



CHAPITRE 47

Le système digestif

Aperçu du chapitre

- 47.1 Types de système digestif
- 47.2 La bouche et les dents : ingestion et transformation de la nourriture
- 47.3 L'œsophage et l'estomac : le début de la digestion
- 47.4 Les intestins : digestion, absorption et élimination
- 47.5 Diversité des systèmes digestifs des vertébrés
- 47.6 Régulation neurale et hormonale du tractus digestif
- 47.7 Fonction des organes accessoires
- 47.8 L'énergie de la nourriture, les dépenses énergétiques et les nutriments essentiels

Introduction

Les plantes et autres organismes photosynthétiques peuvent produire les molécules organiques essentielles à partir de composants inorganiques. C'est pourquoi, on dit qu'ils sont autotrophes, une forme d'autosuffisance. Les animaux, comme ce tamia rayé, sont hétérotrophes. Ils doivent consommer des molécules organiques présentes dans d'autres organismes. Les molécules que les hétérotrophes consomment doivent être digérées en plus petites molécules afin d'être absorbées par le corps de l'animal. Lorsque ces produits de la digestion entrent dans le corps, l'animal peut les utiliser comme source d'énergie pour la respiration cellulaire ou pour la synthèse de molécules plus grandes qui entrent dans la constitution des tissus. Le processus de la digestion chez les animaux constitue le thème de ce chapitre.

47.1 Types de système digestif

Objectifs

1. Distinguer les systèmes digestifs incomplets et complets.
2. Énumérer les composants du tractus digestif des vertébrés.
3. Décrire les couches tissulaires du tractus gastro-intestinal.

Les hétérotrophes se répartissent en trois groupes selon l'origine de leur nourriture. Les animaux qui mangent exclusivement des plantes sont classés comme **herbivores** ; des exemples communs sont les escargots mangeurs d'algues, les insectes butineurs et des vertébrés comme les vaches, les chevaux, les lapins et les moineaux. Les animaux qui se nourrissent de viande comme les crabes, les calmars, de nombreux insectes, les chats, les aigles, les truites et les grenouilles sont des **carnivores**. Les animaux qui mangent aussi bien des plantes que d'autres animaux sont dits **omnivores**. Les humains sont omnivores, comme le sont les porcs, les ours et les corbeaux.

Les systèmes digestifs des invertébrés sont des sacs ou des tubes

Les organismes unicellulaires (ainsi que les éponges) digèrent leur nourriture à l'intérieur des cellules. D'autres animaux la digèrent à l'extérieur des cellules, dans une cavité digestive. Dans ce cas, les enzymes digestives sont libérées dans la cavité qui est en continuité avec l'environnement externe de l'animal. Chez les cnidaires et le vers plats comme les planaires, la cavité digestive ne comporte qu'une seule ouverture qui sert à la fois de bouche et d'anus (voir chapitre 33). Il n'y a pas de spécialisation dans ce type de système digestif, appelé *cavité gastrovasculaire*. En effet, chaque cellule est exposée à tous les stades de la digestion alimentaire (figure 47.1).

La spécialisation se développe lorsque le tractus digestif, ou canal alimentaire, comporte une bouche et un anus séparés, de telle manière que le transit de la nourriture est unidirectionnel. Le tractus digestif le plus primitif s'observe chez les nématodes (phylum Nematoda), chez qui il consiste simplement en un *intestin* tubulaire bordé d'une membrane épithéliale. Les vers de terre (phylum Annelida) ont un tractus digestif avec certaines régions spécialisées pour l'ingestion, la mise en réserve, la fragmentation, la digestion et l'absorption de nourriture. Tous les groupes d'animaux supérieurs, y compris les vertébrés, ont des spécialisations similaires (figure 47.2).

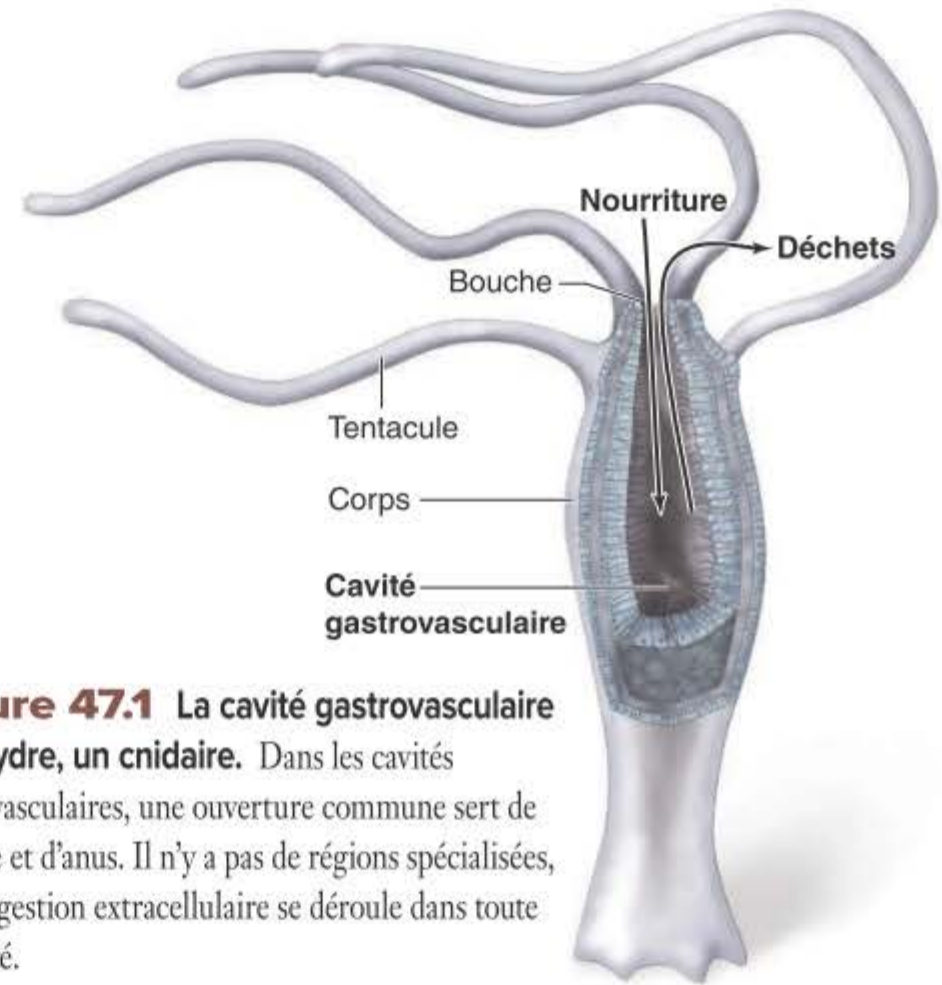


Figure 47.1 La cavité gastrovasculaire de l'hydre, un cnidaire. Dans les cavités gastrovasculaires, une ouverture commune sert de bouche et d'anus. Il n'y a pas de régions spécialisées, et la digestion extracellulaire se déroule dans toute la cavité.

La nourriture ingérée peut être mise en réserve dans une région spécialisée du tractus digestif ou peut d'abord être soumise à une fragmentation physique, produite par la mastication dentaire, comme c'est le cas chez de nombreux vertébrés, ou par le broyage au moyen des petits cailloux présents dans le gésier des vers de terre et des oiseaux. La digestion chimique survient alors, réduisant les plus grandes molécules alimentaires de polysaccharides et disaccharides, de graisses et de protéines en sous-unités plus petites.

La digestion chimique consiste en réactions d'hydrolyse qui libèrent des molécules de base comme les monosaccharides, les acides aminés et les acides gras. Ces produits de la digestion chimique traversent la membrane épithéliale de l'intestin pour gagner le courant sanguin suivant un processus appelé *absorption*. Toutes les molécules de la nourriture qui ne sont pas absorbées ne peuvent être utilisées par l'animal. Ces déchets sont excrétés, ou déféqués, par l'anus.

Les systèmes digestifs des vertébrés comprennent des structures spécialisées adaptées à la nourriture

Chez les humains et les autres vertébrés, le système digestif consiste en un tractus gastro-intestinal tubulaire et en organes digestifs accessoires (figure 47.3).

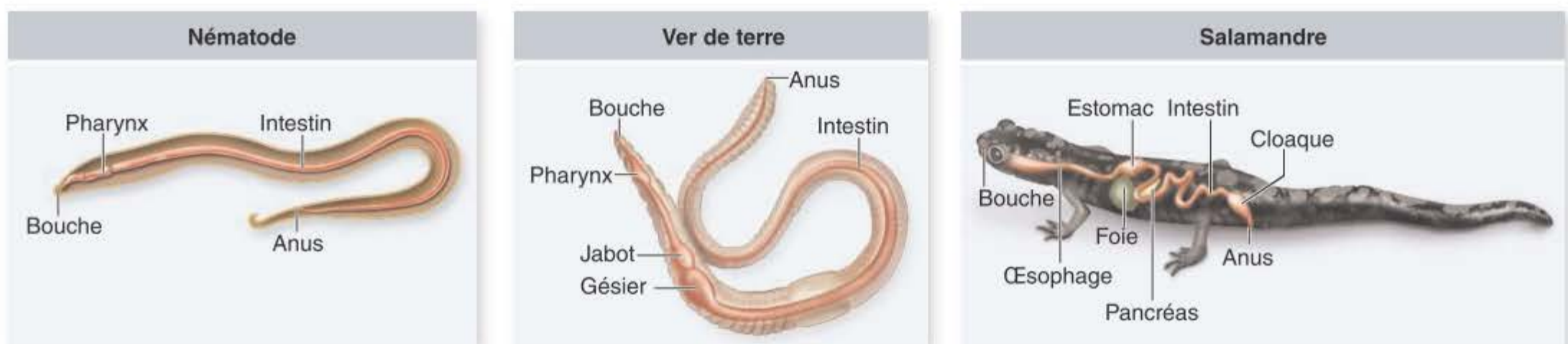


Figure 47.2 Le tractus digestif unidirectionnel des nématodes, des vers de terre et des vertébrés. Le mouvement unidirectionnel à travers le tractus digestif permet à différentes régions du système digestif de se spécialiser dans différentes fonctions.

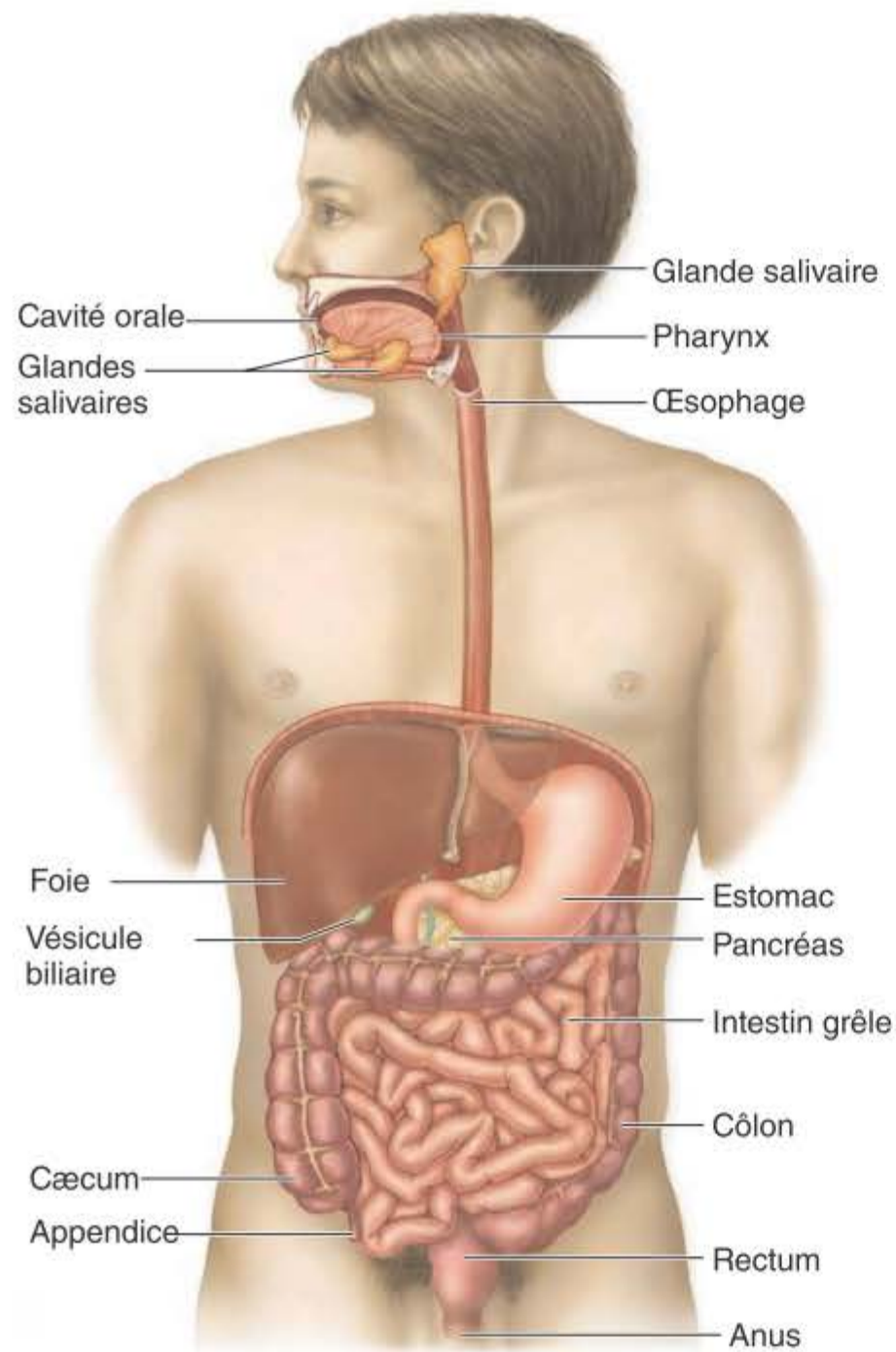


Figure 47.3 Le système digestif humain. Le système digestif humain comprend la cavité orale, l'œsophage, l'estomac, l'intestin grêle, le gros intestin, le rectum et l'anus, auxquels s'ajoutent les organes accessoires.

Vue d'ensemble du tractus digestif

Le tractus gastro-intestinal commence par la bouche et le pharynx, carrefour des cavités orale et nasale. Vient ensuite l'œsophage, un tube musculueux qui transfère la nourriture dans l'estomac, où la digestion commence.

De l'estomac, la nourriture passe dans l'intestin grêle, où une batterie d'enzymes digestives poursuit le processus digestif. Les produits de la digestion ainsi que l'eau et des minéraux sont absorbés par la paroi de l'intestin grêle et passent dans le courant sanguin. L'intestin grêle se vide de ce qui reste dans le gros intestin, où une partie de l'eau et des minéraux restants sont absorbés.

Chez la plupart des vertébrés autres que les mammifères, les déchets émergent du gros intestin dans une cavité appelée cloaque (voir figure 47.2), qui reçoit aussi les produits des systèmes urinaire et reproducteur. Chez les mammifères, les produits urogénitaux sont séparés du matériel fécal présent dans le gros intestin. Les fèces passent dans le rectum et sont expulsées par l'anus.

Les organes digestifs accessoires comprennent le foie, qui produit la *bile*, un liquide verdâtre qui émulsifie les graisses, la vésicule biliaire, qui met en réserve et concentre la bile, et le pancréas. Celui-ci produit le *suc pancréatique*, qui contient des enzymes digestives et du tampon bicarbonate. La bile et le suc pancréatique sont sécrétés dans la première partie de l'intestin grêle, où ils contribuent à la digestion.

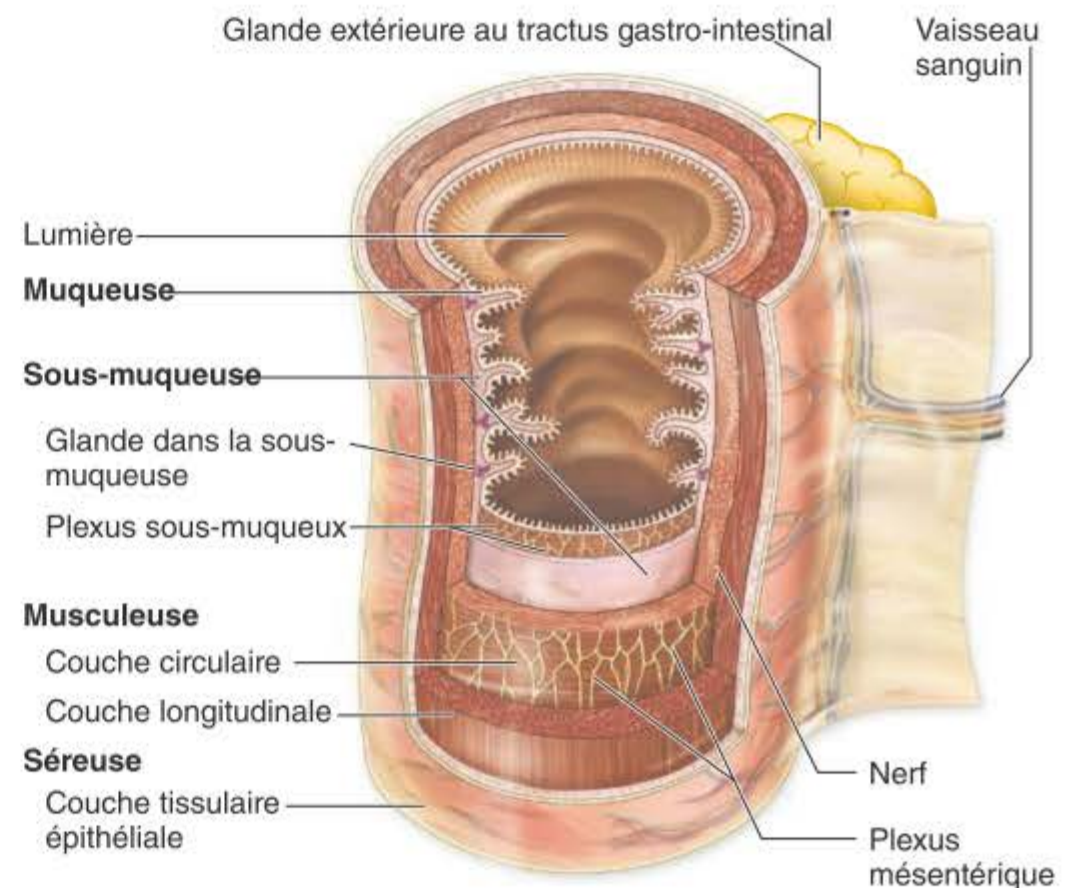


Figure 47.4 Les diverses couches du tractus digestif.

La muqueuse consiste en un épithélium; la sous-muqueuse est composée de tissu conjonctif; la musculeuse est faite de muscles lisses. Les glandes sécrètent diverses substances par des canaux dans des régions particulières du tractus.

Les tissus du tractus digestif

La paroi du tractus gastro-intestinal tubulaire d'un vertébré comporte plusieurs couches caractéristiques (figure 47.4). La couche la plus interne est la **muqueuse**, un épithélium qui borde l'intérieur du tractus, la lumière. La couche tissulaire sous-jacente, la **sous-muqueuse**, est faite de tissu conjonctif.

Elle est elle-même adossée à la **musculeuse**, qui comporte deux couches de muscles lisses; dans l'interne, les muscles ont une disposition circulaire et, dans l'externe, une orientation longitudinale. Une autre couche, la **séreuse**, couvre la surface externe du tractus. Des réseaux nerveux, entrelacés en *plexus* entre les couches musculaires, sont localisés dans la sous-muqueuse et contribuent à réguler les activités gastro-intestinales.

Dans la suite de ce chapitre, nous décrivons en détail la structure et la fonction des systèmes digestifs des vertébrés. Nous clôturons le chapitre par une description des nutriments qui sont essentiels pour les vertébrés.

Synthèse 47.1

Les tractus digestifs incomplets n'ont qu'une ouverture; les tractus digestifs complets sont à une seule voie, avec une bouche et un anus. Le système digestif des vertébrés comprend une bouche, un pharynx, un œsophage, un estomac, un intestin grêle, un côlon, un cloaque ou un rectum, un anus et des organes accessoires. Les couches tissulaires qui composent le tractus tubulaire sont la muqueuse, la sous-muqueuse, la musculeuse et la séreuse.

- Quel serait l'avantage d'un système digestif à une seule voie ?

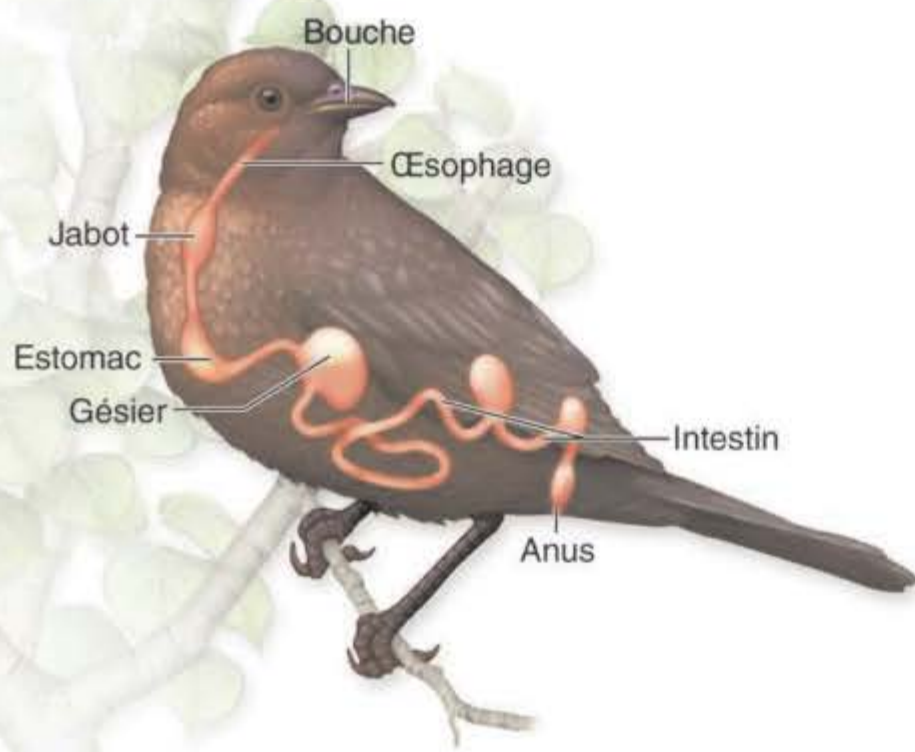


Figure 47.5 Tractus digestif des oiseaux. Les oiseaux n'ont pas de dents, mais sont pourvus d'une chambre musculuse appelée gésier qui sert à broyer la nourriture. Les oiseaux avalent des objets granuleux ou du gravier qui s'accumulent dans le gésier et contribuent à la fragmentation de la nourriture avant qu'elle ne passe dans l'intestin. La nourriture est mise en réserve dans le jabot.

47.2 La bouche et les dents : ingestion et transformation de la nourriture

Objectifs

1. Identifier une variation adaptative dans la forme des dents chez les vertébrés.
2. Comprendre le rôle de la bouche dans le processus digestif.

Les spécialisations du système digestif dans les divers groupes de vertébrés reflètent les différents modes de vie de ces animaux. Les oiseaux, dépourvus de dents, broient les aliments dans leur estomac à deux chambres (figure 47.5). Dans une des deux, le *gésier*, de petits cailloux ingérés par l'oiseau sont mélangés à la nourriture, qui peut ainsi être écrasée sous l'action musculaire. Ce malaxage réduit les graines et d'autres produits végétaux durs en miettes qui peuvent être digérées plus facilement.

Les dents des vertébrés sont adaptées à différents types de nourriture

De nombreux vertébrés ont des dents (figure 47.6) qui servent à la *mastication*, c'est-à-dire à la fragmentation de la nourriture en particules et à leur mélange avec des sécrétions liquides. Les mammifères carnivores ont des dents pointues qui sont dépourvues de surface plate nécessaire au broyage. Ces dents sont faites pour couper et déchirer. Les carnivores arrachent souvent des

morceaux de leur proie, mais ont peu besoin de les mâcher, puisque les enzymes digestives agissent directement sur les cellules animales. Au contraire, les herbivores doivent briser la cellulose des parois cellulaires des tissus végétaux pour que les bactéries dans leur rumen ou leur cæcum puissent les digérer. Ces animaux ont de grandes dents plates avec des arêtes complexes bien adaptées au broyage.

Les dents humaines servent à manger aussi bien des plantes que de la viande ; aussi, la partie antérieure de la bouche humaine est de type carnivore et la partie postérieure, de type herbivore (voir figure 47.6). Les quatre dents de devant dans les mâchoires supérieure et inférieure sont des incisives tranchantes ayant la forme d'un ciseau et servant à mordre. De chaque côté des incisives se trouvent des dents pointues et coupantes appelées canines, qui servent à déchirer la nourriture. Derrière les canines, deux prémolaires et trois molaires, toutes avec une surface plate et crénelée, sont utilisées pour écraser et broyer les aliments.

La bouche sert à l'ingestion et à une première transformation des aliments

À l'intérieur de la bouche, la langue mélange la nourriture avec une solution muqueuse, la salive. Chez l'homme, trois paires de glandes salivaires la sécrètent dans la bouche à travers des canaux qui débouchent à la muqueuse buccale. La salive mouille et lubrifie les aliments afin d'en faciliter la déglutition et d'éviter l'abrasion des tissus sur lesquels ils passent dans leur transfert vers l'œsophage.

La salive contient également l'amylase salivaire, une enzyme hydrolytique, qui commence à digérer l'amidon, un polysaccharide, en maltose, un disaccharide. La digestion buccale est habituellement minimale chez l'homme, car la plupart des gens mâchent peu leur nourriture.

Stimulation de la salivation

Les sécrétions des glandes salivaires sont contrôlées par le système nerveux, qui chez l'homme maintient un flux constant d'environ un demi millilitre par minute lorsque la bouche est vide de nourriture. Cette sécrétion permanente garde la bouche humide.

La présence de nourriture dans la bouche augmente la sécrétion. Les papilles gustatives ainsi que les neurones olfactifs envoient des impulsions au cerveau, qui répond en stimulant les glandes salivaires (voir chapitre 45). Les stimulus les plus importants sont les solutions

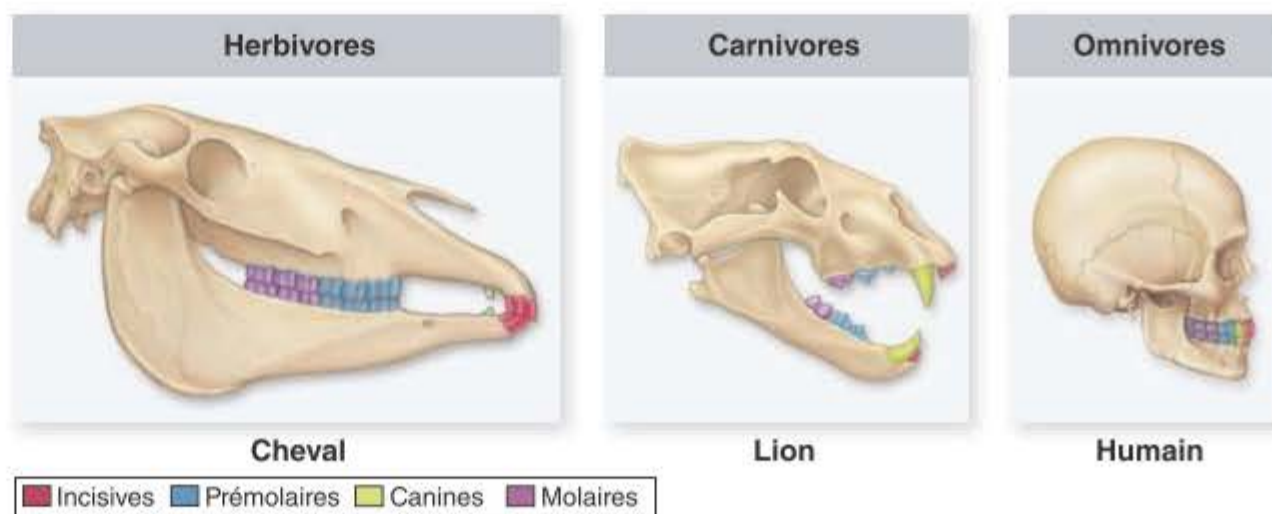


Figure 47.6 La dentition dépend du type d'alimentation. À partir d'un modèle général de dentition, les vertébrés ont acquis des caractères spécifiques de leur type d'alimentation : herbivore, carnivore ou omnivore.



Question Pourquoi tous les animaux n'ont-ils pas des dents comme les omnivores, capables de manger n'importe quoi ?

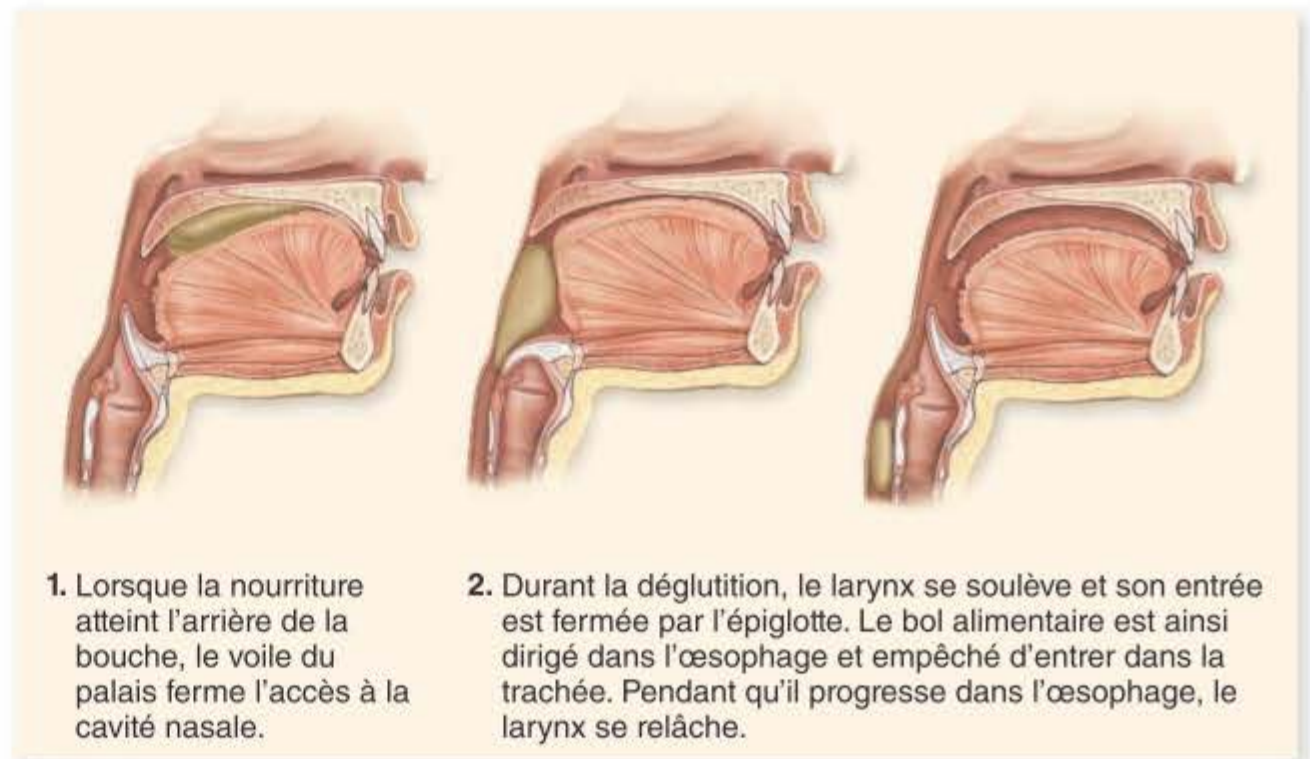
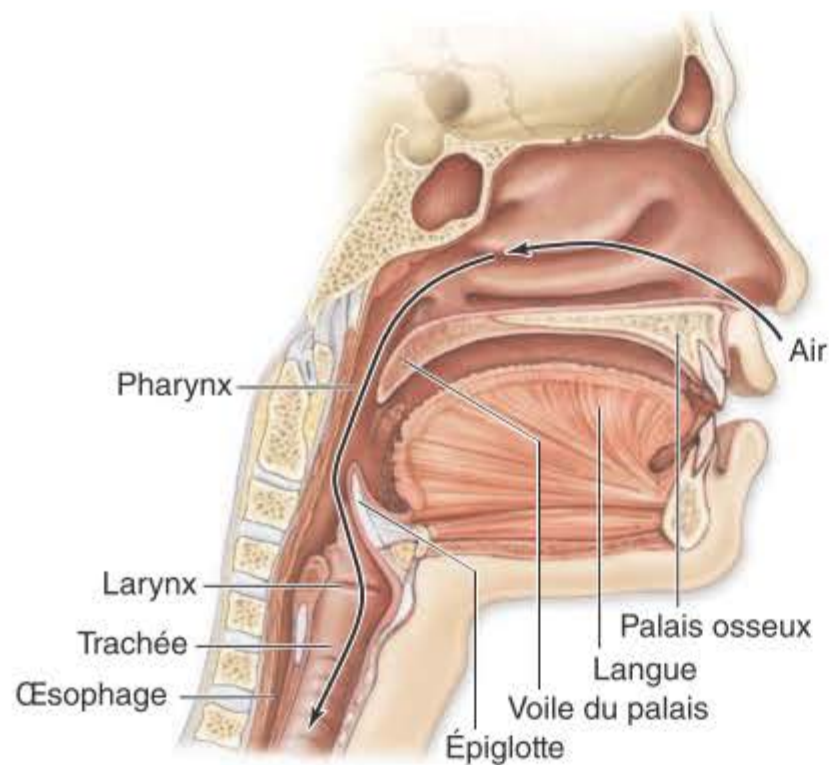


Figure 47.7 Mécanisme de déglutition. Une coupe de la tête et de la gorge montre les structures concernées (à gauche). Au cours de la déglutition (à droite), la langue pousse le palais vers le haut, et le voile du palais ferme l'accès à la cavité nasale. Avec l'élévation du larynx, l'épiglotte vient fermer l'accès à la trachée, prévenant ainsi l'entrée de nourriture dans les voies respiratoires.

? **Question** Lors d'une fausse déglutition, quel est le processus en cause?

acides ; le jus de citron par exemple, peut augmenter de huit fois la salivation. La vue, le son et l'odeur de la nourriture peuvent stimuler fortement la salivation chez de nombreux animaux ; chez l'homme, penser ou parler de nourriture peut avoir le même effet.

Déglutition

La déglutition commence par un acte volontaire, qui se poursuit sous contrôle involontaire. Lorsque la nourriture est prête à être avalée, la langue la déplace vers l'arrière de la bouche. Chez les mammifères, le processus de déglutition commence lorsque le voile du palais s'élève et s'appuie sur la paroi postérieure du pharynx (figure 47.7). Ce qui ferme la cavité nasale et empêche que la nourriture n'y pénètre. La pression contre le pharynx déclenche une réponse automatique et involontaire, le réflexe de déglutition. Puisqu'il s'agit d'un réflexe, à ce stade, on ne peut plus s'empêcher d'avalier.

La pression sur le pharynx stimule les neurones pariétaux, qui envoient des impulsions vers le centre de la déglutition dans le cerveau. En réponse, les impulsions électriques dans les motoneurones stimulent la contraction des muscles qui soulèvent le **larynx** (boîte vocale). Celui-ci pousse la glotte, l'ouverture du larynx dans la trachée, contre un volet tissulaire appelé **épiglotte**. Ces actions maintiennent la nourriture en dehors du tractus respiratoire, tout en la dirigeant vers l'œsophage.

Synthèse 47.2

Chez les vertébrés pourvus de dents, la forme de celles-ci montre une adaptation au type d'alimentation : les herbivores ont des grandes dents plates pour broyer, tandis que les carnivores ont des dents pointues pour déchirer. La transformation de la nourriture commence dans la bouche, dans laquelle l'aliment est goûté, fragmenté et partiellement digéré par la sécrétion salivaire avant la déglutition.

- Quelles sont les phases volontaire et involontaire du processus d'ingestion de nourriture ?

47.3 L'œsophage et l'estomac : le début de la digestion

Objectifs

1. Décrire comment la nourriture se déplace dans l'œsophage.
2. Expliquer les processus digestifs qui se déroulent dans l'estomac.

La nourriture déglutie entre dans un tube musculéux appelé œsophage, qui connecte le pharynx à l'estomac. La contraction des muscles œsophagiens déplace une certaine quantité de nourriture qui constitue ce que l'on appelle le **bol alimentaire**. Les aliments ingérés sont maintenus dans l'estomac durant une période qui permet une première phase de digestion poussée.

Les contractions musculaires de l'œsophage transfèrent la nourriture dans l'estomac

Chez les humains adultes, l'œsophage mesure environ 25 cm ; le tiers supérieur est enveloppé d'un muscle squelettique, impliqué dans le contrôle de la déglutition volontaire, alors que les deux tiers inférieurs sont entourés de muscles lisses involontaires. Le centre de la déglutition stimule dans ces muscles des vagues successives de contractions qui entraînent la nourriture le long de l'œsophage jusqu'à l'estomac. Ces ondes rythmiques de contraction musculaire sont appelées **péristaltisme** (figure 47.8) ; elles permettent aux humains et à d'autres vertébrés de déglutir même avec la tête en bas.

Chez de nombreux vertébrés, le passage de la nourriture de l'œsophage dans l'estomac est contrôlé par un anneau de muscles lisses, ou **sphincter**, qui s'ouvre en réponse à la pression exercée par la nourriture.

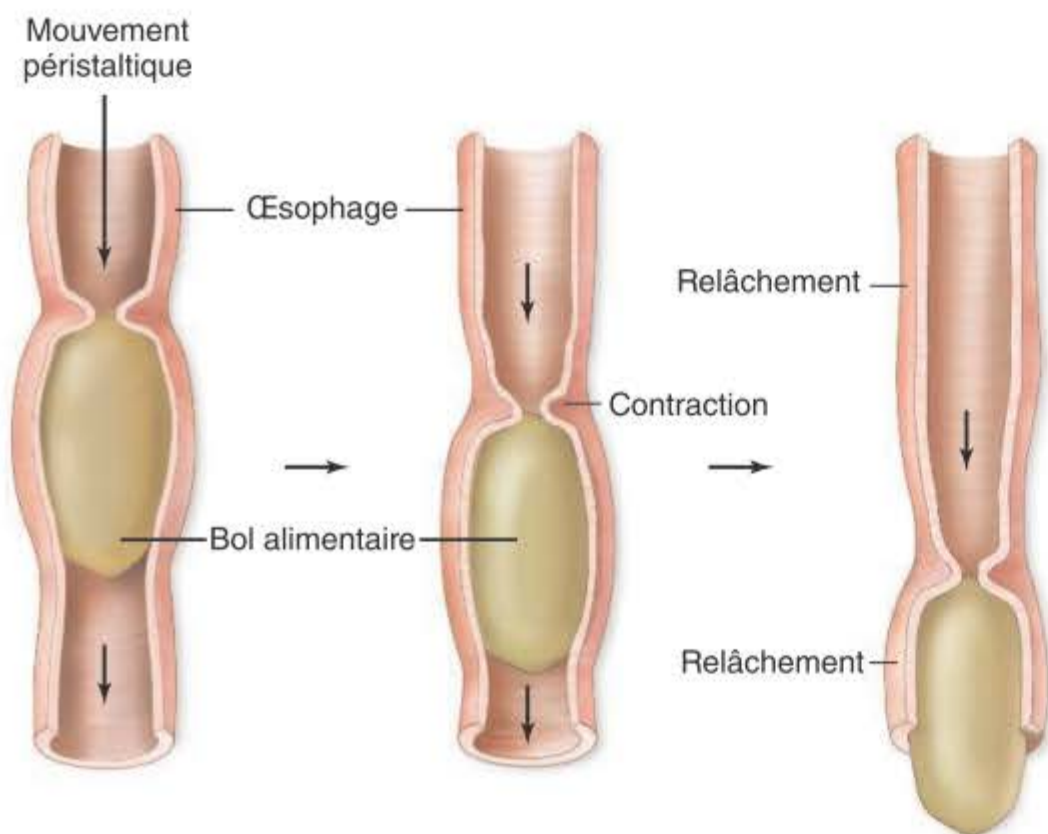


Figure 47.8 Œsophage et péristaltisme. Après l'entrée de la nourriture dans l'œsophage, les vagues rythmiques de contraction musculaire, appelées péristaltisme, font progresser la nourriture vers l'estomac.

La contraction de ce sphincter empêche la nourriture présente dans l'estomac de remonter dans l'œsophage. Les rongeurs et les chevaux ont un véritable sphincter à cet endroit et ne peuvent donc régurgiter, tandis que les humains en sont dépourvus. Normalement, l'œsophage est fermé sauf durant la déglutition.

L'estomac est un « réservoir temporaire » servant à la décomposition acide de la nourriture

L'estomac (figure 47.9) est une partie en forme de sac du tractus digestif. Sa surface interne est fortement plissée, ce qui lui permet de perdre

du volume lorsqu'il est vide et de se dilater comme un ballon lorsqu'il se remplit de nourriture. Alors que le volume de l'estomac humain n'est que de 50 millilitres lorsqu'il est vide, il peut contenir jusqu'à 2 à 4 litres de nourriture quand il est rempli. Les carnivores qui se gavent sporadiquement, une stratégie essentielle à leur survie, sont pourvus d'un estomac capable de se distendre bien plus que cela.

Systemes sécrétoires

L'estomac contient une couche supplémentaire de muscles lisses pour malaxer la nourriture et la mélanger avec le **suc gastrique**, une sécrétion acide des glandes gastriques tubulaires de la muqueuse (figure 47.9). Ces glandes exocrines contiennent trois types de cellule sécrétrice : les *cellules sécrétrices de mucus*, les *cellules pariétales*, qui sécrètent l'acide chlorhydrique (HCl), et les *cellules principales*, qui sécrètent le **pepsinogène**, la forme inactive de la **pepsine**, une protéase digérant les protéines.

Le pepsinogène contient une séquence de 44 acides aminés qui bloque son site actif. Sous l'effet de l'HCl, le pepsinogène se déroule et expose ainsi son site actif, qui élimine alors les 44 acides aminés, ce qui fournit la protéase active, la pepsine. Cette sécrétion d'une forme inactive, transformée ensuite en une enzyme active en dehors de la cellule, empêche les cellules principales de se digérer elles-mêmes. Dans l'estomac, le mucus produit par les cellules spécialisées rend le même type de service ; en couvrant les parois intérieures, il prévient leur digestion.

En plus de la production d'HCl, les cellules pariétales de l'estomac sécrètent également le **facteur intrinsèque**, un polypeptide nécessaire pour l'absorption intestinale de la vitamine B12. Puisque cette vitamine est requise pour la production des globules rouges, les personnes qui ne produisent pas assez de facteur intrinsèque développent un type d'anémie (trop peu de globules rouges), appelée *anémie pernicieuse*.

Action de l'acide

L'estomac humain produit environ 2 litres d'HCl et d'autres sécrétions gastriques chaque jour, créant une solution très acide à l'intérieur de

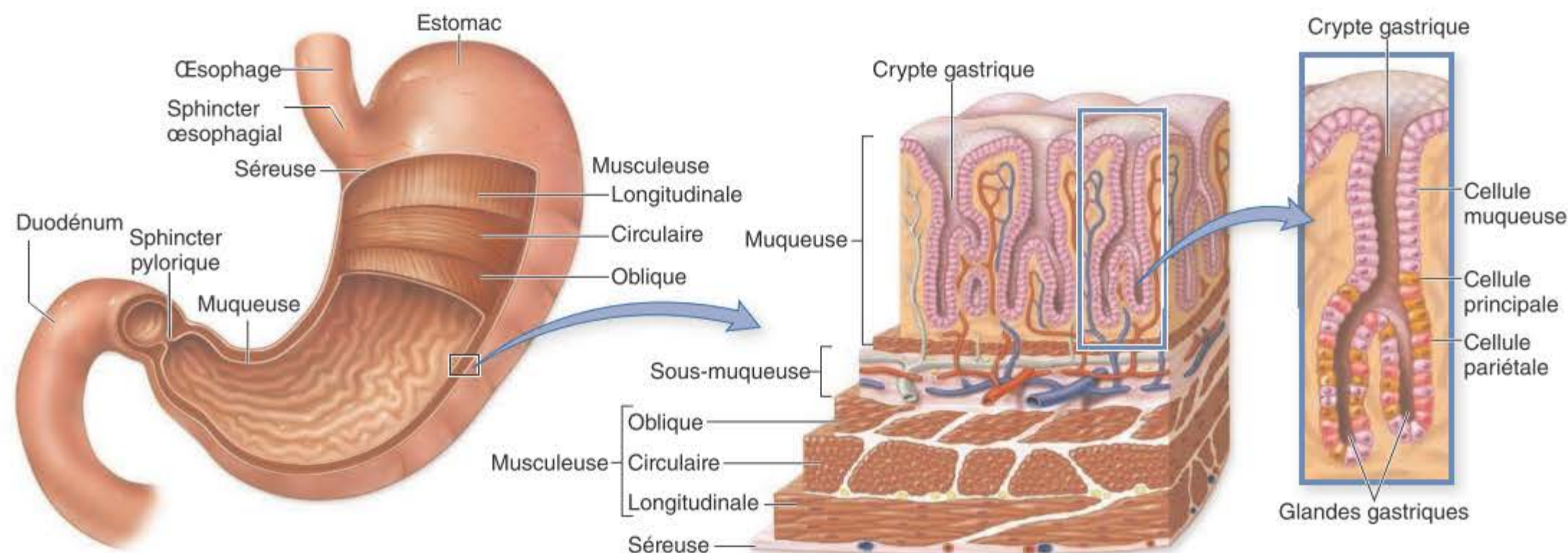


Figure 47.9 Estomac et duodénum. La nourriture passe de l'œsophage dans l'estomac. Une bande de muscles lisses, le sphincter pylorique, contrôle l'entrée dans le duodénum, partie supérieure de l'intestin grêle. La paroi épithéliale de l'estomac est parsemée d'invaginations (cryptes) qui contiennent les glandes gastriques. Celles-ci comprennent les cellules sécrétrices de mucus, les cellules principales qui sécrètent le pepsinogène et les cellules pariétales qui sécrètent l'HCl. Les cryptes gastriques sont les ouvertures des glandes.

? **Question** Comment le système digestif se protège-t-il d'une digestion par les sécrétions gastriques qu'il produit?

l'estomac. La concentration en HCl dans cette solution est d'environ 10 millimolaire, correspondant à un pH de 2. Ainsi, le suc gastrique est environ 250 000 fois plus acide que le sang, dont le pH normal est de 7,4.

Le pH bas dans l'estomac contribue à dénaturer les protéines de la nourriture, les rendant plus faciles à digérer, et garde à la pepsine son activité maximale. La pepsine hydrolyse les protéines de la nourriture en courtes chaînes polypeptidiques incomplètement digérées avant que le mélange ne parvienne dans l'intestin grêle. Le mélange de nourriture partiellement digérée et de suc gastrique est appelé **chyme**. Chez les humains adultes, seules, les protéines sont partiellement digérées dans l'estomac, les glucides et les lipides ne le sont pas.

La solution acide de l'estomac tue la plupart des bactéries qui sont ingérées avec les aliments. Les quelques bactéries qui y survivent et qui entrent intactes dans l'intestin sont capables d'y pousser et de s'y multiplier, particulièrement dans le gros intestin. En fait, l'intestin des vertébrés contient des colonies bactériennes florissantes, et les bactéries constituent un composant majeur des fèces. Comme nous le décrirons plus tard, les bactéries qui vivent dans le tractus digestif des vaches et autres ruminants jouent un rôle essentiel dans l'aptitude de ces animaux à digérer la cellulose.

Ulcères

Une surproduction d'acide gastrique peut parfois contribuer à la destruction localisée de la paroi gastrique ou duodénale et causer ainsi un ulcère peptique. Bien que l'on ait mis en cause la consommation de mets épicés, la cause la plus commune des ulcères peptiques est attribuée à une infection par la bactérie *Helicobacter pylori*.

H. pylori peut pousser sur la muqueuse de l'estomac humain ; il survit au pH acide en sécrétant des substances qui tamponnent le pH dans son environnement immédiat. Bien que l'infection à *H. pylori* soit fréquente aux états-Unis (environ 20 % des personnes de moins de 40 ans et 50 % des plus de 60 ans), la plupart des gens sont asymptomatiques. Cependant, dans certains cas, l'infection par *H. pylori* peut réduire ou affaiblir la couche de mucus de l'estomac ou du duodénum, permettant aux sécrétions acides d'attaquer l'épithélium sous-jacent. Un traitement antibiotique de l'infection peut réduire les symptômes et souvent même guérir l'ulcère.

Vidange gastrique

Le chyme quitte l'estomac en passant par le *sphincter pylorique* (voir figure 47.9) pour entrer dans l'intestin grêle. C'est là que se déroule toute la digestion finale des glucides, des lipides et des protéines, et où les produits de la digestion, acides aminés, glucose, etc. sont absorbés dans le sang. Seule une partie de l'eau du chyme et quelques substances, comme l'aspirine et l'alcool, sont absorbées à travers la paroi gastrique.

Synthèse 47.3

Les ondes péristaltiques de contraction et de relâchement des muscles lisses propulsent la nourriture au long de l'œsophage vers l'estomac. Le suc gastrique contient l'acide chlorhydrique et une enzyme digérant les protéines, la pepsine, qui commence l'hydrolyse des protéines en polypeptides plus courts. Le chyme acide est alors transféré à travers le sphincter pylorique dans l'intestin grêle.

- Supposez que vous mangiez un sandwich au poulet (une poitrine de poulet sur du pain, avec de la mayonnaise). Lequel de ces aliments commencera à être décomposé dans l'estomac ?

47.4 Les intestins : digestion, absorption et élimination

Objectifs

1. Comparer les structures de l'intestin grêle et du côlon.
2. Nommer les organes accessoires et décrire leurs rôles.
3. Expliquer comment les nutriments absorbés arrivent dans le sang ou dans les capillaires lymphatiques.

La capacité de l'intestin grêle est limitée, et les processus digestifs prennent du temps. En conséquence, une digestion efficace exige que des quantités relativement petites de chyme passent de l'estomac dans l'intestin grêle à tout moment. La coordination entre les activités gastrique et intestinale est régulée par des signaux nerveux et hormonaux, qui seront décrits dans la section 47.6.


La structure de l'intestin grêle est spécialisée dans la digestion et l'absorption des nutriments

L'intestin grêle est long d'environ 4,5 mètres chez une personne vivante, mais atteint 6 mètres à l'autopsie, lorsque les muscles sont relâchés. Les premiers 25 centimètres correspondent au **duodénum** ; le reste de l'intestin grêle comprenant deux parties : le **jéjunum** et l'**iléon**.

Le duodénum reçoit le chyme acide de l'estomac, des enzymes digestives et du bicarbonate du pancréas et la bile hépatique de la vésicule biliaire. Les enzymes du suc pancréatique digèrent les grandes molécules de la nutrition en petits fragments, essentiellement dans le duodénum et le jéjunum.

La paroi épithéliale de l'intestin grêle est couverte de projections ténues, digitiformes appelées **villosités** (figure 47.10). Bordant les villosités, chaque cellule épithéliale comporte, à sa surface apicale (le pôle faisant face à la lumière), des **microvillosités**, qui consistent en de nombreux plis membranaires couvrant des extensions cytoplasmiques. Elles sont minuscules et ne peuvent être observées clairement qu'au microscope électronique. Au microscope optique, elles ressemblent aux poils d'une brosse et, pour cette raison, on dit qu'elles forment une *bordure en brosse*.

Les villosités et microvillosités augmentent fortement la surface de l'intestin grêle ; chez l'homme, cette surface est de 300 mètres carrés ; elle est plus grande qu'un court de tennis ! C'est sur cette vaste surface que les produits de la digestion sont absorbés.

 **Analyse de données** Expliquez comment convertir des mètres carrés en pieds carrés et calculez la surface exacte de l'intestin grêle en pieds carrés.

Les microvillosités participent aussi à la digestion parce qu'un nombre d'enzymes digestives sont intégrées dans la membrane plasmique des cellules épithéliales, avec leur site actif exposé au chyme. Ces enzymes de la bordure en brosse comprennent ceux qui hydrolysent les disaccharides, le lactose et le saccharose parmi d'autres. De nombreux humains adultes perdent la faculté de produire l'enzyme de la bordure en brosse, la *lactase*, et dès lors ne

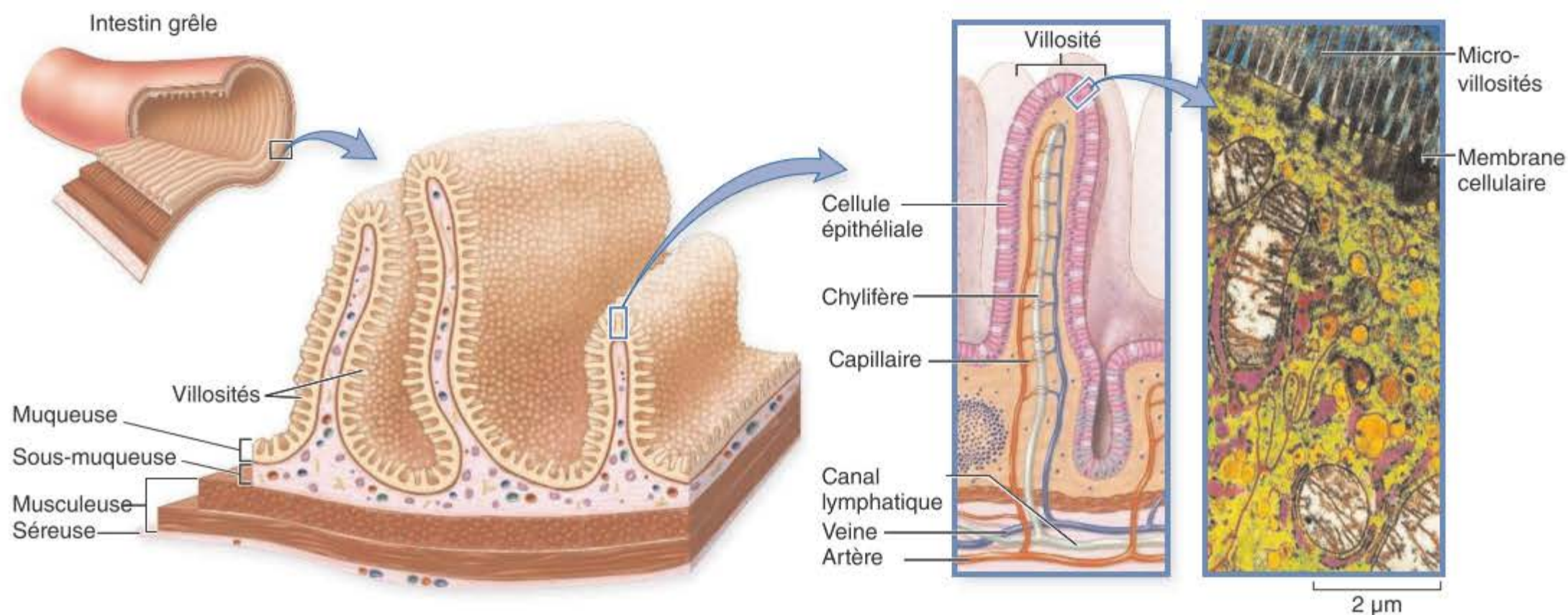


Figure 47.10 Intestin grêle. Les agrandissements successifs montrent les replis de l'épithélium replié formant des villosités qui augmentent la surface. La micrographie montre une cellule épithéliale avec de nombreuses microvillosités.

peuvent digérer le lactose (le sucre du lait), une maladie plutôt fréquente appelée *intolérance au lactose*. Les enzymes de la bordure en brosse complètent le processus digestif qui a commencé avec l'action de l'amylase salivaire dans la bouche.

Des organes accessoires sécrètent des enzymes dans l'intestin grêle

Les organes principaux qui contribuent à la digestion sont le pancréas, le foie et la vésicule biliaire. Ils vident leur sécrétions, surtout des enzymes, par des canaux, directement dans l'intestin grêle.

Sécrétions pancréatiques

Le pancréas (figure 47.11), une glande relativement volumineuse située à la jonction de l'estomac et de l'intestin grêle, sécrète le suc pancréatique dans le duodénum par le *canal pancréatique* dit de Wirsung ; le pancréas fonctionne donc comme une glande exocrine. Ce fluide contient diverses enzymes, comme la **trypsine** et la **chymotrypsine** qui digèrent les protéines, l'**amylase pancréatique** qui digère l'amidon, et la lipase qui digère les graisses. Comme la pepsine dans l'estomac, ces enzymes sont libérées dans le duodénum sous des formes inactives, qui sont alors activées par la trypsine, qui l'est elle-même par une enzyme de la bordure en brosse de l'intestin.

Les enzymes pancréatiques digèrent les protéines en fragments polypeptidiques, les polysaccharides en courtes chaînes glucidiques et les graisses en acides gras et monoglycérides. La digestion des protéines et des glucides est alors complétée par les enzymes de la bordure en brosse. Le suc pancréatique contient également du bicarbonate, qui neutralise l'HCl gastrique et rend le chyme duodénal légèrement alcalin. Les enzymes digestives et le bicarbonate sont produits par des groupes de cellules sécrétrices appelés **acini**.

En plus de sa fonction exocrine dans la digestion, le pancréas joue également un rôle endocrine en sécrétant plusieurs hormones dans le sang qui contrôlent les taux sanguins de glucose et d'autres

nutriments. Ces hormones sont produites dans les **îlots de Langerhans**, des groupes de cellules endocrines dispersés dans tout le pancréas. Les deux hormones pancréatiques les plus importantes,

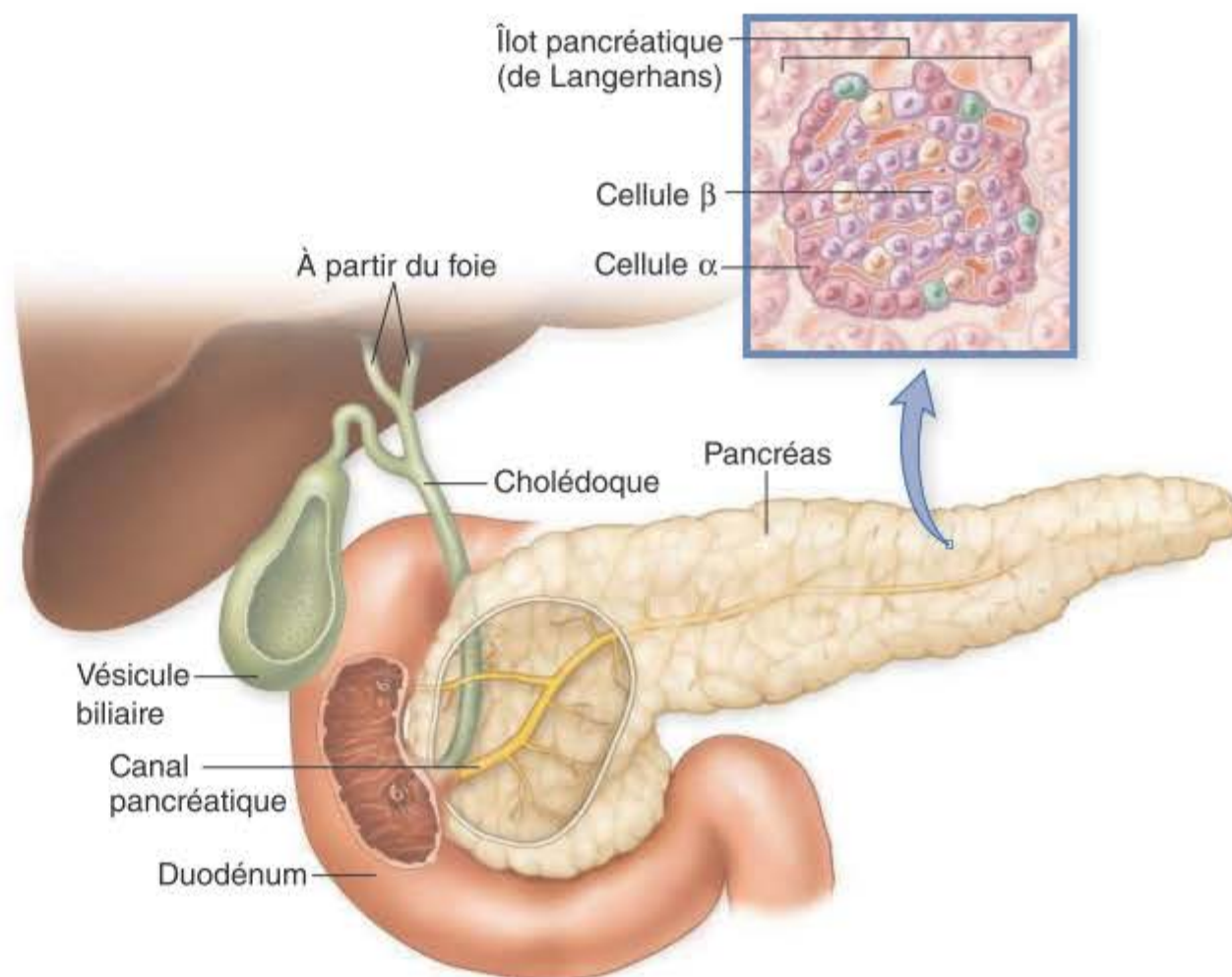


Figure 47.11 Pancréas. Le canal pancréatique et le canal biliaire (cholédoque) se vident dans le duodénum. Le pancréas sécrète le suc pancréatique dans le canal pancréatique (de Wirsung). Les îlots pancréatiques de Langerhans sécrètent des hormones dans le sang ; les cellules α sécrètent le glucagon et les cellules β sécrètent l'insuline. Le foie sécrète la bile, qui consiste en pigments biliaires (déchets d'origine hépatique) et les sels biliaires. Ceux-ci interviennent dans la digestion des graisses. La bile est mise en réserve dans la vésicule biliaire jusqu'à l'arrivée de matières grasses dans le duodénum.

l'insuline et le glucagon, sont décrites au chapitre 45, mais il en sera également question à la section 47.7.

Foie et vésicule biliaire

Le foie est l'organe interne le plus volumineux du corps (voir figure 47.3). Chez un homme adulte, le foie pèse environ 1,5 kilos et a la taille d'un ballon de rugby. La sécrétion hépatique exocrine principale est la bile, un liquide où se mélangent les *pigments biliaires* et les *sels biliaires* qui sont déversés dans le duodénum au cours de la digestion d'un repas.

Les pigments biliaires ne participent pas à la digestion ; ce sont des déchets provenant de globules rouges vieillis détruits dans le foie et qui sont éliminés avec les fèces. Si l'excrétion des pigments biliaires par le foie est bloquée, ils s'accumulent dans le sang et donnent au teint et aux tissus une coloration jaunâtre connue sous le nom de *jaunisse* (ictère).

Les sels biliaires, eux, jouent un rôle très important dans la préparation des graisses pour leur digestion subséquente. Puisque celles-ci sont insolubles dans l'eau, elles entrent dans l'intestin sous forme de gouttes dispersées dans le chyme aqueux. Les sels biliaires, qui sont solubles partiellement dans les lipides et partiellement dans l'eau, agissent à la manière de détergents, dispersant les grandes gouttes de graisse en une suspension de fines gouttelettes. Ce processus émulsifiant augmente la surface des globules graisseux sur lesquels les lipases agissent, ce qui facilite et accélère leur digestion.

Après sa production dans le foie, la bile est mise en réserve et concentrée dans la vésicule biliaire. L'arrivée de nourriture grasse dans le duodénum déclenche un réflexe nerveux et endocrinien qui déclenche la contraction de la vésicule biliaire. Il sera question de ces réflexes dans une prochaine section. La bile est ainsi expulsée dans le duodénum par le conduit cholédoque (ces réflexes constituent le sujet de la section 47.6). Les calculs biliaires sont des précipités durcis de cholestérol et/ou des sels qui se forment chez certaines personnes. Si un de ces calculs vient à bloquer le canal biliaire, la contraction de la vésicule déclenche une douleur intense, qui irradie souvent dans le dos. Dans les cas graves de blocage, une résection chirurgicale de la vésicule biliaire peut être indiquée.

Les nutriments absorbés parviennent dans le sang ou dans des capillaires lymphatiques

Après leur dégradation enzymatique, les protéines et les glucides sont absorbés respectivement comme acides aminés et monosaccharides. Ils sont transportés à travers la bordure en brosse dans les cellules épithéliales qui bordent l'intestin par une combinaison de transport actif et de diffusion facilitée (figure 47.12a). Le transport du glucose est couplé à celui des ions Na^+ (appelé aussi transport actif secondaire). Le fructose, présent dans la plupart des fruits, est transporté par diffusion facilitée. Le transport de la plupart des acides aminés est actif et fait appel à diverses

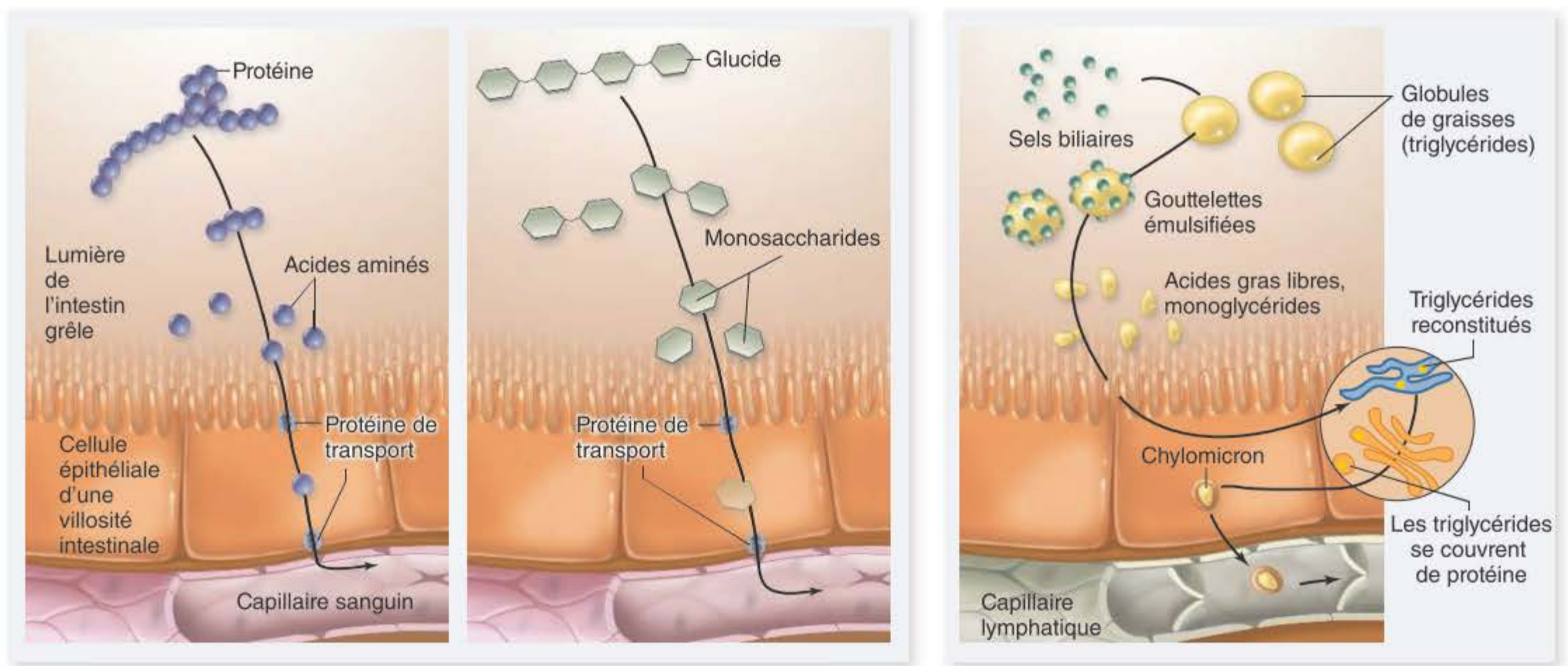


Figure 47.12 Absorption des produits de la digestion. *a.* Les monosaccharides et les acides aminés sont transportés dans les capillaires sanguins. *b.* Les acides gras et les monoglycérides présents dans la lumière intestinale sont absorbés et convertis à l'intérieur des cellules épithéliales intestinales en triglycérides. Ceux-ci sont alors couverts de protéines pour former de petites structures appelées chylomicrons, qui entrent dans les capillaires lymphatiques.

protéines transporteuses. Certaines de celles-ci transportent en même temps des ions Na^+ ; d'autres ne transportent que des acides aminés. Une fois entrés dans les cellules épithéliales à travers la membrane apicale, les monosaccharides et les acides aminés traversent le cytoplasme et sont transportés à travers la membrane basolatérale dans les capillaires sanguins à l'intérieur des villosités.

Le sang transporte les produits de digestion de l'intestin vers le foie par la veine porte hépatique. Une veine porte connecte deux lits de capillaires au lieu de retourner dans le cœur. Dans ce cas, l'intestin est connecté au foie par la veine porte hépatique ; ainsi, le foie reçoit les molécules véhiculées par le sang et provenant de l'intestin. En raison de cette disposition, le foie est le premier organe à recevoir la plupart des produits de digestion, sauf les graisses.

Les produits de la digestion des graisses sont absorbés par un mécanisme différent (figure 47.12b). Les graisses (triglycérides) sont hydrolysées par digestion en acides gras et monoglycérides. Ces acides gras et monoglycérides sont non polaires et peuvent donc entrer dans les cellules épithéliales par simple diffusion. Une fois à l'intérieur des cellules épithéliales intestinales, ils reforment des triglycérides. Ceux-ci se combinent alors à des protéines et constituent ainsi de petites particules appelées **chylomicrons**, qui sont trop volumineux pour entrer dans les capillaires sanguins intestinaux. Au lieu d'entrer dans la circulation portale hépatique, les chylomicrons passent dans les capillaires lymphatiques (voir chapitre 49), qui vident leur contenu dans le sang de veines situées près de la nuque. Les chylomicrons peuvent donner au plasma sanguin une apparence laiteuse si l'échantillon de sang est prélevé peu après un repas gras.

La quantité de liquide qui passe quotidiennement par l'intestin grêle est étonnamment élevée : environ 9 L. Cependant, la majeure partie est absorbée dans le corps plutôt que d'être éliminée dans les selles. Environ 8,5 L sont absorbés dans l'intestin grêle et 350 mL le sont dans le gros intestin. Environ 50 g seulement de matières solides et 100 mL de liquide quittent le corps sous forme de selles. L'efficacité d'absorption normale du liquide du tractus digestif humain approche donc 99 %, ce qui est particulièrement élevé.

Le gros intestin élimine les déchets

Le gros intestin, ou **côlon**, est beaucoup plus court que l'intestin grêle, occupant approximativement le dernier mètre du tractus digestif ; il est qualifié de « gros » à cause de son diamètre. L'intestin grêle se vide directement dans le gros intestin à une jonction où deux structures vestigiales persistent, le **cæcum** et l'**appendice**, (figure 47.13). Il n'y a pas de processus digestif dans le gros intestin, et l'absorption liquidienne ne représente que 4 % de l'absorption intestinale totale.

Le côlon ne comporte pas autant de replis que l'intestin grêle et sa surface interne est dépourvue de villosités. En conséquence, le gros intestin a moins d'un trentième de la surface d'absorption de l'intestin grêle. La fonction du côlon est d'absorber l'eau, les électrolytes résiduels et les produits du métabolisme bactérien, notamment la vitamine K. Le gros intestin prépare l'élimination des déchets de l'organisme.

De nombreuses bactéries vivent et se multiplient dans le gros intestin, et l'excès de bactéries est incorporé dans les déjections, les *fèces*. La fermentation bactérienne produit du gaz dans le côlon à raison d'environ 500 mL par jour. Cette production augmente fortement après la consommation de fèves ou d'autres matières végétales. Arrivant non

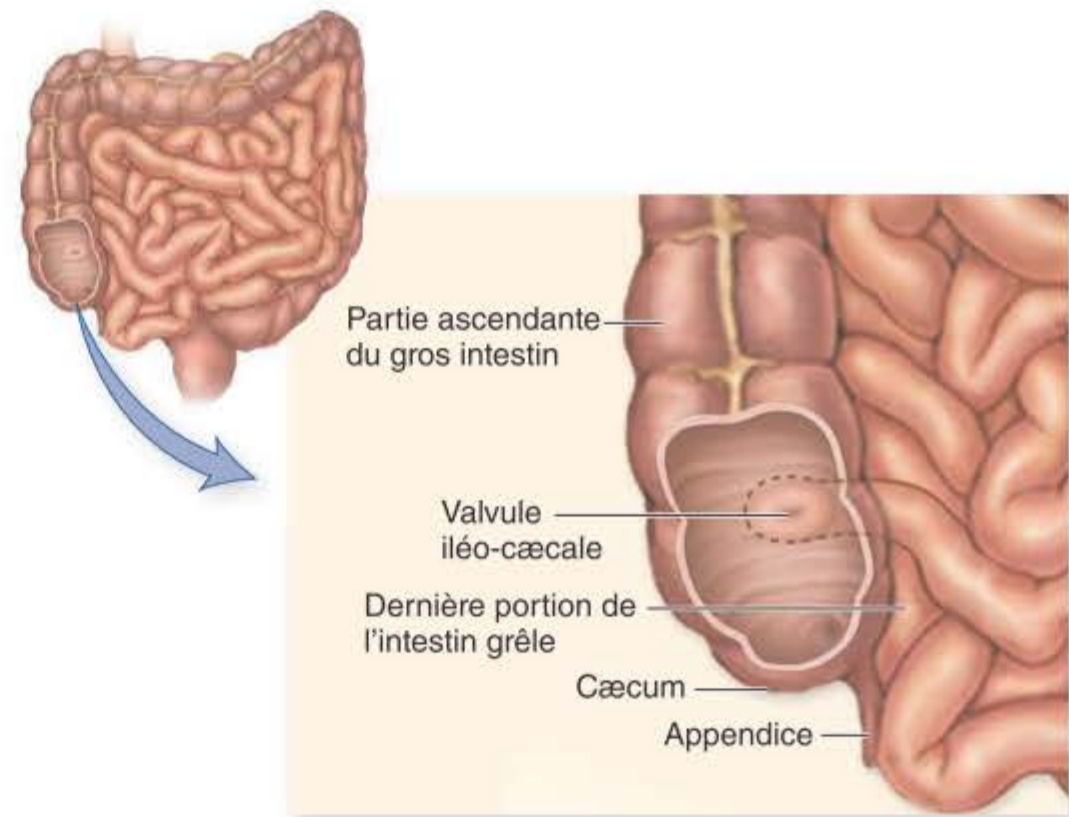


Figure 47.13 Jonction du côlon et de l'intestin grêle chez l'homme. Le gros intestin, ou côlon, commence au cæcum, qui est relativement petit comparé à celui d'autres animaux. Le cæcum est porteur d'une extension vestigiale appelée appendice.

digérées (fibres) dans le gros intestin, elles servent de substrat à la fermentation bactérienne.

Le côlon humain a évolué pour traiter une nourriture relativement riche en fibres. Les régimes pauvres en fibres, ce qui est commun aux états-Unis et dans d'autres pays développés, ralentissent le transit dans le côlon. On pense que ce type de régime ne contenant pas assez de fibres serait responsable du taux de cancer colique, qui est un des plus élevés aux États-Unis.

Les fèces compactées, poussées par les contractions péristaltiques du gros intestin, passent du côlon dans un bout d'intestin plus court appelé rectum, d'où elles sont éliminées par l'anus. Deux sphincters contrôlent le passage par l'anus. Le premier est composé de muscles lisses et s'ouvre involontairement en réaction à la pression à l'intérieur du rectum. Le second, composé de muscles striés, peut être contrôlé volontairement par le cerveau, permettant ainsi la décision consciente de retarder la défécation.

Synthèse 47.4

C'est dans l'intestin grêle que la digestion se déroule principalement ; sa surface interne est couverte de villosités qui augmentent son aire d'absorption. Le gros intestin absorbe l'eau, des électrolytes et des métabolites bactériens. La digestion est effectuée par une combinaison d'enzymes du pancréas et facilitée par des sels biliaires libérés par le foie. Le glucose et les acides aminés sont absorbés par un transport actif et une diffusion facilitée. Les lipides sont absorbés par simple diffusion.

- Pourquoi la graisse ne requiert pas de transport actif pour traverser l'épithélium intestinal ?

47.5 Diversité des systèmes digestifs des vertébrés

Objectifs

1. Expliquer comment les vertébrés digèrent la cellulose.
2. Décrire comment la rumination fonctionne.
3. Décrire l'évolution convergente au niveau moléculaire chez les herbivores.

La plupart des animaux sont dépourvus des enzymes nécessaires à la digestion de la cellulose, mais le tractus digestif de certains animaux contient des bactéries et des protistes qui convertissent la cellulose en substances que l'hôte peut digérer. Bien que la digestion par les micro-organismes gastro-intestinaux joue un rôle relativement faible dans la nutrition humaine, elle est un élément essentiel dans la nutrition de nombreux autres types d'animaux, notamment des insectes comme les termites et les blattes, et quelques groupes de mammifères herbivores. Les relations entre ces micro-organismes et leur hôte animal sont mutuellement bénéfiques et illustrent très bien le phénomène de symbiose (voir chapitre 56).

La cellulose des plantes est particulièrement résistante à la digestion. Dès lors, les herbivores ont en général un tractus digestif beaucoup plus long que les carnivores, ce qui laisse plus de temps pour la digestion (figure 47.14).

Les ruminants mâchent à nouveau la nourriture régurgitée

Les ruminants ont un estomac divisé en quatre parties (figure 47.15). Les trois premières comprennent le réticulum ou bonnet, le rumen ou panse et l'omasum ou feuillet. Celles-ci sont suivies d'un véritable estomac, l'abomasum ou caillette.

Le rumen, qui peut contenir jusqu'à 190 litres, sert de cuve de fermentation dans laquelle des bactéries et des protistes convertissent la cellulose et d'autres molécules en divers composants plus simples. La situation du rumen avant les autres chambres est importante parce qu'elle permet à l'animal de régurgiter et de remâcher le contenu du rumen, une activité appelée *rumination*. Ce processus fragmente les fibres alimentaires les plus dures en particules plus petites, augmentant la surface à laquelle les bactéries adhèrent.

Après avoir été mâché, le produit est alors avalé et soumis à une digestion bactérienne plus poussée dans le rumen ; il passe ensuite dans le feuillet, puis dans la caillette, où il est finalement mélangé au suc

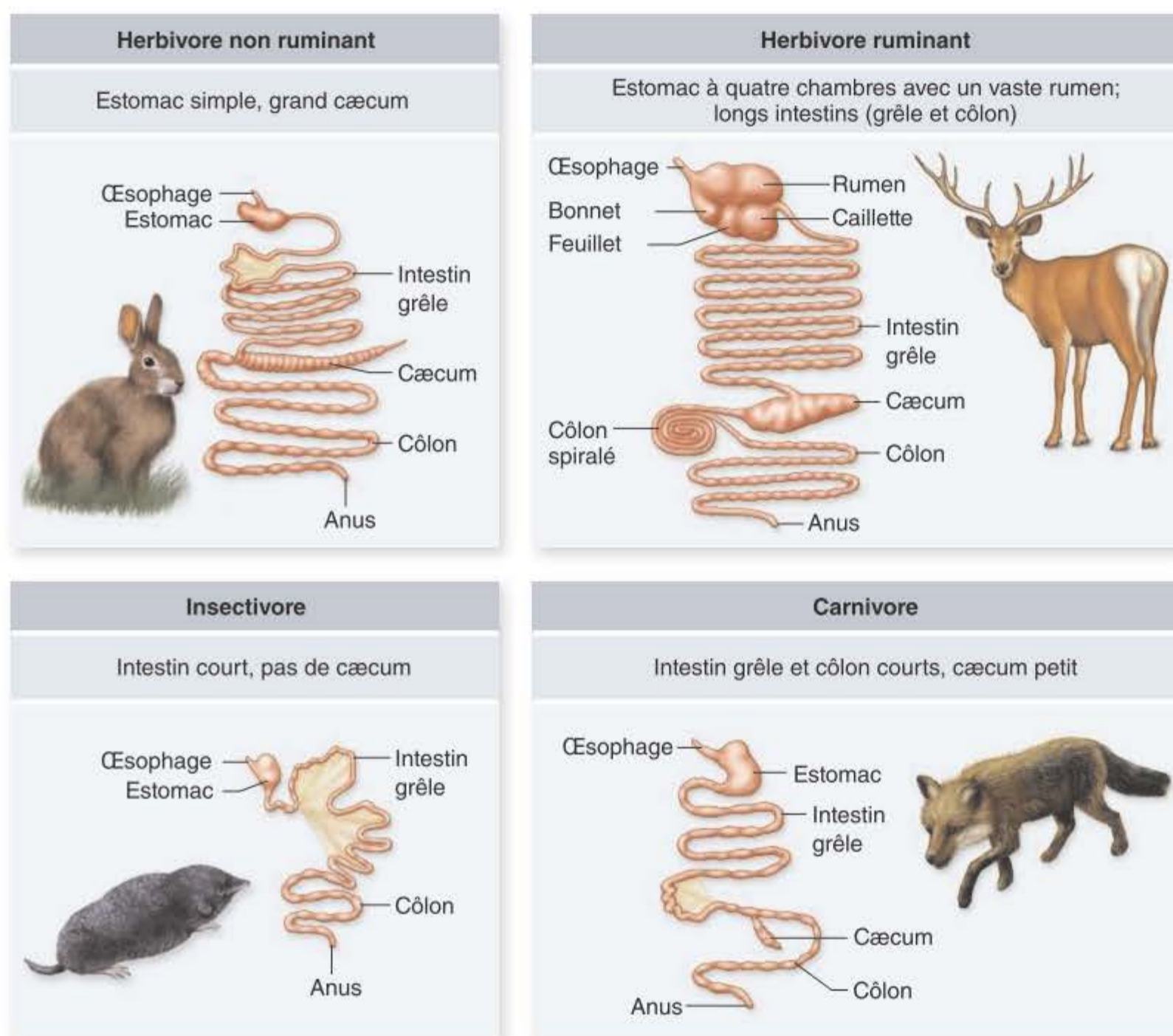


Figure 47.14 Le système digestif de différents mammifères reflète leur régime alimentaire.

Les herbivores, comme les lapins et les cerfs, requièrent un long tractus digestif avec des compartiments spécialisés pour la décomposition des matières végétales. La nourriture protéique est plus facilement digérée; les insectivores et les carnivores, comme les taupes et les renards, ont un tractus digestif court avec peu de poches spécialisées.

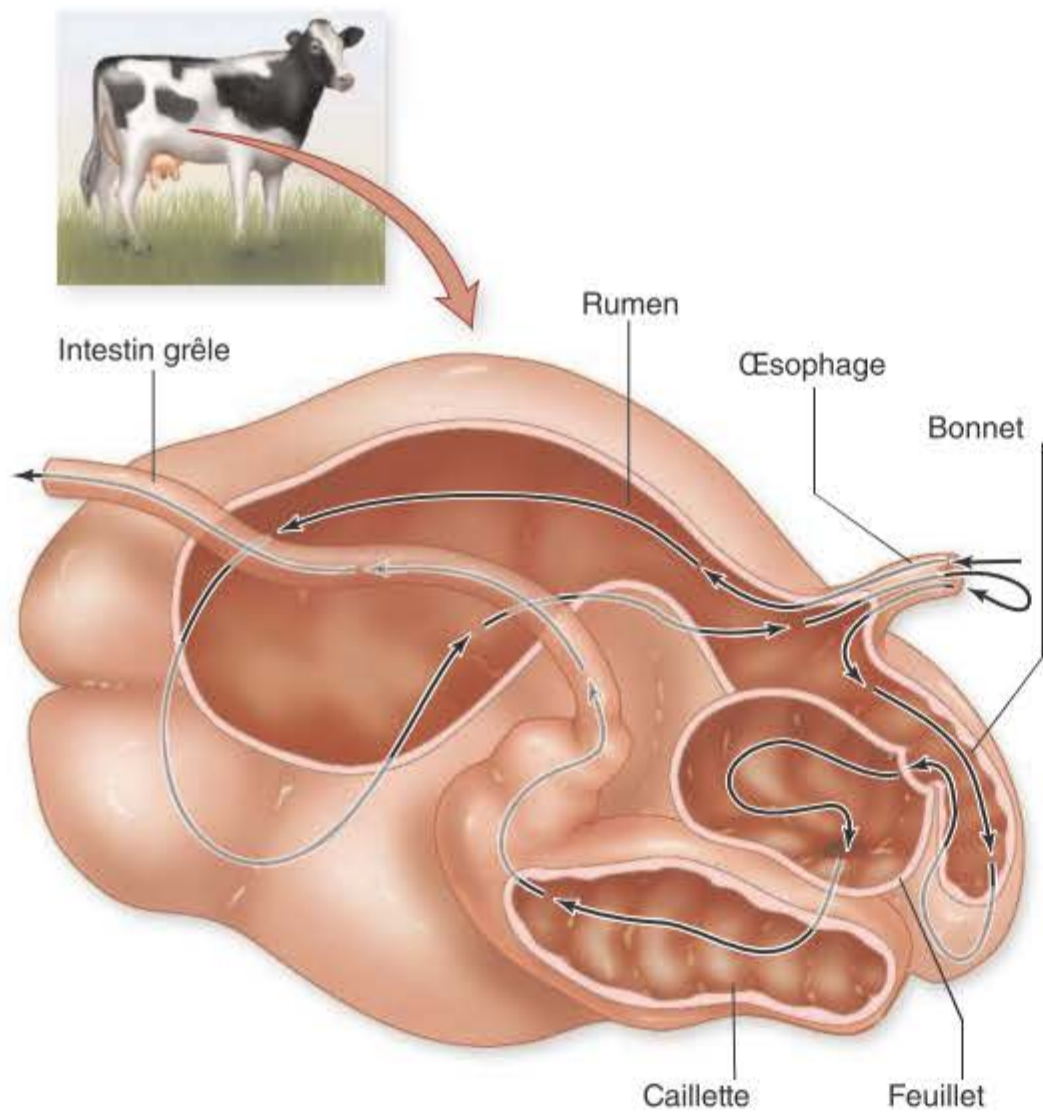


Figure 47.15 L'estomac à quatre chambres d'un ruminant.

Les graminées et d'autres plantes qu'un ruminant, comme la vache, mange entre dans le rumen (panse), où elles sont partiellement digérées. Avant de gagner une seconde chambre, le bonnet, la nourriture peut être régurgitée et remâchée. Elle est alors transférée dans les deux chambres postérieures: le feuille (omasum) et la caillette. Seule la caillette est équivalente à l'estomac humain dans sa fonction de sécrétion du suc gastrique.

gastrique. Ce processus aboutit à une digestion beaucoup plus efficace de la cellulose chez les ruminants que chez les mammifères dépourvus de rumen, comme les chevaux.

La fermentation dans l'intestin antérieur a évolué de façon convergente à plusieurs reprises

Bien que l'estomac à quatre compartiments n'ait évolué qu'une seule fois, beaucoup d'autres types d'herbivore, notamment les hippopotames, les singes langur, les paresseux, les kangourous et les hoazins (un type d'oiseau) ont acquis un vaste estomac pour améliorer la fermentation microbienne. Dans de nombreux cas, ces espèces ont développé diverses autres structures anatomiques qui servent à ralentir le passage des aliments dans l'estomac, allongeant ainsi le temps de la fermentation.

Un cas remarquable d'évolution convergente à l'échelle moléculaire est illustré par les ruminants et le singe langur, qui se nourrit principalement de feuilles. Chez la plupart des mammifères, les lysozymes sont des enzymes, présentes dans la salive et les larmes, qui attaquent les bactéries envahissantes. Cependant, chez les ruminants et les langurs, les lysozymes ont été modifiés pour tenir un nouveau rôle, la digestion des bactéries dans l'estomac. Dans les deux cas, cinq acides aminés identiques ont été changés (figure 47.16), avec comme conséquence que les molécules de lysozyme de ruminants et de langurs se ressemblent plus que les molécules des lysozymes d'espèces plus étroitement apparentées.

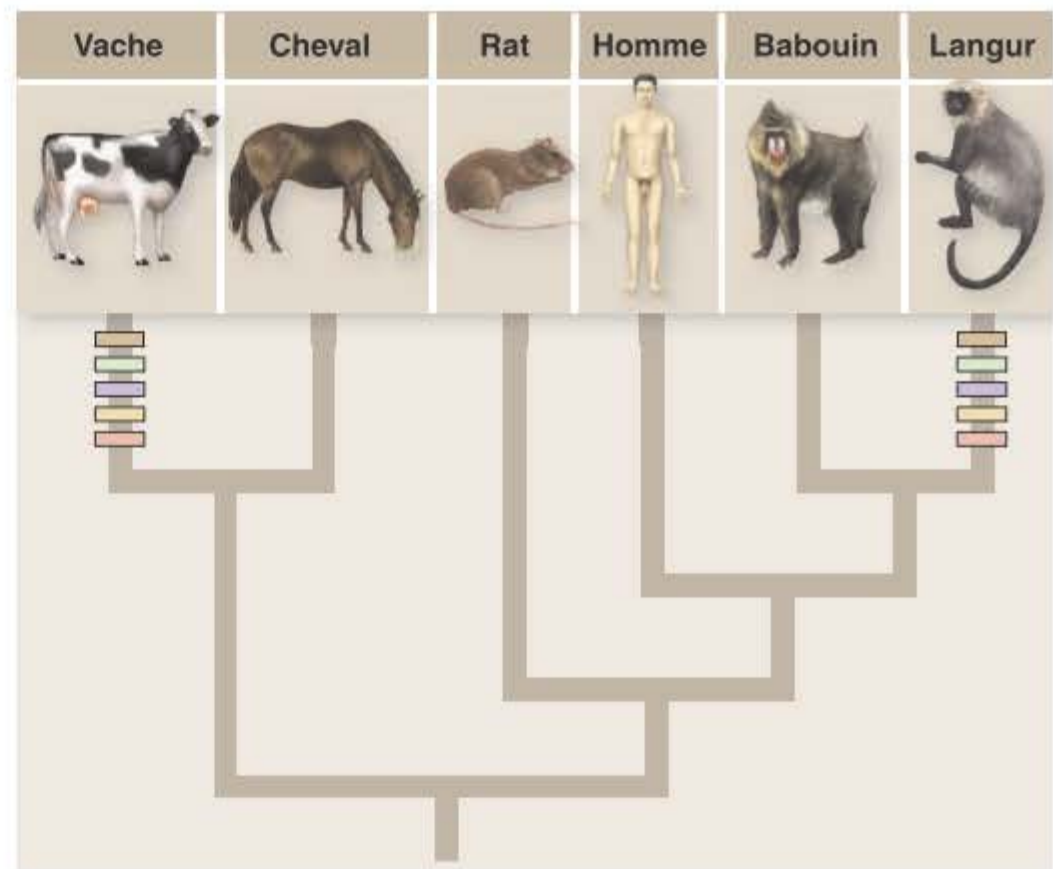


Figure 47.16 Évolution convergente de la structure du lysozyme chez les ruminants (représentés par la vache) et chez un mangeur de feuilles, le singe langur (*Semnopithecus entellus*). La même séquence de cinq acides aminés a été acquise indépendamment au cours de l'évolution par les deux groupes.

Analyse de données Si vous construisiez un arbre phylogénétique sur base des données moléculaires du lysozyme, à quoi ressemblerait-il?

Les herbivores ont encore d'autres types de processus digestif

Chez certains animaux, comme les rongeurs, les chevaux, les cerfs et les lagomorphes (lapins et lièvres), la digestion de la cellulose par des micro-organismes a lieu dans le cæcum, qui est particulièrement grand (figure 47.14). Puisque le cæcum est situé au-delà de l'estomac, la régurgitation de son contenu est impossible.

Les rongeurs et les lagomorphes ont développé une autre mode de digestion de la cellulose qui atteint un degré d'efficacité semblable à la digestion des ruminants. Ils y parviennent en mangeant leurs fèces, passant une seconde fois la nourriture à travers leur tractus digestif. Le second passage permet à l'animal d'absorber les nutriments produits par les micro-organismes dans son cæcum. Les animaux qui recourent à cette pratique de **coprophagie** (du grec *copros*, excréments, et *phagein*, manger) ne peuvent rester en bonne santé si on les empêche d'ingurgiter leurs défécations.

Les animaux dont les régimes ne contiennent pas de cellulose, comme les insectivores ou les carnivores, n'ont pas de cæcum, ou s'ils en ont un, il est atrophié.

Vitamine K

Un autre exemple de la manière par laquelle les micro-organismes intestinaux contribuent au métabolisme de leur hôte animal est fourni par la synthèse de la vitamine K. Tous les mammifères dépendent des bactéries intestinales pour la synthèse de cette vitamine nécessaire à la coagulation du sang. Les oiseaux, qui n'hébergent pas ces bactéries, doivent trouver dans leur nourriture les quantités requises de cette vitamine.

Chez l'homme, un traitement prolongé aux antibiotiques réduit fortement les populations bactériennes intestinales; dans de telles

conditions, il peut devenir nécessaire de fournir un supplément de vitamine K. Restaurer la flore normale du tractus digestif avec des bactéries bénéfiques peut aussi contribuer à corriger la carence en vitamine K.

Synthèse 47.5

Le tractus digestif des herbivores abrite en général de nombreuses colonies de micro-organismes qui digèrent la cellulose. Des réservoirs complexes de fermentation se sont développés dans le système gastro-intestinal. Au cours de la rumination, de la nourriture partiellement digérée est régurgitée à partir du rumen pour un malaxage supplémentaire dans la bouche. Dans des espèces éloignées d'herbivores, des enzymes digestives semblables ont évolué en subissant des changements identiques mais indépendants.

- Vous attendez-vous à ce que des mutations identiques soient bénéfiques dans différentes espèces ? Pourquoi oui ou pourquoi non ?

47.6 Régulation neurale et hormonale du tractus digestif

Objectifs

1. Expliquer comment le système nerveux stimule le processus digestif.
2. Identifier les principales entérogastrones.

Les activités du tractus gastro-intestinal sont coordonnées par le système nerveux et par le système endocrinien. Le système nerveux, par exemple, stimule les sécrétions salivaires et gastriques en réaction à la vue, à l'odeur et à la prise de nourriture. Lorsque les aliments arrivent dans l'estomac, leurs protéines stimulent la sécrétion d'une hormone gastrique appelée **gastrine**, qui à son tour stimule la sécrétion de pepsinogène et d'HCl par les glandes gastriques (figure 47.17). L'HCl sécrété diminue alors le pH du suc gastrique, ce qui inhibe la sécrétion de gastrine par l'effet d'une boucle rétroactive négative. De cette manière, la sécrétion gastrique est strictement contrôlée.

Le passage du chyme de l'estomac dans le duodénum inhibe les contractions gastriques de telle manière qu'un apport supplémentaire de chyme ne puisse entrer dans le duodénum avant que la portion précédente ne soit digérée. Cette inhibition gastrique passe par un réflexe nerveux et par les hormones duodénales sécrétées dans le sang. Ces hormones sont appelées collectivement **entérogastrones**.

Les principales entérogastrones comprennent la **cholécystokinine (CCK)**, la **sécrétine** et le **peptide inhibiteur gastrique (GIP)**. Le chyme riche en graisse est le stimulus le plus puissant de la sécrétion de CCK et de GIP, tandis que l'augmentation de l'acidité du chyme influence principalement la libération de sécrétine. Ces trois entérogastrones inhibent la motilité (malaxage) et les sécrétions gastriques ; par conséquent, la nourriture grasse reste dans l'estomac plus longtemps, laissant plus de temps pour la digestion des molécules lipidiques complexes.

En plus d'inhiber la motilité de l'estomac, la CCK et la sécrétine exercent d'autres fonctions régulatrices importantes dans la digestion. La CCK stimule aussi les sécrétions pancréatiques des enzymes digestives et les contractions de la vésicule biliaire. Les contractions de la vésicule biliaire injectent plus de bile dans le duodénum, ce qui favorise l'activité émulsifiante et une digestion plus efficace des graisses. L'autre fonction importante de la sécrétine est de stimuler la production pancréatique de bicarbonate, qui neutralise l'acidité du chyme. Il faut noter que la sécrétine a été la première hormone à être découverte. Le tableau 47.1 résume les activités des hormones et enzymes digestives.

Synthèse 47.6

Les sensations visuelles, olfactives et gustatives stimulent les activités salivaires et gastriques, comme le fait l'arrivée de la nourriture dans l'estomac. Les principales entérogastrones sont la cholécystokinine (CCK), la sécrétine et le peptide inhibiteur gastrique (GIP, *gastric inhibitor peptide*) ; celles-ci régulent le passage du chyme dans le duodénum et libèrent aussi les enzymes pancréatiques et la bile.

- Vous attendez-vous à ce que l'anosmie, l'incapacité de percevoir les odeurs, affecte la digestion ?

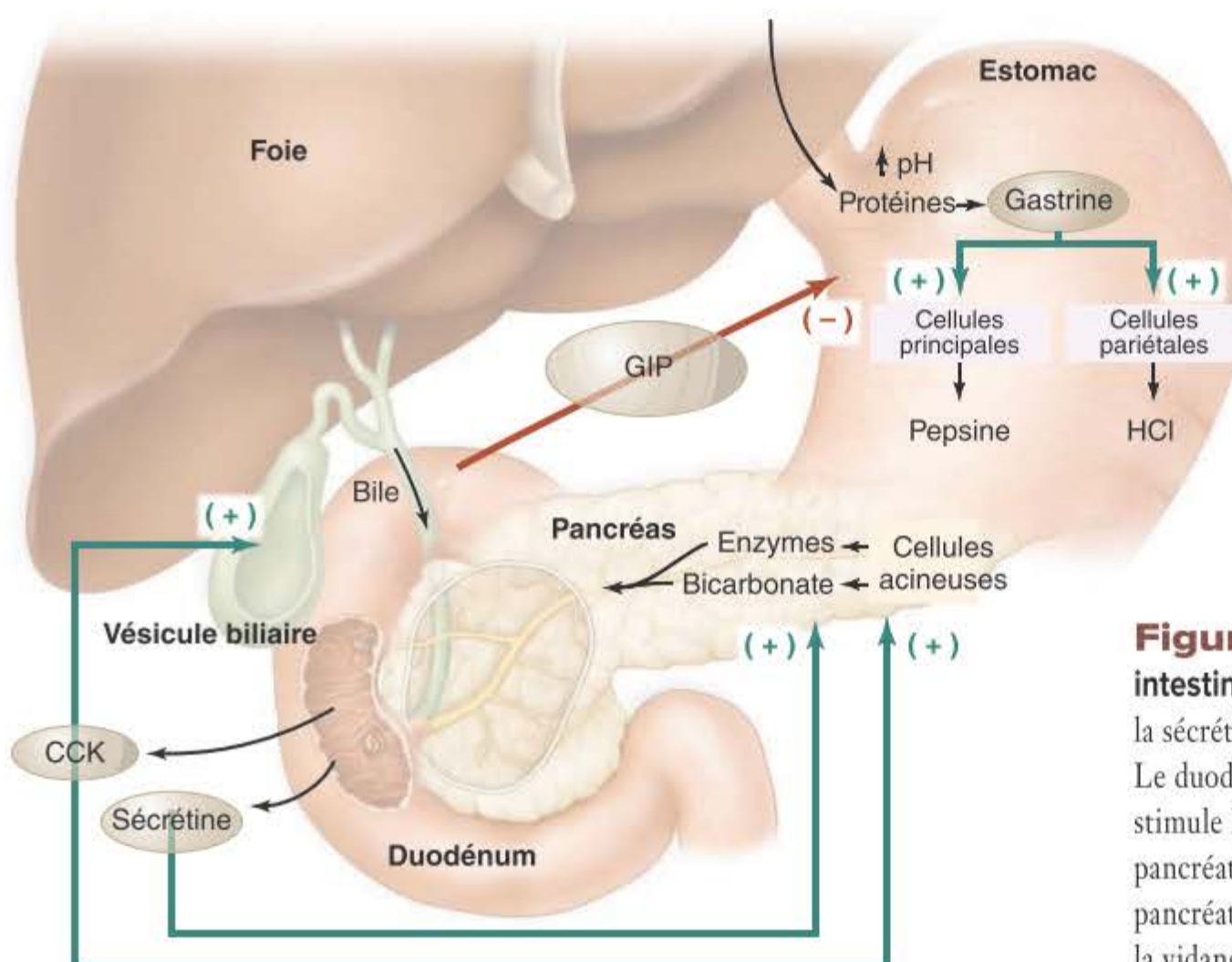


Figure 47.17 Contrôle hormonal du tractus gastro-intestinal. La gastrine, sécrétée par la muqueuse gastrique, stimule la sécrétion d'HCl et de pepsinogène (qui est converti en pepsine). Le duodénum sécrète trois hormones : la cholécystokinine (CCK), qui stimule la contraction de la vésicule biliaire et la sécrétion des enzymes pancréatiques, la sécrétine, qui stimule la sécrétion du bicarbonate pancréatique et le peptide inhibiteur gastrique (GIP), qui inhibe la vidange gastrique.

TABLEAU 47.1 Hormones et enzymes de la digestion**HORMONES**

Hormone	Classe	Origine	Stimulus	Action	Note
Gastrine	Polypeptide	Portion pylorique de l'estomac	Entrée de la nourriture dans l'estomac	Stimule la sécrétion d'HCl et de pepsinogène par l'estomac	Agit sur l'organe qui la sécrète
Cholécystokinine (CCK)	Polypeptide	Duodénum	Chyme gras dans le duodénum	Stimule la contraction de la vésicule biliaire et la sécrétion des enzymes digestives par le pancréas	Structure semblable à celle de la gastrine
Peptide inhibiteur gastrique (GIP)	Polypeptide	Duodénum	Chyme gras dans le duodénum	Inhibe la vidange de l'estomac	Stimule aussi la sécrétion d'insuline
Sécrétine	Polypeptide	Duodénum	Chyme acide dans le duodénum	Stimule la sécrétion de bicarbonate par le pancréas	Première hormone à être découverte (1902)

ENZYMES

Localisation	Enzymes	Substrat	Produits de la digestion
Glandes salivaires	Amylase	Amidon, glycogène	Disaccharides
Estomac	Pepsine	Protéines	Peptides courts
Pancréas	Lipase	Triglycérides	Acides gras, monoglycérides
	Trypsine, chymotrypsine	Protéines	Peptides courts
	DNase	ADN	Nucléotides
	RNase	ARN	Nucléotides
Intestin grêle (bordure en brosse)	Peptidases	Peptides courts	Acides aminés
	Nucléases	ADN, ARN	Sucres, bases d'acides nucléiques
	Lactase, maltase, sucrase	Disaccharides	Monosaccharides

47.7 Fonction des organes accessoires**Objectifs**

1. Décrire le rôle du foie dans le maintien de l'homéostasie.
2. Expliquer comment le pancréas agit pour contrôler la glycémie.

Tant le foie que le pancréas jouent un rôle critique en plus de la production d'enzymes digestives. Le foie est un organe important pour la destruction des toxines, et le pancréas sécrète des hormones qui régulent le taux de glucose sanguin, en partie par l'intervention des cellules hépatiques.

Le foie modifie des substances chimiques afin de maintenir l'homéostasie

Puisque le sang drainant l'estomac et l'intestin parvient directement au foie par la veine porte hépatique, cet organe est dans une position qui lui permet de modifier chimiquement les substances absorbées par le tractus gastro-intestinal avant qu'elles ne parviennent dans le reste du corps. L'alcool et d'autres drogues, par exemple, sont métabolisés par les cellules hépatiques ; c'est pourquoi le foie est souvent endommagé par une consommation excessive d'alcool ou de drogues.

Le foie neutralise aussi des toxines, des pesticides, des carcinogènes et d'autres poisons, en les convertissant en des formes moins toxiques. Un exemple important est la conversion par le foie d'une substance toxique comme l'ammoniaque produite par les bactéries intestinales. Elle est transformée en urée, une substance qui peut s'accumuler sans risque et dont la concentration sanguine peut être relativement élevée.

De même, le foie contrôle les concentrations de nombreux composants produits dans l'organisme. Les hormones stéroïdiennes, par exemple, sont converties en formes hydrosolubles et moins actives par le foie. Ces molécules sont alors mêlées à la bile et éliminées dans les selles ou transportées par le sang vers les reins et excrétées dans l'urine.

Le foie produit aussi la plupart des protéines présentes dans le plasma sanguin. La concentration totale des protéines plasmatiques est significative car elle doit être maintenue dans des limites normales afin de maintenir l'équilibre osmotique entre le sang et le liquide interstitiel. Si la concentration des protéines plasmatiques tombe trop bas, ce qui peut arriver à la suite d'une maladie hépatique comme la cirrhose, le liquide s'accumule dans les tissus, ce que l'on appelle *œdème*.

L'insuline et le glucagon assurent la stabilité du taux de glucose sanguin

Les neurones cérébraux tirent leur énergie surtout de l'oxydation aérobie du glucose provenant du plasma sanguin. Il est dès lors très important que la glycémie (taux de glucose sanguin) ne tombe pas trop bas, comme cela pourrait survenir durant un jeûne ou un exercice prolongé. Il importe aussi que la glycémie ne se maintienne pas à des taux trop

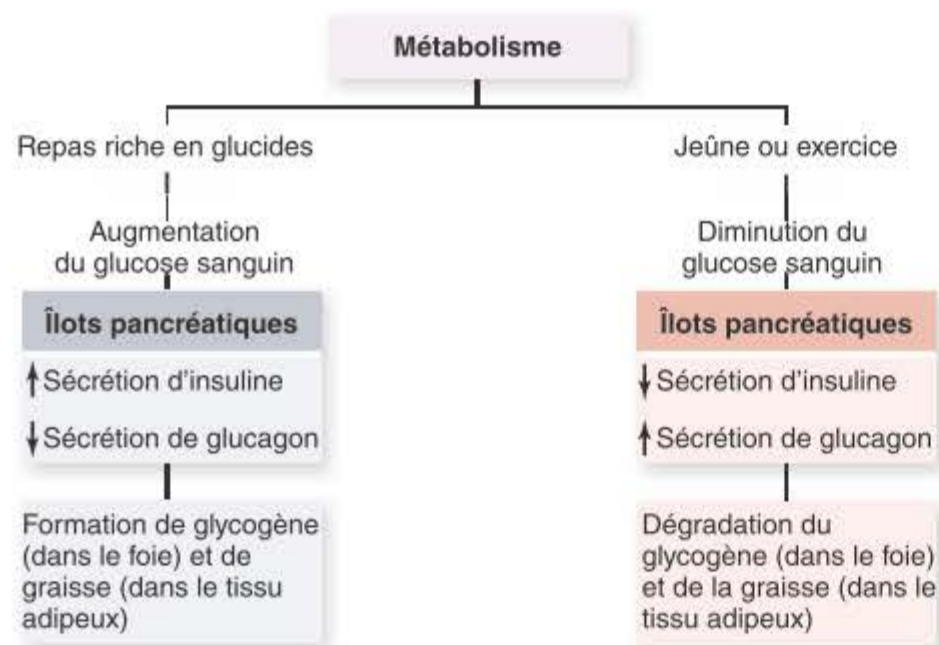


Figure 47.18 Les actions de l'insuline et du glucagon.

Après un repas, une sécrétion accrue d'insuline par les cellules b des îlots pancréatiques induit le dépôt de glycogène et de graisse. Durant le jeûne et l'exercice, une augmentation de la sécrétion de glucagon par les cellules a des îlots pancréatiques et une diminution de la sécrétion d'insuline favorisent la dégradation (par des réactions d'hydrolyse) du glycogène et des graisses.

élevés, comme cela survient chez les gens atteints d'un diabète non équilibré, ce qui peut aboutir à des lésions tissulaires.

Après un repas riche en glucides, le foie et les muscles squelettiques captent le glucose sanguin en excès et le mettent en réserve sous forme d'un polysaccharide, le glycogène. Ce processus est stimulé par l'hormone insuline sécrétée par les cellules b des îlots de Langerhans du pancréas (figure 47.18).

Lorsque la glycémie décroît, comme cela se produit entre les repas, durant les périodes de jeûne et durant les exercices, le foie sécrète du glucose dans le sang. Ce glucose provient en partie de la dégradation du glycogène hépatique en glucose-6-phosphate, un processus appelé **glycogénolyse**. Le groupe phosphate est ensuite enlevé, et du glucose libre est sécrété dans le sang. Les muscles squelettiques sont dépourvus de l'enzyme nécessaire pour enlever le groupe phosphate, et ainsi, même s'ils ont des réserves de glycogène, ils ne peuvent sécréter du glucose dans le sang. Cependant, les cellules musculaires peuvent utiliser ce glucose directement pour le métabolisme énergétique puisque le glucose-6-phosphate est en fait le produit de la première réaction de la glycogénolyse. La dégradation du glycogène hépatique est stimulée par une autre hormone, le glucagon, qui est sécrétée par les cellules a des îlots de Langerhans pancréatiques (voir figure 47.18).

Si le jeûne ou l'exercice se poursuit, le foie commence à convertir d'autres molécules comme les acides aminés et l'acide lactique, en glucose. Ce processus est appelé **gluconéogenèse** (« nouvelle formation de glucose »). Les acides aminés utilisés pour la gluconéogenèse proviennent de protéines musculaires, ce qui explique l'atrophie musculaire sévère qui survient lors d'un jeûne prolongé.

Synthèse 47.7

Le foie est responsable de la neutralisation des toxines potentiellement dangereuses ainsi que des modifications des hormones stéroïdiennes. En outre, le foie produit des protéines plasmatiques essentielles. Les hormones pancréatiques et le foie régulent le taux sanguin du glucose. L'insuline stimule la formation du glycogène et des graisses dans le foie. Le glucagon stimule la dégradation du glycogène dans le foie, qui libère le glucose dans le sang.

- Quel est un des avantages importants du système porte hépatique ?

47.8 L'énergie de la nourriture, les dépenses énergétiques et les nutriments essentiels

Objectifs

1. Expliquer le taux métabolique de base et l'effet de l'exercice.
2. Énumérer les hormones impliquées dans la régulation de l'appétit et du poids du corps.
3. Citer les nutriments essentiels.

L'ingestion de nourriture sert deux fonctions principales : elle fournit la source d'énergie et les substances que l'animal est incapable de produire lui-même.

Même un animal en repos complet requiert de l'énergie pour entretenir son métabolisme ; le taux de consommation énergétique au repos dans des conditions définies est appelé **métabolisme de base (MB)**. Il est relativement constant pour un individu donné, et dépend surtout de l'âge, du sexe et de la taille corporelle.

L'exercice augmente le métabolisme

L'exercice physique augmente le métabolisme au-dessus du niveau de base. Aussi, la quantité d'énergie dépensée par jour est déterminée non seulement par le MB mais aussi par l'intensité de l'activité physique. Si l'énergie fournie par l'alimentation dépasse la consommation quotidienne, l'excès sera mis en réserve sous forme de glycogène et de graisse (figure 47.18). Puisque les réserves de glycogène sont limitées, l'ingestion continue d'un excès de nourriture aboutira principalement à l'accumulation de graisse.

L'énergie fournie par la nourriture ingérée est exprimée en **kilocalories** (1 kilocalorie = 1 000 calories). La teneur calorique des aliments est mesurée par la quantité de chaleur générée lorsqu'ils sont « brûlés » soit littéralement, quand le contenu calorique est mesuré dans un calorimètre, ou dans le corps, quand la nourriture est digérée et ensuite oxydée au cours de la respiration cellulaire. L'ingestion de calories peut être affectée par le régime alimentaire et la quantité d'énergie dépensée par l'exercice peut être modifiée par le style de vie.

La dépense énergétique quotidienne (taux métabolique) d'une personne varie entre 1 300 et 5 000 kilocalories, selon son MB et l'intensité de son activité physique. Si les kilocalories de nourriture ingérée excèdent le taux métabolique pendant une période prolongée, la personne accumulera une quantité de graisse qui sera délétère, aboutissant à l'obésité. En France, l'obésité concernait 15 % des adultes en 2012, contre seulement 6,1 % en 1980. Toutefois, les données les plus récentes, datant de 2012, sont porteuses d'espoir : pour la première fois en plus de 30 ans, la progression de l'obésité ralentit enfin dans notre pays.

La prise de nourriture est sous contrôle neuroendocrinien

Pendant de nombreuses années, les bases neuronales et hormonales de l'appétit sont restées un mystère. Les expériences de jeûne et de suralimentation chez le rat montrent une augmentation de l'apport alimentaire

lorsque le jeûne se termine. Cette augmentation corrige la perte pondérale et ramène l'organisme aux valeurs de base, la prise alimentaire diminuant ensuite. Ces expériences ont montré l'existence de mécanismes de contrôle liant la prise alimentaire à l'équilibre énergétique. L'intervention d'un *facteur de satiété* hormonal produit par le tissu adipeux a été supposée pour expliquer ces observations. Il a également été démontré que des régions de l'hypothalamus étaient impliquées dans le comportement alimentaire.

D'autres études chez les rongeurs avaient identifié certains gènes qui peuvent conduire à l'obésité. Comme la génétique moléculaire moderne a permis le clonage de plusieurs de ces gènes, on a commencé à percevoir les contours d'un modèle reliant l'apport alimentaire à l'équilibre énergétique. Ce modèle implique une signalisation afférente du tissu adipeux et un comportement alimentaire dépendant du système nerveux central (SNC), des signaux efférents étant émis par le SNC en fonction des dépenses énergétiques, du stockage, de la reproduction et du comportement alimentaire. Nous discuterons d'abord des hormones concernées, puis nous montrerons comment elles s'insèrent dans un circuit de contrôle global.

Leptine

L'un des modèles de rongeurs pour l'obésité, la souris obèse, est causée par une mutation dans un gène unique nommé *ob* (pour obésité). Les animaux homozygotes pour l'allèle mutant récessif deviennent obèses par rapport aux souris de type sauvage (figure 47.19). Lorsque le gène responsable de ce phénotype spectaculaire a été isolé, il s'est avéré coder une hormone peptidique appelée leptine, ce qui a conduit à l'hypothèse que l'absence de production de leptine chez les individus mutants était responsable de l'obésité. Effectivement, lorsque des animaux *ob/ob* reçoivent une injection de leptine, ils cessent de manger avec excès et perdent du poids (voir figure 47.19). Ces expériences ont identifié la leptine comme le principal

facteur de satiété, et la clé du contrôle de l'appétit. Le gène codant le récepteur de la leptine (*db*) a également été isolé et il est exprimé dans les neurones hypothalamiques impliqués dans l'apport énergétique.

La leptine est maintenant considérée comme la principale molécule de signalisation dans la partie afférente du circuit de contrôle pour la détection de l'énergie, de la prise alimentaire et de la dépense énergétique. La leptine est produite par le tissu adipeux en réponse à l'alimentation, et le taux de leptine augmente avec la consommation alimentaire et la quantité de graisse corporelle. La restriction alimentaire réduit le taux de leptine, ce qui signale au cerveau que l'apport alimentaire est nécessaire, alors que la réalimentation après un jeûne conduit à une augmentation rapide du taux de leptine et à une perte d'appétit. La partie efférente de ce circuit de contrôle est complexe et inclut le contrôle par le SNC de la dépense énergétique, du stockage de l'énergie et du comportement alimentaire.

Le gène de la leptine a également été isolé chez l'homme et la leptine semble fonctionner chez les humains comme chez la souris. Toutefois, des études récentes chez l'homme montrent que l'activité du gène *ob* et la concentration sanguine de la leptine sont plus élevées chez les obèses que chez les personnes maigres, et que la leptine produite par les personnes obèses semble être normale. Il a été suggéré que, contrairement aux souris mutantes, la plupart des cas d'obésité chez l'homme pouvaient résulter d'une sensibilité réduite à l'action de la leptine dans le cerveau, plutôt que d'une diminution de la production de leptine par les adipocytes. La recherche sur la leptine chez l'homme est en cours et d'un grand intérêt tant pour les scientifiques que pour l'industrie pharmaceutique.

Insuline

Bien que l'obésité extrême associée à des mutations perte de fonction du gène *ob* indique que d'autres signaux hormonaux ne peuvent pas se substituer à la signalisation de la leptine, d'autres hormones sont également impliquées. L'insuline jouerait un rôle dans la signalisation de la satiété ; son taux chute aussi au cours du jeûne et augmente en cas d'obésité. À l'instar de son intervention dans l'homéostasie de la glycémie, comme décrit précédemment, son rôle dans le circuit de contrôle de l'équilibre énergétique est complexe.

Hormones intestinales (entérogastrones)

L'intestin produit un certain nombre d'hormones qui contrôlent la physiologie de la digestion comme décrit précédemment. Plusieurs d'entre elles ont également été impliquées dans la régulation de la prise alimentaire. Elles sont produites en réponse directe à l'alimentation, ce qui est nécessaire pour leur rôle dans la digestion.

Les hormones GIP et CCK ont des récepteurs dans l'hypothalamus et semblent envoyer au cerveau le même genre de signal inhibiteur que ceux de la leptine et de l'insuline. Les taux de ces hormones intestinales varient aussi avec le comportement alimentaire selon un schéma similaire à ceux de la leptine et de l'insuline.

L'hormone intestinale, la ghréline, a l'effet inverse de ces hormones coupe-faim. La ghréline a aussi des récepteurs dans l'hypothalamus, mais elle semble stimuler la prise alimentaire. Ce rôle est étayé par des études chez le rat montrant que l'administration chronique de la ghréline mène à l'obésité. Le taux de ghréline semble s'élever avant l'alimentation et peut être impliqué dans l'induction du comportement alimentaire. L'un des traitements de l'obésité sévère, la chirurgie de pontage gastrique, conduit à des taux réduits de ghréline. On a suggéré que ceci serait une des explications à la suppression de l'appétit constatée après cette intervention.

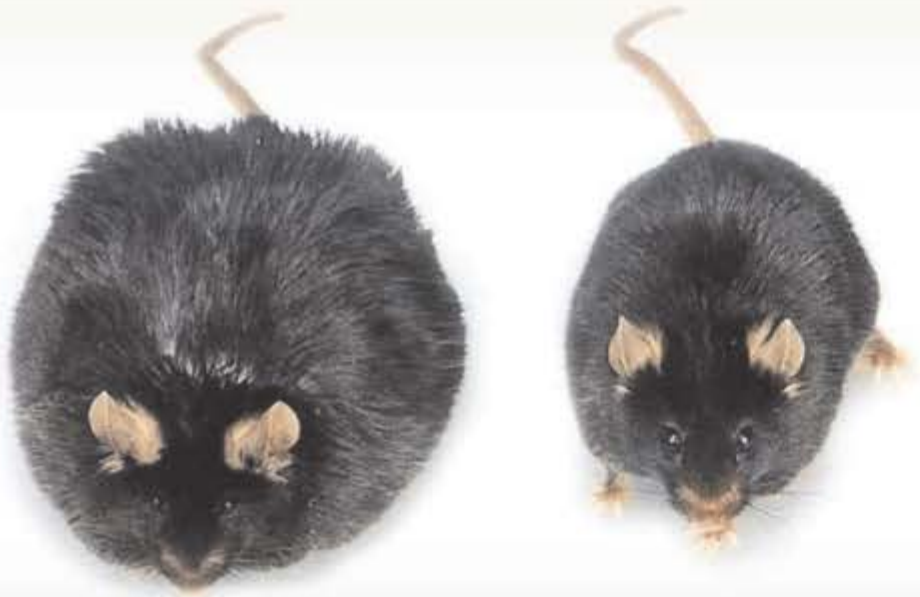
RÉFLEXION SCIENTIFIQUE

Question : pourquoi les souris *ob/ob* sont-elles obèses ?

Hypothèse : une production insuffisante de leptine stimule l'appétit et conduit à une suralimentation.

Expérience : injecter de la leptine aux souris mutantes.

Résultats : en deux semaines à peine, les souris traitées ont perdu 30 % de leur poids sans effets secondaires apparents.



Interprétation : quel est le mécanisme moléculaire par lequel la leptine exerce son effet ? Des mutations dans d'autres gènes ont-ils le même effet ?

Figure 47.19 Effets de l'hormone leptine.

Neuropeptides

Le contrôle efférent sur l'alimentation et l'équilibre énergétique est moins clair que le contrôle afférent, qui vient d'être décrit. Le régulateur central est l'hypothalamus et deux neuropeptides du cerveau ont été mis en cause : le neuropeptide Y (NPY) et l'hormone, mélanotrophine- α (α -MSH, *α -melanocyte-stimulating hormone*). Ces peptides sont antagonistes, le NPY induisant l'alimentation et l' α -MSH la supprimant.

Des expériences ont montré que la production et la libération d' α -MSH sont stimulées par la leptine et que l'administration d' α -MSH inhibe l'appétit. Une perte de fonction du récepteur de l' α -MSH entraîne également de l'obésité. En revanche, l'expression de NPY est régulée négativement par la leptine et l'administration de NPY stimule l'appétit.

Modèle de bilan énergétique

Le modèle actuel du bilan énergétique et le comportement alimentaire sont résumés dans la figure 47.20. Le rôle de la leptine et de l'insuline est la régulation à long terme de la partie afférente de ce réseau de signalisation. La leptine et l'insuline sont produites respectivement par le tissu adipeux et le pancréas en réaction aux effets du comportement alimentaire, et non comme une réponse directe à l'ingestion de nourriture. Cela conduit à des taux circulants de leptine qui sont en corrélation avec la quantité de tissu adipeux. L'exemple extrême est le taux très élevé de leptine chez les sujets obèses. Des taux élevés de leptine et d'insuline agissent alors sur l'hypothalamus pour augmenter les taux d' α -MSH et réduire ceux de NPY ; ce qui entraîne une diminution de l'appétit et une

dépense énergétique accrue et permet la reproduction et la croissance. Des taux faibles de leptine et d'insuline ont comme effet sur l'hypothalamus de réduire la sécrétion d' α -MSH et d'augmenter celle de NPY, avec en conséquence, une augmentation de l'appétit et une diminution de la dépense énergétique. Si le taux de leptine reste faible, cela peut empêcher la reproduction et la croissance.

Les hormones intestinales, CCK et GIP, sont produites en réponse à l'alimentation et représentent des régulateurs à court terme de la partie afférente du circuit de contrôle de l'équilibre énergétique. Leur action est la même que celle de la leptine et l'insuline. La ghréline, autre hormone intestinale, est aussi un régulateur à court terme qui stimule l'appétit.

Les nutriments essentiels sont ceux que le corps ne peut produire

Au cours de l'évolution, de nombreux animaux ont perdu la capacité de synthétiser des substances particulières qui, toutefois, continuent à jouer un rôle essentiel dans leur métabolisme. Ces substances qu'un animal ne peut produire pour lui-même, mais qui sont nécessaires à sa santé et doivent être fournies par l'alimentation sont appelées nutriments essentiels.

Parmi les nutriments essentiels, on trouve les **vitamines**, qui sont des substances organiques requises à l'état de traces. Par exemple, les humains, les singes et les cobayes ont perdu la faculté de synthétiser l'acide ascorbique (vitamine C). S'il vient à manquer dans l'alimentation, la carence aboutira au scorbut, une maladie potentiellement mortelle

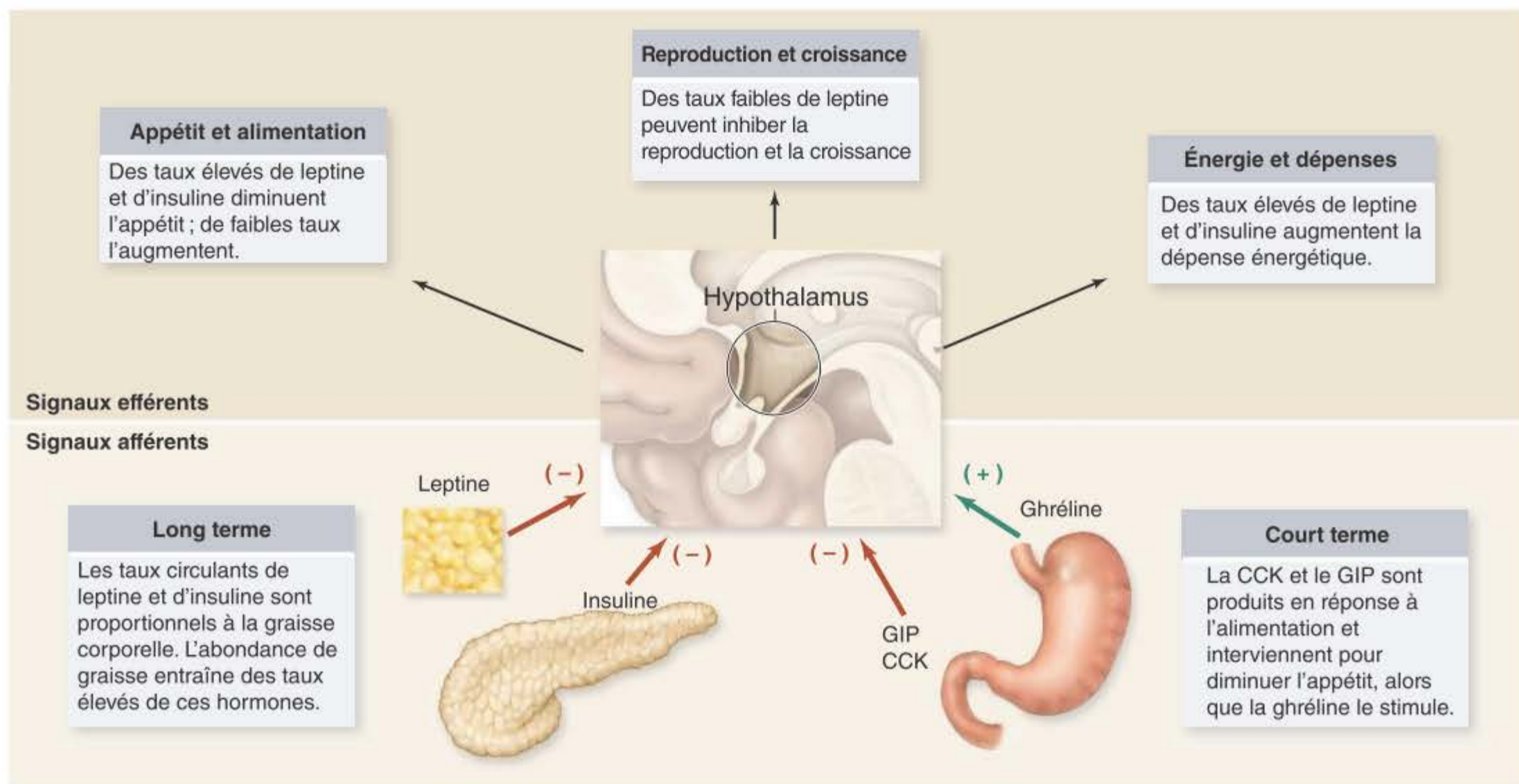


Figure 47.20 Contrôle hormonal du comportement alimentaire. Le comportement alimentaire est sous un contrôle à long terme lié à la quantité de tissu adipeux, et sous un contrôle à court terme liés à l'ingestion de nourriture. Ce contrôle est assuré par le SNC. La région principale du cerveau qui est concernée est l'hypothalamus.



Question Supposons que les récepteurs hypothalamiques du GIP et de la CCK ne fonctionnent pas. Comment cela affectera-t-il la production de leptine?

TABLEAU 47.2 Les vitamines principales nécessaires à l'homme

Vitamine	Fonction	Origine	Symptômes de carence
Vitamine A (rétinol)	Utilisée dans la production des pigments visuels, entretien des tissus épithéliaux	Légumes verts, produits laitiers, foie	Héméralopie (cécité nocturne), peau flasque
Vitamines du complexe B			
B1	Coenzyme dans l'élimination du CO ₂ au cours de la respiration cellulaire	Viande, grains, légumineuses	Béribéri, affaiblissement cardiaque, œdème
B2 (riboflavine)	Constituant des coenzymes FAD et FMN, qui jouent un rôle métabolique	Nombreux types de nourriture	Inflammation et fissures cutanées, irritation oculaire
B3 (niacine)	Constituant des coenzymes NAD ⁺ et NADP ⁺	Foie, viandes maigres, grains	Pellagre, inflammation des nerfs, désordres mentaux
B5 (acide pantothénique)	Constituant du coenzyme A, une connexion majeure entre les métabolismes des glucides et des lipides	Nombreux types de nourriture	Rare: fatigue, perte de la coordination
B6 (pyridoxine)	Coenzyme dans de nombreuses phases du métabolisme des acides aminés	Céréales, légumes, viande	Anémie, convulsions, irritabilité
B12 (cyanocobalamine)	Coenzyme dans la synthèse des acides nucléiques	Viande rouge, produits laitiers	Anémie pernicieuse
Biotine	Coenzyme dans la synthèse lipidique et dans le métabolisme des acides aminés	Viande, légumes	Rare: dépression, anémie
Acide folique	Coenzyme dans le métabolisme des acides aminés et des acides nucléiques	Légumes verts	Anémie, diarrhée
Vitamine C	Importante pour la synthèse du collagène, de l'os, du ciment dentaire, du tissu conjonctif des vaisseaux sanguins; peut contribuer à la résistance aux infections	Fruits, légumes à feuilles vertes	Scorbut, fissures cutanées, fragilité des vaisseaux sanguins
Vitamine D (calciférol)	Augmente l'absorption du calcium et favorise la formation osseuse	Produits laitiers, huile de foie de morue	Rachitisme, déformations osseuses
Vitamine E (tocophérol)	Protège les acides gras et les membranes cellulaires de l'oxydation	Margarine, semences, légumes à feuilles vertes	Atteinte musculaire
Vitamine K	Essentielle pour la coagulation sanguine	Légumes à feuilles vertes	Saignement grave

liée à la dégénérescence des tissus conjonctifs. Les humains ont besoin de 13 vitamines différentes (tableau 47.2).

Certains nutriments essentiels sont requis en quantité plus élevée qu'à l'état de traces. De nombreux vertébrés, par exemple, sont incapables de synthétiser 1 ou plus des 20 acides aminés utilisés pour la synthèse des protéines. Ces *acides aminés essentiels* doivent être obtenus des protéines alimentaires. Neuf acides aminés sont essentiels pour l'homme. Les gens qui sont végétariens doivent choisir un régime équilibré dans lequel les acides aminés essentiels d'un aliment complètent ceux qui sont présents dans un autre. Les végétariens ont également besoin d'apports supplémentaires de certaines vitamines peu abondantes dans les plantes, comme certaines vitamines B.

De plus, tous les vertébrés ont perdu la capacité de synthétiser certains acides gras insaturés à longues chaînes et dès lors doivent les trouver dans leur alimentation. Par ailleurs, certains nutriments essentiels peuvent être produits par les vertébrés, alors que des membres d'autres groupes d'animaux n'ont pas cette faculté. Par exemple, les vertébrés peuvent synthétiser le cholestérol, le composant principal des hormones stéroïdiennes, mais certains insectes carnivores en sont incapables.

La nourriture fournit aussi des **minéraux essentiels** comme le calcium, le magnésium, le phosphore et d'autres substances inorga-

niques, entre autres une large variété d'*oligoéléments* comme le zinc et le molybdène, qui sont requis en très petites quantités. Les animaux obtiennent les oligoéléments soit directement des plantes ou d'animaux qui ont mangé ces plantes.

Synthèse 47.8

Le métabolisme de base est la quantité minimale d'énergie consommée sous des conditions définies de repos. L'exercice n'augmente pas le métabolisme de base, mais il amplifie les dépenses énergétiques totales de l'organisme. L'obésité résulte d'un excès d'apport d'énergie alimentaire par rapport aux dépenses énergétiques au cours d'une période prolongée. Les hormones impliquées dans la régulation de l'appétit sont la leptine, l'insuline, les entérogastrones, notamment la CCK, le GIP et la ghréline, ainsi que des neuropeptides provenant de l'hypothalamus. Les nutriments essentiels pour les humains sont 13 vitamines, des minéraux et des acides aminés et des acides gras que le corps ne peut synthétiser lui-même.

- *Qu'est-ce qui pourrait expliquer l'obésité chez une personne dont le taux de leptine est normal ?*



47.1 Types de système digestif

Les systèmes digestifs des invertébrés sont des sacs ou des tubes.

Chez les cnidaires et les vers plats, le système digestif incomplet est une cavité gastrovasculaire avec une seule ouverture (la figure 47.1). En revanche, un système digestif complet, avec un tube à sens unique de la bouche à l'anus, permet une spécialisation des organes digestifs.

Les systèmes digestifs des vertébrés comprennent des structures spécialisées adaptées à la nourriture.

Le tractus gastro-intestinal comprend la bouche et le pharynx, l'œsophage, l'estomac, l'intestin grêle et le côlon, un cloaque ou un rectum et l'anus (figure 47.3). Les quatre couches de tissus du tractus sont la muqueuse, la sous-muqueuse, la musculuse et la séreuse (figure 47.4).

47.2 La bouche et les dents : ingestion et transformation de la nourriture

Les dents des vertébrés sont adaptées à différents types de nourriture.

Les oiseaux sont dépourvus de dents, mais ont un gésier, où de petits cailloux broient les aliments. Les dents des mammifères sont adaptées à leur régime alimentaire (figure 47.6).

La bouche sert à l'ingestion et à une première transformation des aliments.

Les glandes salivaires sécrètent la salive qui contient de l'amylase et qui humidifie la nourriture et commence la digestion pendant que les aliments sont mâchés. La déglutition, une fois commencée, est involontaire (figure 47.7).

47.3 L'œsophage et l'estomac : le début de la digestion

Les contractions musculaires de l'œsophage transfèrent la nourriture dans l'estomac.

Des contractions musculaires rythmiques suivies de relâchement, appelées péristaltisme, propulsent le bol alimentaire dans l'estomac.

L'estomac est un « réservoir temporaire » servant à la décomposition acide de la nourriture.

Dans l'estomac, l'acide chlorhydrique décompose la nourriture et transforme le pepsinogène en pepsine, une protéase active. Le mélange des aliments et le suc gastrique forme le chyme, qui passe à travers le sphincter pylorique dans l'intestin grêle.

47.4 Les intestins : digestion, absorption et élimination

La structure de l'intestin grêle est spécialisée dans la digestion et l'absorption des nutriments.

La surface de l'intestin grêle est augmentée par des projections digitiformes, appelées villosités (figure 47.10). Le duodénum reçoit les sécrétions digestives du pancréas et du foie.

Des organes accessoires sécrètent des enzymes dans l'intestin grêle.

Les organes accessoires comprennent les glandes salivaires, le pancréas, le foie et la vésicule biliaire (figure 47.11). Le pancréas sécrète des enzymes digestives et du bicarbonate. Le foie sécrète la bile, qui est stockée dans la vésicule biliaire. La bile disperse les graisses en fines gouttelettes.

Les nutriments absorbés parviennent dans le sang ou dans des capillaires lymphatiques.

Les acides aminés et les monosaccharides sont transférés dans les cellules épithéliales par un transport actif et par diffusion facilitée (figure 47.12).

Ils passent ensuite dans la circulation sanguine. Les acides gras et les monoglycérides diffusent simplement dans les cellules épithéliales. Ils sont assemblés en chylomicrons qui entrent dans le système lymphatique.

Les molécules absorbées qui passent dans la circulation sanguine sont transportées dans le foie par la veine porte.

Le gros intestin élimine les déchets.

Le gros intestin absorbe l'eau et concentre les déchets, qui sont stockés dans le rectum jusqu'à ce qu'ils puissent être éliminés.

47.5 Diversité des systèmes digestifs des vertébrés

Les ruminants mâchent à nouveau la nourriture régurgitée.

L'estomac des ruminants à quatre compartiments comprend le rumen, le bonnet, le feuillet et la caillette. Les aliments traités initialement dans le rumen sont régurgités pour être mâchés davantage.

La fermentation dans l'intestin antérieur a évolué de façon convergente à plusieurs reprises.

Un tube digestif élargi a évolué dans de nombreuses espèces ; il constitue une chambre adaptée à la fermentation microbienne. Chez certains herbivores non apparentés, des modifications identiques dans le lysozyme ont été acquises.

Les herbivores ont encore d'autres types de processus digestif.

Chez certains herbivores, la digestion de la cellulose par les microorganismes se déroule dans le cæcum, situé au-delà de l'estomac.

47.6 Régulation neurale et hormonale du tractus digestif

Les activités du tractus gastro-intestinal sont coordonnées par les systèmes nerveux et endocrinien.

Les hormones duodénales régulent le passage du chyme dans le duodénum. Une haute teneur en matières grasses dans le chyme stimule la libération de la CCK et du GIP ; un faible pH du chyme stimule la libération de sécrétine. À son tour, la CCK stimule la libération des enzymes pancréatiques et la bile. La sécrétine stimule la libération de bicarbonate.

47.7 Fonction des organes accessoires

Le foie modifie des substances chimiques afin de maintenir l'homéostasie.

Le foie est impliqué dans la détoxification, la régulation des taux d'hormones stéroïdiennes et la production de protéines présentes dans le plasma sanguin.

L'insuline et le glucagon assurent la stabilité du taux de glucose sanguin.

L'insuline diminue la glycémie et augmente le stockage du glycogène ; le glucagon augmente la glycémie et l'utilisation du glycogène.

47.8 L'énergie de la nourriture, les dépenses énergétiques et les nutriments essentiels

L'exercice augmente le métabolisme.

Le métabolisme de base est le taux minimum de consommation d'énergie au repos. Une activité conduit à une augmentation du métabolisme.

La prise de nourriture est sous contrôle neuroendocrinien.

La prise d'aliments est régulée par les hormones, la leptine et l'insuline, par les entérogastrones et par les neuropeptides (figure 47.20).

Les nutriments essentiels sont ceux que le corps ne peut produire.

Les nutriments essentiels sont ceux qui ne peuvent pas être synthétisés par les animaux. Pour les humains, ce sont 13 vitamines (tableau 47.2), les acides aminés essentiels ainsi que certains minéraux et acides gras.



COMPRÉHENSION

- En quoi la digestion des graisses est-elle différente de celle des protéines et des glucides ?
 - Les graisses sont digérées dans l'intestin grêle, alors que les protéines et les glucides le sont dans l'estomac.
 - Les matières grasses sont absorbées dans les cellules comme acides gras et monoglycérides, mais sont ensuite modifiées en vue de l'absorption ; les acides aminés et le glucose ne subissent pas d'autres modifications.
 - Les graisses entrent dans la circulation porte hépatique, mais les protéines et les glucides digérés entrent dans le système lymphatique.
 - Les graisses digérées sont absorbées dans le gros intestin, et les protéines et les glucides digérés sont absorbés dans l'intestin grêle.
- Bien que l'estomac soit considéré normalement comme le principal acteur dans le processus digestif, la majeure partie de la digestion chimique se produit réellement dans le
 - la bouche.
 - l'appendice.
 - le duodénum.
 - le gros intestin.
- Après avoir été absorbés par la muqueuse intestinale, le glucose et les acides aminés sont
 - directement absorbés dans la circulation systémique.
 - utilisés pour la synthèse de glycogène et de peptides avant d'être livrés aux cellules du corps.
 - transportés directement dans le foie par la veine porte.
 - digérés davantage par la bile avant la libération dans la circulation.
- Laquelle de ces associations est incorrecte ?
 - Transport des graisses/système lymphatique
 - Transport du glucose/système lymphatique
 - Transport des acides aminés/système circulatoire
 - Toutes ces associations sont correctes.
- Les micro-organismes intestinaux aident la digestion et l'absorption
 - en digérant la cellulose.
 - en produisant du glucose.
 - en synthétisant la vitamine K.
 - a et c.
- Le _____ et _____ jouent un rôle important dans le processus digestif en produisant des produits chimiques qui sont nécessaires à digérer les protéines, les lipides et les glucides.
 - foie ; pancréas
 - foie ; vésicule biliaire
 - reins ; appendice
 - pancréas ; vésicule biliaire
- Lequel de ces effets représente l'action de l'insuline ?
 - augmente la glycémie par hydrolyse du glycogène
 - augmente la glycémie en stimulant la production de glucagon
 - diminue la glycémie en formant du glycogène
 - augmente la glycémie en favorisant la capture du glucose par les cellules.

APPLICATION

- L'intestin grêle est spécialisé dans l'absorption, car il
 - est la dernière section du tube digestif et garde les aliments le plus longtemps.
 - a, sur toute sa longueur, des extensions en forme de sac qui collectent la nourriture.
 - n'a pas de sortie ce qui permet aux aliments d'y rester durant de longues périodes.
 - a une très grande surface qui permet une exposition étendue aux aliments.
- La fonction principale du gros intestin est de concentrer les déchets sous forme solide (féces) pour en débarrasser l'organisme. Comment y parvient-il ?
 - En ajoutant des cellules épithéliales supplémentaires
 - En absorbant l'eau
 - En libérant le sel
 - Tous ces mécanismes sont utilisés par le gros intestin.
- Des formes inactives de certaines molécules sont sécrétées
 - car elles consomment moins de matière et d'énergie.
 - parce qu'elles doivent se combiner avec l'eau pour être activées.
 - de sorte que leur activité puisse être régulée.
 - pour les empêcher d'obstruer la glande qui les sécrète.
- Les humains obèses ont probablement des niveaux élevés de leptine, car
 - la leptine stimule l'appétit.
 - les récepteurs de la leptine dans le cerveau ne fonctionnent pas correctement, ce qui conduit à une production accrue de leptine pour compenser la pénurie apparente.
 - le gain de poids conduit à la production de leptine.
 - la leptine répond à une stimulation mécanique dans le cortex surrénalien.

RÉVISION

- De nombreux oiseaux possèdent un jabot, alors que peu de mammifères en ont un. Suggérez une explication à cette différence entre oiseaux et mammifères.
- Supposons que vous souhaitiez développer un nouveau traitement contre l'obésité fondé sur la leptine. Quelles sont les structures dans le corps qui produisent la leptine ? Quel est son effet ? Votre traitement devrait-il causer une augmentation du taux sanguin de leptine ou une diminution ? Ce traitement affecterait-il d'autres systèmes physiologiques ?
- Comment une diminution de la concentration des protéines plasmatiques et de la production de bile peut-elle être liée à l'abus d'alcool et de drogue ?
- Contrairement à de nombreux cas de convergence (voir la section 47.5), les ruminants et les singes langurs ont acquis un lysozyme modifié de la même façon pour atteindre le même résultat final. En quoi ce cas pourrait-il être différent ?
- Les oiseaux n'ont pas de dents. Pensez-vous qu'ils se sont adaptés à l'assimilation de différents types d'aliment comme l'ont fait les mammifères ? Si oui, quelles pourraient être ces différences d'adaptation ?