



VOS OUTILS INTERACTIFS



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

▲ **Figure 41.1** Comment une loutre peut-elle fabriquer de la fourrure à partir d'un crabe ?

CONCEPTS CLÉS

- 41.1** Le régime alimentaire des animaux doit fournir de l'énergie chimique, des molécules organiques et des éléments nutritifs essentiels
- 41.2** La transformation des aliments comprend l'ingestion, la digestion, l'absorption et l'élimination
- 41.3** Les différents organes du système digestif des mammifères assurent la transformation progressive de la nourriture
- 41.4** Les adaptations évolutives du système digestif des vertébrés sont corrélées avec le régime alimentaire
- 41.5** Des circuits de rétroaction régulent la digestion, le stockage de l'énergie et l'appétit

La nécessité de s'alimenter

C'est l'heure du repas pour la loutre de mer (*Enhydra lutris*) de la **figure 41.1** (et pour le crabe également, quoique dans un tout autre sens !). Les mâchoires de la loutre déchiquetteront les muscles et les autres tissus de sa proie, puis les acides et les enzymes de son système digestif dégraderont ces petits morceaux de nourriture et les transformeront en molécules plus petites encore, que son corps absorbera. Dans son ensemble, ce processus illustre la **nutrition** chez les animaux : un animal ingère de la nourriture, la décompose, l'absorbe et élimine les déchets.

Évidemment, ce ne sont pas tous les animaux qui, à l'instar de la loutre de mer, se nourrissent de poissons, de crabes, d'oursins et d'ormeaux, mais ils ont tous en commun de consommer d'autres organismes, que ceux-ci soient morts ou vivants, entiers ou en morceaux. Contrairement aux végétaux, les animaux doivent ingérer de la nourriture pour obtenir leur énergie et pour se procurer les molécules organiques qui leur permettront de fabriquer de nouvelles molécules, de nouvelles cellules et de nouveaux tissus. Les animaux ont donc en commun le besoin de se nourrir, mais ils diffèrent par leur mode d'alimentation. Les **herbivores**, tels que les bovins, les concombres de mer et les chenilles, se nourrissent principalement de végétaux ou d'algues. Les **carnivores**, comme les loutres de mer, les buses et les araignées, dévorent d'autres animaux. Enfin, les rats et les autres **omnivores** (du latin *omni*, qui signifie « tout ») ne mangent pas réellement tout ce qu'ils trouvent, mais leur régime alimentaire est très varié puisqu'il peut se composer d'animaux aussi bien que de végétaux ou d'algues. Les humains que nous sommes sont également omnivores, tout comme les cafards et les corbeaux.

Les termes *herbivore*, *carnivore* et *omnivore* correspondent aux types d'aliments *généralement* consommés. En réalité, la plupart des animaux ont un comportement opportuniste à l'égard de l'alimentation; ils consomment de la nourriture qui ne relève pas de leur régime alimentaire habituel quand leurs aliments favoris ne sont pas disponibles. Par exemple, les cerfs sont herbivores, mais en plus de se nourrir d'herbe et d'autres plantes, il leur arrive de consommer des petits animaux tels que des insectes ou des vers, ou des œufs d'oiseaux. Notons que les micro-organismes font inévitablement partie du régime alimentaire de tout animal.

Pour survivre et se reproduire, les animaux doivent assurer un équilibre entre la consommation, le stockage et l'utilisation de la nourriture. Par exemple, les loutres de mer maintiennent un métabolisme rapide en mangeant quotidiennement jusqu'à 25% de leur masse corporelle. Une alimentation excessive, insuffisante ou inappropriée peut compromettre la santé d'un animal. Le présent chapitre porte sur les besoins nutritionnels des animaux, les adaptations auxquelles ils font appel pour obtenir des aliments et les transformer, ainsi que la régulation des apports et des dépenses énergétiques.

CONCEPT **41.1**

Le régime alimentaire des animaux doit fournir de l'énergie chimique, des molécules organiques et des éléments nutritifs essentiels

Dans l'ensemble, une alimentation adéquate doit satisfaire trois grands besoins nutritionnels: fournir de l'énergie chimique pour les processus cellulaires; apporter des molécules organiques pour la fabrication de macromolécules; et procurer des nutriments essentiels.

Le fonctionnement des cellules, des tissus et des organes ainsi que les activités des animaux eux-mêmes dépendent des sources

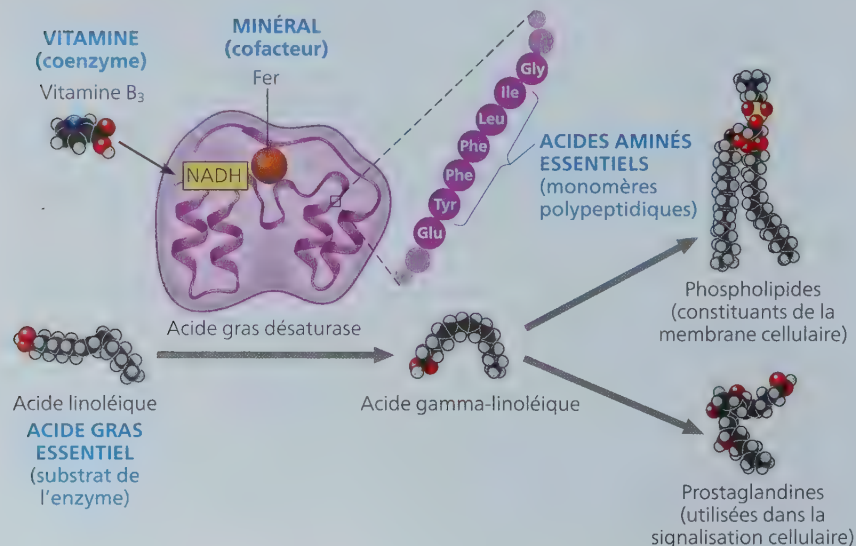
d'énergie chimique fournies par les aliments. Cette énergie sert à produire l'ATP qui entretient les réactions cellulaires, depuis la réplication de l'ADN et la division cellulaire jusqu'à la vision et au vol (voir le concept 8.3). Pour satisfaire les besoins en ATP, les animaux ingèrent et digèrent des nutriments, dont des glucides, des protéines et des lipides, qu'ils utilisent dans la respiration cellulaire et dans le stockage d'énergie.

En plus de fournir aux animaux l'énergie destinée à la production de l'ATP, l'alimentation doit procurer les matériaux de base nécessaires à la biosynthèse. Pour fabriquer les molécules complexes essentielles à sa croissance, à son maintien et à sa reproduction, un animal doit trouver deux types de molécules organiques dans les aliments: une source de carbone organique (comme les monosaccharides et les disaccharides) et une source d'azote organique (généralement les acides aminés provenant de la digestion des protéines). À partir de ces matériaux, il peut fabriquer une grande variété de molécules organiques.

Les nutriments essentiels

Le troisième grand besoin nutritionnel des animaux concerne les **nutriments essentiels**, qu'ils sont incapables de synthétiser eux-mêmes, mais qui leur sont indispensables en raison des fonctions vitales qu'ils exercent dans les cellules. Par exemple, ils servent de substrats aux enzymes, en devenant des coenzymes ou en étant des cofacteurs dans des réactions biosynthétiques (**figure 41.2**). On classe les nutriments essentiels en quatre catégories: les acides aminés essentiels, les acides gras essentiels, les vitamines et les minéraux.

En général, un animal qui se nourrit de végétaux ou d'autres animaux obtiendra tous les acides aminés et les acides gras essentiels, ainsi que les vitamines et les minéraux nécessaires. Les besoins en nutriments varient d'une espèce à l'autre. Ainsi, la plupart des animaux peuvent synthétiser eux-mêmes l'acide ascorbique (vitamine C) à partir des autres nutriments qu'ils ingèrent, mais certains animaux (dont les humains) ne le peuvent pas et doivent avoir un régime alimentaire qui leur procure cette vitamine.



◀ **Figure 41.2 Les nutriments essentiels et leurs rôles.** Cet exemple de réaction biosynthétique illustre quelques-unes des fonctions courantes des nutriments essentiels. La conversion de l'acide linoléique en acide gamma-linoléique par une enzyme, l'acide gras désaturase, fait intervenir les quatre classes de nutriments essentiels (en bleu). Notez que, chez les animaux, presque toutes les enzymes ainsi que d'autres protéines contiennent quelques acides aminés essentiels, comme le montre la séquence partielle de l'acide gras désaturase (en violet).

Les acides aminés essentiels

Tous les organismes ont besoin des 20 acides aminés en quantité suffisante pour fabriquer un ensemble complet de protéines (voir la figure 5.14). Les végétaux et les microorganismes peuvent normalement produire tous ces acides aminés, mais la plupart des animaux possèdent les enzymes qu'il faut pour en synthétiser environ la moitié, du moment que leur régime alimentaire comporte du soufre et une source d'azote organique. Les autres doivent se trouver déjà préformés dans les aliments, d'où leur nom d'**acides aminés essentiels**. Pour beaucoup d'animaux, dont les humains (adultes), huit acides aminés sont indispensables : l'isoleucine, la leucine, la lysine, la méthionine, la phénylalanine, la thréonine, le tryptophane et la valine. (Un neuvième acide aminé, l'histidine, est nécessaire au nourrisson.)

Les protéines des produits d'origine animale (comme la viande, les œufs et le fromage) sont dites *complètes*, c'est-à-dire qu'elles contiennent tous les acides aminés essentiels, dans des proportions adéquates. En revanche, la plupart des protéines végétales sont dites *incomplètes*, car il leur manque un ou plusieurs acides aminés essentiels. Ainsi, le maïs ne contient pas de tryptophane ni de lysine, tandis que les légumineuses sont dépourvues de méthionine. Les personnes végétariennes peuvent néanmoins obtenir facilement tous les acides aminés essentiels en consommant un large éventail de protéines végétales.

Les acides gras essentiels

Les animaux ont besoin des acides gras pour synthétiser plusieurs de leurs constituants cellulaires, notamment les phospholipides membranaires, les molécules de signalisation et les graisses de réserve. Ils sont capables de synthétiser la plupart des acides gras, sauf ceux qui comportent certaines liaisons doubles dont la formation requiert l'intervention de certaines enzymes qu'ils ne possèdent pas. Les animaux doivent donc trouver dans leur alimentation ces **acides gras essentiels** qu'ils sont incapables de fabriquer eux-mêmes. Chez les mammifères, l'acide linoléique fait partie de ce groupe (voir la figure 41.2). En règle générale, la consommation de graines, de produits céréaliers, de légumes et de poissons permet aux animaux d'obtenir suffisamment d'acides gras essentiels pour couvrir leurs besoins.

Les vitamines

Albert Szent-Gyorgyi, qui a découvert la vitamine C, affirmait : « Une vitamine est une substance qui vous rend malade *si vous n'en consommez pas*. » Les **vitamines** sont des molécules organiques nécessaires en très petites quantités (de 0,01 à 100 mg par jour, selon la vitamine).

Les 13 vitamines indispensables à l'humain diffèrent par leurs propriétés chimiques et leurs fonctions (**tableau 41.1**). Par exemple, la vitamine B₂ est hydrosoluble, et dans l'organisme,

Tableau 41.1 Les besoins en vitamines chez les humains

Vitamines	Principales sources alimentaires	Principales fonctions	Symptômes de carence
Vitamines hydrosolubles			
B ₁ (thiamine)	Porc, légumineuses, arachides et céréales à grains entiers	Coenzyme utilisée pour éliminer le CO ₂ des composés organiques	Béribéri (picotements, troubles de la coordination, altération de la fonction cardiaque)
B ₂ (riboflavine)	Produits laitiers, viandes, céréales enrichies et légumes	Constituant des coenzymes FAD et FMN	Lésions cutanées, notamment fissures aux commissures des lèvres
B ₃ (niacine)	Noix, viandes et céréales	Constituant des coenzymes NAD ⁺ et NADP ⁺	Lésions cutanées et gastro-intestinales, hallucinations, confusion mentale
B ₅ (acide pantothénique)	Viandes, produits laitiers, céréales à grains entiers, fruits et légumes	Constituant de la coenzyme A	Fatigue, perte de sensibilité, picotements dans les mains et les pieds
B ₆ (pyridoxine)	Viandes, légumes et céréales à grains entiers	Coenzyme utilisée dans le métabolisme des acides aminés	Irritabilité, convulsions, secousses musculaires et anémie
B ₇ (biotine)	Légumineuses, autres légumes et viandes	Coenzyme utilisée dans la synthèse des lipides, du glycogène et des acides aminés	Inflammation et desquamation cutanées, troubles neuromusculaires
B ₉ (acide folique)	Légumes verts, noix, légumineuses, céréales à grains entiers et foie d'animaux	Coenzyme participant au métabolisme des acides aminés et des acides nucléiques	Anémie et malformations congénitales
B ₁₂ (cobalamine)	Viandes, œufs et produits laitiers	Production des acides nucléiques et des érythrocytes	Anémie, perte de sensibilité, troubles de l'équilibre
C (acide ascorbique)	Agrumes, brocoli et tomates	Utilisée pour la synthèse du collagène; antioxydant	Scorbut (dégénérescence de la peau et des dents); cicatrisation lente
Vitamines liposolubles			
A (rétinol)	Légumes vert foncé et orange, fruits et produits laitiers	Constituant des pigments visuels; entretien des tissus épithéliaux	Cécité; problèmes cutanés, affaiblissement du système immunitaire
D	Produits laitiers et jaune d'œuf	Augmentation de l'absorption et de l'utilisation du calcium et du phosphore	Rachitisme (difformités osseuses) chez les enfants, ostéomalacie chez les adultes
E (tocophérol)	Huiles végétales, noix et graines	Antioxydant; protection des membranes cellulaires	Dégénérescence du système nerveux
K (phylloquinone)	Légumes verts et thé (est aussi élaborée par les bactéries du gros intestin)	Rôle important dans la coagulation du sang	Troubles de la coagulation du sang

elle est convertie en FAD, une coenzyme intervenant dans de nombreux processus métaboliques, dont la respiration cellulaire (voir la figure 9.12), tandis que la vitamine C, également hydrosoluble, est nécessaire à la production des tissus conjonctifs.

Parmi les vitamines liposolubles, il y a la vitamine A, incorporée aux pigments visuels, et la vitamine D, qui contribue à l'absorption du calcium et à la formation des os. Nos besoins en vitamine D sont variables, ce qui n'est pas le cas des autres vitamines. Pourquoi? Parce que nous la synthétisons à partir d'autres molécules lorsque notre peau est exposée à la lumière du soleil.

Pour les personnes dont l'alimentation n'est pas équilibrée, il peut être raisonnable de prendre des suppléments de vitamines qui fournissent la quantité quotidienne recommandée. Cependant, on ne sait pas encore si des doses massives de vitamines sont bénéfiques ou nuisibles à la santé. Un apport modérément excessif de vitamines hydrosolubles est probablement inoffensif, puisque les vitamines hydrosolubles en trop sont excrétées dans l'urine. Par contre, les vitamines liposolubles tendent à s'accumuler dans les graisses corporelles au lieu d'être éliminées, de sorte qu'une accumulation toxique est possible.

Les minéraux

Les **minéraux** fournis par les aliments, comme le fer ou le soufre, sont des nutriments inorganiques. Ils sont habituellement requis en très petites quantités, les apports quotidiens nécessaires variant de moins de 1 mg à environ 2 500 mg. Comme le montre le **tableau 41.2**, les minéraux remplissent plusieurs fonctions physiologiques chez les animaux. Certains sont

intégrés dans la structure des protéines; le fer, par exemple, est incorporé dans l'hémoglobine, qui transporte des molécules d'oxygène (O₂), ainsi que dans plusieurs enzymes (voir la figure 41.2). D'autres, comme le sodium, le potassium et le chlore, jouent un rôle important dans le fonctionnement du système nerveux et dans le maintien de l'équilibre osmotique entre les cellules et le liquide interstitiel. Chez les vertébrés, l'iode est un minéral contenu dans les hormones thyroïdiennes, qui régulent la vitesse du métabolisme. Les vertébrés ont également besoin d'une quantité relativement élevée de calcium et de phosphore pour la formation et l'entretien des os.

La consommation excessive de certains minéraux peut perturber l'équilibre homéostatique et nuire à la santé. Par exemple, l'excès de sodium est associé à l'hypertension artérielle. Il s'agit d'un problème répandu en Amérique du Nord, où les gens consomment en moyenne environ 20 fois plus de sel (chlorure de sodium) que l'exigent les besoins physiologiques. Une grande partie de ce sel est cachée dans les aliments transformés, sous emballage, même dans ceux qui n'ont pas de goût salé.

Les carences nutritionnelles

La **malnutrition** est un état qui résulte d'une alimentation qui ne fournit pas tous les nutriments essentiels. La malnutrition, qui touche une personne sur quatre dans le monde, compromet non seulement la santé, mais la survie. (La *sous-alimentation*, elle, résulte d'un apport énergétique insuffisant, comme nous le verrons plus loin.)

Tableau 41.2 Les besoins en minéraux chez les humains*

Minéraux	Principales sources alimentaires	Principales fonctions	Symptômes de carence	
Apport quotidien recommandé: plus de 200 mg	Calcium (Ca)	Produits laitiers, légumes vert foncé et légumineuses	Formation des os et des dents; coagulation sanguine; fonctions musculaires et nerveuses	Retard de croissance, perte de masse osseuse, tétanie musculaire
	Phosphore (P)	Produits laitiers, viandes et céréales	Formation des os et des dents; équilibre acidobasique; synthèse des nucléotides	Faiblesse, déminéralisation des os, perte de calcium
	Soufre (S)	Protéines de nombreuses sources	Constituant de certains acides aminés	Retard de croissance, fatigue, œdème
	Potassium (K)	Viandes, produits laitiers, nombreux fruits et légumes, céréales	Équilibre acidobasique; équilibre hydrique; transmission des potentiels d'action; synthèse protéique	Faiblesse musculaire, paralysie, nausées, insuffisance cardiaque
	Chlore (Cl)	Sel de table	Équilibre acidobasique; formation du suc gastrique; transmission des potentiels d'action; équilibre osmotique	Crampes musculaires, diminution de l'appétit
	Sodium (Na)	Sel de table	Équilibre acidobasique; équilibre hydrique; transmission des potentiels d'action	Crampes musculaires, diminution de l'appétit
	Magnésium (Mg)	Céréales à grains entiers et légumes verts feuillus	Cofacteur enzymatique; bioénergétique de l'ATP	Troubles neuromusculaires
Fer (Fe)	Viandes, œufs, légumineuses, céréales à grains entiers et légumes verts feuillus	Constituant de l'hémoglobine et des transporteurs d'électrons; cofacteur enzymatique	Anémie ferriprive, faiblesse, affaiblissement du système immunitaire, troubles de la thermorégulation	
Fluor (F)	Eau fluorée, thé et fruits de mer	Entretien de la structure des dents (et sans doute des os)	Fréquence accrue des caries dentaires	
Iode (I)	Fruits de mer, produits laitiers et sel iodé	Constituant des hormones thyroïdiennes	Goitre (hypertrophie thyroïdienne), hypothyroïdie, myxoœdème	

* D'autres minéraux sont requis en quantités infimes. Ce sont notamment le chrome (Cr), le cobalt (Co), le cuivre (Cu), le manganèse (Mn), le molybdène (Mo), le sélénium (Se) et le zinc (Zn). En outre, tous ces minéraux peuvent être nocifs si leur apport est excessif.

Les carences en nutriments essentiels

Un apport insuffisant de nutriments essentiels peut entraîner des déformations du squelette, diverses maladies, voire la mort. Par exemple, les os se fragilisent chez les cerfs et d'autres herbivores qui se nourrissent de végétaux poussant dans un sol dépourvu de phosphore. Dans ce type d'environnement, certains animaux de pâturage obtiennent les nutriments manquants en consommant des sources concentrées de sel ou d'autres minéraux (figure 41.3). De la même façon, certains oiseaux suppléent leurs carences nutritionnelles en mangeant des coquilles d'escargots, et certaines tortues, en ingérant des pierres.

Comme tous les animaux, il arrive que les humains aient des carences en nutriments essentiels. Un régime auquel il manque un ou plusieurs acides aminés essentiels entraîne une *carence protéique*, la forme de malnutrition la plus courante. Par exemple, un bébé peut souffrir d'une carence protéique si son alimentation passe du lait maternel à des aliments solides relativement pauvres en protéines, comme le riz. Lorsqu'ils survivent, ces enfants présentent souvent un retard dans leur développement physique et mental.

La sous-alimentation

Comme nous venons de le mentionner, la sous-alimentation résulte d'un apport énergétique insuffisant. Lorsqu'un animal est sous-alimenté, son organisme réagit d'abord en puisant dans ses réserves de glucides et de graisses. Ensuite, il commence à dégrader ses propres protéines pour obtenir l'énergie dont il a besoin. Les muscles s'atrophient alors, et le cerveau peut manquer de protéines. Si l'apport d'énergie demeure inférieur à la dépense d'énergie, l'animal finit par mourir. Et s'il survit malgré une sous-alimentation grave, les dommages subis peuvent être irréversibles.

Chez l'humain, la sous-alimentation est plus répandue, car des événements tels qu'une sécheresse, une guerre ou toute autre crise peuvent compromettre l'approvisionnement d'une population en nourriture. Par exemple, en Afrique subsaharienne, où l'épidémie du sida a détruit des communautés tant rurales qu'urbaines, environ 200 millions d'enfants et d'adultes souffrent de sous-alimentation.

▼ **Figure 41.3** L'obtention de nutriments essentiels d'une source inhabituelle. Ce jeune chamois (*Rupicapra rupicapra*), un herbivore, lèche les sels présents à la surface des roches de son habitat alpin. Ce comportement est courant chez les herbivores qui vivent là où les sols et les plantes ne fournissent pas assez de minéraux.



La sous-alimentation n'est pas uniquement liée au manque de nourriture et peut résulter d'un trouble du comportement alimentaire. Par exemple, dans l'anorexie mentale, qu'on associe à une perturbation du schéma corporel, la personne présente une perte de poids beaucoup trop importante pour sa taille et son âge.

L'évaluation des besoins nutritionnels

Pour les scientifiques, la détermination du régime alimentaire idéal pour la population humaine est une question importante et difficile. En effet, l'humain n'est pas un objet d'étude facile. Contrairement aux animaux de laboratoire, les humains sont génétiquement divers. Par ailleurs, ils vivent dans des environnements très différents les uns des autres, contrairement aux milieux stables et uniformes utilisés par les scientifiques pour comparer plus aisément leurs expériences en laboratoire. Enfin, les préoccupations d'ordre éthique constituent un autre obstacle. Par exemple, il n'est pas acceptable d'étudier les besoins nutritionnels des enfants par des méthodes qui pourraient nuire à leur croissance et à leur développement.

Une bonne partie des connaissances sur la nutrition humaine nous vient de l'épidémiologie, qui est l'étude de la santé et de la maladie chez les populations humaines. Dans les années 1970, par exemple, les chercheurs ont découvert que les enfants nés de mères issues d'un milieu socioéconomique défavorisé présentaient un risque plus élevé de souffrir d'une anomalie particulière du tube neural, caractérisée par un défaut de fermeture de la moelle épinière (voir le concept 47.2). Le scientifique anglais Richard Smithells a émis l'hypothèse que cette malformation résultait d'une malnutrition avant le début de la grossesse. Comme le montre la figure 41.4, ce chercheur a constaté que les suppléments vitaminiques réduisaient considérablement le risque de malformation du tube neural, comme le spina bifida. D'autres études lui ont fourni des données probantes indiquant qu'il s'agissait d'une carence en acide folique (vitamine B₉). Cette découverte a été confirmée par d'autres chercheurs. À partir de ces données, le Canada et les États-Unis ont commencé en 1998 à exiger qu'on ajoute de l'acide folique aux produits céréaliers enrichis, notamment à ceux qu'on utilise dans la fabrication du pain et des céréales. Des études de suivi ont démontré que ce programme réduit effectivement la fréquence des anomalies du tube neural. La microchirurgie et les techniques d'imagerie médicale ultramodernes volent souvent la vedette lorsqu'on entend parler des progrès de la médecine. Pourtant, un simple changement dans l'alimentation, comme l'ajout d'acide folique, représente également une grande avancée en matière de santé humaine.

RETOUR SUR LE CONCEPT 41.1

1. Un animal a besoin des 20 acides aminés pour fabriquer des protéines. Pourquoi ces acides aminés ne sont-ils pas tous essentiels dans l'alimentation d'un animal ?
2. **FAITES DES LIENS** ► Rappelez-vous la façon dont les enzymes fonctionnent (voir le concept 8.4) et expliquez pourquoi les vitamines sont nécessaires en très petites quantités.

3. **ET SI ?** ► Supposez qu'un animal en captivité (dans un zoo) qui mange abondamment présente des signes de malnutrition. Expliquez comment un chercheur pourrait déterminer le nutriment essentiel qui manque à l'alimentation de cet animal.

Voir les réponses proposées à l'appendice A.

DÉMARCHE SCIENTIFIQUE

INVESTIGATION

L'alimentation a-t-elle une incidence sur la fréquence des malformations congénitales ?

■ **HYPOTHÈSE** ■ Richard Smithells, chercheur à la University of Leeds, en Angleterre, a étudié l'effet d'une supplémentation vitaminique sur le risque de malformation du tube neural chez des femmes qui avaient eu un ou plusieurs bébés présentant une telle anomalie. Il a émis l'hypothèse que la prise de suppléments vitaminiques avant et durant la grossesse diminuait le risque d'anomalie du tube neural.

■ **EXPÉRIENCE** ■ Pour vérifier cette hypothèse, Smithells a réparti ces femmes en deux groupes: le groupe expérimental comprenait celles qui avaient planifié leur grossesse et commencé à prendre des multivitamines au moins quatre semaines avant de concevoir. Le groupe témoin, lui, comprenait les femmes qui ne prenaient pas de suppléments, notamment celles qui avaient refusé de le faire et celles qui étaient déjà enceintes. Smithells a ensuite noté le nombre de cas d'anomalies du tube neural parmi les bébés des femmes des deux groupes.

■ RÉSULTATS ■

Groupe	Nombre de bébés ou fœtus étudiés	Nombre de bébés ou fœtus atteints
Avec suppléments vitaminiques (groupe expérimental)	141	1 (0,7 %)
Sans suppléments vitaminiques (groupe témoin)	204	12 (5,9 %)

Source des données: R. W. Smithells et coll., Possible prevention of neural-tube defects by periconceptional vitamin supplementation, *Lancet* 315: 339-340 (1980).

■ **CONCLUSION** ■ Cette étude a montré que les suppléments vitaminiques diminuaient le risque d'anomalie du tube neural, du moins après la première grossesse. Des études de suivi ont montré que les suppléments contenant uniquement de l'acide folique exerçaient un effet protecteur équivalent.

INTERPRÉTEZ LES DONNÉES ► Aux États-Unis, la prescription généralisée de suppléments d'acide folique chez les femmes enceintes a été suivie d'une diminution de la fréquence des anomalies du tube neural (1 cas sur 5 000 naissances vivantes). Proposez deux raisons qui pourraient expliquer pourquoi la fréquence observée était beaucoup plus élevée dans le groupe expérimental de l'étude de Smithells.

La transformation des aliments comprend l'ingestion, la digestion, l'absorption et l'élimination

Maintenant que nous avons présenté les besoins nutritionnels des animaux, nous décrirons en quatre étapes les processus qui transforment les aliments: l'ingestion, la digestion, l'absorption et l'élimination.

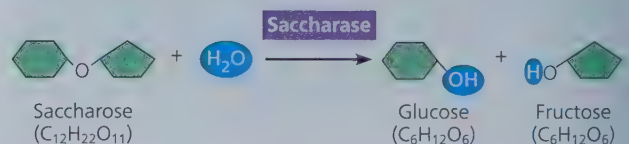
La transformation des aliments commence par l'**ingestion**, soit l'acte de manger à proprement parler. Comme le montre la **figure 41.5**, on peut classer en quatre groupes les modes d'ingestion de la plupart des animaux.

La **digestion** constitue la deuxième étape de la transformation des aliments. Elle consiste à décomposer les aliments en molécules suffisamment petites pour être absorbées par le corps. Pour ce faire, elle fait généralement intervenir des processus mécaniques et chimiques. La digestion mécanique, par la mastication ou le broyage, par exemple, fragmente les aliments en petits morceaux, ce qui augmente la surface exposée aux processus chimiques. Les particules de nourriture subissent ensuite une digestion chimique qui permet de décomposer les grosses molécules en plus petits composants.

La digestion chimique est nécessaire puisque les animaux ne peuvent pas utiliser directement les protéines, les glucides, les acides nucléiques, les lipides et les phospholipides contenus dans les aliments: ces macromolécules sont trop volumineuses pour passer à travers les membranes cellulaires et pénétrer dans les cellules, et elles ne conviennent pas nécessairement, telles quelles, aux tissus et aux besoins physiologiques d'un animal. En décomposant les macromolécules des aliments en leurs constituants, la digestion chimique permet à l'animal de les utiliser pour assembler des macromolécules qui répondront à ses besoins propres. Par exemple, même si la mouche tsé-tsé et la baleine à bosse de la figure 41.5 ont des alimentations fort différentes, elles décomposent toutes deux les protéines de leur nourriture pour obtenir les 20 mêmes acides aminés à partir desquels elles élaboreront toutes les protéines propres à leur organisme.

Une cellule fabrique une macromolécule ou un lipide en réunissant des composants plus petits; elle y arrive en éliminant une molécule d'eau pour chaque nouvelle liaison covalente formée. La digestion chimique inverse ce processus: elle rompt chaque liaison en ajoutant une molécule d'eau (voir la figure 5.2). Ce processus de dégradation des macromolécules est catalysé par les enzymes digestives et s'appelle **hydrolyse enzymatique**. Les polysaccharides et les disaccharides sont décomposés en monosaccharides, comme illustré ici pour le saccharose:

▼ L'hydrolyse enzymatique d'un disaccharide.



Les quatre principaux modes d'ingestion des aliments par les animaux

PANORAMA

L'ingestion par filtration



Les **organismes filtreurs** sont des animaux aquatiques qui se nourrissent en filtrant les petits organismes ou les particules d'aliments en suspension dans leur milieu. Cette baleine à bosse (*Megaptera novaeangliae*) en est un exemple. Pour se nourrir, elle utilise ses fanons – deux rangées de lames cornées en forme de peigne suspendues à sa mâchoire supérieure – pour filtrer d'énormes quantités d'eau (et parfois de boue) contenant des petits invertébrés et des poissons. L'ingestion par filtration est un type de microphagie suspensivore, qui inclut également le retrait de particules d'aliments en suspension dans le milieu environnant par divers mécanismes de capture et de piégeage.

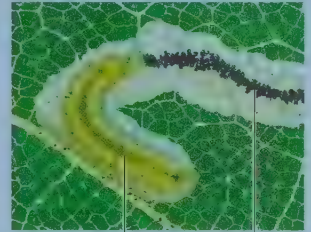
L'ingestion en vrac

La plupart des animaux, notamment les humains, se nourrissent par **ingestion en vrac**. Ils utilisent différentes parties anatomiques pour tuer les proies, déchirer la chair ou arracher des matières végétales : des tentacules, des pinces, des griffes, des crochets venimeux, des mâchoires et des dents. Ils consomment des morceaux de nourriture relativement gros. Dans cette scène étonnante, un python de Séba (*Python sebae*) commence à ingérer une gazelle qu'il a capturée et tuée. (On a déjà trouvé les restes d'un adulte humain dans le tube digestif d'un python indien,



L'ingestion du substrat

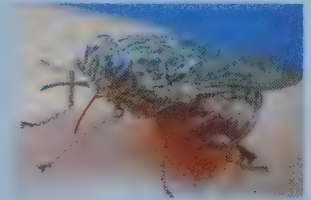
Les animaux qui se nourrissent par **ingestion du substrat** vivent sur leur source de nourriture ou à l'intérieur de celle-ci. Cette chenille processionnaire du chêne, qui est la larve d'un papillon de nuit (*Thaumetopoea processionea*), se fraye un chemin dans le tissu mou d'une feuille de chêne en mangeant ce tissu à mesure et en laissant une traînée de matières fécales noirâtres sur son passage. Les asticots (larves de mouches), qui se nourrissent de cadavres d'animaux, font également partie de cette catégorie.



Chenille Excréments

L'ingestion par aspiration

Les espèces qui ont recours à un mécanisme d'**ingestion par aspiration** tirent des liquides riches en nutriments d'un hôte vivant. Cette mouche tsé-tsé (*Glossina sp.*) a perforé l'épiderme de son hôte humain au moyen d'une pièce buccale semblable à une aiguille hypodermique. Elle remplit de sang son tube digestif. De même, les pucerons (de la super-famille des *aphidoidea*) puisent la sève élaborée du phloème de certains végétaux. Contrairement à ces parasites qui nuisent à leurs hôtes, d'autres espèces qui utilisent l'ingestion par aspiration rendent service à ces derniers. Par exemple, les colibris et les abeilles transportent du pollen quand ils visitent les fleurs à la recherche de nectar.



Python molurus.) Les serpents sont incapables de déchiqueter leur proie et de les mâcher pour les diviser en morceaux. Ils doivent avaler la proie tout entière, même si elle excède leur propre diamètre. Ils en sont capables parce que leur mâchoire inférieure est attachée lâchement à leur crâne par un ligament élastique qui permet à la bouche et à la gorge de s'ouvrir très grand. Il faudra plus d'une heure au python pour avaler cette gazelle. Il passera ensuite au moins deux semaines dans un lieu calme situé à proximité pour digérer son repas.

De la même façon, les protéines sont décomposées en petits peptides et en acides aminés, et les acides nucléiques sont réduits en nucléotides et en leurs constituants. L'hydrolyse enzymatique libère également des acides gras et d'autres composants que renferment les lipides et les phospholipides. Chez beaucoup d'animaux, les bactéries vivant dans le système digestif accomplissent une partie de la digestion chimique.

Les deux derniers processus qui transforment les aliments se déroulent après la digestion. Au cours de la troisième étape, l'**absorption**, les cellules absorbent les petites molécules telles que les acides aminés et les glucides simples. Lors de la dernière étape, l'**élimination**, les matières qui n'ont pas subi de digestion ni d'absorption quittent l'organisme selon l'une des façons décrites dans la section suivante.

Les compartiments de la digestion

Nous venons de voir que les matériaux biologiques (protéines, lipides, glucides, etc.) hydrolysés par les enzymes digestives sont les mêmes matériaux que ceux qui composent l'animal lui-même. Comment, alors, l'animal arrive-t-il à digérer sa nourriture sans se digérer lui-même ? Ce tour de force est le fruit d'une adaptation évolutive, en l'occurrence des compartiments spécialisés intracellulaires ou extracellulaires dont la fonction consiste à traiter les aliments séparément des tissus de l'animal.

La digestion intracellulaire

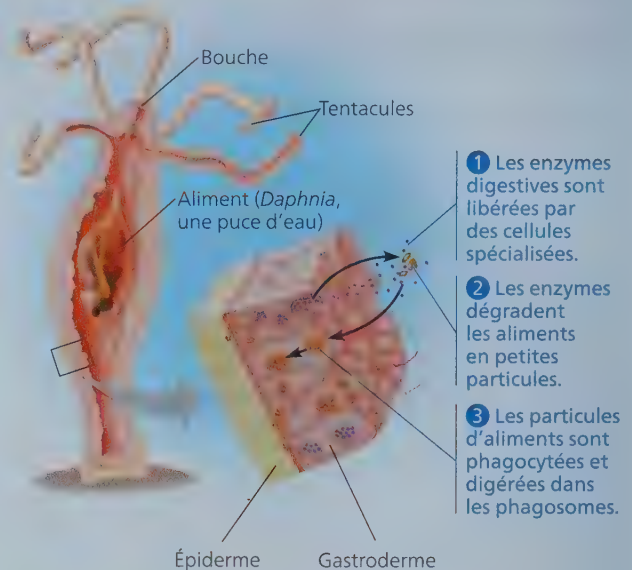
Les phagosomes (vacuoles digestives) sont les cavités digestives les plus simples. Il s'agit d'organites cellulaires servant à décomposer les aliments. Cette digestion, appelée **digestion intracellulaire**, commence dans la cellule une fois que celle-ci a incorporé les aliments par phagocytose ou par pinocytose (voir la figure 7.19). Les phagosomes nouvellement formés fusionnent avec des lysosomes, des organites contenant des enzymes hydrolytiques. La fusion des organites permet aux enzymes d'entrer en contact avec les aliments et de procéder à la digestion dans une cavité délimitée par une membrane protectrice, sans que les enzymes hydrolytiques qu'ils contiennent dégradent le cytoplasme de la cellule. Les éponges se distinguent des autres animaux en ce qu'elles digèrent entièrement leur nourriture grâce à ce mécanisme intracellulaire (voir la figure 33.4).

La digestion extracellulaire

Chez la plupart des animaux, l'hydrolyse s'effectue en grande partie au cours de la **digestion extracellulaire**, un processus de dégradation des aliments qui se déroule dans des compartiments communiquant avec l'extérieur du corps des animaux. Le fait de disposer de compartiments extracellulaires servant à la digestion permet à un animal de dévorer des proies beaucoup plus grosses que celles qui sont phagocytées et digérées à l'intérieur d'une cellule.

Les animaux dont le plan d'organisation corporelle est simple possèdent généralement une cavité digestive à une seule ouverture (**figure 41.6**). Cette structure en forme de sac, appelée **cavité gastrovasculaire**, sert à la fois à la digestion des nutriments et à leur circulation dans tout l'organisme (d'où le qualificatif *vasculaire*). L'hydre (*Hydra sp.*), un petit cnidaire d'eau douce, illustre bien le fonctionnement de la cavité gastrovasculaire.

▼ **Figure 41.6 La digestion chez l'hydre.** La digestion commence dans la cavité gastrovasculaire. Elle se poursuit dans les cellules gastrodermiques, une fois que les petites particules d'aliments y sont entrées par phagocytose.



- 1 Les enzymes digestives sont libérées par des cellules spécialisées.
- 2 Les enzymes dégradent les aliments en petites particules.
- 3 Les particules d'aliments sont phagocytées et digérées dans les phagosomes.

FAITES UN DESSIN ► Dessinez un schéma simple qui montre le trajet suivi par les nutriments, depuis le moment où ils entrent dans la bouche de l'hydre jusqu'au moment où ils atteignent une cellule située sur la couche externe (l'épiderme) à l'extrémité d'un de ses tentacules. Ensuite, indiquez les différentes structures représentées sur votre dessin.

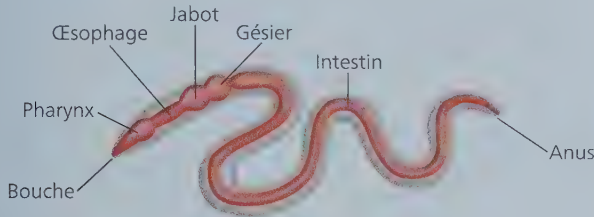
Cet animal carnivore utilise ses tentacules pour porter la proie capturée à sa bouche et l'introduire dans sa cavité gastrovasculaire. Des cellules spécialisées du gastroderme (le tissu tapisant la cavité) sécrètent alors des enzymes digestives qui séparent les tissus mous de la proie en petits fragments. Ensuite, d'autres cellules gastrodermiques ingèrent par phagocytose les particules d'aliments, et la plus grande partie de l'hydrolyse des macromolécules se fait à l'intérieur des cellules, comme chez les éponges ; la digestion chez les cnidaires n'est donc que partiellement extracellulaire. Une fois qu'elle a digéré son repas, l'hydre élimine par son orifice unique les matières non digérées restant dans sa cavité gastrovasculaire (les exosquelettes de petits crustacés, par exemple). Son unique orifice lui sert à la fois de bouche et d'anus. De nombreux vers plats possèdent aussi une cavité gastrovasculaire munie d'un seul orifice (voir la figure 33.10).

Chez les animaux dont le plan d'organisation corporelle est complexe, la cavité gastrovasculaire est remplacée par un conduit doté de deux ouvertures : la bouche et l'anus (**figure 41.7**). Ce conduit s'appelle **tube digestif**, *tractus digestif* ou *canal alimentaire*. Pareille structure a pu apparaître chez les animaux grâce à une importante innovation évolutive, la cavité interne, ou cœlome, dont il a été question au concept 32.3. Comme la nourriture se déplace dans une seule direction, le tube digestif peut comprendre plusieurs compartiments spécialisés effectuant graduellement la digestion des aliments puis l'absorption des nutriments. Un autre avantage d'un tube digestif complet est de rendre possible l'ingestion de nourriture avant que les repas précédents aient été entièrement digérés. La digestion se déroule

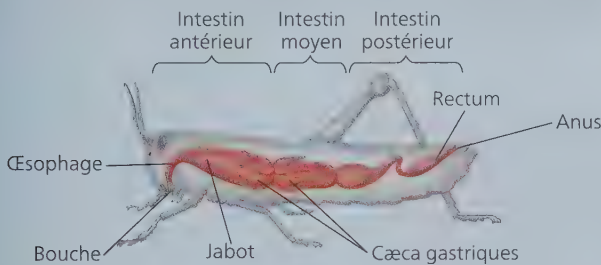
donc de façon continue et la nourriture digérée reste relativement séparée de celle qui ne l'est pas encore. Les animaux munis d'une simple cavité gastrovasculaire n'ont pas ce privilège.

Étant donné que la plupart des animaux, dont les mammifères, possèdent un tube digestif, nous prendrons l'exemple du tube digestif de ces vertébrés dans la prochaine section pour illustrer les principes généraux de la transformation des aliments dans l'organisme.

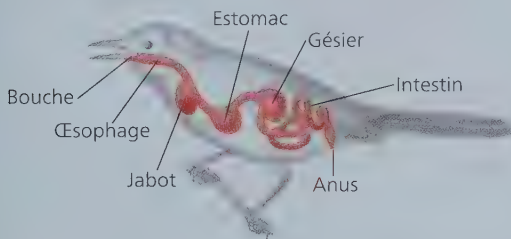
▼ **Figure 41.7 Différents tubes digestifs.** Ces exemples montrent à quel point l'organisation et la structure des compartiments destinés à la digestion, au stockage et à l'absorption des aliments peuvent différer d'un animal à l'autre.



(a) **Ver de terre.** Le tube digestif du ver de terre commence par la bouche. Les aliments y entrent par un mouvement d'aspiration déclenché par le pharynx, qui est musculéux. Ils passent ensuite dans l'œsophage, avant d'atteindre le jabot, où ils sont emmagasinés et humidifiés. La digestion mécanique a lieu dans le gésier, également musculéux, qui contient de petits morceaux de sable et de gravier facilitant le broyage de la nourriture. La digestion et l'absorption s'effectuent dans l'intestin.



(b) **Criquet.** Le criquet possède plusieurs cavités digestives, groupées en trois régions principales : l'intestin antérieur (comportant l'œsophage et le jabot), l'intestin moyen et l'intestin postérieur. Les aliments sont humidifiés et emmagasinés dans le jabot, mais la majeure partie de la digestion s'effectue dans l'intestin moyen. Des cæca gastriques, soit des structures en forme de sac émergeant de l'intestin moyen, servent à digérer et à absorber les nutriments.



(c) **Oiseau.** De nombreux oiseaux possèdent un jabot pour emmagasiner la nourriture ainsi qu'un estomac et un gésier pour la digérer mécaniquement. La digestion chimique et l'absorption des nutriments se déroulent dans l'intestin.

1. Quelle est la principale différence anatomique entre une cavité gastrovasculaire et un tube digestif ?
2. Dans quel sens peut-on dire que les nutriments ingérés lors d'un repas ne sont pas vraiment « à l'intérieur » de notre organisme avant l'absorption, une des étapes de la transformation des aliments ?
3. **ET SI ?** ► De manière générale, quelles ressemblances y a-t-il entre la digestion dans le corps d'un animal et la dégradation de l'essence dans une voiture ? (Il n'est pas nécessaire de s'y connaître en mécanique automobile pour répondre à cette question.)

Voir les réponses proposées à l'appendice A.

Les différents organes du système digestif des mammifères assurent la transformation progressive de la nourriture

Chez les mammifères, divers organes annexes comme les trois paires de glandes salivaires, les dents, la langue, le pancréas, le foie et la vésicule biliaire participent à la transformation des aliments soit en contribuant à la digestion mécanique, soit en déversant par des conduits diverses substances intervenant dans la digestion chimique qui se déroule dans le tube digestif. Pour comprendre la coordination des fonctions du tube digestif et des organes annexes, nous allons suivre le trajet des aliments dans le tube digestif de l'humain et examiner en détail ce qu'ils deviennent à chaque étape de leur transformation.

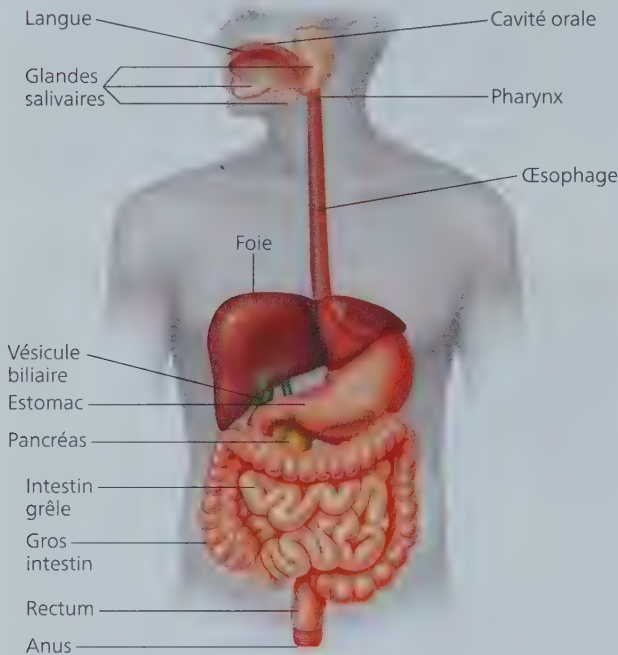
La cavité orale, le pharynx et l'œsophage

Dès qu'un aliment entre dans votre bouche, ou **cavité orale**, la transformation de la nourriture commence (**figure 41.8**). Les dents de diverses formes coupent, écrasent et broient les aliments en petits morceaux. Cette décomposition mécanique a pour effet d'augmenter la surface exposée aux agents chimiques et de faciliter la déglutition. La présence d'aliments dans la cavité buccale (ou la seule idée de leur arrivée) déclenche la sécrétion de salive par les **glandes salivaires**.

La salive est un mélange complexe de substances dont les fonctions sont importantes. Un des principaux composants de la salive est le **mucus**, un mélange visqueux d'eau, de sels, de cellules et de glycoprotéines (complexes glucides-protéines). Le mucus protège les muqueuses de la bouche contre l'abrasion et lubrifie les aliments pour faciliter leur déglutition. Il favorise en outre le goût et l'odorat. La salive contient également des solutions tampons qui aident à prévenir la carie dentaire en neutralisant les substances acides introduites dans la bouche. En outre, les agents antibactériens salivaires (tel le lysozyme ; voir la figure 5.16) protègent contre les bactéries ingérées avec la nourriture.

Les scientifiques comprennent mal pourquoi la salive contient une si grande quantité d'**amylase salivaire**, une enzyme

▼ **Figure 41.8** Le système digestif de l'humain. Après avoir été mastiqués et déglutis, les aliments prennent de 5 à 10 secondes pour parcourir l'œsophage et entrer dans l'estomac. Ils y restent de 2 à 6 heures, partiellement digérés. La majeure partie de la digestion et de l'absorption des nutriments se produit dans l'intestin grêle; elle dure de 5 à 6 heures. En 12 à 24 heures, tous les résidus de la digestion traversent le gros intestin jusqu'à l'anus, par lequel les matières fécales sont expulsées.

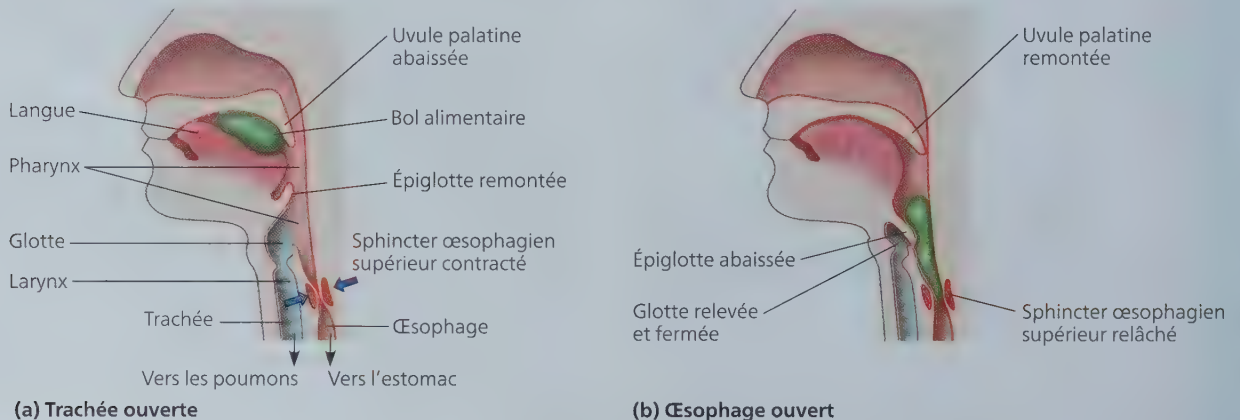


digestive qui dégrade l'amidon (polymère de glucose produit par les végétaux) et le glycogène (polymère de glucose produit par des animaux). La majeure partie de la digestion chimique a lieu non pas dans la bouche, mais dans l'intestin grêle, où l'amylase est également présente. Pourquoi, alors, y a-t-il autant d'amylase dans la salive, se demandent les scientifiques? Une des hypothèses actuelles veut que l'amylase salivaire libère les particules d'aliments collées aux dents, réduisant ainsi la quantité de nutriments offerts aux microorganismes qui vivent dans la bouche.

La langue joue également un rôle important dans la transformation des aliments. À la manière d'un portier qui contrôle et oriente les personnes qui entrent dans un édifice, la langue participe à la digestion en évaluant certaines qualités des substances ingérées et en déterminant quels aliments poursuivront leur chemin dans le tube digestif. (Voir le concept 50.4 pour une description du sens du goût.) Une fois la nourriture jugée acceptable, la mastication débute et les mouvements de la langue façonnent les aliments en une boule appelée **bol alimentaire** (figure 41.9). En outre, la langue sécrète une enzyme, la lipase linguale, qui amorce la digestion chimique des triglycérides. Pendant la déglutition, la langue a également pour fonction de pousser le bol alimentaire vers l'arrière de la cavité orale, dans le pharynx.

Chaque bol alimentaire descend dans la région que nous appelons *gorge* et qui correspond au **pharynx**. Le pharynx est un carrefour qui communique aussi bien avec l'œsophage qu'avec les voies respiratoires (trachée). L'**œsophage** est un conduit musculéux qui s'abouche avec l'estomac, tandis que la trachée mène aux poumons. Le mécanisme de la déglutition doit donc se dérouler correctement pour que la nourriture et les liquides ne s'introduisent pas dans la trachée et n'obstruent pas les voies respiratoires, causant un étouffement. Le manque d'air

▼ **Figure 41.9** L'intersection des voies respiratoires et du tube digestif chez l'humain. Chez l'humain, le pharynx communique à la fois avec la trachée et l'œsophage. (a) La plupart du temps, le sphincter œsophagien supérieur est contracté et bloque ainsi l'entrée de l'œsophage, tandis que la trachée demeure ouverte. (b) L'arrivée d'un bol alimentaire dans le pharynx déclenche le réflexe de déglutition. Le mouvement du larynx (partie supérieure des voies respiratoires) renverse alors l'épiglotte sur la glotte, ce qui empêche la nourriture de s'introduire dans la trachée. Par ailleurs, l'uvule palatine (luette) remonte et prévient le reflux des aliments dans la cavité nasale. Au même moment, le sphincter œsophagien supérieur se détend et permet au bol alimentaire de passer dans l'œsophage. La trachée s'ouvre à nouveau, et des ondes de contraction musculaire (péristaltisme) font descendre le bol alimentaire dans l'œsophage jusqu'à l'estomac.



HABILÉTÉS VISUELLES ► Si vous riez en buvant de l'eau, le liquide peut vous sortir par les narines. Servez-vous du diagramme pour expliquer pourquoi cela arrive, en tenant compte du fait que pour rire, il faut expirer.

aux poumons peut alors être fatal si la cause de l'obstruction n'est pas expulsée rapidement par une toux vigoureuse ou une forte pression sur le diaphragme, vers le haut (manœuvre de Heimlich).

Dans l'œsophage, les aliments avancent dans le canal alimentaire grâce au **péristaltisme**, c'est-à-dire un mouvement produit par une succession de contractions rythmiques résultant de l'action des muscles lisses. Arrivé au bout de l'œsophage, le bol alimentaire rencontre un **sphincter** (ou muscle sphincter), qui est une valve musculaire en forme d'anneau (**figure 41.10**). Celui-ci ouvre et ferme le tube à la manière d'un nœud coulant, régulant le passage des aliments d'un compartiment à l'autre.

La digestion dans l'estomac

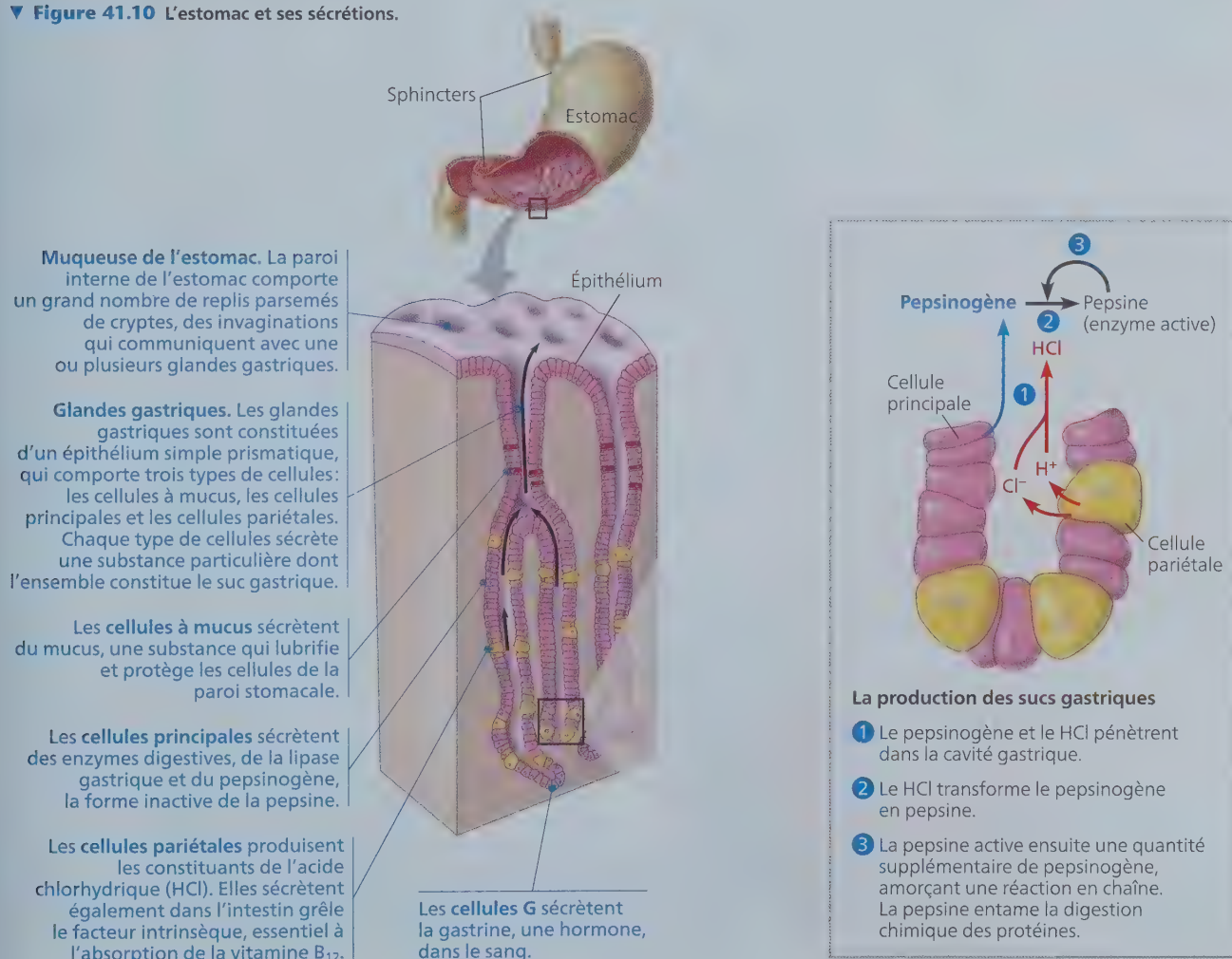
L'estomac, situé immédiatement sous le diaphragme, remplit deux grandes fonctions. La première est d'entreposer la nourriture. Grâce à ses replis en accordéon et à sa paroi extrêmement élastique, il peut s'étirer jusqu'à contenir environ 2 L d'aliments et de liquides. La seconde est de transformer les aliments en une suspension liquide. Comme on le voit dans la figure 41.10, l'estomac sécrète le **suc gastrique**, une solution digestive qui se

mélange aux aliments grâce aux contractions des muscles lisses de la paroi stomacale. La bouillie formée par les aliments et les sucs gastriques est appelée **chyme**.

La digestion chimique

Deux constituants du suc gastrique aident à liquéfier le bol alimentaire dans l'estomac. Premièrement, l'acide chlorhydrique (HCl) démantèle la matrice extracellulaire qui assemble les cellules des tissus végétaux et animaux. Sa concentration est si élevée que le pH du suc gastrique est d'environ 2, ce qui est suffisamment acide pour dissoudre du fer (et tuer la plupart des bactéries). Ce pH très bas dénature (déplie) les protéines de la nourriture et expose ainsi leurs liaisons peptidiques. Les liaisons exposées sont alors attaquées par le deuxième composant du suc gastrique, la **pepsine**, qui est une **protéase** (c'est-à-dire une enzyme qui hydrolyse les protéines). La pepsine fait partie des rares enzymes parfaitement adaptées au travail en milieu fortement acide. En brisant les liaisons peptidiques, elle décompose les protéines en polypeptides plus petits et expose davantage le contenu des tissus ingérés.

▼ **Figure 41.10** L'estomac et ses sécrétions.



Les composants du suc gastrique sont produits par deux types de cellules contenues dans les glandes gastriques de l'estomac. Les *cellules pariétales* utilisent une pompe activée par l'ATP pour expulser les ions hydrogène (H^+) dans la cavité. Au même moment, les ions chlorure (Cl^-) diffusent dans la cavité par des canaux membranaires spécifiques des cellules pariétales. Ce n'est qu'une fois mis en présence dans la lumière stomacale que ces deux constituants se combinent pour donner le HCl (voir la figure 41.10). Les cellules pariétales sécrètent aussi le facteur intrinsèque. Ce dernier protège la vitamine B_{12} de l'acidité gastrique et rend possible son absorption. Une carence de cette vitamine entraîne l'anémie pernicieuse. Dans l'intervalle, les *cellules principales* libèrent la pepsine dans la lumière stomacale, sous une forme inactive appelée **pepsinogène**. Le HCl convertit le pepsinogène en pepsine (active) en retirant un fragment de la molécule et en exposant son site actif. Au cours de ces processus, c'est donc dans la lumière (cavité) de l'estomac, et non dans les cellules des glandes gastriques, que se forment le HCl et la pepsine. C'est ainsi que les cellules pariétales et principales peuvent produire le suc gastrique sans être digérées de l'intérieur par les constituants du suc. Les cellules principales sécrètent également la lipase gastrique qui, à l'instar de la lipase linguale, digère une petite quantité des triglycérides (15 %), plus précisément les triglycérides à chaînes courtes. Enfin, d'autres cellules, les cellules G, sécrètent la gastrine, une hormone qui passe dans le sang pour aller stimuler la production des sucs gastriques.

Une fois que le HCl a converti une petite quantité de pepsinogène en pepsine, cette pepsine active elle-même le reste du pepsinogène. Comme le HCl, la pepsine peut couper le pepsinogène pour exposer le site actif de l'enzyme. Cette réaction produit plus de pepsine, laquelle active davantage de pepsinogène, ce qui accroît les quantités d'enzyme active. L'activation du pepsinogène constitue un exemple de rétroactivation, un mécanisme qui amplifie l'effet d'un stimulus (voir le concept 40.2).

Comment se fait-il que la muqueuse gastrique ne soit pas endommagée par le HCl et par la pepsine ? Tout d'abord, le mucus sécrété par les cellules des glandes gastriques protège la muqueuse contre l'autodigestion (voir la figure 41.10). De plus, les cellules épithéliales de la muqueuse gastrique se multiplient continuellement, de sorte que tous les trois jours, une nouvelle couche se forme et remplace les cellules érodées par les sucs gastriques. Malgré cela, il arrive que des lésions, appelées ulcères gastriques, apparaissent. Pendant des décennies, les scientifiques ont attribué les ulcères au stress et à son influence sur la sécrétion d'acide par l'estomac. En 1982, cependant, les chercheurs australiens Barry Marshall et Robin Warren ont découvert que les ulcères gastriques étaient principalement causés par la bactérie *Helicobacter pylori*. Ils ont également montré qu'une antibiothérapie pouvait guérir la plupart des ulcères gastriques. En 2005, ces découvertes ont valu un prix Nobel aux deux chercheurs.

La digestion mécanique

L'activité musculaire de l'estomac contribue à la dégradation des aliments par le suc gastrique. En effet, toutes les 20 secondes environ, les muscles lisses de l'estomac brassent et pétrissent son contenu. Cette action de malaxage de l'estomac facilite la digestion chimique en exposant tout le bol alimentaire au suc

gastrique sécrété par l'estomac. C'est ainsi qu'un repas qui vient d'être ingéré devient une bouillie acide riche en éléments nutritifs appelée chyme.

Les contractions des muscles de l'estomac aident aussi à pousser les aliments qu'il contient dans le tube digestif. En général, le contenu de l'estomac atteint l'intestin grêle de 2 à 6 heures après un repas, principalement grâce au péristaltisme. Dans la partie inférieure de l'estomac, qui communique avec l'intestin grêle, se trouve le sphincter pylorique, un muscle qui règle le passage du chyme dans l'intestin, un jet à la fois. L'orifice du cardia, par lequel l'estomac communique avec l'œsophage et qui est contrôlé par le sphincter œsophagien inférieur, ne se dilate habituellement qu'à l'arrivée d'un bol alimentaire. Parfois, cependant, le reflux de chyme acide dans la partie inférieure de l'œsophage cause des aigreurs (les « brûlures d'estomac »).

La digestion dans l'intestin grêle

Bien que la digestion chimique de certains nutriments commence dans la cavité orale ou dans l'estomac, la majeure partie de l'hydrolyse enzymatique des macromolécules alimentaires se déroule dans l'intestin grêle (figure 41.11). Cet organe a hérité du qualificatif « grêle » non pas parce qu'il est mince ou très fin, mais en raison de son diamètre qui est petit en comparaison de celui du gros intestin. En fait, l'**intestin grêle** est le plus long compartiment du tube digestif : il mesure plus de 6 m chez l'humain. Le premier segment de 25 cm environ s'appelle **duodénum**. C'est là que le chyme acide en provenance de l'estomac se mêle aux substances facilitant la digestion issues du pancréas, du foie, de la vésicule biliaire et des cellules glandulaires de la muqueuse intestinale. Comme nous le verrons au concept 41.5, les hormones libérées par l'estomac et le duodénum régulent les sécrétions gastriques dans le tube digestif. La progression du chyme dans l'intestin grêle est assurée par le péristaltisme combiné au processus de la **segmentation**. Ce dernier consiste en une série de contractions de la paroi intestinale qui contribuent à fragmenter mécaniquement le chyme et à le mélanger avec les sucs digestifs.

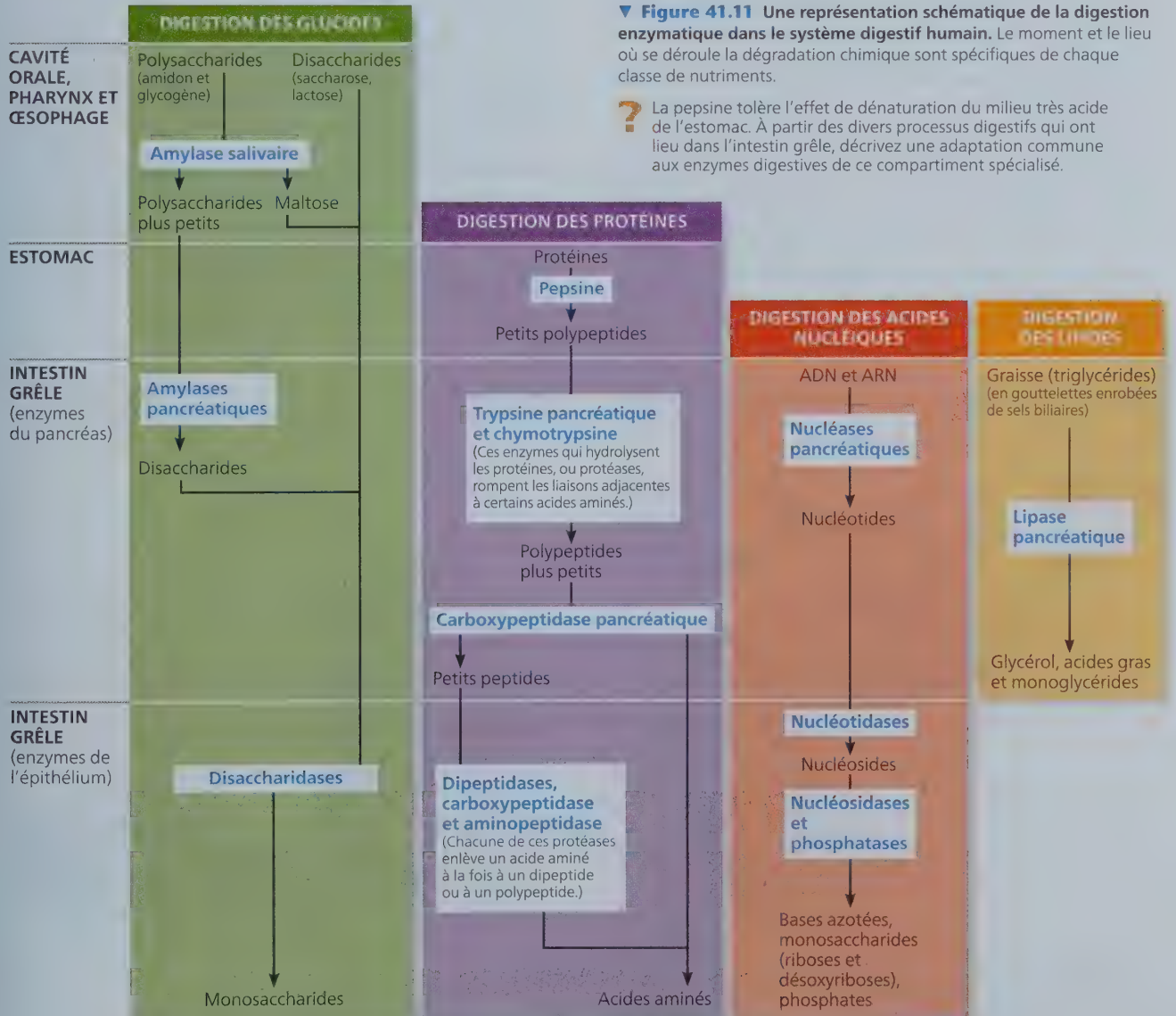
L'arrivée du chyme dans le duodénum déclenche la libération de sécrétine, une hormone qui incite le **pancréas** à sécréter des ions bicarbonate (HCO_3^-), ainsi que la libération de cholécystokinine (CCK), une autre hormone qui augmente les sécrétions de suc pancréatique et provoque la contraction de la vésicule biliaire. Notez que ces deux hormones ont d'autres effets : elles provoquent notamment la diminution des sécrétions et de la motilité de l'estomac. Les ions HCO_3^- neutralisent l'acidité du chyme de l'estomac et agissent comme substance tampon pour la digestion chimique dans l'intestin grêle. Le pancréas y sécrète aussi plusieurs enzymes, dont la trypsine et la chymotrypsine, des protéases déversées dans le duodénum sous une forme inactive. Dans une réaction en chaîne semblable à l'activation de la pepsine dans l'estomac, les protéases pancréatiques sont activées seulement une fois parvenues dans la lumière du duodénum, là où elles peuvent accomplir leurs fonctions sans risque de léser les autres tissus. Le pancréas sécrète également la carboxypeptidase pancréatique, les amylases pancréatiques, la lipase pancréatique et les nucléases pancréatiques, des enzymes qui participent à la digestion des polypeptides, de l'amidon, des lipides et des acides nucléiques.

La paroi épithéliale du duodénum est la source de plusieurs enzymes digestives. Certaines d'entre elles sont sécrétées dans la cavité du duodénum, alors que d'autres sont en fait liées à la surface des cellules épithéliales. La majeure partie de la digestion s'achève dans le duodénum sous l'action des enzymes pancréatiques (disaccharidases, dipeptidases, carboxypeptidase, aminopeptidases, nucléotidases, nucléosidases et phosphatases).

La digestion des graisses et autres lipides représente un défi particulier pour le corps. Insolubles dans l'eau, les lipides forment des globules que les enzymes digestives ne peuvent pas fractionner facilement. Chez les humains et les autres vertébrés, la digestion des lipides requiert la production de sels biliaires, qui servent d'émulsifiants (détergents) pour dégrader les globules lipidiques. L'agent émulsifiant fragmente les globules lipidiques en fines gouttelettes sur lesquelles la lipase pancréatique

peut effectuer son travail de dégradation des triglycérides. Les sels biliaires composent une grande partie de la **bile**, sécrétée par le **foie**. La **vésicule biliaire** emmagasine et concentre la bile qui ne sert pas immédiatement.

La production de bile fait partie intégrante d'une autre fonction du foie: la dégradation des globules rouges non fonctionnels. Les pigments produits durant la dégradation des érythrocytes font partie des pigments biliaires que l'organisme élimine en même temps dans les matières fécales. (L'un de ces pigments biliaires, la bilirubine, est transformé en stercobiline par des microorganismes lors de son passage dans l'intestin. Ce pigment est responsable de la coloration caractéristique des selles.) Dans certaines affections du foie ou du sang, les pigments biliaires s'accumulent dans la peau et lui donnent une coloration jaune appelée ictère (jaunisse).



▼ **Figure 41.11** Une représentation schématique de la digestion enzymatique dans le système digestif humain. Le moment et le lieu où se déroule la dégradation chimique sont spécifiques de chaque classe de nutriments.

❓ La pepsine tolère l'effet de dénaturation du milieu très acide de l'estomac. À partir des divers processus digestifs qui ont lieu dans l'intestin grêle, décrivez une adaptation commune aux enzymes digestives de ce compartiment spécialisé.

L'absorption des nutriments dans l'intestin grêle

Pendant que la digestion s'achève, le péristaltisme déplace le contenu du duodénum dans les deux derniers segments de l'intestin grêle : le *jéjunum* et l'*iléon*. C'est là que l'absorption des nutriments s'effectue en traversant la muqueuse de l'intestin (**figure 41.12**). La muqueuse qui tapisse l'entière surface intérieure de l'intestin est fortement plissée et parsemée de prolongements digitiformes appelés **villosités intestinales**. Sur ces villosités, chaque cellule épithéliale possède à son tour des milliers d'appendices microscopiques, appelés **microvillosités**, qui sont en contact avec le contenu de l'intestin. Densément alignées, les microvillosités confèrent à l'épithélium intestinal un aspect qui lui vaut le nom de *bordure en brosse*. Collectivement, ces plis, villosités et microvillosités possèdent une aire immense de 200 à 300 m², soit à peu près l'équivalent d'un court de tennis. Cette énorme surface constitue une adaptation évolutive qui permet d'accélérer considérablement l'absorption des nutriments (voir la figure 33.9 pour plus de détails et d'exemples au sujet de la maximisation de la surface d'absorption chez divers organismes).

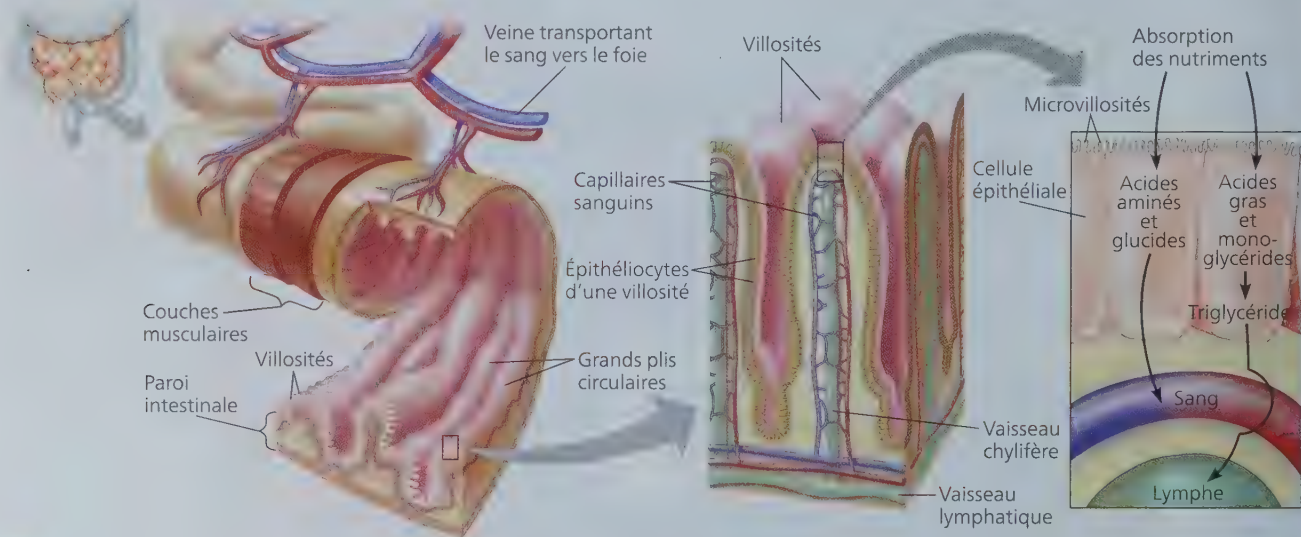
Le transport des nutriments de part et d'autre de la membrane des cellules épithéliales fait intervenir des mécanismes passifs ou actifs, selon le nutriment (voir les concepts 7.3 et 7.4). Par exemple, le fructose, un monosaccharide, se déplace par diffusion suivant son gradient de concentration, de la lumière intestinale jusque dans les cellules épithéliales. De là, le fructose quitte la face basale et passe dans des vaisseaux sanguins microscopiques, ou capillaires, qui parcourent le centre de chaque villosité. D'autres nutriments, dont les acides aminés, les petits peptides, les vitamines et la plupart des molécules de glucose, sont pompés contre leur gradient de concentration à travers les

membranes épithéliales. Grâce au transport actif, l'intestin peut absorber une proportion beaucoup plus élevée de ces nutriments que ne le permettrait la seule diffusion passive.

Les capillaires et les veines des villosités qui transportent le sang riche en éléments nutritifs se déversent dans la **veine porte hépatique**, un vaisseau sanguin qui communique directement avec les capillaires du foie. Quand le sang sort de cet organe, il se rend au cœur puis à toutes les parties du corps. Grâce à cette position stratégique, le foie est en mesure d'exercer simultanément deux fonctions cruciales. Premièrement, il régule la distribution des nutriments dans le reste du corps. Comme cet organe est capable de convertir plusieurs types de nutriments organiques en d'autres molécules qui seront utilisées ailleurs, la composition nutritionnelle du sang qui sort du foie peut être très différente du sang qui y pénètre. Deuxièmement, le foie peut débarrasser le sang des substances toxiques avant que celles-ci circulent vers toutes les autres régions du corps. Le foie est le principal lieu de détoxification d'un grand nombre de molécules organiques qui sont des substances étrangères pour l'organisme, dont les médicaments et certains déchets métaboliques.

La plupart des nutriments quittent l'intestin grêle par la circulation sanguine et passent dans le foie pour y être traités, sauf certains produits de la digestion des lipides (comme les triglycérides, aussi appelés triacylglycérols), qui empruntent une voie différente (**figure 41.13**). L'hydrolyse des triglycérides alimentaires par les lipases donne des acides gras libres et des monoglycérides (glycérol lié à un acide gras). Après leur absorption par les cellules épithéliales de l'intestin grêle, le glycérol et les acides gras reforment des triglycérides. Ils sont ensuite recouverts de phospholipides, de cholestérol et de protéines, de façon à former de petits globules nommés **chylomicrons**.

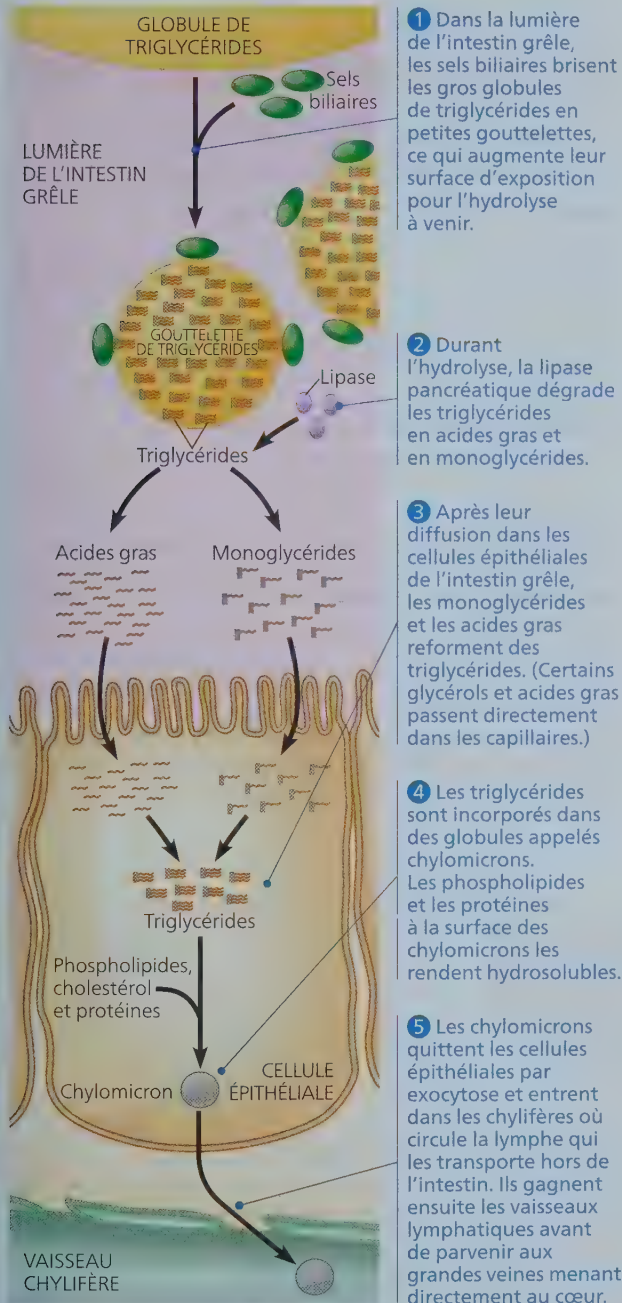
▼ **Figure 41.12** L'absorption des nutriments dans l'intestin grêle. Les nutriments hydrosolubles tels que les acides aminés et les glucides entrent dans la circulation sanguine, alors que les triglycérides sont transportés jusqu'au système lymphatique.



? Les vers plats infectent parfois le tube digestif des humains et s'accrochent à la paroi de l'intestin grêle. À partir de ce que vous savez sur la compartimentation de la digestion dans le tube digestif mammalien, quelles fonctions digestives ces parasites possèdent-ils, à votre avis?

▼ **Figure 41.13** La digestion et l'absorption des triglycérides.

Insolubles dans l'eau, les triglycérides sont dégradés dans la lumière de l'intestin grêle et réassemblés dans les cellules épithéliales. Ils sont ensuite transportés dans des globules hydrosolubles, les chylomicrons, qui entrent dans la lymphe par l'intermédiaire d'étroits capillaires lymphatiques appelés chylifères. De là, les chylomicrons sont emportés par la circulation lymphatique vers le conduit thoracique, un vaisseau lymphatique de grande taille qui se jette dans la veine sous-clavière gauche, puis menés au cœur. Ils sont ensuite captés par les tissus adipeux et par le foie.



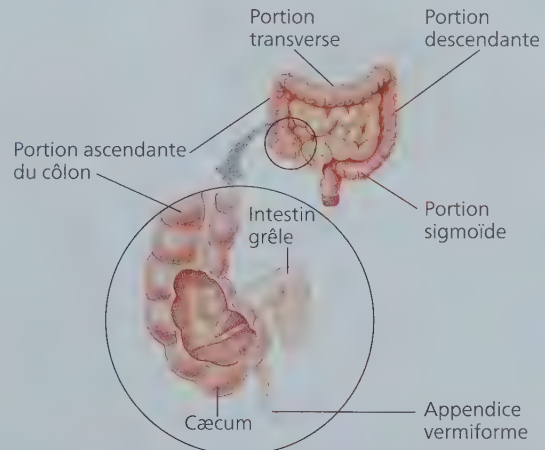
HABILITÉS VISUELLES ► Dans cette figure, deux des flèches indiquent un mouvement de substances entre la cellule et son environnement. L'un de ces mouvements requiert-il un apport d'énergie? Expliquez votre réponse.

En plus d'absorber les nutriments, l'intestin grêle récupère de l'eau et des ions. Chaque jour, une personne consomme environ 2 L d'eau et en sécrète 7 L en sucs digestifs dans le tube digestif. En général, toute cette eau (sauf environ 0,1 L) est réabsorbée dans les intestins, et la majeure partie de la récupération s'effectue dans l'intestin grêle. Il n'y a pas de mécanisme de transport actif de l'eau. Elle est réabsorbée par osmose quand les ions sodium (Na^+) et d'autres ions sont pompés à l'intérieur des cellules à partir de la lumière de l'intestin.

L'absorption dans le gros intestin

Le tube digestif se termine par le **gros intestin**, qui comprend le cæcum, le côlon et le rectum. Le petit intestin est relié au gros intestin par une jonction en T (**figure 41.14**). L'un des bras du T forme le **côlon**, qui mesure 1,5 m de longueur et mène au rectum et à l'anus. Le côlon est constitué de quatre portions : ascendante, transverse, descendante et sigmoïde. L'autre bras du T forme un renflement appelé **cæcum**. Ce segment en forme de cul-de-sac joue un rôle important dans la fermentation des matières ingérées, surtout chez les herbivores. En comparaison de nombreux autres mammifères, l'humain possède un cæcum relativement petit, portant un prolongement en forme de doigt, l'**appendice vermiforme**. L'appendice vermiforme servirait de réservoir aux microorganismes symbiotiques, dont il sera question au concept 41.4. Cette structure renferme de nombreux follicules lymphatiques où se produisent des réactions immunitaires qui permettent de contrôler la croissance bactérienne dans le gros intestin.

C'est dans le côlon que s'achève la récupération de l'eau qui a débuté dans l'intestin grêle. Les résidus de la digestion avancent dans le côlon sous l'effet du péristaltisme et forment les **matières fécales**, qui se solidifient progressivement. Leur mouvement est lent; il faut de 12 à 24 heures aux résidus pour traverser l'organe d'un bout à l'autre. Lorsque la muqueuse du côlon est irritée à la suite d'une infection virale ou bactérienne, par exemple, la réabsorption d'eau diminue, ce qui cause la diarrhée. Le problème contraire, la constipation, survient par suite du ralentissement du péristaltisme. Comme les matières fécales progressent plus lentement, de plus grandes quantités d'eau sont réabsorbées, ce qui rend les selles trop compactes et plus difficiles à évacuer.



▲ **Figure 41.14** La jonction de l'intestin grêle et du gros intestin.

Les matières non digérées présentes dans les matières fécales contiennent notamment des fibres de cellulose. Ces matériaux ne possèdent aucune valeur énergétique pour l'humain, mais ils facilitent le déplacement du bol alimentaire dans le tube digestif.

Une importante communauté bactérienne vit en symbiose avec les cellules épithéliales du côlon. Formant le microbiote normal du côlon, ces bactéries vivent des matières organiques non absorbées du côlon et représentent environ le tiers des matières fécales. Au cours de leurs activités métaboliques, de nombreuses bactéries du côlon produisent des gaz, notamment du méthane et du sulfure de dihydrogène (lequel a une odeur désagréable), qui sont expulsés par l'anus en même temps que l'air ingéré. Certaines bactéries intestinales produisent des vitamines, par exemple de la biotine, de l'acide folique, de la vitamine K et plusieurs vitamines du groupe B. Ces substances sont absorbées dans le sang et contribuent aux apports alimentaires en vitamines. Le segment terminal du gros intestin s'appelle **rectum** ; c'est là que les matières fécales s'accumulent avant d'être éliminées. Entre le rectum et l'anus se trouvent deux sphincters qui ferment l'orifice distal du tube digestif. L'un est involontaire (le muscle sphincter interne de l'anus, un muscle lisse), l'autre, volontaire (le muscle sphincter externe de l'anus, un muscle squelettique). Une ou plusieurs fois par jour, de puissantes contractions du côlon provoquent le besoin de déféquer. Ce besoin se fait souvent sentir après un repas parce que le remplissage de l'estomac déclenche un réflexe qui augmente le rythme des contractions dans le côlon.

Maintenant que nous avons suivi le trajet d'un repas dans tout le tube digestif, nous allons examiner quelques adaptations du système digestif chez divers animaux.

- En vous basant sur les besoins nutritionnels des humains et sur leur façon de s'alimenter, essayez d'expliquer, du point de vue de l'évolution, pourquoi l'amylase, contrairement aux autres enzymes digestives, est sécrétée dans la bouche.
- ET SI ?** ▶ Prédisez ce qui se passerait si vous mélangiez un suc gastrique et des aliments broyés dans une éprouvette.

Voir les réponses proposées à l'appendice A.

CONCEPT 41.4

Les adaptations évolutives du système digestif des vertébrés sont corrélées avec le régime alimentaire

ÉVOLUTION Les différents systèmes digestifs des vertébrés représentent des variations d'un même thème, mais il existe de nombreuses adaptations étroitement associées au régime alimentaire de l'animal. Afin d'illustrer comment la forme sert la fonction, nous présenterons quelques-unes de ces adaptations.

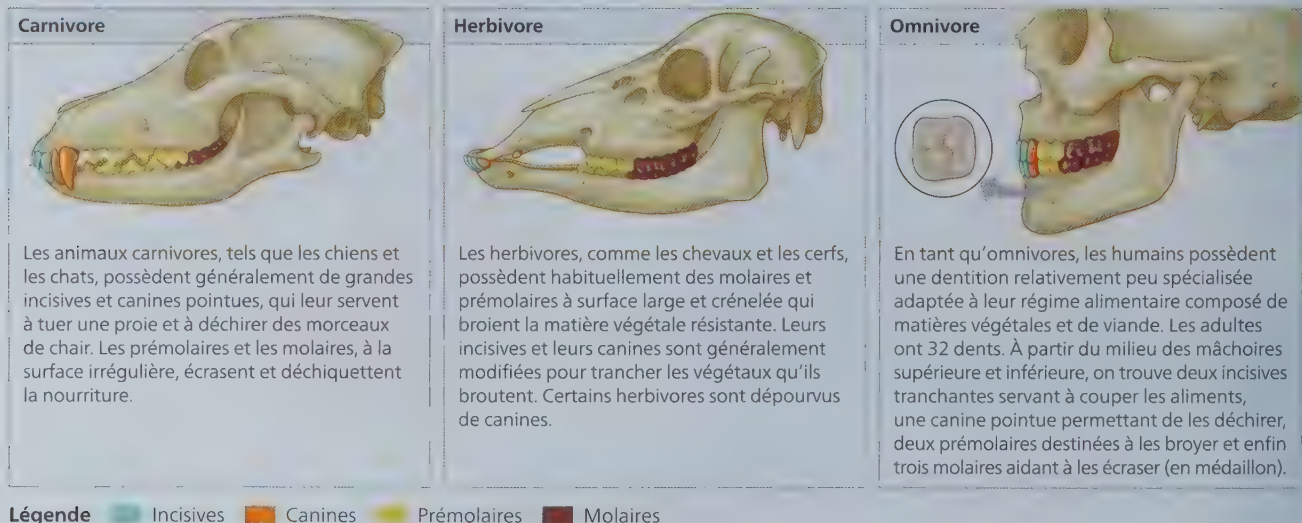
Les adaptations de la dentition

La dentition, c'est-à-dire l'ensemble des dents d'un animal, constitue un exemple de variation structurale reflétant le régime alimentaire (**figure 41.15**). L'adaptation évolutive de la dentition des mammifères au traitement de divers types d'aliments constitue l'une des principales raisons qui expliquent le succès de cette catégorie de vertébrés. Par exemple, la loutre de mer de la figure 41.1 utilise ses canines très pointues pour déchiqeter des proies comme le crabe et ses molaires un peu arrondies pour en broyer la carapace. Les mécanismes adaptatifs touchent un grand nombre d'aspects de la dentition. C'est le cas notamment de la forme des dents, de leur constitution et de leur nombre (32 chez l'humain adulte, mais des milliers pour d'autres espèces). Parmi les autres adaptations, mentionnons l'emplacement des

RETOUR SUR LE CONCEPT 41.3

- Expliquez pourquoi un inhibiteur de la pompe à protons, par exemple le médicament oméprazole, soulage les symptômes du reflux gastrique.

▼ **Figure 41.15** La dentition et le régime alimentaire.



dents (sur plusieurs os du squelette buccal ou seulement sur les arcades dentaires des maxillaires), le rythme de remplacement (certains animaux ont une certaine de dentitions au cours de leur vie), leur mode d'implantation (soudées à l'os ou reliées à lui par un ligament) ainsi que leur croissance (limitée ou non). Les mammifères possèdent généralement une dentition plus spécialisée (la « dent » du narval et les défenses de l'éléphant) que celle des autres vertébrés, mais il existe des exceptions intéressantes. Par exemple, les serpents venimeux, comme les crotales (de la sous-famille des crotalinés), sont armés de crochets : ce sont des dents modifiées qui injectent du venin dans les proies. Certains crochets sont creux comme des seringues, tandis que d'autres laissent tomber le venin goutte à goutte le long de rainures parcourant la surface des dents.

Les adaptations de l'estomac et de l'intestin

Les adaptations évolutives qui découlent du régime alimentaire se traduisent parfois par des variations dans la taille des organes digestifs. Par exemple, les vertébrés carnivores sont souvent dotés d'un grand estomac extensible ; comme il leur arrive d'être privés de nourriture durant de longues périodes, ils doivent consommer autant de nourriture que possible quand ils réussissent à capturer une proie. Ainsi, c'est un estomac extensible qui permet à un python de Séba d'avalier une gazelle entière (voir la figure 41.5) et à un lion d'Afrique (*Panthera leo*) de 200 kg d'ingérer jusqu'à 40 kg de viande en un seul repas !

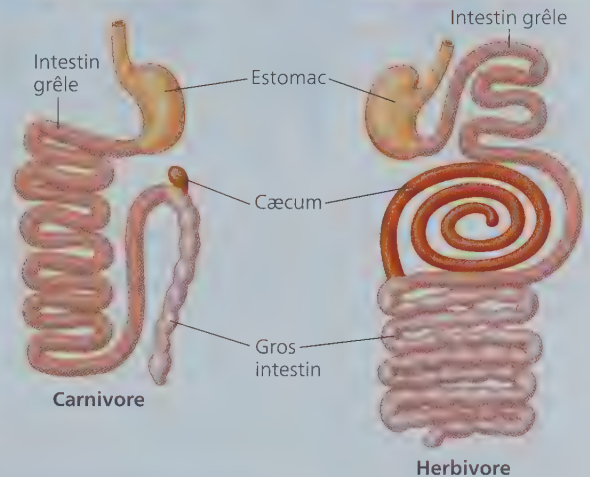
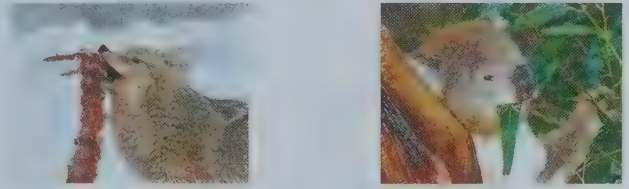
Chez les vertébrés, la longueur du système digestif peut également témoigner d'adaptations évolutives au régime alimentaire. En général, les herbivores et les omnivores ont des tubes digestifs un peu plus longs par rapport à leur taille corporelle que ceux des carnivores (figure 41.16). Les végétaux contiennent des parois cellulaires riches en cellulose, un polysaccharide difficile à digérer. Un tube digestif plus long est utile dans la mesure où il permet de prolonger la digestion et d'augmenter la zone de surface essentielle à l'absorption des nutriments. Prenons l'exemple du coyote et du koala. Ces deux mammifères ont environ la même taille, mais le tube digestif du koala (*Phascolarctos cinereus*) est beaucoup plus long que celui du coyote (*Canis latrans*). Cette adaptation favorise la digestion des feuilles d'eucalyptus – qui sont fibreuses et pauvres en protéines – dont ce marsupial tire la totalité ou presque de son apport en nutriments et en eau.

Les adaptations mutualistes

On estime que de 10 à 100 milliards de bactéries vivent dans le système digestif de l'humain. Une de ces bactéries, *Escherichia coli*, est si répandue que sa présence dans les lacs et les rivières est un indicateur utile de la contamination fécale provenant des eaux usées non traitées.

Cette cohabitation des humains avec d'innombrables bactéries intestinales est un exemple de mutualisme, une interaction mutuellement bénéfique entre deux espèces (voir le concept 54.1). Par exemple, certaines bactéries intestinales produisent des vitamines comme la vitamine K, la biotine et l'acide folique, qui sont absorbées dans le sang, s'ajoutant ainsi à notre apport alimentaire. Les bactéries intestinales régulent également le développement de l'épithélium intestinal et la fonction de l'immunité innée. En échange, les bactéries reçoivent un apport constant de nutriments et bénéficient de l'environnement stable de leur hôte.

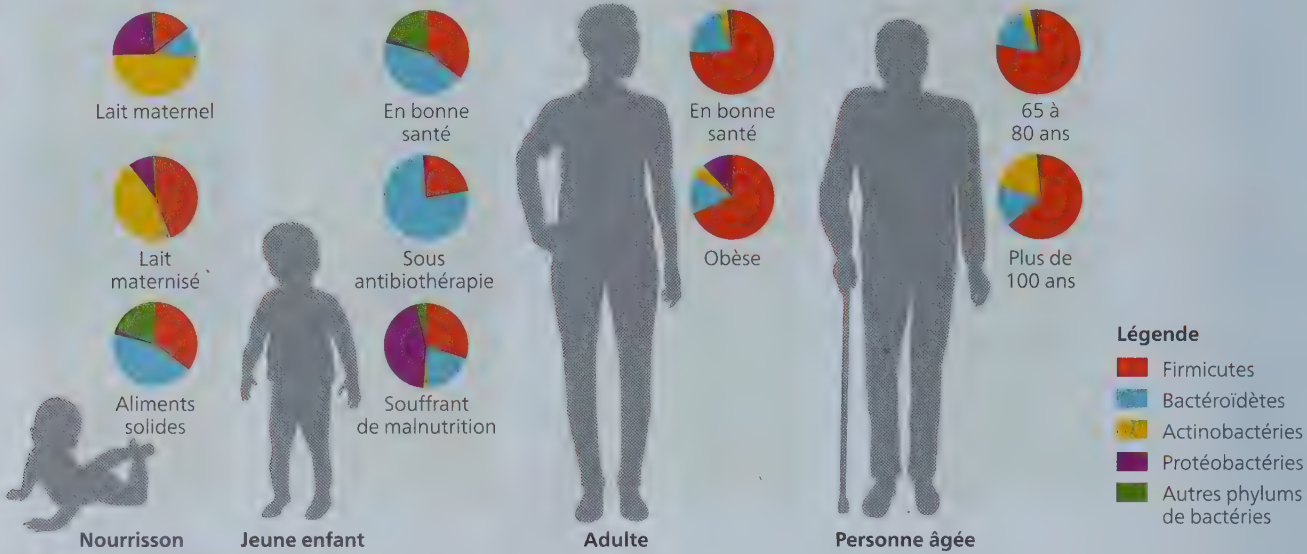
▼ **Figure 41.16** Le tube digestif d'un carnivore (coyote) et celui d'un herbivore (koala). Un tube digestif relativement court suffit au coyote pour digérer la viande et absorber les nutriments. En comparaison, le long tube digestif du koala est adapté à la digestion des feuilles d'eucalyptus. La mastication prolongée permet de découper les feuilles ingérées en tous petits fragments, ce qui augmente la surface exposée aux sucs digestifs. Dans le très long cæcum et la portion supérieure du côlon, les bactéries symbiotiques dégradent les feuilles déchiquetées, ce qui libère les nutriments que le koala peut absorber.



Au cours des dernières années, notre compréhension du microbiote s'est considérablement approfondie. Le **microbiote** est l'ensemble des microorganismes qui vivent dans l'organisme et sur lui, tandis que le **microbiome** est l'ensemble de leurs génomes. Pour étudier le microbiote, les scientifiques utilisent une technique de séquençage de l'ADN par amplification en chaîne par polymérase (voir la figure 20.7). Ils ont ainsi découvert plus de 400 espèces bactériennes dans le tube digestif de l'humain, un nombre beaucoup plus élevé que le nombre de bactéries identifiées par culture en laboratoire et par caractérisation. Les chercheurs ont en outre constaté des différences notables d'un microbiote à l'autre, selon l'alimentation de la personne, son âge et la présence de maladie (figure 41.17).

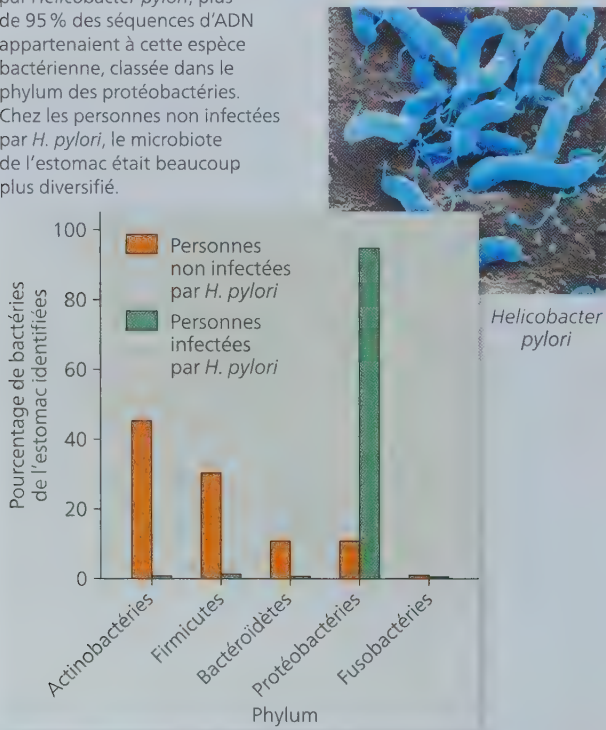
Une des études réalisées sur le sujet a fourni des données très éclairantes qui aident à expliquer pourquoi la bactérie *H. pylori* peut nuire à la santé de l'estomac et entraîner des ulcères. Après avoir identifié toutes les bactéries présentes dans les échantillons de tissus stomacaux prélevés chez des adultes (certains tissus étant infectés par *H. pylori* et d'autres non infectés), les chercheurs de cette étude ont fait une découverte remarquable : la présence d'une infection par *H. pylori* éliminait presque toutes les autres espèces bactériennes de l'estomac (figure 41.18). Les études qui portent sur les différences microbiotiques associées à des maladies sont particulièrement prometteuses pour la mise au point de traitements innovateurs efficaces.

▼ **Figure 41.17** La composition du microbiote selon le stade de développement chez l'humain. En copiant et en séquençant l'ADN bactérien contenu dans des échantillons de tubes digestifs humains, les chercheurs ont pu caractériser la communauté bactérienne qui compose le microbiote intestinal de l'humain.



INTERPRÉTEZ LES DONNÉES ► Comparez la proportion relativement élevée d'actinobactéries dans le microbiote de l'intestin d'adultes en santé avec leur proportion dans un estomac en santé (voir la figure 41.18). Tentez d'expliquer pourquoi la composition du microbiote de ces deux organes est différente malgré que l'intestin et l'estomac sont directement reliés.

▼ **Figure 41.18** Le microbiote de l'estomac. En copiant et séquençant l'ADN d'échantillons d'estomacs humains, des chercheurs ont pu caractériser la communauté bactérienne composant le microbiote de l'estomac. Dans les échantillons provenant de personnes infectées par *Helicobacter pylori*, plus de 95 % des séquences d'ADN appartenaient à cette espèce bactérienne, classée dans le phylum des protéobactéries. Chez les personnes non infectées par *H. pylori*, le microbiote de l'estomac était beaucoup plus diversifié.



Selon les données actuelles, les changements qui affectent le microbiote intestinal pourraient jouer un rôle dans l'obésité, les carences nutritionnelles, le diabète, les maladies cardiovasculaires, les maladies inflammatoires du tube digestif, et même perturber certaines fonctions cérébrales et l'humeur. Par exemple, une expérience a montré que les souris chez qui on éliminait les microorganismes du tube digestif présentaient des concentrations élevées de corticostérome, une hormone de stress. De plus, en présence d'une limitation de la mobilité, leur réaction de stress était plus forte que celle des souris témoins.

Le microbiome (ensemble des génomes bactériens) du tube digestif d'une personne renferme quelque 100 fois plus de gènes qu'une seule de ses cellules. Cette énorme différence dans le nombre de gènes permettra sans doute aux scientifiques de faire des découvertes cruciales à propos du rôle des gènes bactériens dans la physiologie de la santé et des maladies humaines.

Les adaptations mutualistes chez les herbivores

Les relations mutualistes avec des microorganismes sont tout particulièrement importantes chez les herbivores. La majorité de l'énergie chimique contenue dans le régime alimentaire d'un herbivore doit être extraite de la cellulose de la paroi des cellules végétales. Toutefois, ces animaux ne produisent pas eux-mêmes les enzymes (cellulases) nécessaires à l'hydrolyse de la cellulose. De nombreux vertébrés (ainsi que les termites, qui s'alimentent en consommant du bois composé de cellulose) règlent le problème en abritant d'énormes populations de bactéries et de protistes symbiotiques (des trichomonadines, dans le cas des termites) ou encore d'eumycètes dans des chambres de fermentation spéciales, situées le long de leur tube digestif. Ces microorganismes mutualistes possèdent des enzymes capables de

digérer la cellulose et de la convertir en monosaccharides et en d'autres composés absorbables par l'animal qui les abrite. Dans bien des cas, les microorganismes peuvent également utiliser les monosaccharides issus de la digestion de la cellulose et les minéraux présents dans le tube digestif pour fabriquer toutes sortes de nutriments essentiels, notamment des vitamines, des acides aminés et des acides gras.

Chez les chevaux (*Equus caballus*), les koalas et les éléphants (famille des éléphantidés), les microorganismes symbiotiques vivent dans le cæcum. Chez l'hoazin (*Opisthocomus hoazin*), un oiseau herbivore des forêts tropicales d'Amérique du Sud, c'est dans un grand jabot musculueux (une poche œsophagienne; voir la figure 41.7) que vivent les microorganismes symbiotiques. Des rainures rigides situées dans la paroi du jabot réduisent les feuilles en fragments, et les microorganismes se chargent de décomposer la cellulose.

Les bactéries mutualistes des lapins et de certains rongeurs vivent dans le gros intestin ainsi que dans le cæcum. Étant donné que la plupart des nutriments sont absorbés dans l'intestin grêle, ceux qui résultent de la fermentation bactérienne dans le gros intestin quittent l'organisme en même temps que les matières fécales. Pour récupérer ces nutriments, les lapins et certains rongeurs ingèrent une partie de leurs matières fécales (cæcotrophie), faisant ainsi repasser les aliments dans leur tube digestif. Les crottes de lapin qui ne sont pas réingérées constituent les selles (ou fèces) éliminées une fois que la nourriture est passée de nouveau dans le tube digestif.

Les adaptations les plus complexes associées à un régime herbivore ont évolué chez les ruminants, c'est-à-dire chez des animaux qui ruminent comme les cerfs, les girafes, les bovins et les ovins (figure 41.19).

Même si nous nous sommes intéressés tout particulièrement aux vertébrés jusqu'à maintenant, il existe beaucoup d'adaptations relatives à la digestion chez les autres animaux. Certaines sont remarquables, d'ailleurs, notamment celles des vers tubicoles géants (*Riftia pachytila*). Ces vers, qui mesurent plus de 3 m de long, tolèrent des pressions de l'ordre de 260 atmosphères et vivent à proximité des cheminées hydrothermales des grands fonds océaniques (voir la figure 52.15). Ils n'ont ni bouche ni

système digestif et comptent plutôt sur des bactéries mutualistes qui vivent à l'intérieur d'eux pour produire l'énergie et les nutriments dont ils ont besoin. En effet, ces bactéries sont chimioautotrophes (voir le concept 27.3) à partir du dioxyde de carbone (CO_2), des molécules d'oxygène (O_2), du sulfure d'hydrogène (H_2S) et du nitrate (NO_3^-) qui s'échappent de ces cheminées. En somme, pour les invertébrés aussi bien que pour les vertébrés, l'évolution des relations mutualistes avec des microorganismes symbiotiques a été, au cours de l'évolution, une stratégie générale pour multiplier les sources de nutriments disponibles.

Maintenant que nous avons vu comment les animaux optimisent l'extraction des nutriments contenus dans la nourriture, nous allons examiner la façon dont ils utilisent ces nutriments de manière équilibrée.



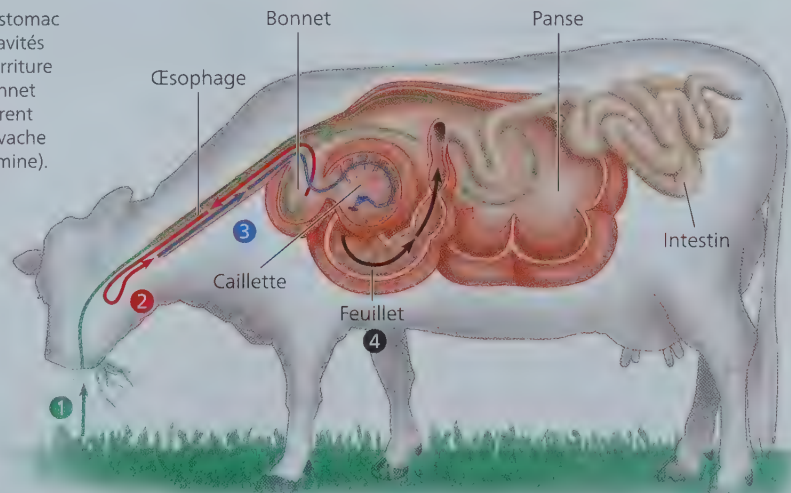
▲ Le ver tubicole géant.

RETOUR SUR LE CONCEPT 41.4

1. Nommez deux avantages d'avoir un tube digestif long pour transformer les matières végétales difficiles à digérer.
2. Quelles caractéristiques du tube digestif d'un mammifère en font un habitat de choix pour les microorganismes mutualistes ?
3. **ET SI ?** ► Certaines personnes souffrent d'intolérance au lactose, un trouble qui se manifeste par des crampes, des ballonnements ou de la diarrhée quand elles mangent des produits laitiers. Elles sont en effet incapables de sécréter la lactase, l'enzyme qui dégrade le lactose du lait. Supposons qu'une personne intolérante au lactose mange du yogourt contenant des bactéries productrices de lactase. Pourquoi l'ingestion de ce yogourt ne fera-t-elle, au mieux, que soulager temporairement les symptômes ?

Voir les réponses proposées à l'appendice A.

► **Figure 41.19 La digestion chez les ruminants.** L'estomac de la vache (*Bos taurus*, un ruminant) comporte quatre cavités qui abritent des microorganismes mutualistes. 1 La nourriture mâchée entre d'abord dans la panse (ou rumen) et le bonnet (ou réticulum), où des microorganismes mutualistes digèrent la cellulose des végétaux ingérés. 2 Périodiquement, la vache régurgite le contenu de la panse et le «remâche» (elle rumine). Cette rumination assure une meilleure décomposition des fibres et les prépare à l'action microbienne. 3 Les matières ruminées passent ensuite dans la caillette (ou omasum), où une partie de l'eau est retirée. 4 Puis elles vont dans le feuillet (ou abomasum) pour y être digérées par les enzymes produites par la vache. C'est ainsi que cet animal obtient une quantité considérable de nutriments, qui proviennent non seulement de l'herbe, mais aussi des microorganismes mutualistes, dont la population demeure stable chez le ruminant.



Des circuits de rétroaction régulent la digestion, le stockage de l'énergie et l'appétit

Pour approfondir notre étude de la nutrition des animaux, nous allons voir comment leur façon d'obtenir et d'utiliser les nutriments correspond aux exigences du moment et à leurs besoins énergétiques.

La régulation de la digestion

Chez bien des animaux, les repas peuvent être très espacés. Lorsque c'est le cas, le système digestif n'a pas besoin de fonctionner continuellement. Au lieu de cela, chaque étape de la digestion n'est activée qu'en présence de nourriture : au moment où des aliments arrivent dans un compartiment du tube digestif, ils déclenchent la sécrétion de sucs digestifs qui mettent en route l'étape suivante de la digestion chimique. Des contractions musculaires font également avancer la nourriture dans le tube digestif. Par exemple, nous avons vu que des réflexes nerveux stimulent la libération de salive lorsque de la nourriture est introduite dans la cavité buccale et orchestrent la déglutition quand un bol alimentaire entre dans le pharynx. De la même façon, l'arrivée de nourriture dans l'estomac active le malaxage et la libération des sucs gastriques. Une partie du système nerveux appelée *système nerveux entérique*, spécialisée dans les organes de la digestion, régule ces étapes ainsi que le péristaltisme dans l'intestin grêle et le gros intestin.

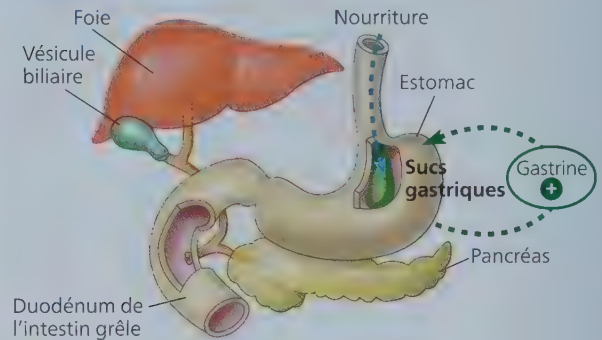
Le système endocrinien joue aussi un rôle crucial dans la régulation de la digestion. Comme l'illustre la **figure 41.20**, les hormones libérées par l'estomac et le duodénum font en sorte que les sécrétions du système digestif interviennent seulement au moment voulu. Comme toutes les hormones, celles qui sont libérées par l'estomac et le duodénum circulent dans le sang, y compris la gastrine dont la cible (l'estomac) est aussi l'organe qui la sécrète.

La régulation des réserves d'énergie

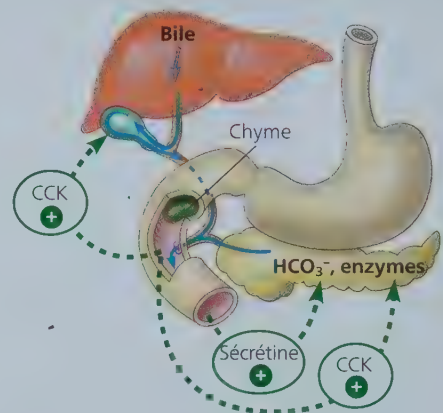
Lorsqu'un animal consomme plus de molécules riches en énergie qu'il n'en a besoin pour son métabolisme et ses activités, l'excédent d'énergie est emmagasiné (voir le concept 40.4). Chez l'humain, ce sont d'abord les cellules du foie et les cellules musculaires qui emmagasinent l'énergie sous forme de glycogène, un polymère composé de nombreuses unités de glucose (voir la figure 5.6b). Quand l'organisme a fait toutes les réserves possibles de glycogène, il transforme généralement l'excédent en triglycérides (graisses) dans les tissus adipeux.

À l'inverse, durant les périodes où la quantité d'énergie absorbée est inférieure à celle qui est dépensée, par exemple lors d'une période d'exercice physique intense ou en raison d'un manque de nourriture, le corps humain commence habituellement par consommer le glucose provenant des réserves de glycogène du foie. Ensuite, le corps puise dans les réserves de glycogène musculaire et, enfin, dans les graisses. Les triglycérides sont particulièrement riches en énergie. L'oxydation de 1 g de triglycérides

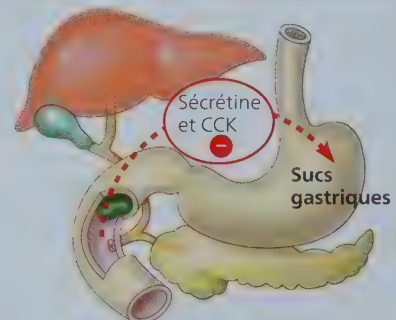
▼ **Figure 41.20** La régulation hormonale de la digestion.



- 1 L'entrée de nourriture dans l'estomac provoque l'étirement des parois, un stimulus qui déclenche la libération de *gastrine*. Cette hormone emprunte la circulation sanguine pour atteindre l'estomac où elle stimule la production de sucs gastriques.



- 2 Après un certain temps, le chyme (une bouillie acide formée par la nourriture partiellement digérée) passe de l'estomac au duodénum. Le duodénum réagit aux acides aminés ou aux acides gras du chyme en libérant des hormones digestives : la cholécystokinine et la sécrétine. La *cholécystokinine* (CCK) déclenche à son tour la sécrétion d'enzymes digestives par le pancréas et de bile par la vésicule biliaire. Sous l'effet de la *sécrétine*, le pancréas libère du bicarbonate (HCO_3^-) qui neutralise le chyme acide.



- 3 Si le chyme est riche en graisses, les taux élevés de sécrétine et de CCK libérées incitent l'estomac à inhiber le péristaltisme et la sécrétion de sucs gastriques, ralentissant ainsi la digestion.

Légende + Stimulation - Inhibition

libère environ deux fois plus d'énergie que l'oxydation de 1 g de glucides ou de protéines. C'est pour cette raison que le tissu adipeux est la façon la plus efficace, au regard de l'espace disponible, de stocker de grandes quantités d'énergie. La plupart des personnes en bonne santé disposent de suffisamment de réserves de graisse pour supporter plusieurs semaines de jeûne.

La régulation de la glycémie

La synthèse et la dégradation du glycogène sont des processus vitaux non seulement pour le stockage de l'énergie, mais également pour le maintien de l'équilibre métabolique par l'intermédiaire de la régulation de la glycémie. Chez l'humain, les valeurs normales de la glycémie (taux de glucose sanguin) se situent entre 3,9 et 6,1 mmol/L. Comme le glucose est un carburant important pour la respiration cellulaire et une source de squelettes carbonés tout aussi importante pour la biosynthèse, le maintien de la glycémie dans cet intervalle de valeurs est essentiel.

La régulation du glucose relève principalement des effets antagonistes (opposés) de deux hormones : l'insuline et le glucagon (figure 41.21). Quand la glycémie est trop élevée, la sécrétion d'**insuline** déclenche l'absorption du glucose du sang dans les cellules du corps pour abaisser la glycémie. Quand la glycémie est trop basse, la sécrétion de **glucagon** stimule la libération de glucose dans le sang pour augmenter la glycémie ; ce glucose provient des réserves de l'organisme, comme le glycogène du foie.

Le foie est un organe cible que l'insuline et le glucagon gardent très actif. Après un repas riche en glucides, par exemple, le taux d'insuline s'élève, ce qui stimule la biosynthèse du

glycogène à partir du glucose qui arrive au foie par la veine porte hépatique. Entre les repas, alors que la glycémie dans la veine porte hépatique est beaucoup plus faible, le glucagon stimule la dégradation du glycogène hépatique, ce qui entraîne la libération de glucose dans le sang. L'action combinée et opposée de l'insuline et du glucagon permet au sang qui sort du foie d'avoir une concentration de glucose qui se situe presque tout le temps dans les limites de la normale.

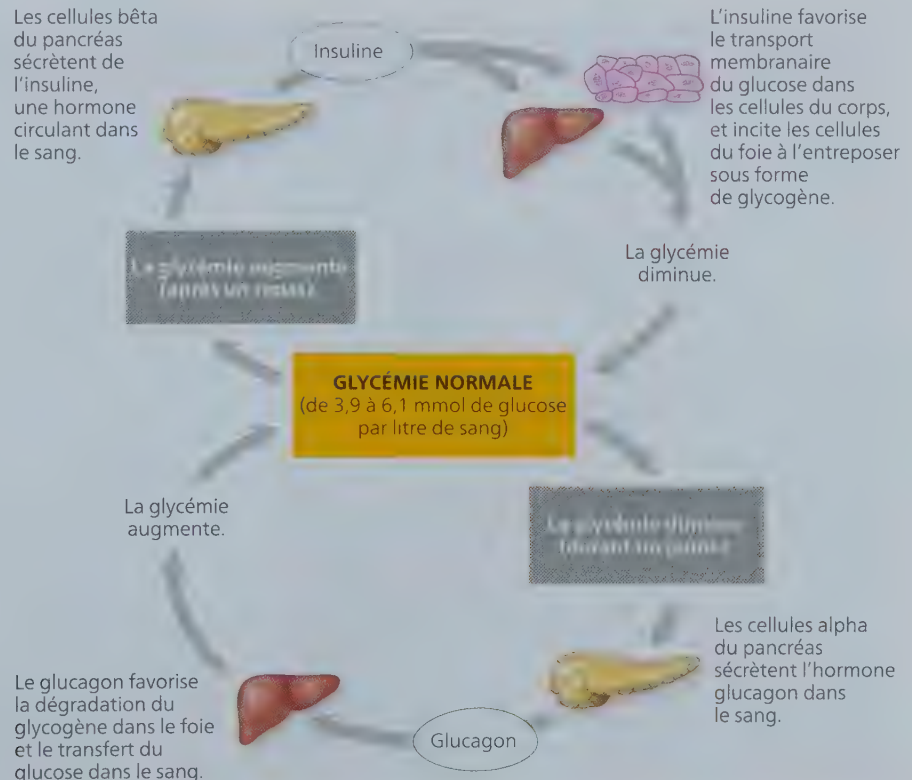
L'insuline a également un effet sur presque toutes les cellules du corps lorsqu'elle stimule l'absorption de glucose du sang, à l'exception des cellules de l'encéphale, qui consomment du glucose même en l'absence d'insuline. Grâce à cette adaptation évolutive, l'encéphale a accès presque en tout temps au glucose en circulation, même lorsque la glycémie est basse.

Le glucagon et l'insuline sont tous deux produits par le pancréas, dans lequel sont dispersés des amas de cellules endocrines appelées îlots pancréatiques (ou îlots de Langerhans). Chaque îlot renferme des *cellules alpha*, qui fabriquent le glucagon, et des *cellules bêta*, qui fabriquent l'insuline. Comme toutes les hormones, l'insuline et le glucagon sont sécrétés dans le liquide interstitiel et entrent ensuite dans la circulation sanguine.

En tout, les cellules productrices d'hormones ne comptent que pour 1 à 2% de la masse du pancréas. D'autres cellules pancréatiques synthétisent et sécrètent des ions HCO_3^- et les enzymes digestives qui s'activent dans l'intestin grêle (voir la figure 41.11). Ces substances sont déversées dans de petits conduits reliés au canal pancréatique qui, lui, s'ouvre sur l'intestin grêle. Par conséquent, le pancréas travaille à la fois pour le système endocrinien et pour l'appareil digestif.

► **Figure 41.21** La régulation du glucose, une des sources d'énergie cellulaire. Après la digestion d'un repas, le glucose et les autres monomères sont absorbés par les tissus du tube digestif et passent dans le sang. Le corps humain régule l'utilisation et l'entreposage du glucose, qui constitue une importante source d'énergie cellulaire. Le mécanisme de régulation fait intervenir deux hormones pancréatiques, l'insuline et le glucagon, qui agissent sur la glycémie, c'est-à-dire sur la concentration molaire volumique de glucose dans le sang.

FAITES DES LIENS ► Quel mécanisme de régulation par rétroaction chacun de ces circuits de régulation illustre-t-il (voir le concept 40.2) ?



Le diabète sucré

Jusqu'à maintenant, nous avons décrit le rôle de l'insuline et du glucagon dans la régulation de la glycémie, mais exclusivement dans le contexte de bon fonctionnement. Il existe toutefois un certain nombre de maladies susceptibles de perturber la régulation du glucose et de nuire à la santé, en affectant notamment le cœur, les vaisseaux sanguins, les yeux et les reins. Parmi ces maladies, le diabète sucré est la plus connue et la plus répandue.

Le **diabète sucré** est une maladie causée par un déficit d'insuline ou par une réponse inadéquate des tissus cibles à l'insuline. Quand la glycémie augmente, les cellules sont incapables d'absorber suffisamment de glucose pour répondre aux besoins métaboliques. Il s'ensuit que les graisses deviennent le principal substrat de la respiration cellulaire. Dans les formes les plus graves de la maladie, des métabolites acides se forment durant la dégradation des graisses et s'accumulent dans le sang, ce qui peut être dangereux puisque leur présence abaisse le pH et épuise les ions sodium et potassium de l'organisme.

Chez les personnes diabétiques, la glycémie peut excéder la capacité des reins à réabsorber le glucose. Celui-ci demeure donc dans le filtrat rénal et il est excrété dans l'urine. C'est pour cette raison que la recherche de glucose dans l'urine est une des méthodes de dépistage du diabète. L'accumulation du glucose dans l'urine a pour effet d'attirer de plus grandes quantités d'eau, si bien que le volume d'urine augmente considérablement. Le terme *diabète* (du grec *diabainein*, « qui traverse ») évoque d'ailleurs ces mictions abondantes, tandis que le terme *sucré* désigne, évidemment, la présence de sucre (glucose) dans l'urine.

Il existe deux types de diabète sucré, soit de type 1 ou de type 2. Chaque type se caractérise par une glycémie élevée, mais leurs causes sont fort différentes.

Le diabète de type 1 Aussi appelé diabète insulino-dépendant, le *diabète de type 1* est une maladie auto-immune dans laquelle le système immunitaire s'attaque aux cellules bêta du pancréas. Cette forme de diabète apparaît habituellement dans l'enfance et anéantit la capacité à produire de l'insuline. Le traitement consiste en injections d'insuline, généralement plusieurs fois par jour. Auparavant, l'insuline injectable provenait de pancréas animaux, mais de nos jours, on utilise l'hormone humaine produite par des bactéries génétiquement modifiées, une source relativement peu coûteuse (voir la figure 20.4). La recherche sur les cellules souches progresse rapidement; il serait possible de les utiliser pour obtenir des cellules bêta de remplacement qui rétabliraient la capacité du pancréas à produire de l'insuline. On pourrait ainsi guérir le diabète de type 1.

Le diabète de type 2 Aussi appelé diabète non insulino-dépendant, le *diabète de type 2* se caractérise par l'incapacité des cellules cibles de répondre normalement à l'insuline. Le pancréas produit bel et bien de l'insuline, mais les cellules cibles sont incapables d'absorber le glucose sanguin, de sorte que la glycémie demeure élevée. La résistance à l'insuline qui caractérise le diabète de type 2 est parfois due à une malformation héréditaire du récepteur de l'insuline ou de la voie de transduction de la réponse à l'insuline. Dans beaucoup de cas, toutefois, ce sont des événements survenant dans les cellules cibles qui inactivent la voie de transduction de la réponse qui, elle, s'avère fonctionnelle. Cette inactivation semble être associée à une réaction inflammatoire de l'immunité innée (voir le concept 43.1).

Bien que l'hérédité soit un facteur dans le diabète de type 2, l'excès de poids et la sédentarité augmentent considérablement le risque de voir s'installer la maladie. Cette forme de diabète apparaît généralement après l'âge de 40 ans, mais elle peut également toucher les enfants, surtout s'ils sont sédentaires et font de l'embonpoint. Plus de 90% des personnes diabétiques souffrent de diabète de type 2, et si bon nombre d'entre eux peuvent maîtriser leur glycémie au moyen d'une activité physique régulière et d'une saine alimentation, beaucoup ont besoin de médicaments. Chose certaine, le diabète de type 2 est la septième cause de décès aux États-Unis, la sixième au Canada et en France. Cette maladie représente un problème de santé publique de plus en plus important dans le monde.

On effectue actuellement des études sur des animaux de laboratoire et chez les humains afin de déterminer le rôle de l'obésité et de la sédentarité dans l'inactivation de la voie de transduction de la réponse à l'insuline.

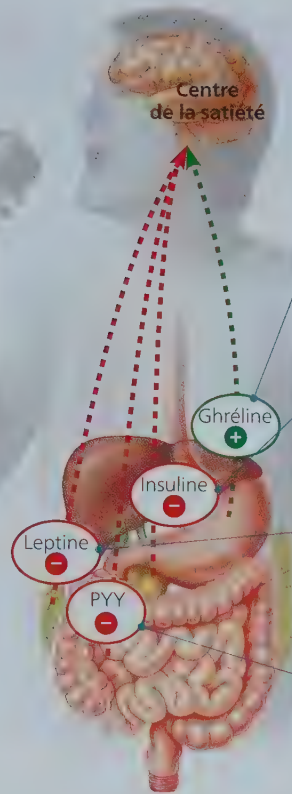
La régulation de l'appétit et de l'apport énergétique

La **suralimentation** résulte d'un apport calorique supérieur aux besoins métaboliques. Elle cause l'obésité, qui se manifeste par l'accumulation excessive de graisses dans l'organisme. L'obésité est associée à de nombreux problèmes de santé, notamment le diabète de type 2, les cancers du côlon et du sein, ainsi que les maladies cardiovasculaires, telles les crises cardiaques, et les accidents vasculaires cérébraux. Aux États-Unis seulement, on estime qu'annuellement l'obésité est en cause dans 300 000 décès. Les États-Unis ont peut-être le triste record du nombre de personnes souffrant d'obésité, mais ce problème est devenu un phénomène mondial que plusieurs décrivent comme une véritable épidémie.

Les chercheurs ont découvert plusieurs mécanismes homéostatiques qui fonctionnent comme des circuits de rétroaction dont le rôle est de régir la mise en réserve et le métabolisme des graisses corporelles. Un réseau de neurones transmet et traite l'information envoyée par l'estomac pour réguler la sécrétion des hormones qui assurent la régulation de l'appétit à court et à long terme. La cible de ces hormones est un « centre de la satiété » situé dans l'encéphale (**figure 41.22**). Par exemple, la *ghréline*, une hormone également sécrétée par l'estomac, déclenche la sensation de faim avant les repas. En revanche, l'insuline et le peptide tyrosine tyrosine (PYY), une hormone sécrétée par l'intestin grêle après les repas, suppriment l'appétit. La *leptine*, elle, est produite par le tissu adipeux (les graisses) et inhibe aussi l'appétit; elle semble jouer un rôle majeur dans la régulation du taux de graisses de l'organisme. Dans la rubrique **Habilités scientifiques**, vous interpréterez les données d'une expérience portant sur les gènes qui affectent la production de leptine et son fonctionnement chez la souris.

Trouver de la nourriture, la digérer et en absorber les nutriments: voilà comment les animaux obtiennent l'énergie dont ils ont besoin pour leurs activités. Mais ce n'est pas tout. Encore faut-il que l'organisme de l'animal distribue dans toutes ses cellules les nutriments absorbés (circulation) et que, pour les utiliser à des fins métaboliques, il effectue des échanges gazeux avec l'environnement. Ces processus ainsi que les adaptations qui les facilitent sont les sujets du chapitre 42.

► **Figure 41.22** Quelques hormones de régulation de l'appétit. Les hormones sécrétées par divers organes et tissus atteignent l'encéphale par l'intermédiaire de la circulation sanguine. Ces signaux agissent sur l'hypothalamus, une région de l'encéphale, qui à son tour régit le «centre de la satiété». Ce dernier génère les potentiels d'action à l'origine de la sensation de faim ou de satiété. L'hormone ghréline stimule l'appétit; les trois autres l'inhibent.



La **ghréline**, découverte en 1999, est sécrétée par l'estomac; c'est l'un des médiateurs qui déclenche la sensation de faim quand l'heure des repas approche. Chez les personnes qui suivent un régime amaigrissant, la concentration de ghréline augmente, ce qui expliquerait pourquoi il est si difficile de faire preuve de persévérance.

L'élévation de la glycémie après un repas stimule la sécrétion de l'**insuline** par le pancréas. En plus de ses autres fonctions, l'insuline inhibe l'appétit en agissant sur l'encéphale.

La **leptine**, découverte en 1994, est produite par les cellules adipeuses; l'augmentation de sa concentration supprime l'appétit. Lorsque les graisses corporelles diminuent, la concentration de leptine baisse et l'appétit augmente.

Le **PYY** (peptide agissant sur les récepteurs de type Y2 de l'hypothalamus), découvert en 2002, est une hormone sécrétée par l'intestin grêle et le côlon après les repas; elle agit comme un suppresseur d'appétit et se comporte comme un antagoniste de la ghréline, qui stimule l'appétit.

DÉMARCHE SCIENTIFIQUE HABILETÉS SCIENTIFIQUES

Interpréter les données d'expériences portant sur des mutants

■ QUELS RÔLES LES GÈNES *ob* ET *db* JOUENT-ILS DANS LA RÉGULATION DE L'APPÉTIT ? ■

Les chercheurs utilisent souvent un gène mutant qui perturbe un processus physiologique pour étudier le fonctionnement normal du même gène. Idéalement, ils effectuent l'expérience dans des conditions standardisées et comparent des animaux qui diffèrent génétiquement par la présence, ou non, d'une unique mutation sur un gène donné. Le gène muté est non fonctionnel, tandis que le gène normal (type sauvage) est fonctionnel. Ainsi, si les chercheurs constatent une différence dans le phénotype, qui est la propriété physiologique mesurée, alors ils peuvent l'attribuer à la différence observée dans le génotype, c'est-à-dire à l'absence ou à la présence de la mutation. Pour étudier le rôle de gènes spécifiques associés à la régulation de l'appétit, des chercheurs ont utilisé des animaux de laboratoire porteurs de telles mutations.

Les souris chez qui les mutations récessives inactivent les deux copies du gène *ob* ou du gène *db* mangent énormément et grossissent beaucoup plus que les souris porteuses des formes sauvages des deux gènes. Dans la photographie, la souris de droite est de type sauvage, tandis que la souris obèse de gauche porte une mutation qui inactive les deux copies du gène *ob*.



Selon une des hypothèses formulées, le rôle normal des gènes *ob* et *db* serait de participer à une voie hormonale qui supprime l'appétit lorsque l'apport énergétique est suffisant. Avant d'isoler l'hormone, les chercheurs ont exploré cette hypothèse du point de vue génétique.

■ **MÉTHODE** ■ Les chercheurs ont mesuré les masses corporelles de jeunes souris possédant des génotypes différents, après quoi ils ont relié chirurgicalement le système circulatoire de chaque sujet à celui d'une autre souris. Ce faisant, tout facteur présent dans la circulation sanguine d'une des souris devrait être transféré à l'autre. Après huit semaines, ils ont mesuré à nouveau la masse de chaque sujet.

Interpréter les données d'expériences portant sur des mutants (suite)

■ RÉSULTATS ■

Appariement des génotypes (les gènes mutants sont en rouge)			Changement moyen de la masse corporelle (g) du sujet
	Sujet	Apparié avec	
(a)	<i>ob⁺/ob⁺, db⁺/db⁺</i>	<i>ob⁺/ob⁺, db⁺/db⁺</i>	8,3
(b)	<i>ob/ob, db⁺/db⁺</i>	<i>ob/ob, db⁺/db⁺</i>	38,7
(c)	<i>ob/ob, db⁺/db⁺</i>	<i>ob⁺/ob⁺, db⁺/db⁺</i>	8,2
(d)	<i>ob/ob, db⁺/db⁺</i>	<i>ob⁺/ob⁺, db/db</i>	-14,9*

* En raison d'une importante perte de poids et de l'affaiblissement, les sujets de ces paires ont été pesés à nouveau avant la fin de la période de huit semaines.

Source des données: D. L. Coleman, Effects of parabiosis of obese mice with diabetes and normal mice. *Diabetologia* 9: 294-298 (1973).

INTERPRÉTEZ LES DONNÉES ▼

1. Premièrement, exercez-vous à lire les données génotypiques présentées dans le tableau. Par exemple, l'appariement (a) combine deux souris ayant chacune le type sauvage des deux gènes.

Décrivez les deux souris de l'appariement (b), de l'appariement (c) et de l'appariement (d). Expliquez de quelle façon chacune des quatre combinaisons a contribué au plan de l'expérience.

2. Comparez les résultats phénotypiques obtenus pour les appariements (a) et (b). Si les résultats avaient été identiques pour ces deux appariements, qu'est-ce que cela aurait indiqué relativement au plan de l'expérience ?
3. Comparez les résultats observés pour l'appariement (c) avec ceux observés pour les appariements (a) et (b). D'après ces résultats, le produit du gène *ob⁺* semble-t-il stimuler l'appétit ou le supprimer ? Expliquez votre réponse.
4. Décrivez les résultats obtenus pour l'appariement (d). Notez la différence d'avec les résultats obtenus pour l'appariement (b). Formulez une hypothèse qui expliquerait cette différence. Comment pourriez-vous tester votre hypothèse avec les mêmes types de souris que ceux de cette expérience ?

RETOUR SUR LE CONCEPT 41.5

1. Expliquez comment un individu peut devenir obèse, même s'il mange relativement peu de lipides alimentaires comparativement à son ingestion de glucides.
2. **ET SI ?** ► Vous étudiez deux groupes de personnes obèses porteuses d'anomalies génétiques qui perturbent la voie de la leptine. Dans l'un de ces deux groupes, les taux de leptine sont anormalement élevés,

alors que dans l'autre, ils sont anormalement bas. Comment les taux de leptine de chaque groupe changeront-ils si les deux groupes suivent un régime amaigrissant pendant une longue période ? Expliquez votre réponse.

3. **ET SI ?** ► Un insulinoïde est une masse de cellules bêta du pancréas, parfois cancéreuses, qui sécrètent de l'insuline, mais ne répondent pas aux mécanismes de rétroaction. D'après vous, comment cette tumeur affecte-t-elle la glycémie et l'activité du foie ?

Voir les réponses proposées à l'appendice A.

RÉVISION DU CHAPITRE 41



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

Résumé des concepts clés

- Les animaux ont divers régimes alimentaires. Les **herbivores** consomment surtout des végétaux, et les **carnivores**, principalement d'autres animaux. Les **omnivores** ingèrent régulièrement des matières animales et végétales. Tous les animaux doivent équilibrer l'apport, l'entreposage et la dépense d'énergie.

CONCEPT 41.1

Le régime alimentaire des animaux doit fournir de l'énergie chimique, des molécules organiques et des nutriments essentiels (p. 984 à 988)

- La nourriture procure aux animaux l'énergie dont ils ont besoin pour produire de l'ATP, des squelettes carbonés pour la biosynthèse et des **nutriments essentiels**, qui doivent être fournis sous une forme préassemblée. Les nutriments essentiels comprennent : certains acides aminés et acides gras que les animaux sont incapables de synthétiser eux-mêmes ; des **vitamines**, qui sont des molécules organiques ; et des **minéraux**, qui sont des substances inorganiques.

- La malnutrition résulte d'un apport inadéquat de nutriments essentiels, alors que la sous-alimentation découle d'un apport énergétique insuffisant. Les études sur les malformations génétiques et sur la maladie au sein des populations aident les chercheurs à déterminer les besoins nutritionnels de l'humain.

? Comment un cofacteur enzymatique nécessaire à un processus essentiel peut-il être un nutriment essentiel pour quelques animaux seulement ?

CONCEPT 41.2

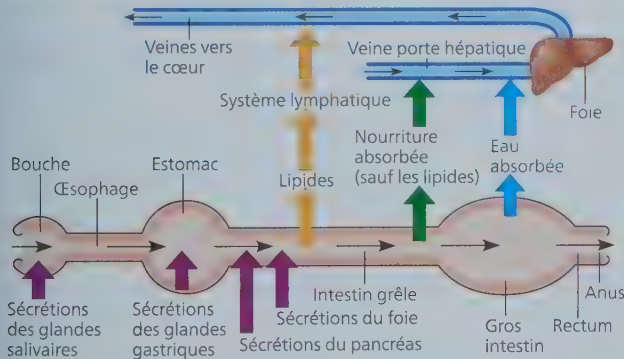
La transformation des aliments comprend l'ingestion, la digestion, l'absorption et l'élimination (p. 988 à 991)

- Les modes d'ingestion des aliments varient d'une espèce animale à l'autre. Beaucoup d'animaux, notamment les humains, se nourrissent par **ingestion en vrac**. Ils consomment des morceaux de nourriture relativement gros. L'**ingestion par filtration**, l'**ingestion du substrat** et l'**ingestion par aspiration** sont d'autres stratégies.
- La compartimentation du tube digestif permet d'éviter l'autodigestion. Dans la digestion intracellulaire, les particules alimentaires pénètrent dans les cellules par phagocytose, puis elles sont digérées au sein de phagosomes qui ont fusionné avec des lysosomes. La plupart des animaux font appel à la digestion extracellulaire. Dans ce cas, l'hydrolyse enzymatique est effectuée à l'extérieur des cellules, dans une **cavité gastrovasculaire** ou dans un **tube digestif**.

? Proposez une alimentation artificielle qui éliminerait une des trois premières étapes de la transformation des aliments.

CONCEPT 41.3

Les différents organes du système digestif des mammifères assurent la transformation progressive de la nourriture (p. 991 à 998)



? Quelle caractéristique structurale de l'intestin grêle fait de lui un organe mieux adapté que l'estomac à l'absorption des nutriments ?

CONCEPT 41.4

Les adaptations évolutives du système digestif des vertébrés sont corrélées avec le régime alimentaire (p. 998 à 1001)

- Chez les vertébrés, plusieurs adaptations évolutives sont reliées au régime alimentaire. Par exemple, la dentition (l'ensemble des dents), correspond généralement au régime alimentaire. Aussi, beaucoup

d'herbivores possèdent des chambres de fermentation spéciales, dans lesquelles des microorganismes mutualistes digèrent la cellulose. De même, les herbivores ont habituellement un tube digestif plus long que celui des carnivores, car il faut plus de temps pour digérer les matières végétales que les matières animales.

? Quelles caractéristiques de notre anatomie nous donnent à penser que nos ancêtres les primates n'étaient pas exclusivement végétariens ?

CONCEPT 41.5

Des circuits de rétroaction régulent la digestion, le stockage de l'énergie et l'appétit (p. 1002 à 1006)

- La régulation de la nutrition intervient à plusieurs niveaux. La présence de nourriture dans le tube digestif déclenche des réactions nerveuses et hormonales qui provoquent la sécrétion des sucs digestifs et qui facilitent le déplacement de la nourriture ingérée dans le tube digestif. La disponibilité du glucose pour la production d'énergie est régulée par l'**insuline** et le **glucagon**, deux hormones qui président à la synthèse et à la dégradation du glycogène, respectivement.
- Les vertébrés emmagasinent l'énergie excédentaire sous forme de glycogène (dans le foie et dans les muscles), ainsi que sous forme de triglycérides (dans les cellules adipeuses). Ils peuvent puiser dans ces réserves quand ils dépensent plus d'énergie qu'ils n'en ingèrent. S'ils consomment plus de calories qu'ils n'en ont besoin pour leur métabolisme, la suralimentation qui en résulte peut causer un problème de santé sérieuse : l'obésité.
- Plusieurs hormones, notamment la leptine et l'insuline, agissent sur le centre de la satiété dans le cerveau et régulent ainsi l'appétit.

? Expliquez pourquoi votre estomac peut gargouiller lorsque vous sautez un repas.

Évaluation

NIVEAU 1 : CONNAISSANCES ET COMPRÉHENSION

- La digestion des graisses produit des acides gras et du glycérol. La digestion des protéines produit des acides aminés. Ces deux processus de la digestion :
 - ont lieu dans les cellules de la plupart des animaux.
 - ajoutent une molécule d'eau pour rompre des liaisons.
 - requièrent un faible pH en raison de la sécrétion de HCl.
 - consomment de l'ATP.
- Chez les mammifères, la trachée et l'œsophage s'ouvrent dans :
 - le pharynx.
 - l'estomac.
 - le gros intestin.
 - le rectum.
- Voici une liste d'organes associés chacun à une fonction. Parmi ces associations, laquelle est *erronée* ?
 - Estomac : digestion des protéines.
 - Gros intestin : production de bile.
 - Intestin grêle : absorption des nutriments.
 - Pancréas : production d'enzymes.
- Parmi les activités suivantes, laquelle *n'est pas* une des principales activités de l'estomac ?
 - Le stockage.
 - La production de HCl.
 - L'absorption de nutriments.
 - La sécrétion d'enzymes.

NIVEAU 2 : APPLICATION ET ANALYSE

5. Si vous placez les événements ci-dessous dans l'ordre où ils ont lieu dans le tube digestif de l'humain, le troisième événement sera :
- Les cellules des cryptes gastriques sécrètent des protons.
 - La pepsine active le pepsinogène.
 - Le HCl active le pepsinogène.
 - Les aliments partiellement digérés entrent dans l'intestin grêle.
6. Après avoir subi l'ablation de la vésicule biliaire du fait d'une infection, une personne doit faire particulièrement attention à ce qu'elle mange et restreindre sa consommation :
- d'amidon.
 - de protéines.
 - de glucides.
 - de lipides.

7. Si vous allez courir sur une distance de 1 km quelques heures après avoir mangé, à quelle source d'énergie votre organisme fera-t-il d'abord appel ?
- Aux protéines des muscles.
 - Au glycogène des muscles et du foie.
 - Aux graisses emmagasinées dans le foie.
 - Aux graisses des tissus adipeux.

NIVEAU 3 : SYNTHÈSE ET ÉVALUATION

8. **FAITES UN DESSIN ►** Faites un schéma du cheminement parcouru par la nourriture partiellement digérée lorsqu'elle quitte l'estomac. Utilisez les termes suivants : sécrétion de HCO_3^- , circulation, diminution de l'acidité, augmentation de l'acidité, sécrétion de sécrétine, détection de signaux. À côté de chacun de ces termes, indiquez le ou les compartiments concernés. Vous pouvez utiliser le même terme plus d'une fois.

Voir les réponses proposées à l'appendice A.