deux systèmes, le type de voie utilisé est le même, peu importe que le signal parcourt toute la longueur du corps ou seulement une distance de quelques cellules.

On donne le nom d'**hormones** aux molécules servant de signaux qui sont produites par le système endocrinien. Chaque hormone déclenche des effets particuliers et seules les cellules pourvues des récepteurs compatibles avec cette hormone réagissent (**figure 40.6a**). Une hormone peut exercer des effets sur une seule partie du corps ou sur son ensemble, tout dépend des récepteurs concernés. Par exemple, la thyroïdostimuline (TSH), qui agit uniquement sur les cellules de la glande thyroïde, stimule la libération des hormones thyroïdiennes, qui, elles, agissent directement sur les cellules de presque tous les tissus afin d'accroître la consommation d'O₂ et la production de chaleur.

Il faut plusieurs secondes aux hormones pour être libérées dans la circulation sanguine et acheminées dans le corps. Toutefois, les hormones exercent souvent des effets à long terme, car elles demeurent dans le sang pendant plusieurs secondes, plusieurs minutes, voire plusieurs heures.

Dans le système nerveux, les signaux, appelés potentiels d'action, se rendent aux cellules cibles en empruntant des voies de communication qui sont surtout des axones (**figure 40.6b**). Les potentiels d'action peuvent agir sur d'autres neurones, sur les cellules musculaires ainsi que sur les cellules et les glandes qui produisent des sécrétions. Contrairement au système endocrinien, le système nerveux achemine l'information selon la *voie* particulière empruntée par le signal. Par exemple, une personne distingue différentes notes de musique parce que dans l'oreille, la fréquence de chaque note active des neurones qui relient des régions légèrement différentes du cerveau.

La communication au sein du système nerveux fait intervenir habituellement plus d'un type de signal. Les potentiels d'action parcourent les axones, parfois sur de longues distances, sous la forme d'une variation de voltage. Dans bien des cas, toutefois, la transmission d'informations d'un neurone à un autre fait intervenir des signaux chimiques de très courte portée. Dans l'ensemble, la transmission est extrêmement rapide ; les potentiels d'action atteignent instantanément leur cible et leur durée est de l'ordre de la fraction de seconde.

Comme les types de signaux, de même que leur transmission, leur vitesse et leur durée, diffèrent selon qu'ils appartiennent au système endocrinien ou au système nerveux, il n'est pas étonnant que ces deux systèmes accomplissent des fonctions distinctes. Le système endocrinien est particulièrement bien adapté pour intervenir dans la coordination des changements graduels qui touchent le corps entier, par exemple la croissance et le développement, la reproduction, les réactions métaboliques et la digestion. De son côté, le système nerveux est adapté à ses fonctions de régulation des réactions rapides et immédiates à l'environnement, par exemple les réflexes et autres mouvements rapides.

Même si les fonctions du système endocrinien et du système nerveux sont différentes, les deux systèmes collaborent étroitement et contribuent ainsi au maintien d'un milieu interne stable, thème auquel nous allons à présent nous consacrer.

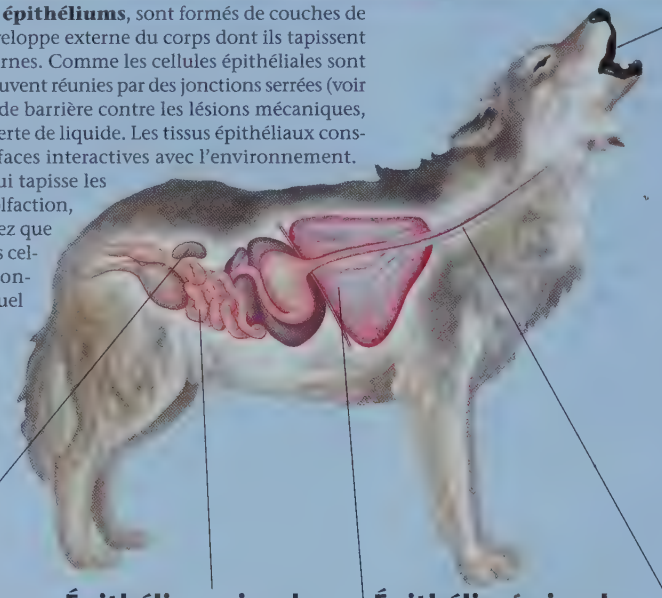
RETOUR SUR LE CONCEPT 40.1

1. Quelles propriétés tous les types d'épithéliums ont-ils en commun ?
2. **HABILITÉS VISUELLES** ► Examinez l'animal schématisé à la figure 40.4. À quels endroits l'O₂ de l'environnement externe doit-il traverser une membrane plasmique pour se rendre au cytoplasme d'une cellule du corps ?
3. **ET SI ?** ► Imaginez que vous vous tenez sur le bord d'une falaise et que vous trébuchez subitement : vous parvenez tout juste à garder l'équilibre et à éviter de plonger dans le vide... Votre cœur bat la chamade, vous sentez en vous une explosion d'énergie, causée par un afflux de sang dans les vaisseaux dilatés de vos muscles et par une hausse soudaine de votre taux de glucose sanguin. À votre avis, qu'est-ce que cette réaction « de fuite ou de lutte » a exigé de votre système nerveux et de votre système endocrinien ?

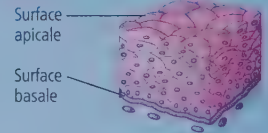
Voir les réponses proposées à l'appendice A.

Tissu épithélial

Les **tissus épithéliaux**, ou **épithéliums**, sont formés de couches de cellules. Ils constituent l'enveloppe externe du corps dont ils tapissent les organes et les cavités internes. Comme les cellules épithéliales sont étroitement juxtaposées et souvent réunies par des jonctions serrées (voir la figure 6.30), elles servent de barrière contre les lésions mécaniques, les agents pathogènes et la perte de liquide. Les tissus épithéliaux constituent également des interfaces interactives avec l'environnement. Par exemple, l'épithélium qui tapisse les voies nasales est vital pour l'olfaction, le sens de l'odorat. Remarquez que la forme et l'arrangement des cellules servent bien le fonctionnement du type de tissu auquel elles appartiennent.

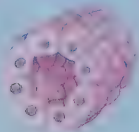


Épithélium stratifié squameux



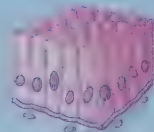
L'épithélium stratifié squameux est multicouche et se régénère rapidement. Les nouvelles cellules qui naissent par division près de la surface basale (voir la micrographie ci-dessous) sont poussées vers la surface apicale de façon à remplacer celles qui desquament continuellement. Ce type d'épithélium se situe généralement sur les surfaces soumises à l'abrasion, comme la partie externe de la peau, ou encore sur les muqueuses de l'œsophage, de l'anus et du vagin.

Épithélium cubique



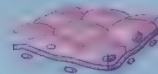
L'épithélium cubique, composé de cellules en forme de dés et spécialisé dans la sécrétion, constitue l'épithélium des tubules rénaux (représenté ici) et de nombreuses glandes, dont la thyroïde et les glandes salivaires.

Épithélium simple prismatique



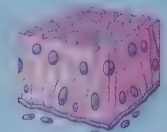
L'épithélium simple prismatique se compose de grosses cellules en forme de briques. Il recouvre souvent les régions dans lesquelles la sécrétion ou l'absorption active de substances représentent des fonctions importantes. Par exemple, il tapisse les intestins, y sécrète des sucs digestifs et absorbe des nutriments.

Épithélium simple squameux



La couche unique de cellules plates qui forme l'épithélium simple squameux se spécialise dans le transport des substances par diffusion. Plutôt mince et perméable, ce type d'épithélium tapisse la face interne des vaisseaux sanguins et des alvéoles pulmonaires où la diffusion des nutriments et des gaz est vitale.

Épithélium pseudostratifié prismatique et cilié



L'épithélium pseudostratifié prismatique et cilié se compose d'une couche unique de cellules de hauteur inégale dans lesquelles le noyau occupe une position variable. Chez beaucoup de vertébrés, cet épithélium forme une muqueuse ciliée qui tapisse une partie des voies respiratoires. Les cils vibratiles font glisser la pellicule de mucus le long de la surface.



Polarité de l'épithélium

Tous les épithéliums sont polarisés, c'est-à-dire que leurs deux faces sont différentes. La surface *apicale* est orientée vers la lumière (cavité), ou l'extérieur, de l'organe; elle est exposée à des liquides ou à l'air. Des prolongements spécialisés recouvrent souvent cette face. Par exemple, la face apicale de l'épithélium qui tapisse l'intestin grêle est recouverte de microvillosités, des prolongements de la membrane plasmique qui accroissent la surface d'absorption des nutriments. La face opposée de chaque épithélium est la surface *basale*. Celle-ci est attachée à la *lame basale*, une couche compacte de la matrice extracellulaire. La lame basale, composée principalement de glycoprotéines sécrétées par les cellules épithéliales, repose sur la lame réticulaire, constituée de fibres de collagène produites par le tissu conjonctif sous-jacent. Ensemble, ces deux lames forment la *membrane basale*.

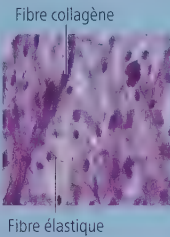
Tissu conjonctif

Le **tissu conjonctif** a surtout pour fonction de fixer et de soutenir les autres tissus. Les tissus conjonctifs contiennent peu de cellules. Celles-ci sont dispersées dans une matrice extracellulaire, généralement composée d'un réseau de fibres enchâssées dans une substance fondamentale homogène, qui est liquide, gélatineuse ou solide. Dans la matrice se trouvent de nombreuses cellules, appelées **fibroblastes**, qui sécrètent les substances protéiques des fibres extracellulaires, et les **macrophagocytes**, qui détruisent par phagocytose les particules étrangères et les débris de cellules mortes (voir la figure 7.19).

Les fibres des tissus conjonctifs sont classées en trois catégories : les **fibres collagènes**, résistantes et souples ; les **fibres réticulaires**, qui joignent le tissu conjonctif aux tissus voisins ; et les **fibres élastiques**, qui rendent les tissus extensibles. Si vous pincez la peau qui recouvre le dos de votre main, les fibres collagènes et réticulaires empêchent que la peau qui adhère aux muscles sous-jacents soit arrachée, tandis que les fibres élastiques redonnent rapidement à votre peau sa forme originale. Divers mélanges de fibres et de matrices forment les principaux types de tissus conjonctifs présentés ci-dessous.

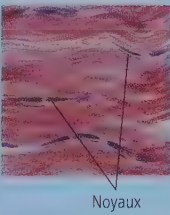
Tissu conjonctif lâche

Le tissu conjonctif le plus répandu chez les vertébrés est le **tissu conjonctif aréolaire**. Il fait partie du **tissu conjonctif lâche** et sert à fixer l'épithélium aux tissus sous-jacents ; il a aussi pour rôle d'envelopper les organes afin de les maintenir en place et de les protéger. On qualifie ce tissu de **lâche** parce que ses fibres, peu nombreuses et disséminées dans la substance fondamentale, s'entrecroisent de manière espacée. Il renferme les trois sortes de fibres. On le trouve dans la peau et un peu partout dans le corps.



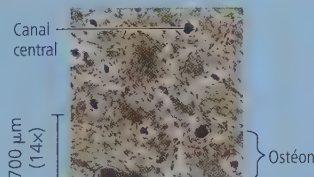
Tissu conjonctif dense

Le **tissu conjonctif dense** est compact, car il contient beaucoup de fibres collagènes. On trouve le tissu conjonctif dense régulier principalement dans les **tendons**, qui relient les muscles aux os, et dans les **ligaments**, qui unissent les os à l'endroit des articulations.



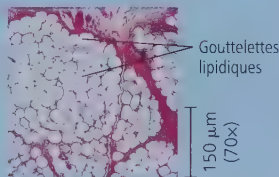
Tissu osseux

Chez la plupart des vertébrés, le squelette se compose de **tissu osseux**, c'est-à-dire d'un tissu conjonctif minéralisé. Des cellules appelées **ostéoblastes** sécrètent une matrice de collagène. Puis, en s'imprégnant de calcium, de magnésium et de phosphate, la matrice du tissu conjonctif durcit et se transforme en substance rigide. Chez les mammifères, la structure microscopique du tissu osseux compact présente une succession d'unités appelées **ostéons** (ou ostéones, ou encore systèmes de Havers). Chaque ostéon possède des couches concentriques (**lamelles**) de matrice minéralisée, déposées autour d'un canal central contenant des vaisseaux sanguins nourriciers et des nerfs.



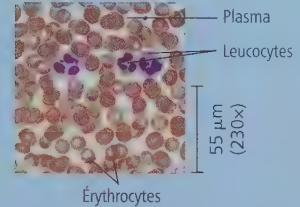
Tissu adipeux

Le **tissu adipeux** est une forme spécialisée de tissu conjonctif lâche, qui emmagasine les graisses dans les cellules adipeuses (ou adipocytes) disséminées dans sa matrice. Il contribue à réduire les pertes de chaleur du corps (isolation), à amortir les chocs et à emmagasiner de l'énergie sous forme de molécules de gras. Une cellule adipeuse renferme une gouttelette lipidique dont le volume s'accroît lorsque l'organisme emmagasine des lipides et diminue lorsqu'il en utilise comme source d'énergie.



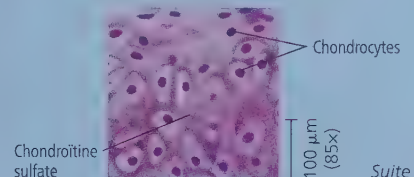
Tissu sanguin

Le **tissu sanguin** possède une matrice liquide appelée plasma et composée d'eau, de sels et de diverses protéines solubles. Trois éléments baignent dans le plasma : les érythrocytes (globules rouges), les leucocytes (globules blancs) et des fragments de cellules appelés thrombocytes (plaquettes). Les érythrocytes transportent l'O₂, les leucocytes assurent la défense immunitaire et les thrombocytes interviennent dans la coagulation du sang.



Tissu cartilagineux

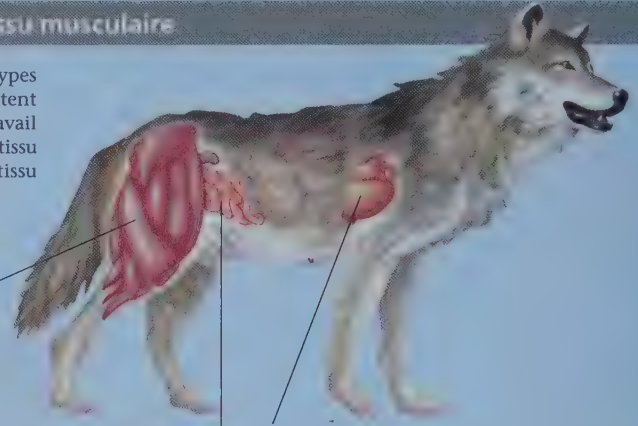
Le **tissu cartilagineux** comporte des fibres collagènes, enchâssées dans une substance fondamentale caoutchouteuse (ou matrice) appelée chondroïtine sulfate (polysaccharides de la catégorie glycosaminoglycane). La chondroïtine sulfate et le collagène sont sécrétés par des cellules appelées **chondroblastes** ; lorsque ceux-ci sont matures, ils portent le nom de **chondrocytes**. L'association des fibres collagènes et de la chondroïtine sulfate fait du cartilage un matériau de soutien à la fois résistant et flexible. De nombreux vertébrés possèdent un squelette cartilagineux au cours de leur stade embryonnaire, mais cette structure est remplacée par du tissu osseux à mesure que l'embryon se développe. Néanmoins, du cartilage subsiste à certains endroits ; pensons notamment aux disques intervertébraux (cartilage fibreux), qui jouent le rôle d'amortisseurs entre les vertèbres.



Suite ▶

Tissu musculaire

Le **tissu musculaire** est un tissu sollicité dans presque tous les types de mouvements du corps. Toutes les cellules musculaires comportent des filaments de protéines appelées actine et myosine, dont le travail conjoint permet aux muscles de se contracter. Il existe trois types de tissu musculaire chez les vertébrés : le tissu musculaire squelettique, le tissu musculaire lisse et le tissu musculaire cardiaque.



Tissu musculaire squelettique

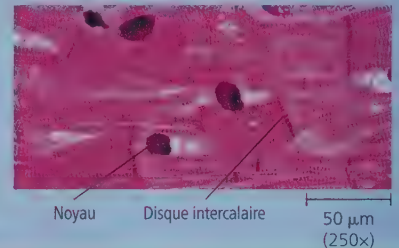
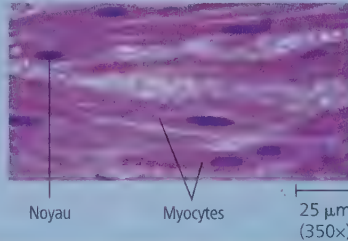
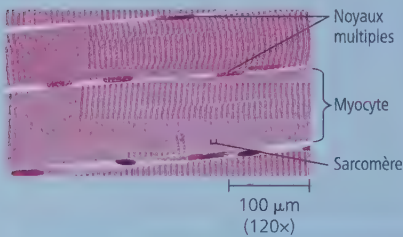
Le **tissu musculaire squelettique**, ou *muscle strié*, est fixé aux os par des tendons. Il intervient dans les mouvements volontaires. Le muscle squelettique se compose de faisceaux de longues cellules appelées *myocytes* (fibres musculaires). Au cours du développement, les myocytes naissent de la fusion de plusieurs cellules, de sorte que chaque fibre contient plusieurs noyaux. La disposition des unités contractiles, ou sarcomères, donne aux cellules leur apparence rayée (striée). Chez les mammifères adultes, l'augmentation de la masse musculaire n'accroît pas le nombre de cellules musculaires, seulement leur volume.

Tissu musculaire lisse

Le **tissu musculaire lisse**, dépourvu de stries, se trouve dans la paroi du tube digestif, de la vessie, des artères et d'autres organes internes. Les myocytes de ce tissu sont fusiformes. Les muscles lisses sont associés aux activités corporelles involontaires, notamment au péristaltisme du tube digestif ou à la constriction des artères.

Tissu musculaire cardiaque

Le **tissu musculaire cardiaque** forme la paroi contractile (myocarde) du cœur. Il est strié, à l'instar du tissu musculaire squelettique, et possède les mêmes propriétés contractiles. Toutefois, le tissu musculaire cardiaque se distingue du muscle squelettique par la présence de fibres ramifiées et reliées par des disques intercalaires. Ces structures facilitent la transmission de signaux d'une cellule cardiaque à l'autre et contribuent à synchroniser les contractions cardiaques.

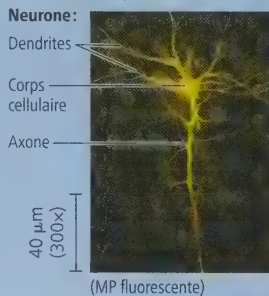


Tissu nerveux

Le **tissu nerveux** perçoit, traite et transmet les stimuli. Il contient des **neurones**, ou cellules nerveuses, spécialisés dans la conduction des potentiels d'action, ainsi que des cellules de soutien appelées **cellules gliales**. Chez de nombreux animaux, un amas de tissu nerveux forme l'encéphale, dans lequel est effectué le traitement de l'information.

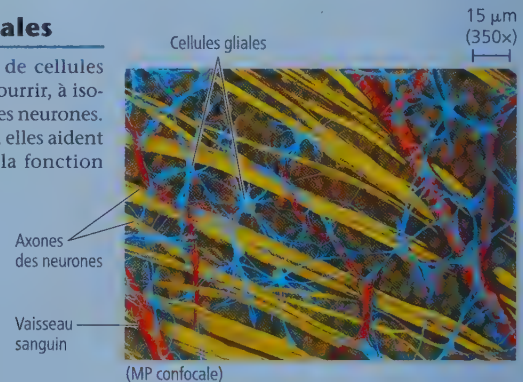
Neurones

Le **neurone** est l'unité fondamentale du système nerveux. Il reçoit des signaux d'autres neurones par l'intermédiaire de son corps cellulaire et de multiples prolongements appelés dendrites. Les neurones acheminent des potentiels d'action à d'autres neurones, aux muscles et à divers types de cellules, par l'intermédiaire de prolongements appelés axones, souvent groupés en faisceaux de nerfs.

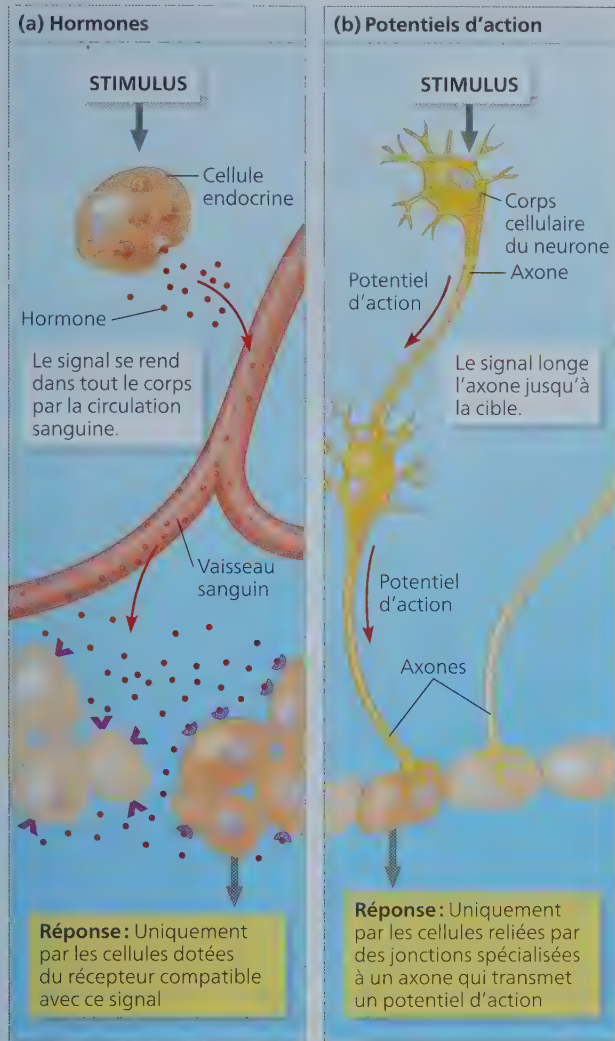


Cellules gliales

Les divers types de cellules gliales aident à nourrir, à isoler et à régénérer les neurones. Dans certains cas, elles aident aussi à moduler la fonction neuronale.



▼ **Figure 40.6** Les signaux émis par le système endocrinien et le système nerveux.



HABILITÉS VISUELLES ► Comparez les deux schémas et expliquez pourquoi le potentiel d'action d'un nerf donné ne peut emprunter qu'une seule voie physique, alors que la molécule d'une hormone donnée peut en emprunter plusieurs.

CONCEPT **40.2**

De nombreux animaux maintiennent leur milieu interne à l'aide de mécanismes de rétroaction

Plusieurs systèmes de l'organisme contribuent activement au maintien du milieu interne, une tâche sans répit pour le corps d'un animal. Imaginez ce qui se passerait si votre température corporelle grimpeait chaque fois que vous prenez une douche ou buvez un café bien chaud. Devant les fluctuations environnementales, les animaux maintiennent la stabilité de leur milieu interne par la régulation et la tolérance.

La régulation et la tolérance

Comparez les deux ensembles de données de la **figure 40.7**. La température interne de la loutre de rivière (*Lontra canadensis*) est pratiquement indépendante de celle de l'eau dans laquelle elle nage, tandis que la température corporelle de l'achigan à grande bouche (*Micropterus salmoides*) suit la température de l'eau à mesure que celle-ci varie. Pour décrire ces deux tendances, on dit que la loutre est un régulateur, et l'achigan, un tolérant. On qualifie un animal de **régulateur** au regard d'une variable environnementale particulière s'il utilise des mécanismes de régulation interne pour atténuer les changements dans son milieu interne lorsque son environnement externe fluctue. En revanche, un animal est dit **tolérant** au regard d'une variable environnementale particulière s'il supporte les variations de son milieu interne liées à certains changements dans l'environnement externe.

Les animaux qui sont tolérants stricts ou régulateurs stricts représentent les deux extrêmes d'un continuum. La plupart des animaux se situent entre ces deux limites. En outre, un animal peut maintenir son homéostasie en assurant la régulation de certaines conditions internes et en en laissant d'autres fluctuer au gré des conditions environnementales. Par exemple, l'achigan est tolérant quant à la température de l'eau dans laquelle il vit, mais il régule la concentration de solutés dans son sang et dans son liquide interstitiel. En outre, le fait d'être un régulateur ne suppose pas toujours le changement d'une variable interne. Par exemple, de nombreux invertébrés marins, comme les araignées de mer du genre *Libinia*, vivent dans des milieux où la concentration de solutés (la salinité) est relativement stable.

L'homéostasie

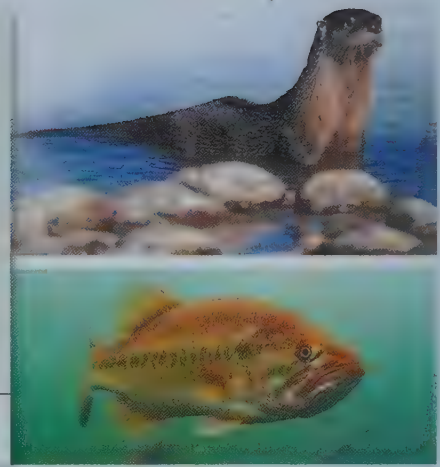
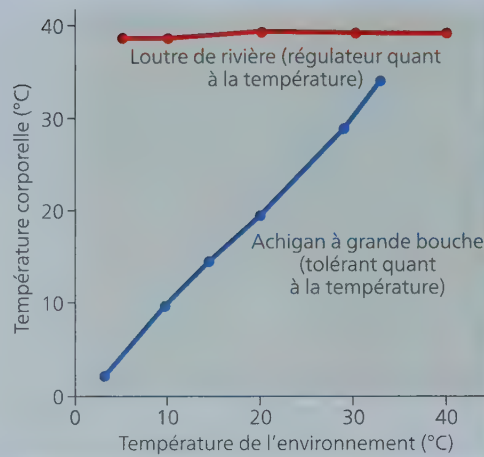
Le maintien de la température corporelle de la loutre de rivière ou la stabilité de la concentration des solutés dans les tissus de l'achigan d'eau douce sont des exemples d'**homéostasie**, un terme qui signifie « maintien de l'équilibre interne ». Les racines grecques de ce terme sont *homoios*, « semblable », et *stasis*, qui signifie « position ». L'homéostasie permet aux animaux de maintenir un état stable, c'est-à-dire un milieu interne relativement constant, même lorsque les conditions du milieu externe varient fortement.

De nombreux animaux sont capables d'homéostasie à l'égard de plusieurs paramètres physiques et chimiques. Par exemple, l'humain peut garder son milieu interne à une température de 37 °C environ, et maintenir le pH de son sang et de son liquide interstitiel à 7,4. En outre, il peut ajuster la concentration du glucose sanguin de manière que la concentration ne s'écarte jamais longtemps de la valeur de 5 mmol/L de sang.

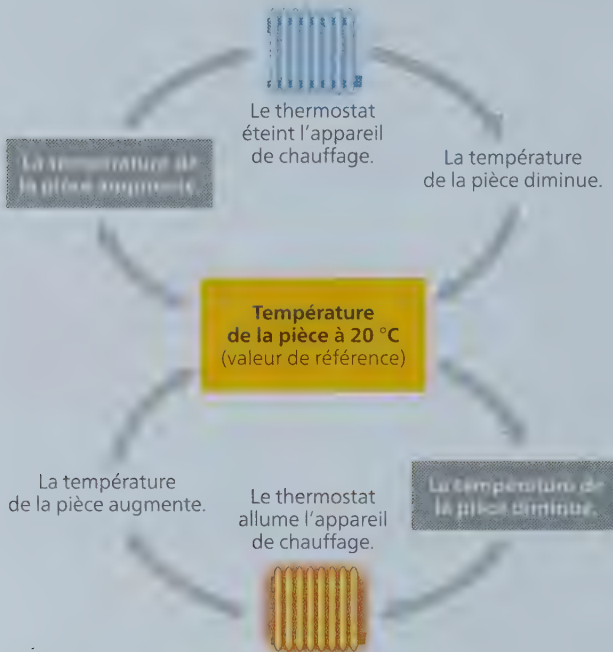
Les mécanismes de l'homéostasie

L'homéostasie suppose la présence d'un système de contrôle. Avant d'explorer l'homéostasie chez les animaux, établissons une analogie avec un système mécanique, en l'occurrence avec celui qui régule la température d'une pièce (**figure 40.8**). Supposons que l'on veuille garder cette pièce à 20 °C, une température confortable pour une activité normale. Pour ce faire, on règle le centre de régulation (le thermostat) à 20 °C. Un thermomètre intégré au thermostat détecte la température ambiante. Si celle-ci tombe sous la valeur fixée (20 °C), le thermostat

► **Figure 40.7** Les rapports entre les températures corporelles d'un régulateur et d'un tolérant aquatiques, et la température de l'environnement. La loutre de rivière maintient une température interne stable, indépendamment de la température de l'environnement. L'achigan à grande bouche, par contre, engendre relativement peu de chaleur métabolique et s'adapte à la température de l'eau.



▼ **Figure 40.8** Exemple mécanique de régulation thermique: la régulation de la température dans une pièce. La régulation de la température ambiante d'une pièce dépend d'un centre de régulation (thermostat). Celui-ci déclenche les variations de température et active des mécanismes visant à la ramener à une valeur de référence.



FAITES UN DESSIN ► Indiquez au moins un stimulus, une réponse et un récepteur (centre de régulation) dans la figure. Comment modifieriez-vous ce système pour y ajouter un climatiseur?

déclenche la mise en marche de l'appareil de chauffage. Lorsque la température de la pièce dépasse 20 °C, le thermostat commande l'arrêt de l'appareil de chauffage. Chaque fois que la température de la pièce descend sous les 20 °C, le thermostat déclenche le même processus.

Tout comme le système de chauffage, les mécanismes de l'homéostasie de l'être humain permettent de maintenir une variable, comme la température corporelle ou la concentration

de solutés, à une valeur constante ou presque constante; celle-ci est appelée **valeur de référence**. Toute fluctuation à la hausse ou à la baisse de cette valeur de référence représente un **stimulus** détecté par un **récepteur**. Chaque fois que le récepteur perçoit un changement, un *centre de régulation* traite l'information provenant du récepteur et émet un signal qui déclenche une **réponse**, c'est-à-dire une activité physiologique qui favorise le retour de la variable à sa valeur de référence. Dans l'exemple du système de chauffage, la baisse de la température correspond au stimulus, le thermostat constitue le récepteur et le centre de régulation, et l'appareil de chauffage produit la réponse.

Le rôle de la rétroaction dans l'homéostasie

Si vous examinez le circuit de régulation illustré à la figure 40.8, vous pouvez voir que la réponse (la production de chaleur) atténue le stimulus (baisse de la température ambiante sous la valeur de référence). Il s'agit là d'une **rétro-inhibition**, un mécanisme de régulation qui diminue l'intensité du stimulus initial (voir la figure 1.10). Ce type de rétroaction joue un rôle important dans l'homéostasie des animaux. Par exemple, lorsque vous faites un exercice intense, vous produisez de la chaleur, laquelle fait monter votre température corporelle. Votre système nerveux détecte cette augmentation de température et déclenche le mécanisme de la transpiration. Lorsque vous transpirez, l'évaporation de la sueur de la peau rafraîchit votre corps; la température corporelle revient à sa valeur de référence et le stimulus est éliminé.

L'homéostasie est un état d'équilibre dynamique. C'est l'interaction entre des facteurs externes susceptibles d'influer sur le milieu interne, d'une part, et les mécanismes de régulation internes qui s'opposent à cette influence, d'autre part. Remarquez que les réponses physiologiques aux stimulus ne sont pas instantanées, de la même façon qu'une pièce ne se réchauffe pas aussitôt qu'on met en marche l'appareil de chauffage. En somme, l'homéostasie modère les fluctuations du milieu interne, mais ne les élimine pas. Les fluctuations sont plus importantes si une variable s'inscrit dans un *intervalle normal* – caractérisé par une limite supérieure et une limite inférieure – au lieu d'avoir une valeur de référence unique. C'est ce qui arrive lorsque le système de chauffage commence à produire de la chaleur quand la température de la pièce descend à 19 °C et cesse d'en produire

quand elle atteint 21 °C. Que la valeur de référence soit unique ou qu'elle s'inscrive dans un intervalle de référence, l'homéostasie est facilitée par des adaptations qui amortissent les fluctuations, par exemple l'isolation, dans le cas de la température, ainsi que les tampons physiologiques, dans le cas du pH.

Contrairement à la rétro-inhibition, la **rétroactivation** est un mécanisme qui amplifie le stimulus initial au lieu de l'atténuer. Chez les animaux, les mécanismes de rétroactivation ne jouent pas un rôle crucial dans l'homéostasie; ils contribuent plutôt à conduire certains processus à leur terme. Au cours du travail de l'accouchement, par exemple, la pression exercée par la tête du bébé sur les récepteurs situés dans le col utérin intensifie les contractions utérines. En s'amplifiant, ces contractions augmentent la pression sur le bébé, donc sur le col utérin, lequel se dilate et s'ouvre de plus en plus. La rétroactivation amène ainsi l'accouchement à son terme.

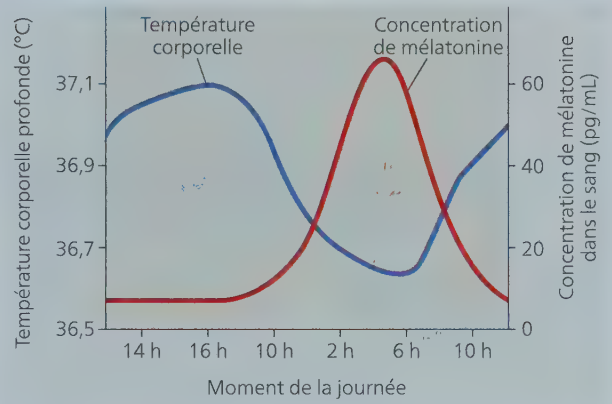
Les variations de l'homéostasie

Les valeurs de référence et les limites normales de l'homéostasie peuvent changer dans certaines conditions. En fait, les *changements régulés* dans le milieu interne sont essentiels aux fonctions corporelles normales, car certains d'entre eux sont associés à des fonctions physiologiques particulières ou à des périodes spécifiques du développement. Pensons, par exemple, au changement radical que connaît l'équilibre hormonal au cours de l'adolescence ou aux variations hormonales cycliques qui président au cycle menstruel de la femme (voir la figure 46.14).

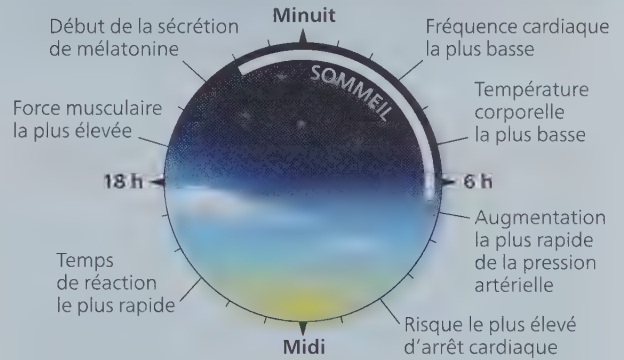
Chez tous les animaux (et les végétaux), certaines variations cycliques du métabolisme suivent un **rythme circadien**, lequel est un ensemble de changements physiologiques qui surviennent sur une période de 24 heures environ (figure 40.9). On peut observer ce rythme en suivant la température corporelle, qui augmente et diminue de plus de 0,6 °C de façon cyclique chez l'humain. Soulignons que ce rythme de variation est réglé par une horloge biologique qui fonctionne indépendamment des variations de l'activité humaine, de la température ambiante et de l'intensité lumineuse (figure 40.9a). Le rythme circadien est donc un facteur endogène du corps humain, bien que l'horloge biologique soit normalement synchronisée avec le cycle clarté-obscurité de l'environnement (figure 40.9b). Ce cycle est régulé par la mélatonine, une hormone sécrétée la nuit; la sécrétion est plus intense durant les nuits plus longues de l'hiver. L'horloge biologique est également sensible à certains stimulus externes, mais l'effet n'est pas immédiat. C'est ce qui explique pourquoi un voyageur qui traverse rapidement (en avion) plusieurs fuseaux horaires souffre de décalage horaire. Ce syndrome résulte de l'absence de concordance entre le rythme circadien et l'environnement local; il persiste jusqu'à ce que l'horloge s'ajuste, ce qui peut prendre plusieurs jours.

L'**acclimatation** peut modifier l'homéostasie. L'acclimatation est un processus d'adaptation physiologique d'un animal à une nouvelle gamme de valeurs environnementales. Par ce processus graduel, l'organisme animal s'adapte aux changements dans son milieu externe. Par exemple, quand un cerf passe d'un lieu situé au niveau de la mer à une région sise en altitude, il sera porté à respirer plus rapidement et plus profondément parce que la pression étant plus faible en haute montagne, sa capacité d'absorption d'O₂ est diminuée. Le cerf évacuera alors plus de dioxyde de carbone (CO₂) en expirant, ce qui élèvera son

▼ **Figure 40.9** Le rythme circadien chez les humains.



(a) **Variations de la température corporelle profonde et concentration de mélatonine dans le sang.** Des chercheurs ont mesuré ces deux variables chez des sujets au repos, mais éveillés, se trouvant dans une chambre d'isolement peu éclairée où la température était constante. (La mélatonine est une hormone qui semble intervenir dans les cycles veille-sommeil; voir le concept 45.3.)



(b) **L'horloge biologique humaine.** Les activités métaboliques suivent des cycles quotidiens déterminés par le rythme circadien. Comme on peut le constater dans ce schéma représentant l'horloge chez une personne qui se lève tôt le matin, mange vers midi et dort la nuit, ces variations cycliques ont lieu sur une période de 24 heures.

pH sanguin au-dessus de la valeur de référence. Pendant plusieurs jours, à mesure que le cerf s'acclimatera, sa fonction rénale se modifiera et ses reins se mettront à excréter de l'urine plus alcaline afin de ramener le pH sanguin à sa valeur normale. Ainsi, son organisme subit un certain nombre de changements physiologiques qui l'aident à accomplir ses activités. D'autres changements se produiront lors de l'acclimatation à l'altitude, dont la production d'un plus grand nombre d'érythrocytes, qui transportent l'O₂. D'autres mammifères, dont l'humain, sont également capables de s'acclimater à d'importants changements d'altitude (figure 40.10).

Remarquez qu'il ne faut pas confondre l'acclimatation, un changement temporaire dans la vie d'un animal, avec l'adaptation, un processus de changement imposé à une population par la sélection naturelle au cours de nombreuses générations.

▼ **Figure 40.10** L'acclimatation des alpinistes dans l'Himalaya. Lorsqu'ils prévoient atteindre un haut sommet, les alpinistes bivouaquent en cours de route afin de s'acclimater et de se prémunir contre le mal des montagnes (ou mal d'altitude). Le fait de passer du temps à une altitude intermédiaire permet aux systèmes circulatoire et respiratoire de capter et de distribuer plus efficacement l'O₂ qui y est présent à une moindre concentration.



RETOUR SUR LE CONCEPT 40.2

1. **FAITES DES LIENS** ► En quoi la rétro-inhibition de la thermorégulation diffère-t-elle de la rétro-inhibition d'un processus biosynthétique déclenché par une enzyme (voir la figure 8.21) ?
2. Si vous deviez décider où placer des thermostats dans une maison, de quels facteurs tiendriez-vous compte ? Quel lien pouvez-vous faire entre ces facteurs et le fait qu'une grande partie des récepteurs de régulation homéostatique de l'humain sont situés dans son cerveau ?
3. **FAITES DES LIENS** ► À l'instar des animaux, les cyanobactéries ont un rythme circadien. En analysant les gènes qui maintiennent les horloges biologiques, des scientifiques ont conclu que les rythmes de 24 heures des humains et des cyanobactéries témoignent d'une évolution convergente (voir le concept 26.2). Quelles données ont pu contribuer à cette conclusion ?

Voir les réponses proposées à l'appendice A.

CONCEPT 40.3

Les processus homéostatiques qui président à la thermorégulation font intervenir la forme, la fonction et le comportement

Dans la présente section, nous examinerons la régulation de la température corporelle pour illustrer comment la forme et la fonction d'un animal contribuent à contrôler son environnement interne. Nous étudierons les autres mécanismes qui jouent

un rôle dans le maintien de l'homéostasie dans les chapitres ultérieurs de cette partie du manuel.

La **thermorégulation** est le mécanisme par lequel les animaux maintiennent leur température corporelle dans un intervalle compatible avec la vie. Une température corporelle à l'extérieur de l'intervalle normal peut réduire l'efficacité des réactions enzymatiques, altérer la fluidité des membranes cellulaires et nuire à d'autres processus biochimiques sensibles aux variations de la température corporelle. Ces changements peuvent avoir des conséquences fatales. Par exemple, la vitesse de la plupart des réactions enzymatiques diminue d'un facteur de deux ou trois pour chaque diminution de température de 10 °C. L'élévation de la température engendre une légère accélération de la vitesse des réactions enzymatiques jusqu'à ce qu'elle devienne critique et que les protéines commencent à se dénaturer. Par exemple, à mesure que la température s'élève, l'hémoglobine se lie moins efficacement à l'O₂ qu'elle transporte dans le sang. La température influe également sur les propriétés des membranes : celles-ci deviennent de plus en plus rigides ou fluides selon que la température monte ou baisse, respectivement.

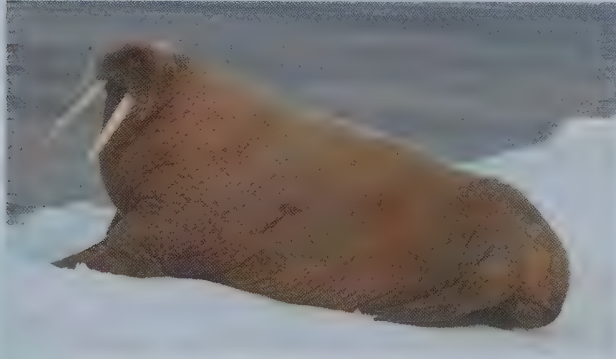
L'endothermie et l'ectothermie

Les sources de chaleur de la thermorégulation sont soit le métabolisme interne, soit l'environnement externe. Les humains et d'autres mammifères, ainsi que les oiseaux, sont des **endothermes**, ce qui signifie que les activités métaboliques constituent leur principale source de chaleur. Certaines espèces de poissons et d'insectes ainsi que quelques reptiles sont aussi principalement des endothermes. En revanche, les amphibiens, de nombreuses espèces de reptiles et de poissons ainsi que la plupart des invertébrés sont des **ectothermes**, ce qui veut dire qu'ils tirent presque toute leur chaleur de leur environnement. L'endothermie et l'ectothermie ne sont pas des modes de thermorégulation mutuellement exclusifs. Par exemple, un oiseau est d'abord un endotherme, mais il peut se réchauffer au soleil par temps froid, à l'instar d'un lézard, qui est un ectotherme.

Les endothermes arrivent à maintenir une température interne très stable même quand la température de l'environnement fluctue grandement. Quand il se trouve dans un environnement froid, un endotherme produit assez de chaleur pour maintenir son corps à une température passablement plus élevée que celle de l'environnement (**figure 40.11a**). Quand il fait chaud, les vertébrés endothermes possèdent des mécanismes qui leur permettent d'évacuer une partie de la chaleur excédentaire ; grâce à eux, ils peuvent supporter des températures que la plupart des ectothermes sont incapables de tolérer.

De nombreux ectothermes arrivent à réguler leur température interne en adoptant des comportements appropriés, comme se chauffer au soleil ou chercher de l'ombre (**figure 40.11b**). Étant donné que la principale source de chaleur des ectothermes provient de l'environnement, ces derniers doivent généralement consommer beaucoup moins d'aliments que les endothermes de taille équivalente ; il s'agit d'un avantage important quand les réserves de nourriture sont limitées. La plupart des ectothermes peuvent également tolérer de plus grandes fluctuations de leur température interne. Dans l'ensemble, l'ectothermie est une stratégie efficace dans la plupart des environnements, comme nous le montrent l'abondance et la diversité des ectothermes.

▼ **Figure 40.11** La thermorégulation par les sources de chaleur internes et externes. Chez les endothermes, la chaleur est fournie par le métabolisme interne, tandis que chez les ectothermes, elle provient de l'environnement externe.



(a) Le morse est un endotherme.



(b) Le lézard est un ectotherme.

Les variations de la température corporelle

Une autre différence entre les animaux est que leur température corporelle peut varier ou être constante. Un animal dont la température corporelle varie en fonction de celle de l'environnement est un *poikilotherme* (du grec *poikilos*, qui signifie «variable»). À l'inverse, un *homéotherme* est un animal qui maintient une température interne relativement stable. Par exemple, l'achigan à grande bouche est un poikilotherme, tandis que la loutre de rivière est un homéotherme (voir la figure 40.7).

La description des ectothermes et des endothermes peut donner à penser que tous les ectothermes sont poikilothermes et que tous les endothermes sont homéothermes. En fait, il n'existe pas de lien direct entre la source de chaleur et la stabilité de la température corporelle. De nombreux poissons marins et des invertébrés habitent des eaux dont les températures sont si stables que leur température corporelle varie encore moins que celle d'endothermes comme les humains et d'autres mammifères. À l'inverse, certains endothermes connaissent de grandes variations de leur température interne. Par exemple, la température corporelle de certaines chauves-souris baisse de 40 °C à 1 ou 2 °C lorsqu'elles entrent en hibernation.

L'idée que les ectothermes sont des animaux «à sang froid» et que les endothermes sont des animaux «à sang chaud» constitue une autre idée fausse courante. La température corporelle des ectothermes n'est pas nécessairement basse. Au contraire, quand ils se chauffent au soleil, la température interne de beaucoup de lézards ectothermes est supérieure à celle des mammifères. Par conséquent, la plupart des scientifiques préfèrent ne pas employer les termes à *sang froid* et à *sang chaud*, qui peuvent induire en erreur.

L'équilibre entre la perte et le gain de chaleur

La thermorégulation relève de la capacité d'un animal à moduler l'échange de chaleur avec son environnement. Cet échange s'effectue par quatre processus physiques : la conduction, la convection, le rayonnement (radiation) et l'évaporation (figure 40.12). La chaleur se propage toujours d'un objet dont la température est élevée vers un objet dont elle est plus basse.

La thermorégulation consiste à maintenir une quantité de chaleur gagnée équivalente à la quantité de chaleur perdue. Les animaux y parviennent par des mécanismes qui réduisent l'échange de chaleur dans son ensemble ou qui favorisent le

passage de la chaleur dans une direction particulière. Chez les mammifères, plusieurs mécanismes de thermorégulation sont associés au **système tégumentaire**, c'est-à-dire à la couche externe de l'organisme, constituée de la peau, des poils et des ongles (les griffes ou les sabots chez certaines espèces).

L'isolation

L'isolation constitue une grande adaptation thermorégulatrice chez les mammifères et chez les oiseaux. Elle consiste à réduire le flux thermique entre le corps et l'environnement, et à abaisser le coût énergétique du maintien de la température. L'isolation est présente tant à la surface du corps (poils et plumes) que sous la surface (couches de graisse formées par le tissu adipeux). En outre, certains animaux sécrètent des substances huileuses afin de repousser l'eau qui réduirait la capacité isolante de leurs plumes ou de leurs poils, comme le font les oiseaux quand ils lissent leurs plumes.

Souvent, les animaux peuvent modifier leurs couches isolantes pour mieux réguler leur température corporelle. Ainsi, la plupart des mammifères terrestres et de nombreux oiseaux réagissent au froid en gonflant leur fourrure ou leurs plumes. Ce faisant, ils emprisonnent une couche d'air plus épaisse, ce qui augmente passablement l'efficacité de leur isolation. Les humains, qui n'ont ni plumes ni fourrure, ne peuvent guère compter que sur leur tissu adipeux pour ce qui est de l'isolation. Cela dit, lorsque nous avons froid, nous avons la chair de poule : c'est un vestige du gonflement de la fourrure de nos ancêtres plus velus.

L'isolation est tout particulièrement importante pour les mammifères marins tels que les baleines et les morses. Ces animaux nagent dans une eau dont la température est bien plus froide que celle de l'intérieur de leur corps. Un grand nombre de ces espèces passent au moins une partie de l'année dans des mers polaires où l'eau atteint presque le point de congélation. Leur thermorégulation est d'autant plus difficile que, dans l'eau, la perte de chaleur par conduction est de 50 à 100 fois plus rapide que dans l'air. Ces mammifères marins peuvent survivre dans ces conditions grâce à la présence, sous leur peau, d'une très épaisse couche de gras isolant appelée lard. Cette adaptation évolutive est tellement efficace qu'elle permet à ces animaux de maintenir une température corporelle de l'ordre de 36 à 38 °C sans nécessiter beaucoup plus d'énergie de source alimentaire que les mammifères terrestres de taille équivalente.

► **Figure 40.12** Les échanges thermiques entre un organisme et son environnement.

HABILETÉS VISUELLES ►

Si cette illustration montrait un morse (un endotherme) plutôt qu'un iguane, une ou des flèches pointerai(en)t-elle(s) dans une autre direction ? Expliquez votre réponse.

La **convection** est le processus par lequel l'air ou un liquide qui se réchauffe à la surface d'un corps se dilate et tend à s'éloigner de ce corps, faisant place à l'air plus froid ou au liquide plus froid. Par exemple, le vent facilite la déperdition thermique par convection à la surface d'un lézard ayant une peau sèche ; le sang en circulation déplace la chaleur de l'intérieur du corps pour la transférer par convection aux extrémités plus froides. Chez les animaux, la convection contribue plus souvent à une perte de chaleur qu'à un gain.

Le **rayonnement** est l'émission d'ondes électromagnétiques par tous les objets dont la température est supérieure au zéro absolu. Ici, un lézard absorbe de la chaleur irradiée par le soleil et il transfère une petite partie de l'énergie à l'air ambiant.

L'**évaporation** est le retrait de chaleur à la surface d'un liquide, qui perd certaines de ses molécules du fait de leur passage à l'état gazeux. L'évaporation de l'eau à la surface humide d'un lézard a un effet de refroidissement important.



La **conduction** est le transfert direct de chaleur entre les molécules de deux corps en contact ou celles de deux parties d'un même corps, par exemple quand un lézard se tient sur une roche préalablement chauffée au soleil.

La régulation de la circulation sanguine

Les systèmes circulatoires jouent un rôle important dans l'échange de chaleur entre le milieu interne et l'environnement. Les adaptations qui régulent la circulation du sang proche de la surface du corps ou qui gardent la chaleur au centre du corps sont essentielles à la thermorégulation.

En réaction aux variations de température de leur environnement, de nombreux animaux peuvent modifier la quantité de sang (et donc de chaleur) qui circule entre les parties internes de leur corps et leur peau. Un apport sanguin élevé dans la peau résulte normalement de la **vasodilatation**, soit l'augmentation du diamètre des vaisseaux sanguins superficiels (ceux qui sont situés près de la surface du corps). La vasodilatation est déclenchée par des potentiels d'action produisant un relâchement des fibres musculaires de la paroi des vaisseaux. Ceux-ci se dilatent, entraînant alors une augmentation de la circulation sanguine. Chez les endothermes, la vasodilatation accroît le transfert de la chaleur du corps à l'environnement par rayonnement, conduction et convection (voir la figure 40.12). Le processus inverse est la **vasoconstriction**, qui réduit l'apport sanguin et le transfert thermique en diminuant le diamètre des vaisseaux superficiels.

Comme les endothermes, certains ectothermes modulent l'échange de chaleur en régulant l'apport de sang. Ainsi, lorsque l'iguane marin des îles Galápagos nage dans l'eau froide de l'océan, ses vaisseaux sanguins superficiels subissent une vasoconstriction. De plus grandes quantités de sang étant acheminées vers les régions profondes du corps, l'iguane conserve sa chaleur.

Pour réduire la déperdition thermique, de nombreux oiseaux et mammifères doivent compter sur l'**échange thermique à contre-courant**, c'est-à-dire sur le transfert de chaleur (ou de solutés) entre des liquides corporels qui circulent dans des directions opposées. Dans un échangeur thermique à contre-courant, les artères et les veines passent à proximité les unes des autres (figure 40.13). Le sang des veines et des artères circule dans des directions opposées, et c'est cette disposition des vaisseaux sanguins qui rend le transfert de chaleur remarquablement efficace : le sang chaud qui arrive du centre du corps par

les artères se trouve à transférer sa chaleur au sang moins chaud qui revient des extrémités par les veines. Plus important encore, le transfert s'effectue sur toute la longueur de l'échangeur, ce qui maximise le processus d'échange et réduit au minimum la perte de chaleur vers l'environnement.

Certains requins, poissons et insectes utilisent également l'échangeur thermique à contre-courant. Bien que les requins et les poissons soient des animaux tolérants au regard de la chaleur, certains d'entre eux, dont le grand requin blanc, le thon rouge et l'espadon, disposent d'échangeurs thermiques à contre-courant. Cette adaptation favorise l'activité vigoureuse et soutenue de ces animaux, car leurs principaux muscles natatoires peuvent ainsi demeurer à une température adéquate. De même, de nombreux insectes endothermes (les bourdons, les abeilles domestiques et certaines noctuelles ou papillons de nuit) ont un mécanisme d'échange thermique à contre-courant qui maintient une température élevée dans leur thorax, où leurs muscles alaires sont situés.

Le refroidissement par perte de chaleur du fait de l'évaporation

Beaucoup de mammifères et d'oiseaux habitent dans des milieux où la thermorégulation fait intervenir des mécanismes tantôt de refroidissement, tantôt de réchauffement. Si la température du milieu est supérieure à celle de son corps, l'évaporation constitue pour l'animal l'unique façon d'éviter que sa température corporelle augmente rapidement. Des animaux terrestres perdent de l'eau par évaporation à travers la peau et par la respiration. L'eau absorbe une quantité considérable de chaleur quand elle s'évapore (voir le concept 3.2). Cette chaleur s'éloigne de la peau et des surfaces respiratoires en même temps que la vapeur d'eau.

Certains animaux bénéficient d'adaptations qui augmentent sensiblement l'effet de refroidissement de l'évaporation. Quelques mammifères, dont les chevaux et les humains, possèdent des glandes sudoripares (figure 40.14). Le halètement joue un rôle important chez les oiseaux et chez de nombreux mammifères (le chien, par exemple). Certains oiseaux sont pourvus d'un sac spécialisé, très vascularisé, dans le plancher de leur cavité

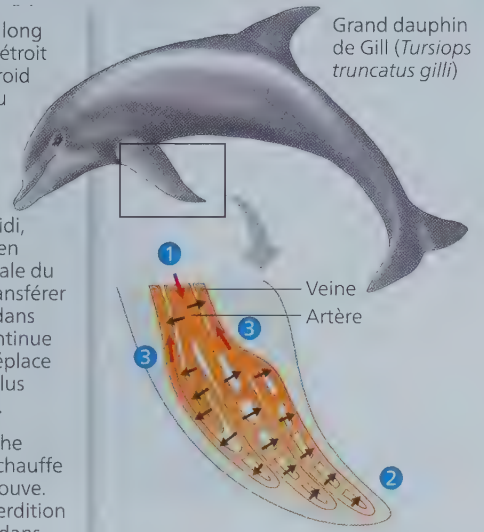
▼ **Figure 40.13 Les échangeurs thermiques à contre-courant.** Ce mécanisme aide à retenir la chaleur au centre du corps, réduisant ainsi la déperdition thermique par les extrémités, surtout lorsqu'elles sont immergées dans de l'eau froide ou en contact avec de la glace ou de la neige. En fait, la chaleur du sang artériel provenant du centre du corps est transférée directement au sang veineux qui retourne vers cette partie du corps, au lieu de se dissiper dans l'environnement.



- 1 Les artères transportant le sang chaud le long des membres de l'animal sont en contact étroit avec les veines transportant le sang plus froid dans la direction inverse, vers le centre du corps. Ce dispositif facilite le transfert thermique des artères aux veines sur toute la longueur des vaisseaux sanguins.
- 2 Près de l'extrémité d'une patte ou d'une nageoire, là où le sang artériel s'est refroidi, de sorte qu'il atteint une température bien inférieure à la température interne normale du corps de l'animal, l'artère peut encore transférer de la chaleur au sang plus froid passant dans une veine adjacente. Le sang veineux continue à absorber de la chaleur, parce qu'il se déplace à proximité du sang artériel, de plus en plus chaud, circulant dans la direction inverse.
- 3 À mesure que le sang veineux se rapproche du centre du corps, sa température se réchauffe et atteint presque celle du sang qui s'y trouve. Ce mécanisme réduit les effets de la déperdition thermique associée au transfert de sang dans les parties du corps en contact avec l'eau froide.

Légende

- Sang plus chaud
- Sang plus froid
- Circulation sanguine
- Transfert de chaleur



Dans les nageoires d'un dauphin, chaque artère est entourée de plusieurs veines, formant un échangeur thermique à contre-courant. Ce dispositif permet un transfert de chaleur efficace entre le sang artériel et le sang veineux.

▼ **Figure 40.14 Une adaptation qui améliore le refroidissement par évaporation.** Les chevaux et les humains font partie des animaux dont la thermorégulation est facilitée par les glandes sudoripares présentes sur tout le corps.



buccale, et dont le gonflement et le dégonflement rapide favorisent l'évaporation. Du moment que les pigeons ont assez d'eau, ils peuvent faire appel au refroidissement par évaporation pour conserver une température corporelle proche de 40 °C dans un milieu où la température de l'air atteint jusqu'à 60 °C.

Les réactions comportementales

Les ectothermes, et parfois aussi les endothermes, modulent leur température corporelle en adaptant leurs comportements aux changements environnementaux. Quand ils ont froid, ces animaux cherchent des endroits chauds; en outre, pour augmenter leur apport thermique, ils adoptent une position qui leur permet d'exposer la plus grande partie de leur surface corporelle à la source de chaleur (voir la figure 40.11b). Au contraire, quand ils ont chaud, ils se baignent, se retirent dans des zones plus fraîches ou changent de position afin de diminuer l'absorption de chaleur solaire. Par exemple, la position dite *en obélisque* que prend la libellule est une adaptation qui réduit au minimum la surface corporelle exposée au soleil, donc les gains de chaleur par rayonnement (figure 40.15). Bien que ces comportements soient relativement simples, ils permettent à beaucoup d'ectothermes de maintenir une température corporelle presque constante.

Les abeilles domestiques (*Apis mellifera*) font appel à un mécanisme de thermorégulation qui dépend d'un comportement social. Quand il fait froid, elles augmentent leur production de chaleur et s'entassent les unes sur les autres pour mieux la conserver. Certaines d'entre elles se déplacent, allant de la périphérie du regroupement vers le centre, où il fait plus chaud, ce qui permet de faire circuler et de distribuer la chaleur. Même quand elles s'entassent, les abeilles doivent dépenser une énergie considérable pour maintenir une température vitale durant de longues périodes de temps froid. (C'est la principale fonction du stockage,

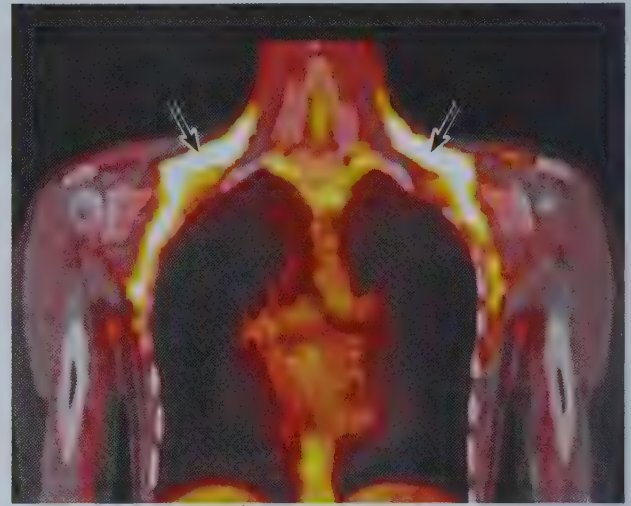
► Figure 40.15

Le comportement de thermorégulation chez la libellule.

En orientant son corps de manière à exposer au soleil seulement la partie effilée de son abdomen, la libellule réduit au minimum les gains de chaleur par rayonnement solaire.



▼ Figure 40.16 L'activité du tissu adipeux brun en réaction au froid. Cette tomographie par émission de positons (TEP) montre des dépôts de tissu adipeux brun dont le métabolisme est actif (régions blanches indiquées par les flèches) autour du cou.



dans la ruche, d'importantes quantités d'énergie sous forme de miel.) Quand il fait chaud, les abeilles régulent également la température de la ruche en y transportant de l'eau et en battant des ailes pour faciliter l'évaporation et la convection. Ainsi, une colonie d'abeilles utilise de nombreux mécanismes de thermorégulation observés chez d'autres animaux vivant en solitaires.

L'ajustement de la production de chaleur métabolique

Étant donné qu'ils ont généralement une température corporelle plus élevée que celle de l'environnement, les endothermes doivent compenser leur perte constante de chaleur. Ceux-ci peuvent ajuster leur production de chaleur – la *thermogenèse* – en fonction de la vitesse de leur déperdition thermique. La thermogenèse augmente à la suite d'activités musculaires telles que les mouvements ou les frissons. Par exemple, grâce aux frissons, la mésange à tête noire (*Poecile atricapillus*), qui ne pèse que 20 g, peut rester active et maintenir une température corporelle presque constante, de l'ordre de 40 °C, dans un milieu atteignant parfois -40 °C.

Les plus petits de tous les endothermes (les insectes volants comme les abeilles et les noctuelles) sont également capables de modifier leur production de chaleur. De nombreux insectes endothermes frissonnent pour se réchauffer avant de s'envoler : ils contractent les muscles alaires antagonistes en synchronie. Ces contractions donnent lieu à un mouvement très léger, mais à une production de chaleur considérable. Les réactions chimiques, dont celles de la respiration cellulaire, s'accroissent dans les muscles alaires réchauffés, ce qui permet aux insectes en question de voler même par temps froid, de jour comme de nuit.

Certains mammifères, en réaction au froid, sécrètent des hormones qui stimulent les mitochondries à accroître leur activité métabolique et à produire de la chaleur au lieu de l'ATP. Cette *thermogenèse sans frisson* peut avoir lieu dans tout le corps. D'autres mammifères ont aussi des *tissus adipeux bruns* (la

couleur brune est attribuable à l'abondance des mitochondries dans les cellules). Situés dans le cou et entre les épaules, ces tissus sont spécialisés dans la production rapide de chaleur. Le tissu adipeux brun est présent chez les nouveau-nés de nombreux mammifères ; il représente d'ailleurs environ 5 % de la masse corporelle totale des nouveau-nés humains. On sait depuis longtemps que du tissu adipeux brun est présent chez les mammifères qui hibernent, mais récemment, on en a découvert pour la première fois chez des humains adultes (figure 40.16), en quantité variable, et davantage chez les humains exposés pendant un mois à des températures froides. Grâce à ces diverses adaptations qui permettent la thermogenèse, les mammifères et les oiseaux peuvent produire de 5 à 10 fois plus de chaleur métabolique qu'ils ne le font quand la température extérieure est plus chaude.

Quelques grands reptiles deviennent endothermes dans des circonstances particulières. Par exemple, des chercheurs ont constaté qu'un python birman femelle (*Python molurus bivittatus*) maintient une température corporelle supérieure d'environ 6 °C à celle de l'air environnant pendant qu'il couve ses œufs. D'où venait cette chaleur ? Des expériences ultérieures ont montré que les pythons, comme les oiseaux, peuvent augmenter leur température corporelle en frissonnant (figure 40.17). L'hypothèse selon laquelle certains groupes de dinosaures du Mésozoïque étaient endothermes est encore très controversée (voir le concept 34.5).

L'acclimatation dans la thermorégulation

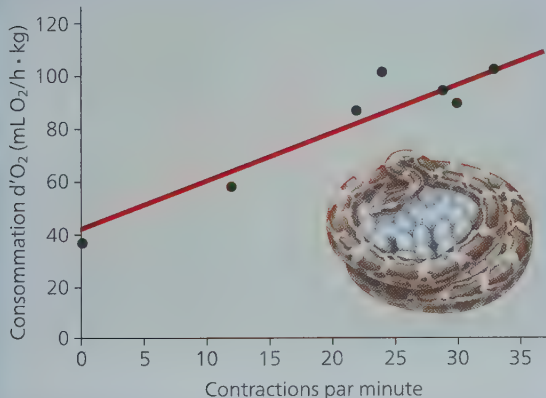
L'acclimatation contribue à la thermorégulation chez beaucoup d'espèces animales. Chez les oiseaux et les mammifères, l'acclimatation aux changements saisonniers de température passe généralement par une modification de la quantité d'isolant cutané (la fourrure s'épaissit en vue de l'hiver, puis elle s'éclaircit en été, lors de la mue, par exemple). De tels changements aident ces animaux endothermes à conserver une température corporelle à peu près constante, indépendamment de la saison.

Comment un python birman femelle produit-il de la chaleur pendant qu'il couve ses œufs ?

■ **HYPOTHÈSE** ■ Au Bronx Zoo de New York, Herndon Dowling et ses collaborateurs ont constaté que, lorsqu'un python birman femelle couvait ses œufs en enroulant son corps autour d'eux, il augmentait sa température corporelle et contractait souvent les muscles commandant ces enroulements. Les chercheurs ont émis l'hypothèse que les contractions musculaires étaient responsables de l'élévation de la température corporelle. Par conséquent, une diminution de la température de la chambre devrait entraîner une augmentation des contractions musculaires et de la consommation d'O₂.

■ **EXPÉRIENCE** ■ Pour savoir si ces contractions musculaires élevaient sa température corporelle, les chercheurs ont installé le python et ses œufs dans une chambre. Ils ont ensuite fait varier la température de cette chambre et enregistré les contractions musculaires du python ainsi que sa consommation d'O₂, laquelle renseigne sur la vitesse de la respiration cellulaire.

■ **RÉSULTATS** ■ La consommation d'O₂ du python augmente lorsque la température de la chambre diminue. Comme le montre le graphique, cette augmentation de la consommation d'O₂ coïncide avec une augmentation de la fréquence des contractions musculaires.



■ **CONCLUSION** ■ Étant donné qu'il y a une corrélation entre la consommation d'O₂, qui produit de la chaleur par la respiration cellulaire et la fréquence des contractions musculaires, les chercheurs ont conclu que les contractions musculaires, une forme de frisson, expliquent la hausse de la température corporelle du python birman.

Source des données: V. H. Hutchison, H. G. Dowling et A. Vinegar, Thermoregulation in a brooding female Indian python, *Python molurus bivittatus*, *Science* 151 : 694-696 (1966).

ET SI ? ► Supposez que vous faites varier la température de l'air et que vous mesurez la consommation d'O₂ d'un python birman femelle sans sa couvée d'œufs. Comme le python n'aura pas de frissons, comment fera-t-il, à votre avis, pour adapter sa température corporelle en fonction de la température ambiante ?

L'acclimatation des ectothermes comprend souvent des modifications au niveau cellulaire. Les cellules peuvent produire des variantes d'enzymes (isoenzymes) ayant la même fonction, mais des températures optimales différentes. La proportion de lipides saturés et insaturés dans les membranes peut aussi changer; les lipides insaturés permettent aux membranes de garder leur fluidité malgré les baisses de température (voir la figure 7.5).

Fait remarquable, certains ectothermes survivent à des températures inférieures à zéro grâce aux protéines « antigel » qu'ils produisent et qui préviennent la formation de cristaux de glace dans leurs cellules. Dans l'océan Arctique et l'océan Austral (Antarctique), ces protéines permettent à certaines espèces de poissons de survivre dans des eaux dont la température peut atteindre -2 °C, un seuil bien inférieur au point de congélation des liquides corporels non protégés (environ -1 °C).

Les thermostats physiologiques et la fièvre

Chez l'humain et d'autres mammifères, les récepteurs associés à la thermorégulation sont regroupés dans l'**hypothalamus**, une région de l'encéphale également responsable du rythme circadien. Dans l'hypothalamus, un groupe de neurones régulateurs fonctionnent comme un véritable thermostat: ils réagissent aux changements de la température corporelle situés au-dessus ou au-dessous d'un intervalle de référence. L'hypothalamus active des mécanismes favorisant la déperdition ou le gain thermique (figure 40.18).

Des récepteurs distincts indiquent au thermostat hypothalamique les augmentations ou les diminutions de température du sang. Lorsque la température du corps est inférieure à l'intervalle des valeurs de référence, le centre de la thermogenèse dans l'hypothalamus inhibe les mécanismes de déperdition de chaleur et active soit ceux qui permettent de conserver la chaleur, notamment la constriction des vaisseaux superficiels, soit ceux qui permettent de produire de la chaleur, comme le frisson. Une fois que la température corporelle dépasse la valeur de référence fixée par le thermostat, le centre de la thermolyse dans l'hypothalamus désactive les mécanismes de conservation de la chaleur et enclenche le refroidissement du corps par la dilatation des vaisseaux superficiels, la sudation ou le halètement.

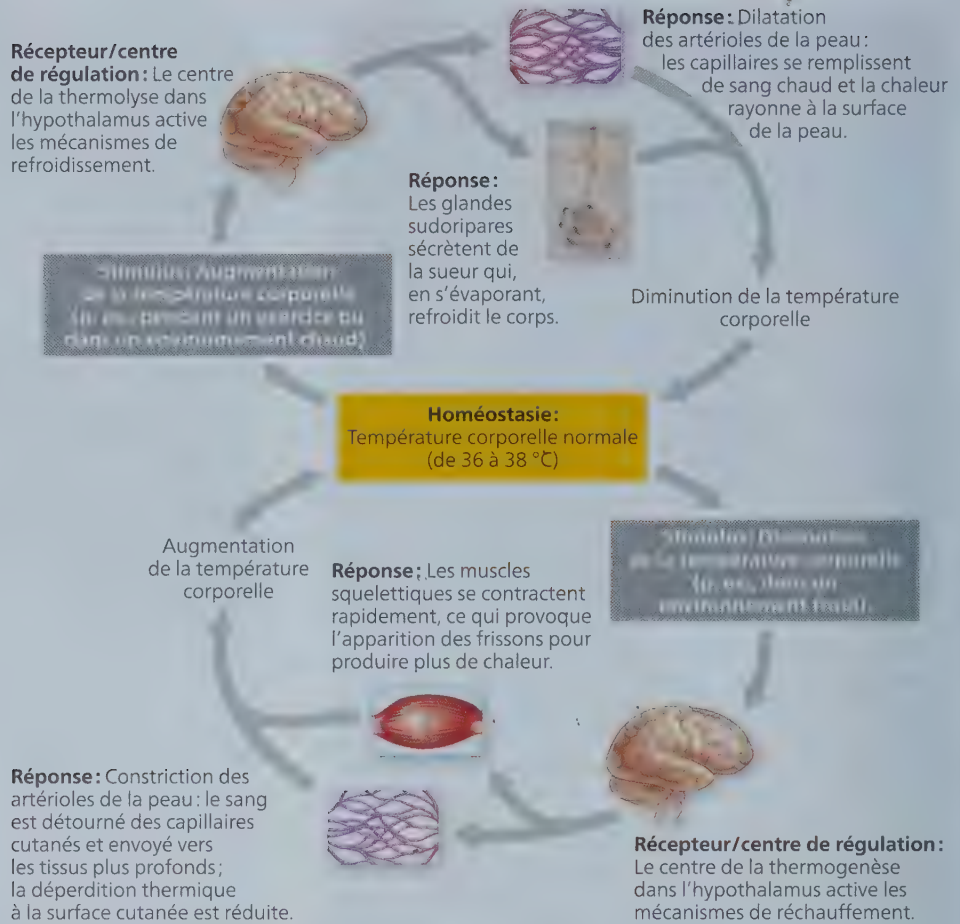
Au cours de certaines infections bactériennes ou virales, les mammifères et les oiseaux font de la *fièvre*, c'est-à-dire que leur température corporelle augmente. Diverses expériences ont montré que la fièvre reflète une augmentation de l'intervalle normal du thermostat biologique. Par exemple, si on fait *monter* artificiellement la température de l'hypothalamus d'un animal contaminé, on *réduit* la fièvre dans le reste du corps!

Chez certains ectothermes, l'augmentation de la température lors d'une infection est appelée *fièvre comportementale*. Par exemple, lorsque l'iguane du désert (*Dipsosaurus dorsalis*) est infecté par certaines bactéries, il s'installe dans un endroit chaud et maintient une température corporelle plus élevée de 2 à 4 °C. Des observations semblables chez des poissons, chez des amphibiens, et même chez les blattes, indiquent que la fièvre est commune aux endothermes et aux ectothermes.

Maintenant que nous avons exploré la thermorégulation, nous allons conclure cette introduction sur la structure et la fonction en examinant les différentes façons dont les animaux dépendent, utilisent et conservent l'énergie.

► **Figure 40.18** Le rôle prépondérant de l'hypothalamus dans la thermorégulation humaine.

ET SI ? ► Imaginez que, au terme d'une longue séance de jogging par temps chaud, vous constatez qu'il ne reste plus de boissons froides dans la glacière. Comme vous voulez à tout prix vous rafraîchir, vous plongez la tête dans la glacière. Comment l'eau glacée influera-telle sur la vitesse à laquelle votre température corporelle reviendra à la normale ?



RETOUR SUR LE CONCEPT **40.3**

1. Quel mode d'échange thermique intervient dans le « refroidissement éolien », lorsque l'air en mouvement nous paraît plus froid que l'air immobile, qui est pourtant à la même température ? Expliquez votre réponse.
2. Les fleurs n'ont pas toutes les mêmes besoins en matière d'ensoleillement. Quelle importance ce fait peut-il avoir pour un colibri cherchant du nectar par un matin frais ?
3. **ET SI ?** ► Pourquoi la survenue de frissons est-elle probable au début d'une fièvre ?

Voir les réponses proposées à l'appendice A.

CONCEPT **40.4**

Les besoins énergétiques sont fonction de la taille, de l'activité et de l'environnement

La vie dépend du transfert et de la transformation de l'énergie ; c'est là un des thèmes intégrateurs de la biologie, présentés au

concept 1.1. Comme tous les autres organismes, les animaux ont besoin d'énergie chimique pour assurer leur croissance, la réparation de leurs tissus, leurs processus physiologiques, leur régulation et leur reproduction. Le transfert et la transformation de l'énergie qui se produisent chez un animal sont qualifiés de **processus bioénergétiques**. Ces processus déterminent les besoins nutritionnels d'un animal ; ils dépendent de sa taille, de son activité et de son environnement.

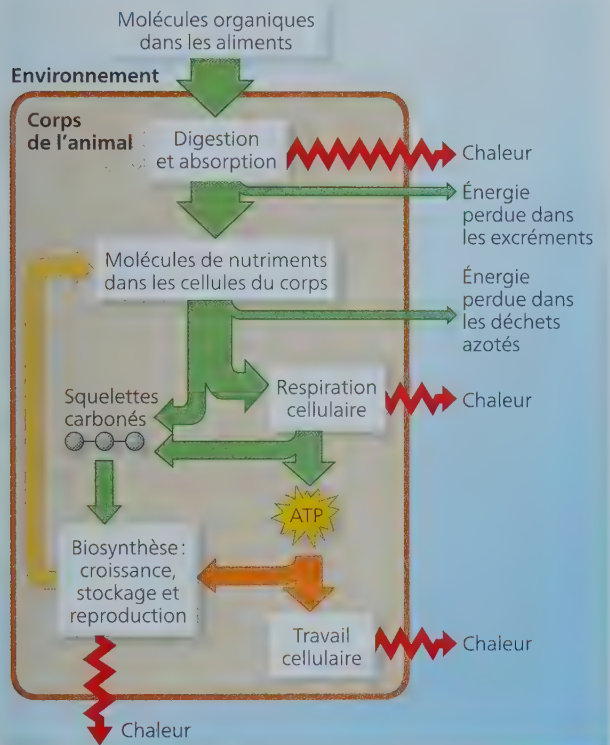
Les allocations et les utilisations énergétiques

On peut classer les organismes selon les sources d'approvisionnement en énergie auxquelles ils font appel. La plupart des **autotrophes**, comme les végétaux, utilisent l'énergie solaire pour élaborer des molécules organiques riches en énergie. Ils dégradent ensuite ces molécules organiques pour produire de l'énergie. La plupart des **hétérotrophes**, comme les animaux, puisent leur énergie chimique dans les aliments. Les aliments contiennent en effet des molécules organiques déjà synthétisées par d'autres organismes.

Les animaux utilisent l'énergie chimique des aliments qu'ils consomment pour alimenter leur métabolisme et leur activité. Ces aliments sont digérés par hydrolyse enzymatique (voir la figure 5.2b), et les molécules riches en énergie sont ensuite absorbées par les cellules du corps (**figure 40.19**). L'ATP (adénosine triphosphate) produite par l'intermédiaire de la respiration

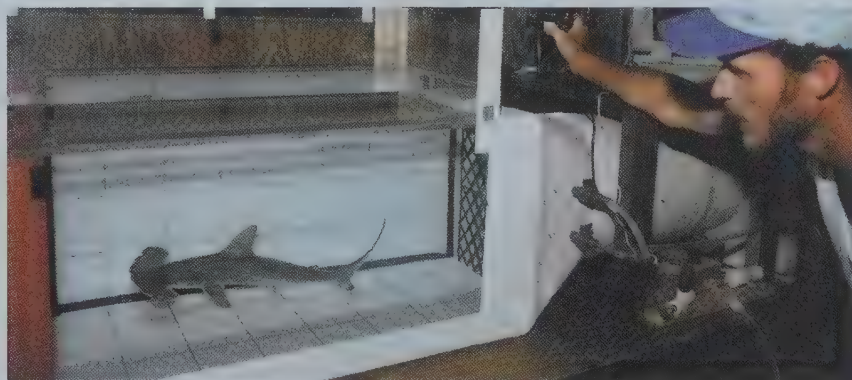
cellulaire ou de la fermentation alimente le travail cellulaire et permet aux cellules, aux organes et aux systèmes d'accomplir les fonctions vitales de l'organisme. L'énergie contenue dans l'ATP sert aussi à la biosynthèse, un processus qui rend possibles la croissance et la réparation des tissus, l'élaboration des substances de stockage (comme le gras) ainsi que la production des gamètes. La production et l'utilisation de l'ATP engendrent de la chaleur, que l'organisme animal rejette par la suite dans le milieu ambiant.

▼ **Figure 40.19** Vue d'ensemble de la bioénergétique d'un animal.



FAITES DES LIENS ► Servez-vous de la notion de couplage énergétique pour expliquer de quelle manière l'absorption des nutriments, la respiration cellulaire et la synthèse des biopolymères produisent de la chaleur (voir le concept 8.3).

► **Figure 40.20** La mesure du taux de consommation d'O₂ chez un requin en train de nager. Un chercheur enregistre la baisse du taux d'O₂ pendant une période donnée dans l'eau de recirculation de l'aquarium d'un jeune requin-marteau (*Sphyrna mokarran*).



La mesure des besoins énergétiques

Combien d'énergie (sur le total de l'énergie obtenue à partir des aliments) faut-il à un animal simplement pour rester en vie ? Quelle quantité consommera-t-il pour les déplacements, la marche, la course, la nage ou le vol ? Quelle fraction de l'apport d'énergie utilisera-t-il pour la reproduction ? Les physiologistes répondent à ces questions en mesurant la vitesse à laquelle les animaux utilisent l'énergie chimique ainsi que les variations de la vitesse du métabolisme selon les circonstances.

La **vitesse du métabolisme** correspond à la somme de toutes les dépenses d'énergie d'un animal pendant une période donnée. L'énergie se mesure en kilojoules (kJ) ou en calories; la vitesse du métabolisme peut s'exprimer en kilojoules par heure et par kilogramme de masse corporelle, ou, plus généralement, en kilojoules par unité de temps.

Il est possible de déterminer la vitesse du métabolisme de plusieurs façons. Étant donné que presque toute l'énergie chimique utilisée au cours de la respiration cellulaire finit par se transformer en chaleur, on peut évaluer la vitesse du métabolisme en mesurant la déperdition de chaleur d'un animal. Pour ce faire, les chercheurs se servent d'un calorimètre, un appareil constitué d'une chambre fermée et isolée, munie d'un dispositif de mesure de la perte de chaleur de l'animal. On peut également mesurer le métabolisme en déterminant la quantité d'O₂ consommé ou celle CO₂ produit au cours de la respiration cellulaire (**figure 40.20**). En outre, quand les chercheurs veulent mesurer le métabolisme sur de longues périodes, ils notent la quantité d'aliments consommés, calculent l'énergie qu'ils renferment (de 19 à 21 kJ environ par gramme de protéines ou de glucides, et à peu près 38 kJ par gramme de lipides) ainsi que l'énergie chimique perdue en déchets (excréments et urine ou autres déchets azotés).

Métabolisme minimal et thermorégulation

Les animaux doivent maintenir un métabolisme minimal pour accomplir des fonctions vitales comme l'entretien et la réparation des tissus, la respiration (ventilation pulmonaire) et la circulation sanguine. La méthode utilisée par les chercheurs pour mesurer ce minimum diffère selon que l'animal est un endotherme ou un ectotherme. Le métabolisme minimal d'un endotherme au repos, qui a terminé sa croissance, qui a l'estomac vide et qui ne subit aucun stress correspond au **métabolisme basal (MB)**. Le MB se mesure dans un environnement

maintenu à une température « confortable » pour l'animal, c'est-à-dire une température pour laquelle la production ou la perte de chaleur est minimale. Dans le cas des ectothermes, le métabolisme minimal doit être déterminé à une température externe bien précise, parce que les variations thermiques de l'environnement influent sur la température corporelle, donc sur la vitesse du métabolisme. Le métabolisme d'un ectotherme qui est au repos, à jeun et non stressé s'appelle **métabolisme standard (MS)**.

La comparaison des métabolismes minimaux montre que l'endothermie et l'ectothermie se caractérisent par des dépenses énergétiques différentes. Celles-ci se situent entre 6 700 et 7 500 kJ/j (kilojoules par jour) chez un homme adulte, et entre 5 400 et 6 300 kJ/j chez une femme adulte. Ces dépenses d'énergie équivalent approximativement à celle d'une ampoule électrique de 75 W employée pendant 24 heures. Par comparaison, le MS d'un alligator américain ne dépasse pas 250 kJ par jour, à 20 °C. Comme cette valeur représente moins du vingtième de l'énergie utilisée par un humain adulte de taille comparable, il est évident que la dépense énergétique est considérablement moindre pour un ectotherme que pour un endotherme.

Les facteurs influant sur la vitesse du métabolisme

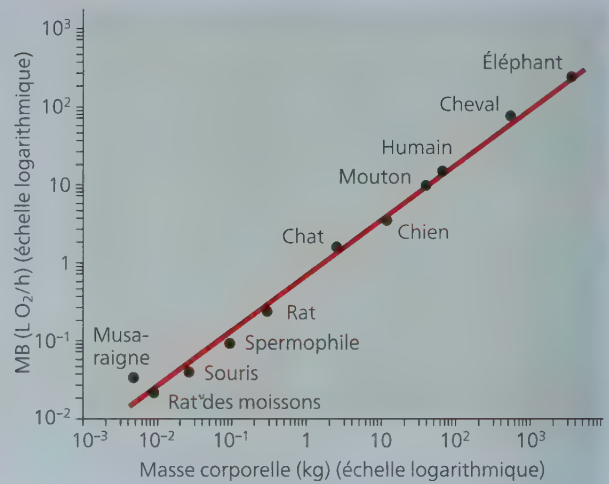
Outre le fait d'être endotherme ou ectotherme, de nombreux autres facteurs influent sur la vitesse du métabolisme des animaux. L'âge, le sexe, la taille, l'activité, la température et l'alimentation font partie des facteurs clés. Examinons ici l'influence de la taille et de l'activité.

La taille et la vitesse du métabolisme

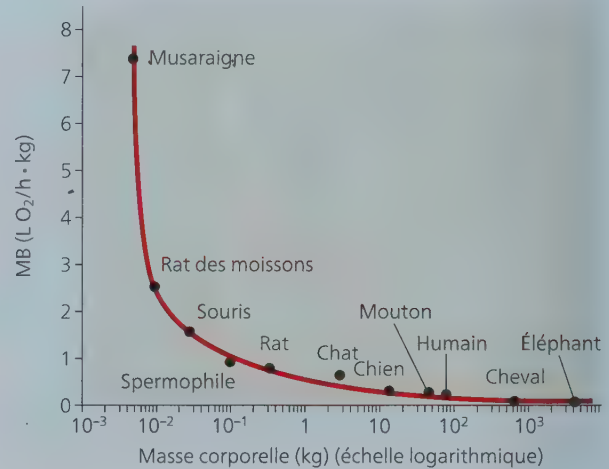
Les animaux de grande taille ont une masse corporelle plus importante et requièrent donc plus d'énergie chimique. Étonnamment, la relation entre la vitesse du métabolisme et la masse corporelle est constante pour un grand nombre de tailles et de formes, comme on peut le voir dans la **figure 40.21a**, qui illustre cette observation chez les mammifères. En fait, même pour une gamme très large de tailles, allant de celle de la bactérie à celle de la baleine, le métabolisme demeure approximativement proportionnel à la masse corporelle à la puissance trois quarts ($m^{3/4}$). Les chercheurs continuent d'étudier les causes fondamentales de cette relation qui s'applique à la fois aux ectothermes et aux endothermes.

La relation entre le métabolisme basal et la taille influe fortement sur la consommation d'énergie par les cellules et les tissus de l'organisme. Comme le montre la **figure 40.21b**, la quantité d'énergie nécessaire pour maintenir chaque kilogramme de masse corporelle est inversement proportionnelle à la taille du corps. Par exemple, chaque kilogramme de masse corporelle de la souris commune (*Mus musculus*) consomme environ 20 fois plus de kilojoules que 1 kg de masse corporelle de l'éléphant d'Afrique (*Loxodonta africana*). Si on considère la masse totale de chacun de ces animaux, il va sans dire que l'éléphant d'Afrique dépense beaucoup plus de kilojoules que la souris commune. Mais le métabolisme basal des tissus d'un petit animal étant relativement élevé, sa vitesse d'approvisionnement en O_2 est proportionnellement plus grande. Pour soutenir son métabolisme plus intense, sa fréquence respiratoire doit être plus

Figure 40.21 Les rapports entre le métabolisme basal et la taille du corps.



(a) Rapports entre le métabolisme basal (MB) et la taille corporelle chez divers mammifères. L'éléphant est un million de fois plus gros que la musaraigne.



(b) Rapports entre le MB par kilogramme de masse corporelle et la taille corporelle chez les mêmes mammifères qu'en (a).

INTERPRÉTEZ LES DONNÉES ► En examinant le graphique (a), un observateur affirme que le métabolisme basal d'un groupe de 100 spermophiles est le même que celui de 1 chien. Un second observateur jette un coup d'œil au graphique et indique qu'il n'est pas d'accord. Qui a raison et pourquoi ?

rapide, son volume sanguin, plus grand (comparativement à sa taille), et sa fréquence cardiaque, plus élevée. Il doit donc également consommer beaucoup plus d'aliments par unité de masse corporelle.

Les principes bioénergétiques associés à la taille d'un animal mettent en évidence l'influence des échanges d'énergie sur l'évolution des plans d'organisation corporelle. Plus la taille du corps est petite, plus le coût énergétique par gramme de tissu est élevé. Plus la taille est grande, plus le coût énergétique par

gramme de tissu diminue, mais alors une fraction toujours plus grande des tissus corporels est sollicitée pour l'échange, le soutien et la locomotion.

L'activité et la vitesse du métabolisme

L'activité des ectothermes et des endothermes influe grandement sur leur métabolisme. Tout comportement (que ce soit, pour un être humain, le fait de lire tranquillement à son bureau ou, pour un insecte, de déplier ses ailes) se traduit par une dépense d'énergie dépassant le métabolisme standard ou le métabolisme basal. Les métabolismes maximaux (les vitesses d'utilisation de l'ATP les plus élevées) sont observés pendant une activité de pointe, comme le soulèvement de masses lourdes, la course ou la nage rapide. En général, le métabolisme maximal d'un animal est inversement proportionnel à la durée de l'activité.

La vitesse moyenne de la consommation d'énergie quotidienne chez la plupart des animaux terrestres (ectothermes et endothermes) est de 2 à 4 fois celle du métabolisme standard ou du métabolisme basal. Les humains de la plupart des pays développés ont un métabolisme journalier moyen d'environ 1,5 fois le métabolisme basal; cela correspond à un mode de vie relativement sédentaire.

La fraction de l'« allocation énergétique » d'un animal dépend de nombreux facteurs, dont son environnement, son comportement, sa taille et sa thermorégulation. Dans la rubrique **Habilités scientifiques**, vous devrez interpréter les données concernant les allocations énergétiques annuelles de trois vertébrés terrestres.

La torpeur et la conservation de l'énergie

En dépit de leurs nombreuses adaptations homéostatiques, les animaux sont obligés occasionnellement de faire face à des situations qui les poussent aux limites de leur capacité à équilibrer leurs allocations énergétiques. Par exemple, pendant certaines saisons de l'année (ou certains moments de la journée), la température peut atteindre des valeurs très élevées ou très basses, ou encore les aliments peuvent manquer. Pour économiser l'énergie tout en évitant de se trouver dans des circonstances difficiles ou dangereuses, certains animaux entrent dans un état de **torpeur**, c'est-à-dire un état physiologique caractérisé par une activité réduite au minimum et par un ralentissement du métabolisme.

Beaucoup de petits mammifères et d'oiseaux présentent une torpeur quotidienne qui semble adaptée à leur mode d'alimentation. Ainsi, certaines chauves-souris se nourrissent la nuit et tombent dans un état de torpeur le jour, quand elles sont inactives. De même, les mésanges et les colibris se nourrissent le jour et entrent souvent dans un état de torpeur pendant les nuits fraîches.

Tous les endothermes qui manifestent une torpeur quotidienne sont relativement petits, les gros mammifères étant incapables d'abaisser rapidement leur température interne. Quand ils sont actifs, la vitesse de leur métabolisme est accélérée et ils consomment beaucoup d'énergie. La variation de la température corporelle, et donc l'économie d'énergie, peut être remarquable: la température corporelle de la mésange tombe à 10 °C, la nuit, alors que celle de certains colibris peut passer de 40 °C, le jour, à 15 °C, la nuit.

L'**hibernation** est un état de torpeur prolongée, qui constitue une adaptation au froid hivernal et à la pénurie d'aliments pendant cette saison. Quand un mammifère entre en hibernation, sa température corporelle diminue; en fait, le thermostat de son corps est réglé à une température plus basse, mais il continue de fonctionner. Certains mammifères en hibernation maintiennent une température de 1 à 2 °C; dans au moins un cas, celui du spermophile arctique (*Spermophilus parryi*), la température corporelle peut même descendre légèrement au-dessous de 0 °C, ce qui laisse le spermophile dans un état de surfusion (sans congélation). Périodiquement, environ toutes les deux semaines, les animaux en hibernation se réveillent; leur température corporelle augmente et ils s'activent brièvement avant de retomber en hibernation.

Pendant l'hibernation, le métabolisme peut être 20 fois plus lent que lorsque l'animal maintient sa température à sa valeur normale (entre 36 et 38 °C). Les animaux qui hibernent, comme les spermophiles, sont donc en mesure de survivre aux longs mois d'hiver en disposant de réserves limitées d'énergie, emmagasinées dans les tissus de leur corps ou entassées dans leur terrier. De la même façon, le ralentissement du métabolisme et l'inactivité qui caractérisent l'*estivation*, ou torpeur estivale, permettent à certains animaux de survivre aux longues périodes de chaleur en comptant sur des réserves limitées d'eau.

Qu'arrive-t-il au rythme circadien d'un animal en hibernation? Dans le passé, certains chercheurs avaient observé des rythmes biologiques quotidiens chez des animaux en hibernation. Toutefois, dans certains cas, ces animaux se trouvaient probablement dans un état de torpeur dont ils pouvaient facilement émerger, plutôt qu'en hibernation « profonde ». Plus récemment, un groupe de chercheurs français a abordé la question sous un angle différent. Au lieu d'examiner les rythmes régulés par l'horloge biologique, ces chercheurs se sont plutôt penchés sur son mécanisme (**figure 40.22**). Les observations qu'ils ont effectuées sur le hamster européen (*Cricetus cricetus*) ont permis de constater que les composants moléculaires de l'horloge cessaient d'osciller durant l'hibernation. Cette découverte appuie l'hypothèse selon laquelle l'horloge circadienne cesse de fonctionner durant l'hibernation, du moins chez cette espèce.

▼ Un muscardin (*Muscardinus avellanarius*) en hibernation.



Interpréter des diagrammes circulaires

■ EN QUOI LES ALLOCATIONS ÉNERGÉTIQUES DE TROIS VERTÉBRÉS TERRESTRES DIFFÉRENT-ELLES ? ■

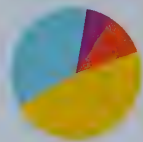
Pour explorer les processus bioénergétiques des animaux, nous allons examiner les allocations énergétiques annuelles de trois vertébrés terrestres dont la taille et la stratégie de thermorégulation varient : un manchot d'Adélie mâle (*Pygoscelis adeliae*) de 4 kg, une souris sylvestre femelle (*Peromyscus maniculatus*) de 25 g (0,025 kg) et un python royal femelle (*Python regius*) de 4 kg. Le manchot a une bonne isolation contre le froid de son environnement antarctique, mais il doit dépenser de l'énergie lorsqu'il nage pour chercher de la nourriture, qu'il couve les œufs de sa partenaire et qu'il rapporte de la nourriture à ses petits. La minuscule souris sylvestre, elle, vit dans un environnement tempéré où la nourriture est facile à obtenir, mais sa petite taille lui fait perdre rapidement sa chaleur corporelle. Contrairement au manchot et à la souris, le python est ectotherme, et sa croissance dure toute la vie. La femelle produit des œufs, mais elle ne les couve pas. Dans cet exercice, vous allez comparer les dépenses d'énergie de ces animaux au regard de cinq fonctions importantes : le métabolisme basal (standard), la reproduction, la thermorégulation, l'activité et la croissance.

■ **MÉTHODE** ■ Les chercheurs ont calculé les allocations énergétiques de chaque animal à partir de mesures effectuées sur le terrain et en laboratoire.

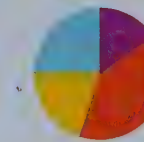
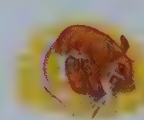
■ **RÉSULTATS** ■ Le diagramme circulaire convient bien à la comparaison des différences *relatives* entre les variables d'un ensemble. Dans les diagrammes circulaires montrés ici, chaque secteur représente une fonction, et la taille de chaque secteur représente la dépense énergétique annuelle relative correspondant à la fonction représentée (voir la légende de couleurs). La dépense énergétique annuelle totale de chaque animal est indiquée sous le diagramme qui le représente.

INTERPRÉTEZ LES DONNÉES ▼

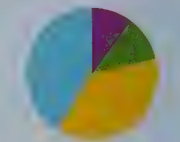
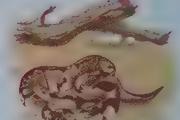
- Pour estimer la part de chaque secteur dans un diagramme, rappelez-vous que le cercle entier représente 100 %, que la moitié du cercle correspond donc à 50 %, et ainsi de suite. Quel pourcentage de l'allocation énergétique de la souris va au métabolisme basal ? Quel pourcentage de l'allocation du manchot correspond à ses activités ?
- Indépendamment de la taille des secteurs, en quoi les trois diagrammes circulaires diffèrent-ils pour ce qui est des fonctions représentées et non représentées ? Expliquez ces différences.
- Quel animal dépense une plus grande partie de son allocation énergétique pour la thermorégulation : le manchot ou la souris ? Pourquoi ?
- Maintenant, examinez la dépense énergétique annuelle *totale* de chaque animal. Dans une année, combien le manchot dépense-t-il d'énergie de plus que le python, dont la taille est similaire ?
- Quel animal dépense le plus de kilojoules par an pour sa thermorégulation ?
- Si vous mesuriez l'allocation énergétique du manchot pendant quelques mois seulement plutôt que durant toute une année, vous pourriez constater que la fonction « croissance » représente une part considérable du diagramme circulaire. Sachant que la croissance des manchots est terminée quand ils arrivent à l'âge adulte, comment expliqueriez-vous cette observation ?



Manchot d'Adélie mâle de 4 kg
1 420 000 kJ/an



Souris sylvestre femelle de 0,025 kg
16 700 kJ/an



Python royal femelle de 4 kg
33 400 kJ/an

Légende

- Métabolisme basal (standard)
- Reproduction
- Thermorégulation
- Activités diverses
- Croissance

Sources des données : M. A. Chappell et coll., Energetics of foraging in breeding Adelie penguins, *Ecology* 74: 2450-2461 (1993); M. A. Chappell et coll., Voluntary running in deer mice: Speed, distance, energy costs, and temperature effects, *Journal of Experimental Biology* 207: 3839-3854 (2004); T. M. Ellis et M. A. Chappell, Metabolism, temperature relations, maternal behavior, and reproductive energetics in the ball python (*Python regius*), *Journal of Comparative Physiology B* 157: 393-402 (1987).

Qu'arrive-t-il à l'horloge circadienne durant l'hibernation ?

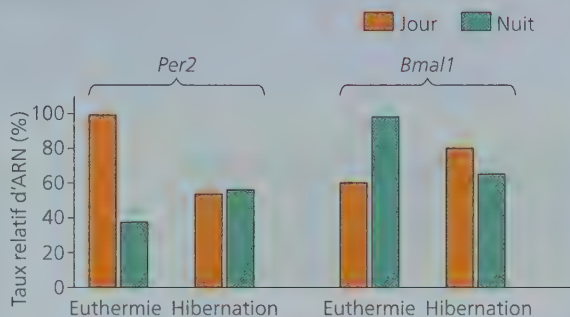
■ **HYPOTHÈSE** ■ Paul Pévet et ses collègues de l'Université Louis-Pasteur à Strasbourg, en France, ont étudié les composants moléculaires de l'horloge circadienne chez le hamster européen (*Cricetus cricetus*). Ils ont émis l'hypothèse selon laquelle l'horloge biologique continuerait de fonctionner durant l'hibernation. Si tel est le cas, la variation circadienne des taux relatifs d'ARN des gènes *Per2* et *Bmal1* devrait être semblable en activité normale (euthermie) et en hibernation.

■ **EXPÉRIENCE** ■ Pour déterminer si l'horloge biologique de 24 heures continue de fonctionner durant l'hibernation, Pévet et ses collègues ont mesuré les taux d'ARN de deux gènes des rythmes circadiens – *Per2* et *Bmal1* – durant l'euthermie et durant l'hibernation, qui se déroulait dans une obscurité continue. Les échantillons d'ARN provenaient des noyaux suprachiasmatiques (NSC), une paire de structures de l'encéphale mammalien qui régulent les rythmes circadiens.

■ **CONCLUSION** ■ L'hibernation modifie la variation circadienne des taux d'ARN des deux gènes des rythmes circadiens du hamster. Des expériences subséquentes ont montré que cette modification n'était pas simplement due à l'obscurité durant l'hibernation. En effet, chez les animaux qui n'étaient pas en hibernation, le degré de luminosité n'influait pas le taux d'ARN. Les chercheurs ont conclu que l'horloge biologique cessait de fonctionner chez le hamster européen en hibernation et peut-être aussi chez d'autres mammifères au cours de cet état léthargique.

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'animal dans son ensemble, depuis les divers types de tissus jusqu'à l'homéostasie. Nous avons également vu comment les animaux échangent des substances avec leur milieu et comment leur taille ainsi que leur activité influent sur la vitesse de leur métabolisme. Dans la suite de la présente partie du manuel, nous verrons surtout comment les organes et systèmes spécialisés permettent aux animaux de survivre. La sixième partie portait sur le même sujet, mais chez les végétaux. La **figure 40.23** des deux prochaines pages montre quelques-unes des différences et des ressemblances entre les végétaux et les animaux quant aux adaptations évolutives. Cette figure est donc à la fois une synthèse de la sixième partie, une introduction à la septième partie et, plus important encore, une illustration des liens qui unifient les innombrables formes de vie.

■ RÉSULTATS ■



Source des données : F. G. Revel et coll., The circadian clock stops ticking during deep hibernation in the European hamster, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104: 13816-13820 (2007).

ET SI ? ► Imaginez que vous découvrez un nouveau gène chez le hamster et que vous constatez que les taux d'ARN de ce gène sont constants durant l'hibernation. Quelle conclusion en tireriez-vous au sujet des taux d'ARN diurnes et nocturnes durant l'euthermie ?

RETOUR SUR LE CONCEPT 40.4

1. Si une souris et un petit lézard de même masse (tous les deux au repos) sont placés dans un respiromètre, dans des conditions ambiantes identiques, quel animal consommera-t-il de l'O₂ à une vitesse plus grande ? Expliquez votre réponse.
2. Lequel, du chat domestique ou du lion d'Afrique (en cage dans un zoo), doit manger quotidiennement des aliments correspondant à une plus grande proportion de son poids ? Expliquez votre réponse.
3. **ET SI ?** ► Supposons que les animaux d'un zoo se reposent confortablement et demeurent au repos pendant que le soir descend et que la température baisse. Si la baisse de température est suffisamment importante pour causer une modification de la vitesse du métabolisme, quels changements peut-on prévoir chez un alligator et chez un lion ?

Voir les réponses proposées à l'appendice A.

FAITES DES LIENS

Défis de la survie et solutions chez les végétaux et les animaux

Les organismes multicellulaires sont tous confrontés aux mêmes défis. Lorsqu'on compare les solutions auxquelles l'évolution a donné lieu chez les végétaux et les animaux, on voit bien l'unité, c'est-à-dire les éléments communs, et la diversité, démontrée par les caractéristiques distinctes, au sein de ces deux lignées.



▲ Mode de nutrition

Tous les êtres vivants dépendent de leur environnement pour obtenir l'énergie et le carbone nécessaires à leur croissance, à leur survie et à leur reproduction. Les végétaux sont autotrophes, c'est-à-dire qu'ils tirent leur énergie de la photosynthèse et que leur carbone provient de sources inorganiques, tandis que les animaux sont hétérotrophes, et donc ingèrent des aliments dont ils tirent l'énergie et le carbone nécessaires à leurs besoins. Les adaptations évolutives qu'on observe chez les végétaux et les animaux concordent avec ces deux façons d'assurer la nutrition. Ainsi, la grande surface des feuilles ainsi que leur nombre (à gauche) augmentent l'absorption de la lumière pour la photosynthèse, alors que le lynx roux (à droite) doit compter sur sa furtivité, sa rapidité et ses griffes effilées pour chasser sa nourriture et en extraire efficacement l'énergie. (Voir les figures 36.2 et 41.16.)

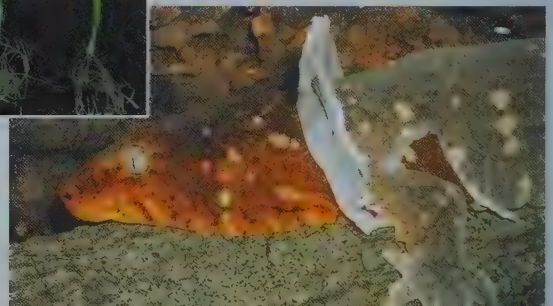
▲ Réponse à l'environnement

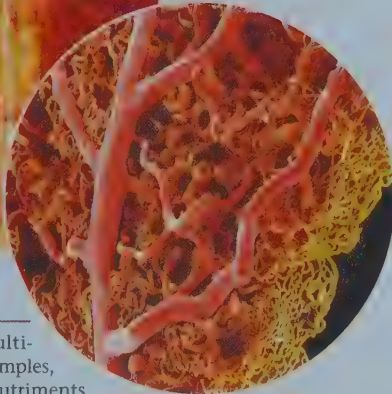
Toutes les formes de vie doivent percevoir les conditions de leur environnement et y répondre adéquatement. Leurs organes spécialisés captent les signaux de l'environnement. Par exemple, la tête florale d'un tournesol (à gauche) et l'œil d'un insecte (à droite) contiennent tous deux des photorécepteurs qui détectent la lumière. Les signaux environnementaux activent des protéines réceptrices spécifiques, ouvrant des voies de transduction du signal qui déclenchent des changements cellulaires coordonnés par la communication chimique et électrique. (Voir les figures 39.19 et 50.15.)



▼ Croissance et régulation

Tant chez les végétaux que chez les animaux, la croissance et la physiologie sont régulées par des substances chimiques : des hormones chez les animaux et des substances de croissance chez les végétaux. Chez les végétaux, les régulateurs de croissance agissent localement ou circulent dans le corps de la plante. Elles régissent le mode de croissance, la floraison, le développement des fruits et d'autres fonctions (à gauche). Chez les animaux, les hormones circulent dans tout le corps et exercent leur action sur des tissus cibles, assurant ainsi les processus homéostatiques et les événements développementaux tels que la mue (ci-dessous). (Voir les figures 39.5 et 45.12.)





▲ Transport

Tous les organismes multicellulaires, sauf les plus simples, doivent transporter les nutriments et les déchets d'une région à une autre dans leur corps. La solution évolutive la plus répandue est le système de vaisseaux tubulaires, bien que l'on observe des variations dans les mécanismes par lesquels les nutriments et les déchets circulent dans ce système. Les végétaux utilisent l'énergie solaire pour transporter l'eau, les minéraux et les sucres dans leurs tubes spécialisés (à gauche). Chez les animaux, une pompe (le cœur) fait circuler le liquide circulatoire dans des vaisseaux (à droite). (Voir les figures 35.10 et 42.5.)



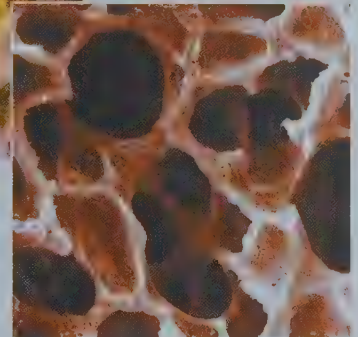
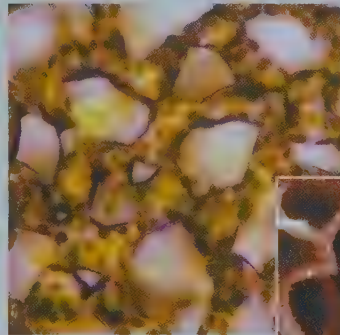
▲ Absorption

Les organismes doivent absorber des nutriments. Les poils absorbants (ou poils racinaires; à gauche) ainsi que les villosités (saillies) qui tapissent l'intestin des vertébrés (à droite) augmentent la surface d'absorption. (Voir les figures 28.4 et 41.12.)



► Reproduction

Dans la reproduction sexuée, des tissus et des structures spécialisés produisent et échangent des gamètes. La progéniture dispose généralement de réserves nutritionnelles qui permettent une croissance et un développement rapides. Par exemple, les graines (à gauche) renferment des réserves nutritionnelles qui fournissent l'énergie nécessaire à la jeune plantule, tandis que le lait répond aux besoins nutritionnels des jeunes mammifères (à droite). (Voir les figures 38.8 et 46.10.)



▲ Échanges gazeux

L'échange de certains gaz avec l'environnement est vital. Chez les végétaux et les animaux, la respiration nécessite l'absorption d' O_2 et le rejet du CO_2 . Lors de la photosynthèse, l'échange net s'effectue dans la direction opposée: absorption de CO_2 et rejet d' O_2 . Chez les végétaux comme chez les animaux, l'évolution a favorisé les tissus hautement alvéolés qui augmentent la surface disponible pour les échanges gazeux. Le mésophylle spongieux de la feuille (à gauche) ainsi que les alvéoles des poumons (à droite) en sont des exemples. (Voir les figures 35.18 et 42.24.)

FAITES DES LIENS ► Comparez les adaptations qui permettent aux végétaux et aux animaux de survivre dans les environnements très chauds et très froids. Consultez les concepts 39.4 et 40.3.

RÉVISION DU CHAPITRE 40



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

Résumé des concepts clés

CONCEPT 40.1

Il y a une corrélation entre les structures et les fonctions animales à tous les niveaux d'organisation (p. 956 à 963)

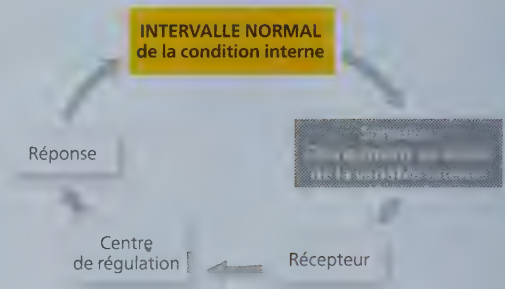
- Les lois de la physique contraignent l'évolution de la taille et de la morphologie d'un animal. Ces contraintes contribuent à l'évolution convergente, caractérisée par des adaptations indépendantes les unes des autres, chez différentes espèces vivant dans des conditions environnementales semblables.
- Chacune des cellules d'un animal multicellulaire doit avoir accès à un environnement aqueux. Les organismes saciformes ou plats, constitués de deux couches de cellules, optimisent les échanges avec le milieu environnant. Les plans d'organisation corporelle plus complexes font appel à des surfaces intérieures aux replis multiples, spécialisées dans l'échange des substances avec l'environnement.
- Le corps d'un animal est organisé selon une hiérarchie déterminée par les regroupements successifs composés respectivement de cellules, de **tissus**, d'**organes** et de **systèmes**. Les quatre principaux types de tissus remplissent des fonctions distinctes. Les **tissus épithéliaux** recouvrent l'extérieur du corps et des organes, et tapissent les cavités internes; les **tissus conjonctifs** servent à fixer et à soutenir les autres tissus; le **tissu musculaire** se contracte et amène le corps à se mouvoir; et le **tissu nerveux** transmet des potentiels d'action dans tout l'organisme de l'animal.
- Le **système endocrinien** et le **système nerveux** sont les deux principaux systèmes de communication entre les diverses parties du corps. Le système endocrinien émet dans la circulation sanguine des molécules appelées **hormones** qui servent de signaux. Chaque hormone exerce ses effets propres, mais elle n'agit que sur les cellules dotées des récepteurs spécifiques qui les rendent sensibles à l'action de cette hormone. Le système nerveux envoie des messages à diverses parties du corps. Pour ce faire, il utilise des circuits cellulaires spécialisés qui font intervenir des signaux électriques et chimiques.

? Au regard des échanges de substances avec l'environnement, en quoi une forme sphérique est-elle désavantageuse pour un animal de grande taille?

CONCEPT 40.2

De nombreux animaux maintiennent leur milieu interne à l'aide de mécanismes de rétroaction (p. 963 à 966)

- On dit d'un animal qu'il est **régulateur** s'il assure la régulation d'une condition interne et **tolérant** s'il laisse fluctuer une condition interne selon les changements externes.
- Les mécanismes de l'homéostasie font habituellement intervenir la **rétro-inhibition**, dans laquelle la **réponse** atténue le **stimulus**.
- À l'inverse, la **rétroactivation** déclenche une réponse qui intensifie le stimulus et, souvent, provoque un changement d'état, par exemple durant le travail de l'accouchement.



- Certains changements régulés du milieu interne sont essentiels aux fonctions normales. Les **rythmes circadiens** sont des fluctuations quotidiennes du métabolisme et du comportement. Ils suivent le cycle de clarté et d'obscurité de l'environnement. D'autres changements environnementaux déclenchent l'**acclimatation**, un changement temporaire de l'état d'équilibre.

? Est-il exact de définir l'homéostasie comme étant un milieu interne constant? Expliquez votre réponse.

CONCEPT 40.3

Les processus homéostatiques qui président à la thermorégulation font intervenir la forme, la fonction et le comportement (p. 966 à 972)

- Un animal maintient sa température interne dans un intervalle compatible avec la vie grâce au processus de **thermorégulation**. Les animaux **endothermes** obtiennent la majeure partie de leur chaleur par leur métabolisme. Les animaux **ectothermes** l'obtiennent principalement de sources externes. L'endothermie requiert une plus grande dépense énergétique que l'ectothermie. La température corporelle peut varier selon la température du milieu externe, comme chez les **poikilothermes**, ou être relativement constante, comme chez les **homéothermes**.
- Dans la thermorégulation, des adaptations physiologiques et comportementales contribuent à équilibrer les gains et les pertes de chaleur, lesquels ont lieu par rayonnement, évaporation, convection et conduction. L'isolation et l'**échange thermique à contre-courant** réduisent les pertes de chaleur, tandis que le halètement, la sudation et la baignade augmentent l'évaporation, ce qui refroidit le corps. De nombreux ectothermes et endothermes modifient la vitesse des échanges thermiques avec le milieu par **vasoconstriction** ou **vasodilatation** ainsi que par l'intermédiaire de réactions comportementales.
- Beaucoup de mammifères et d'oiseaux modifient leur niveau d'isolation thermique selon les variations de la température de l'environnement. Chez les ectothermes, divers changements cellulaires favorisent l'acclimatation aux changements de température.
- Chez les mammifères, l'**hypothalamus** abrite le thermostat qui régule la température corporelle. La fièvre entraîne une réinitialisation du thermostat à un intervalle normal plus élevé en réaction à une infection.

? Compte tenu du fait que les humains recourent à la thermorégulation, expliquez pourquoi votre peau est plus fraîche que le centre de votre corps.

Les besoins énergétiques sont fonction de la taille, de l'activité et de l'environnement (p. 972 à 979)

- Les animaux se procurent de l'énergie chimique en consommant des aliments. Ils transforment ensuite l'énergie de ces aliments en ATP pour une utilisation à court terme. Chez les animaux, la **vitesse du métabolisme** est la quantité totale d'énergie utilisée par unité de temps.
- Dans des conditions similaires et pour des animaux de même taille, le **métabolisme basal** des endothermes est considérablement plus rapide que le **métabolisme standard** des ectothermes. La vitesse du métabolisme par unité de masse est en relation inverse avec la taille du corps chez les animaux d'espèces semblables. Un animal dépense de l'énergie en fonction de son métabolisme basal ou de son métabolisme standard, de ses activités, de son homéostasie (par exemple, la régulation thermique), de sa croissance et de sa reproduction.
- La **torpeur** est un ralentissement de l'activité et du métabolisme. Elle sert à conserver l'énergie pendant les variations extrêmes de l'environnement. Cet état de torpeur peut se produire selon un rythme circadien (torpeur quotidienne), en hiver (**hibernation**) ou en été (estivation).

? Pourquoi les animaux de petite taille respirent-ils plus rapidement que les animaux de grande taille ?

Évaluation

NIVEAU 1 : CONNAISSANCES ET COMPRÉHENSION

1. Le tissu composé de matériaux (fibres et substance fondamentale) et présent principalement à l'extérieur des cellules est :
 - a) le tissu épithélial.
 - b) le tissu conjonctif.
 - c) le tissu musculaire.
 - d) le tissu nerveux.
2. Parmi les éléments suivants, lequel augmenterait la vitesse des échanges thermiques entre un animal et son milieu ?
 - a) L'isolation par les plumes ou les poils.
 - b) La vasoconstriction.
 - c) L'exposition de la surface du corps au vent.
 - d) L'échange thermique à contre-courant.
3. Examinez l'allocation énergétique d'un humain, d'un éléphant, d'un manchot, d'une souris et d'un serpent. Parmi ces organismes, lequel aura la dépense d'énergie annuelle totale la plus élevée et lequel aura la plus grande dépense d'énergie par unité de masse ?
 - a) L'éléphant; la souris.
 - b) L'éléphant; l'humain.
 - c) La souris; le serpent.
 - d) Le manchot; la souris.

NIVEAU 2 : APPLICATION ET ANALYSE

4. Soit deux cellules de forme identique, l'une étant plus petite que l'autre. Chez la plus grande :
 - a) la surface est plus faible.
 - b) la surface par unité de volume est plus faible.
 - c) le rapport surface-volume est identique à celui de la petite cellule.
 - d) le rapport entre le cytoplasme et le noyau est plus faible.
5. Chez un animal, les gains d'énergie et de matière dépassent les pertes d'énergie et de matière :
 - a) s'il est endotherme, car il doit toujours absorber davantage d'énergie en raison de son métabolisme élevé.
 - b) s'il est à la recherche de nourriture.
 - c) s'il est en période de croissance et que sa masse augmente.
 - d) Aucune de ces réponses : cela n'arrive jamais, car l'homéostasie équilibre toujours les allocations d'énergie et de matière.
6. Vous étudiez un grand reptile tropical dont la température corporelle est élevée et relativement stable. Parmi les arguments suivants, lequel vous permet de déterminer s'il est endotherme ou ectotherme ?
 - a) Sa température élevée et constante vous permet d'affirmer que c'est un endotherme.
 - b) Il s'agit d'un ectotherme puisque sa température corporelle et son métabolisme changent en fonction de la température ambiante.
 - c) Il s'agit d'un ectotherme, car sa température corporelle correspond à la température du milieu quand celle-ci est élevée et stable.
 - d) La vitesse de son métabolisme étant plus élevée que celle d'une espèce apparentée qui vit dans les forêts tempérées, ce reptile est endotherme et son cousin est ectotherme.
7. Parmi les animaux suivants, lequel consacre le pourcentage le plus important de son allocation énergétique à sa régulation homéostatique ?
 - a) La méduse (un invertébré).
 - b) Le serpent dans une forêt tempérée.
 - c) L'insecte dans le désert.
 - d) L'oiseau dans le désert.
8. **FAITES UN DESSIN** ► Faites un schéma illustrant les circuits de commande qui vous permettraient de conduire une voiture à une vitesse à peu près constante sur une route accidentée. Indiquez les caractéristiques qui représentent un récepteur, un stimulus ou une réponse.

Voir les réponses proposées à l'appendice A.

