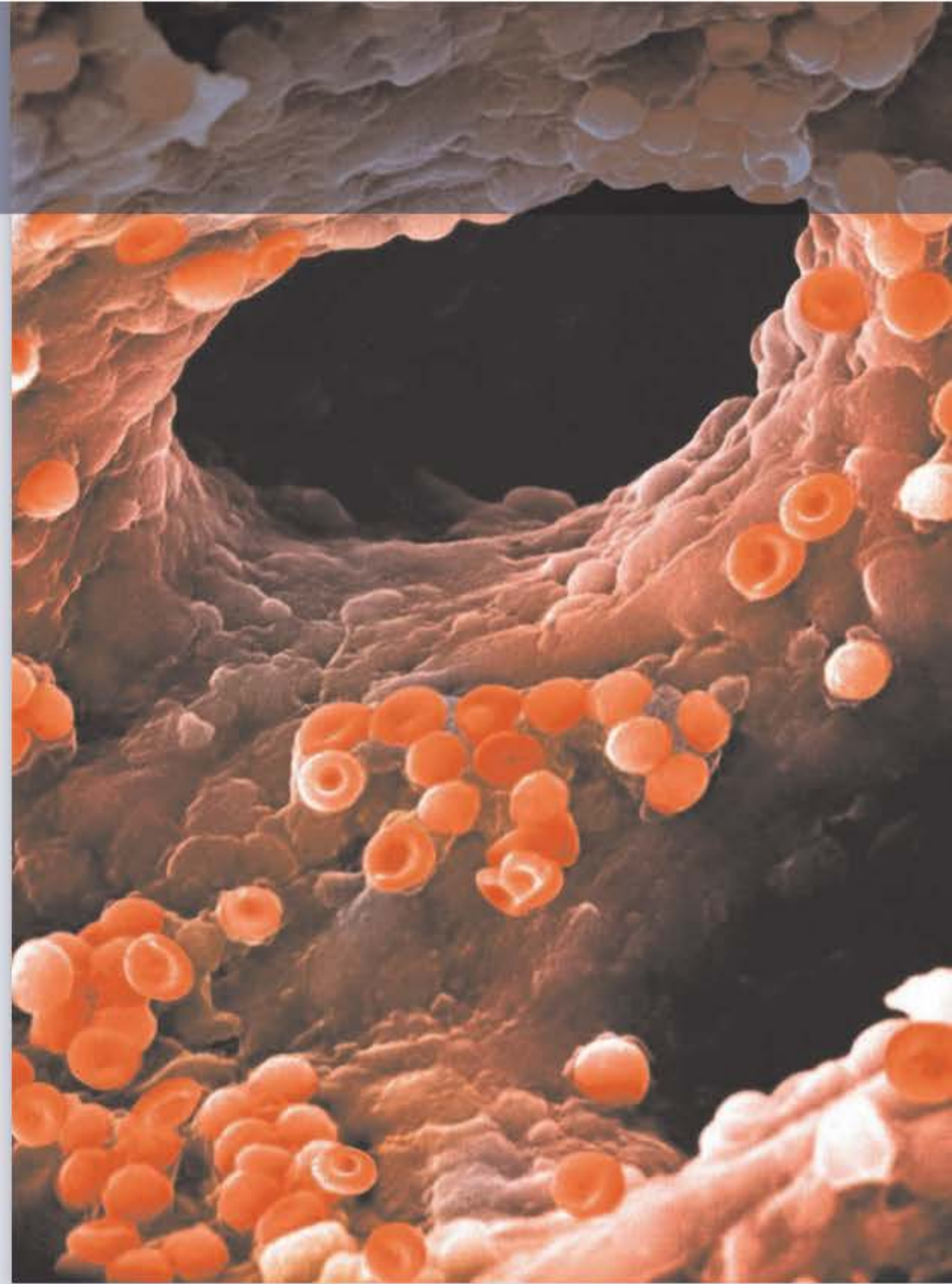


CHAPITRE 49

Systeme circulatoire

Aperçu du chapitre

- 49.1 Composants du sang
- 49.2 Systemes circulatoires des invertébrés
- 49.3 Systemes circulatoires des vertébrés
- 49.4 Le cœur à quatre chambres et les vaisseaux sanguins
- 49.5 Caractéristiques des vaisseaux sanguins
- 49.6 Régulation du courant sanguin et de la pression sanguine



Introduction

Dans les organismes multicellulaires, l'oxygène obtenu par le système respiratoire et les éléments nutritifs absorbés par le système digestif doivent être transportés vers les cellules de tout l'organisme. Inversement, le dioxyde de carbone et les autres déchets produits dans les cellules doivent être transférés dans les systèmes respiratoire, digestif, urinaire en vue de leur élimination de l'organisme. Ces tâches relèvent du système circulatoire. Tous les organismes multicellulaires ont un cœur qui pompe des fluides à travers le corps. De nombreux invertébrés ont un système ouvert dans lequel des fluides parcourent les cavités du corps. Des vertébrés ont également un système de ce genre qui déplace la lymphe à travers le corps, mais le liquide circulatoire principal est le sang, qui parcourt un système fermé de vaisseaux spécialisés.

49.1 Composants du sang

Objectifs

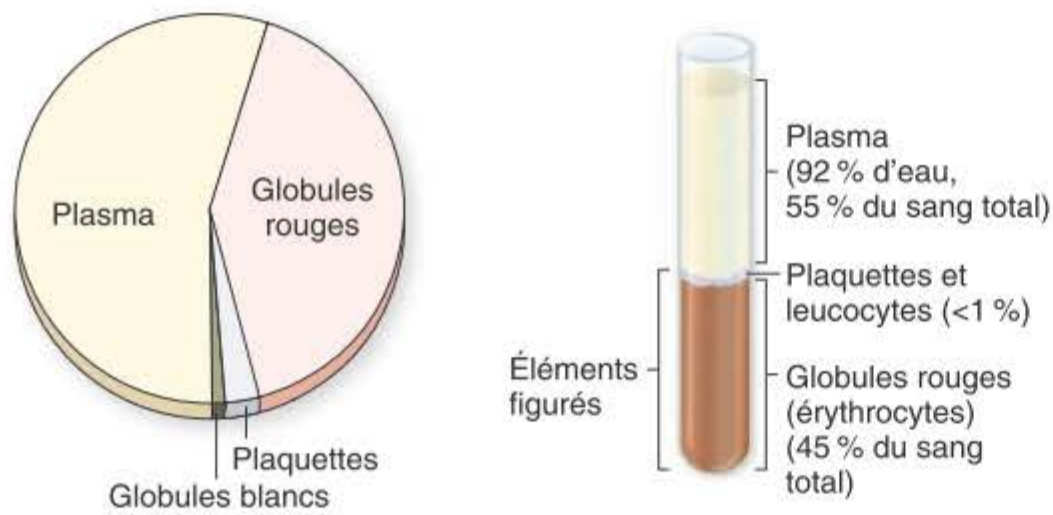
1. Décrire les fonctions du sang circulant.
2. Distinguer les types d'éléments figurés.
3. Décrire la coagulation sanguine.

Le sang est un tissu conjonctif composé d'une matrice fluide, le **plasma**, dans lequel plusieurs types différents de cellules et d'autres **éléments figurés** circulent (figure 49.1). Les **plaquettes** sanguines, bien que

reprises dans la figure 49.1, ne sont pas des cellules complètes, mais bien des fragments de cellules produites dans la moelle osseuse. Nous décrivons le rôle des plaquettes dans la coagulation sanguine plus loin dans cette section.

Le sang exerce de nombreuses fonctions.

1. **Transport.** Toutes les substances essentielles au métabolisme cellulaire sont transportées par le sang, qu'il s'agisse de l'oxygène lié à l'hémoglobine des globules rouges, des molécules de nutriments en solution dans le plasma, à l'état libre ou conjugué, ou des déchets métaboliques, qui sont éliminés lors de leur passage dans le foie et les reins.
2. **Régulation.** Le système cardiovasculaire transporte les hormones régulatrices sécrétées par les glandes endocrines ;










Plasma sanguin	Globules rouges	Plaquettes
Protéines plasmatiques (7 %) Albumine (54 %) Globulines (38 %) Fibrinogène (7 %) Les autres (1 %)	 4 millions–6 millions/ mm ³ de sang	 150 000–300 000/ mm ³ blood
Eau (91,5%) Autres solutés (1,5%) Électrolytes Nutriments Gaz Substances régulatrices Déchets	Neutrophiles  60–70%	Éosinophiles  2–4%
Monocytes  3–8%	Basophiles  0,5–1%	Lymphocytes  20–25%

Figure 49.1 Composition du sang.

il participe aussi à la régulation de la température. Si nécessaire, la contraction et la dilatation des vaisseaux près de la surface du corps, sous l'épiderme, contribuent à conserver ou à dissiper la chaleur.

- 3. Protection.** Le système circulatoire protège contre les lésions, les microbes étrangers ou les toxines introduites dans le corps. En cas de lésion vasculaire, la coagulation sanguine prévient les pertes sanguines. Les globules blancs, ou leucocytes, aident à « désarmer » ou à neutraliser les envahisseurs comme les virus et les bactéries (voir chapitre 51).

Le plasma sanguin est une matrice liquide

Le plasma sanguin est la matrice dans laquelle les cellules sanguines et les plaquettes sont en suspension. Les fluides interstitiels (extracellulaires) proviennent du liquide du plasma.

Bien que le plasma soit composé de 92 % d'eau, il contient aussi les solutés suivants.

- 1. Nutriments, déchets et hormones.** Tous les nutriments provenant de la digestion et utilisables par les cellules, notamment le glucose, les acides aminés et les vitamines, sont dissous dans le plasma. Il en est de même pour, pour les déchets, comme les substances azotées et le CO₂ produit

par le métabolisme cellulaire. Les hormones libérées par les glandes endocrines sont aussi transportées par le sang vers leurs cellules cibles.

- 2. Ions.** Le plasma sanguin est une solution saline diluée. Les ions plasmatiques principaux sont le Na⁺, le Cl⁻ et le bicarbonate (HCO₃⁻). En plus, le plasma contient des traces d'autres ions comme le Ca²⁺, le Mg²⁺, le Cu²⁺, le K⁺ et le Zn²⁺.
- 3. Protéines.** Comme signalé plus tôt, le foie produit la plupart des protéines plasmatiques, en particulier l'**albumine**, qui constitue la majeure partie du contenu protéique plasmatique, les **globulines** alpha (α) et bêta (β), qui servent à transporter des lipides et des hormones stéroïdes, et le **fibrinogène**, nécessaire à la coagulation sanguine. Le plasma sanguin dont le fibrinogène a été enlevé est appelé **sérum**.

Les éléments figurés comprennent les cellules circulantes et les plaquettes

Parmi les éléments figurés du sang, on trouve les globules rouges, les globules blancs et les plaquettes. Chaque élément exerce une fonction spécifique dans le maintien de la santé de l'organisme et de son homéostasie.

Érythrocytes

Chaque microlitre de sang contient environ 5 millions de **globules rouges**, ou **érythrocytes**. La fraction du volume sanguin total qui est occupée par les érythrocytes est appelée *hématocrite* ; chez l'homme, il est normalement d'environ 45 %.

Chaque érythrocyte ressemble à un disque biconcave, c'est-à-dire plus mince au centre qu'au bord. Les érythrocytes mammaliens matures sont dépourvus de noyaux. Les érythrocytes des vertébrés contiennent de l'hémoglobine, un pigment qui lie et transporte l'oxygène. (L'hémoglobine a été décrite plus en détail dans le chapitre 48 traitant de la respiration.) Chez les vertébrés, on trouve l'hémoglobine uniquement dans les érythrocytes. Chez les invertébrés, le pigment liant l'oxygène (ce n'est pas nécessairement l'hémoglobine) est présent aussi dans le plasma.

Leucocytes

Les **leucocytes**, ou **globules blancs**, représentent moins de 1 % des cellules du sang humain. On compte seulement 1 à 2 leucocytes pour 1 000 érythrocytes. Les leucocytes les dépassent en taille et sont nucléés. De plus, ils ne sont pas confinés dans le sang comme les érythrocytes le sont, mais peuvent sortir des capillaires pour gagner le liquide interstitiel tissulaire.

Il existe différents types leucocytaires, chacun d'eux jouant un rôle spécifique dans la défense de l'organisme contre les micro-organismes agresseurs et contre des substances étrangères, comme décrit dans le chapitre 51. Les **leucocytes granuleux** ou granulocytes comprennent les *neutrophiles*, les *éosinophiles* et les *basophiles*, qui tirent leur nom de l'affinité de leurs granules cytoplasmiques pour certains colorants. Les **leucocytes non granuleux** comprennent les *monocytes* et les *lymphocytes*. Les neutrophiles sont les plus nombreux des leucocytes, suivis dans l'ordre par les lymphocytes, les monocytes, les éosinophiles et les basophiles.

Plaquettes

Les plaquettes, des fragments provenant de plus grandes cellules de la moelle osseuse, les *mégacaryocytes*, (figure 49.2), ont un diamètre d'environ

3 µm. Contenant de l'actine et de la myosine, elles sont libérées en réponse à une blessure et sont nécessaires au processus de coagulation sanguine. En agissant avec la fibrine, elles s'agrègent pour former un caillot, qui se contracte afin de rapprocher les lèvres de la plaie.

La coagulation sanguine est un exemple de cascade enzymatique

Lorsqu'un vaisseau sanguin est lésé ou coupé, il se contracte sous l'effet de sa musculature lisse pariétale. Les plaquettes s'accumulent alors au site lésé, adhèrent entre elles ainsi qu'aux tissus voisins ; elles obstruent la plaie en formant le clou plaquettaire, (figure 49.2). Associées à des facteurs plasmatiques ainsi qu'à des molécules libérées du tissu endommagé, les plaquettes déclenchent une cascade de réactions enzymatiques.

En réaction à une lésion vasculaire, le foie libère dans le sang la *prothrombine*, un facteur de coagulation qui convertit le fibrinogène, normalement dissous dans le plasma, en filaments insolubles de **fibrine**. Ces filaments renforcent le clou plaquettaire en se contractant et en formant une masse plus dense. Cet agrégat de plaquettes et de fibrine, qui enferme souvent des globules rouges, constitue un caillot sanguin.

Une fois que la lésion tissulaire est guérie, la dissolution du caillot commence, un processus essentiel, car si un caillot se détache et circule dans le sang, il peut bloquer un vaisseau sanguin dans le cerveau et causer un AVC (accident vasculaire cérébral) ou une artère coronaire cardiaque et causer un infarctus.

Les éléments figurés proviennent de cellules souches

Les éléments figurés du sang ont tous une durée de vie limitée et doivent dès lors être constamment remplacés. Les fragments des vieilles cellules sont en grande partie digérés par des cellules phagocytaires de la rate. Cependant, de nombreux produits, notamment le fer et les acides aminés, sont récupérés et incorporés dans de nouveaux éléments figurés. La formation des cellules sanguines se déroule dans la moelle osseuse (voir chapitre 46).

Tous les éléments figurés se développent à partir de **cellules souches pluripotentes** (voir chapitre 19). La production des cellules sanguines dans la moelle osseuse est appelée **hématopoïèse**. Ce processus génère deux types de cellule souche au destin plus restreint : une cellule souche lymphoïde qui donne naissance aux lymphocytes et une cellule souche myéloïde qui donne naissance au reste des cellules sanguines (figure 49.3).

Lorsque le taux d'oxygène diminue dans le sang, les reins produisent une hormone, l'**érythropoïétine**. Celle-ci stimule la production d'érythrocytes dans la moelle osseuse à partir de cellules souches myéloïdes, un processus appelé **érythropoïèse**.

Chez les mammifères, les érythrocytes en voie de maturation perdent leur noyau avant d'être libérés dans la circulation. Au contraire, les érythrocytes matures de tous les autres vertébrés restent nucléés. Parmi les cellules produites dans la moelle osseuse à partir de cellules souches, les *mégacaryocytes* ont un destin particulier : ils se fragmentent pour donner les plaquettes.



Question Pourquoi croyez-vous que l'usage de l'érythropoïétine comme médicament a été banni dans les jeux olympiques et dans divers sports ?

Synthèse 49.1

Les fonctions du système circulatoire sont le transport de diverses substances, la régulation de la température et de processus physiologiques ainsi que la protection de l'organisme. Les éléments figurés du sang sont les globules rouges, les globules blancs et les plaquettes. La coagulation sanguine est une cascade de réactions enzymatiques déclenchée par des plaquettes et des facteurs plasmatiques afin de produire de la fibrine insoluble à partir du fibrinogène.

■ Comment se forme un caillot sanguin ?

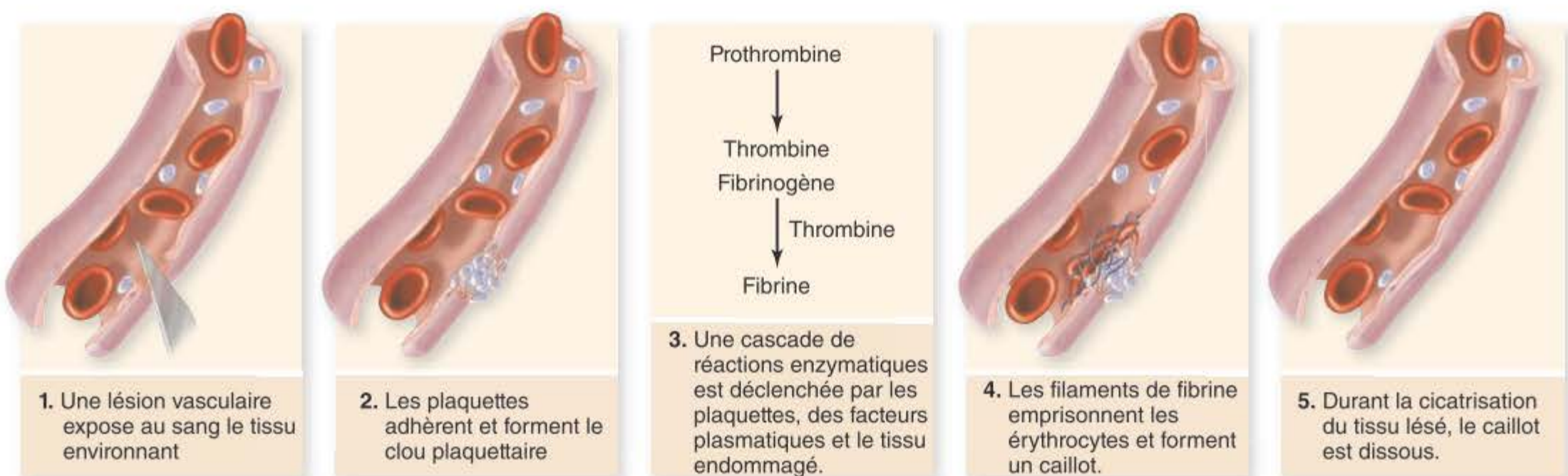
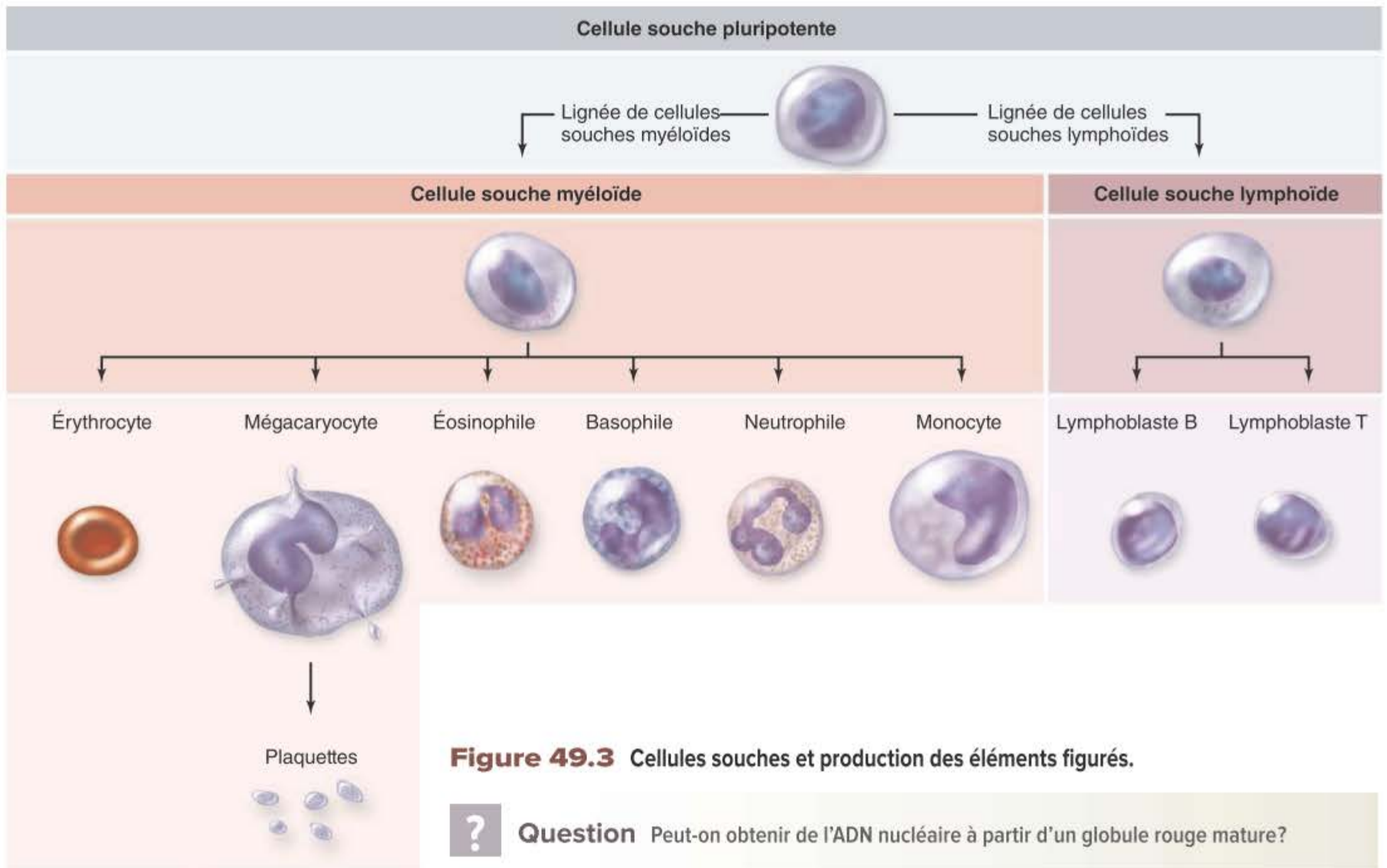


Figure 49.2 Coagulation du sang. La fibrine se forme à partir du fibrinogène, une protéine soluble du plasma. La réaction est catalysée par la thrombine, enzyme provenant de l'activation de la prothrombine, dernière étape d'une cascade de réactions enzymatiques avant la production du caillot sanguin, qui survient lors d'une lésion vasculaire.



49.2 Systèmes circulatoires des invertébrés

Objectifs

1. Distinguer les systèmes circulatoires ouverts et fermés.
2. Définir ce qu'est l'hémolymphe.

La nature du système circulatoire chez les invertébrés multicellulaires est directement liée à la taille, à la complexité et au style de vie de l'organisme en question. Les éponges et la plupart des cnidaires utilisent l'eau de leur environnement comme fluide circulant. Les éponges font circuler l'eau à travers une série de canaux qui parcourent leur corps alors que, chez les hydres et autres cnidaires, l'eau passe à travers une **cavité gastrovasculaire** (figure 49.4a). Puisque la paroi du corps chez les hydres n'est épaisse que de deux couches cellulaires, chaque couche cellulaire est en contact direct avec l'environnement extérieur ou la cavité gastrovasculaire.

La circulation chez les invertébrés pseudocœlomates, comme les vers ronds et les rotifères (voir chapitre 35) se résume au passage des fluides dans la cavité corporelle. La plupart de ces invertébrés sont petits ou sont longs et minces ; dès lors, des mouvements du corps suffisent à faire circuler de manière adéquate les liquides corporels, qui sont en

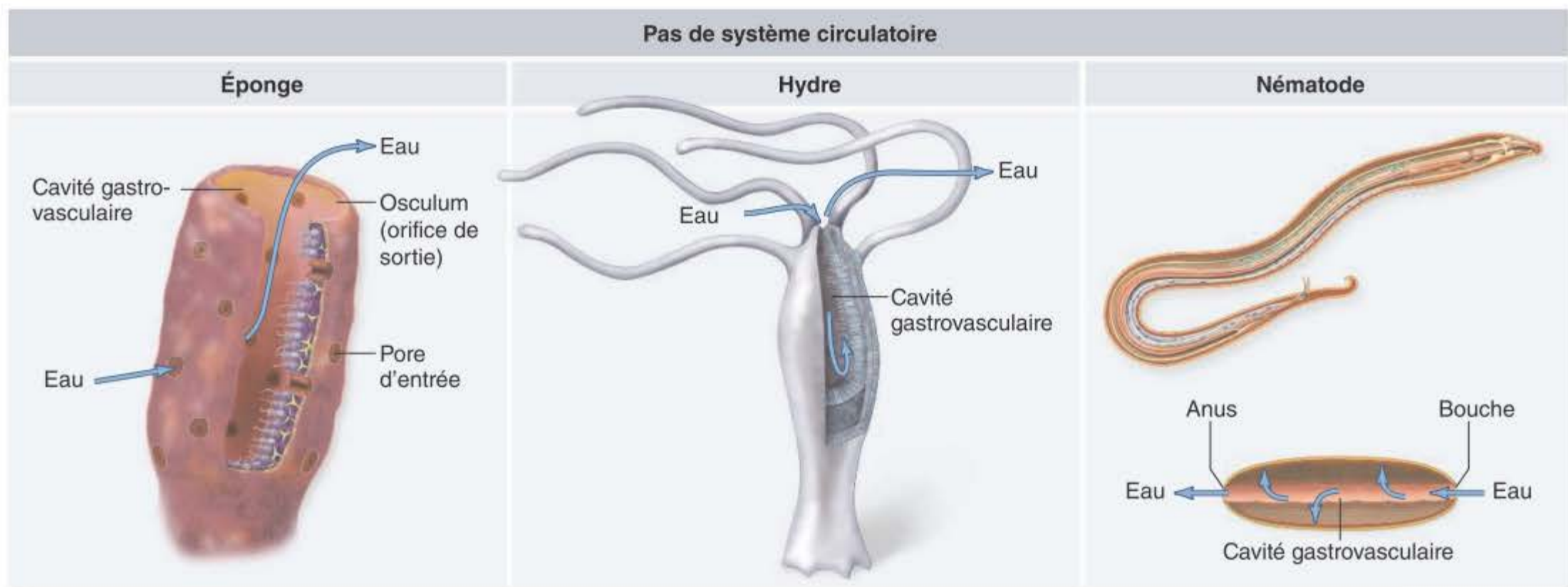
contact direct avec les tissus et organes internes. Les plus grands animaux, cependant, ont des tissus qui sont épais de plusieurs couches cellulaires, si bien que de nombreuses cellules sont trop distantes de la surface du corps ou de la cavité digestive pour des échanges directs avec l'environnement. C'est pourquoi, l'oxygène et les nutriments sont transportés à partir de l'environnement et de la cavité digestive par un liquide interne, dans un système circulatoire, vers les cellules de l'organisme.

Les systèmes circulatoires ouverts déplacent les fluides dans une voie unidirectionnelle

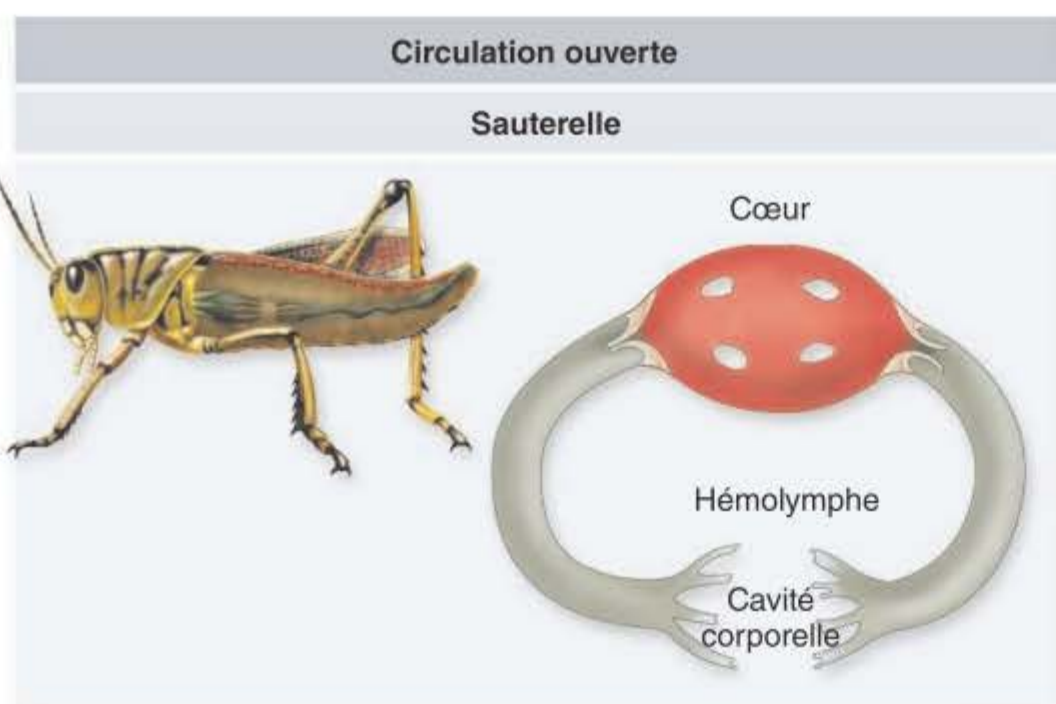
Les deux types principaux de systèmes circulatoires sont *ouverts* ou *fermés*. Dans un système circulatoire ouvert, comme celui des mollusques et des arthropodes (figure 49.4b), il n'y a pas de distinction entre le liquide circulant (sang) et le liquide extracellulaire des tissus (liquide interstitiel ou lymphe), d'où le nom d'**hémolymphe**. Chez les insectes, le **cœur** est un tube musculéux qui pompe l'hémolymphe à travers un réseau de canaux et de cavités du corps. Le liquide est ensuite drainé et ramené dans la cavité centrale.

Les systèmes circulatoires fermés déplacent les fluides en boucle

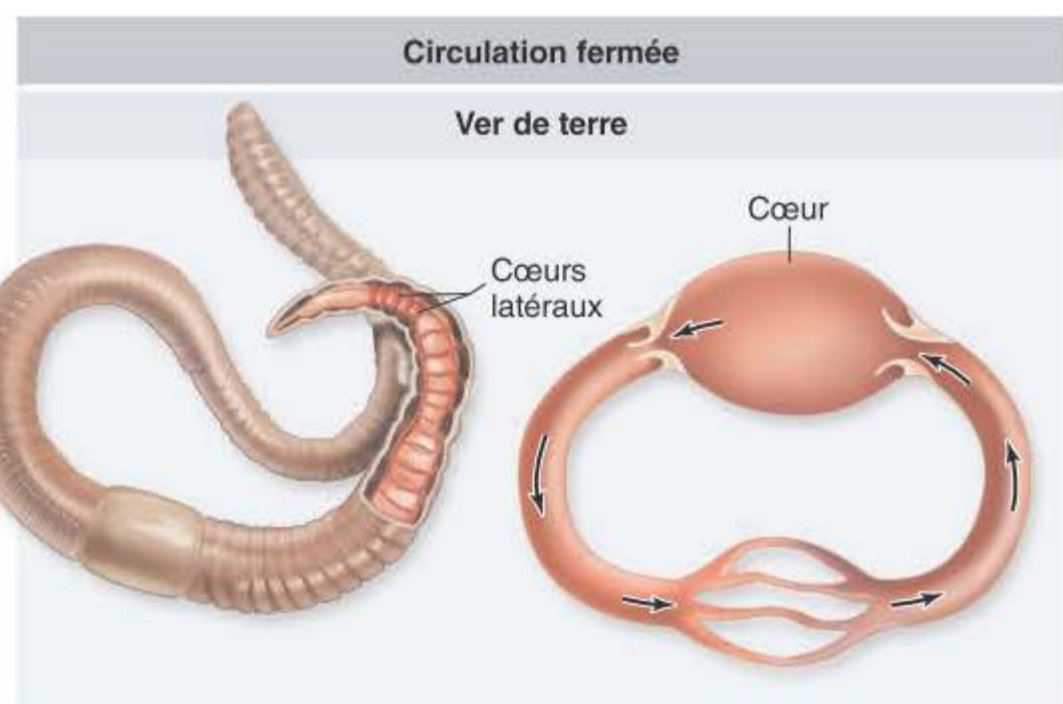
Dans un système circulatoire fermé, le liquide circulant, le sang, reste enfermé de manière permanente dans des vaisseaux où il circule en



a.



b.



c.

Figure 49.4 Systèmes circulatoires du règne animal. a. Les éponges (panneau de gauche) n'ont pas de système circulatoire séparé. Elles font circuler l'eau à partir de nombreux pores d'entrée et d'un seul pore de sortie. La cavité gastrovasculaire d'une hydre (panneau du milieu) sert à la fois de tube digestif et de système circulatoire, les nutriments parvenant directement aux cellules des tissus par diffusion à partir de la cavité digestive. Le nématode (panneau de droite) est suffisamment mince pour que le tractus digestif puisse servir de système circulatoire. Les animaux de plus grande taille requièrent un système circulatoire séparé pour transporter les nutriments aux tissus et éliminer les déchets. b. Dans la circulation ouverte d'un insecte, un cœur tubulaire pompe l'hémolymphe dans les cavités du corps de l'insecte; l'hémolymphe retourne alors dans les vaisseaux sanguins d'où elle repart pour le cycle suivant. c. Dans la circulation fermée d'un ver de terre, les cœurs pompent le sang dans des vaisseaux qui le ramènent dans les cœurs. Tous les vertébrés ont aussi des systèmes circulatoires fermés.

partant d'une pompe, le **cœur**, et en y revenant (figure 49.4c). Certains invertébrés, comme les mollusques céphalopodes et les annélides (voir chapitre 34), et tous les vertébrés ont un système circulatoire fermé.

Chez les annélides, par exemple les vers de terre, un vaisseau dorsal se contracte de manière rythmique et agit à la manière d'une pompe. Le sang est propulsé à travers cinq petites artères, qui fonctionnent également comme des pompes et qui sont connectées au vaisseau ventral, qui transporte le sang vers l'arrière jusqu'à ce qu'il réintègre le vaisseau dorsal. De plus petits vaisseaux se détachent de chaque artère pour apporter aux tissus du ver de terre l'oxygène et les nutriments et pour éliminer les déchets.

Synthèse 49.2

Chez les invertébrés, des systèmes circulatoires ouverts pompent l'hémolymphe dans les tissus, d'où elle est drainée dans une cavité centrale. Dans les systèmes circulatoires fermés, le liquide se déplace en boucle vers et à partir d'une région musculieuse servant de pompe à l'instar du cœur. L'hémolymphe (invertébrés) est identique au liquide extracellulaire des tissus.

- Dans le système circulatoire ouvert des insectes, comment l'hémolymphe revient-elle dans le cœur ?

49.3 Systèmes circulatoires des vertébrés

Objectifs

1. Décrire l'évolution du cloisonnement cardiaque à partir des lancelets jusqu'aux oiseaux et aux mammifères.
2. Décrire le courant sanguin dans le système circulatoire des oiseaux et des mammifères.

L'évolution de cœurs de grande taille et complexes ainsi que des systèmes circulatoires fermés a rendu la circulation nettement plus efficace. C'est ainsi que les vertébrés ont acquis une série remarquable d'adaptations liant de manière inextricable la circulation et la respiration, ce qui a facilité la diversification des habitats tant aquatiques que terrestres et permis l'évolution d'organismes plus grands.

Chez les poissons, une circulation plus efficace s'est développée en parallèle avec les branchies

Les chordés qui ont été les ancêtres des vertébrés avaient, pense-t-on, un cœur tubulaire simple, semblable à celui que l'on trouve chez les amphioxus actuels (voir chapitre 35). Le cœur consistait en une zone spécialisée de l'artère ventrale, zone plus musclée que le reste des artères et qui se contractait simplement par ondes péristaltiques.

Le développement des branchies chez les poissons a requis une pompe plus efficace, et l'on constate chez eux la présence d'un cœur véritable avec ses différentes chambres caractéristiques. Le cœur d'un poisson consiste essentiellement en un tube avec quatre chambres successives (figure 49.5). Les deux premières structures, le **sinus veineux** et l'**atrium**, forment la première chambre ; les deux suivantes, le **ventricule** et le **cône artériel**, forment la seconde. Le sinus veineux est le

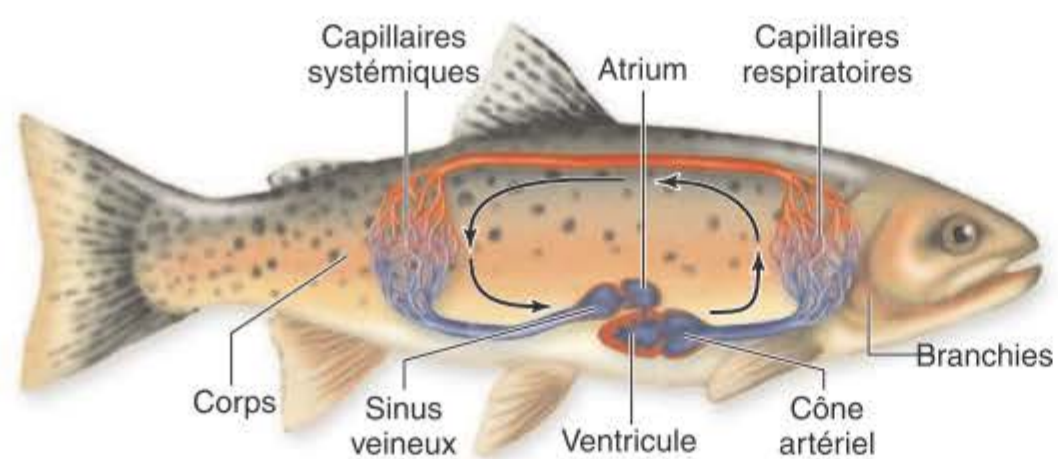


Figure 49.5 Le cœur et la circulation chez un poisson. Schéma représentant le cœur d'un poisson, montrant la succession des chambres : le sinus veineux, l'atrium, le ventricule, le cône artériel. Elles forment deux chambres de pompage. Le ventricule pompe le sang, qui passe par les branchies et ensuite dans le corps. Le sang riche en oxygène (oxygéné) est coloré en rouge ; le sang pauvre en oxygène (désoxygéné) l'est en bleu.

premier à se contracter, suivi de l'atrium, du ventricule et finalement du cône artériel.

Malgré des changements dans les positions relatives de ces structures, cette séquence de battements cardiaques s'est maintenue chez tous les vertébrés. Chez les poissons, l'impulsion électrique qui suscite la contraction est générée dans le sinus veineux ; chez les autres vertébrés, elle est générée par une structure homologue au sinus veineux, le **nœud sinoatrial (SA)**.

Après avoir quitté le cône artériel, le sang arrive aux branchies où il est oxygéné ; des branchies, il passe par un réseau artériel jusque dans le reste du corps ; il retourne alors dans le cœur par les veines. Cette simple boucle a cependant une sérieuse faiblesse. En passant par les capillaires des branchies, la pression sanguine chute de manière importante, ce qui ralentit la circulation à partir des branchies dans le reste du corps et peut limiter la quantité d'oxygène livrée aux tissus.

Chez les amphibiens et la plupart des reptiles, les poumons requièrent une circulation séparée

Le développement des poumons chez les amphibiens (voir chapitre 48) a impliqué un changement dans l'organisation de la circulation, un second circuit de pompage. Après que le sang a été pompé dans les poumons par les *artères pulmonaires*, il ne va pas directement dans les tissus périphériques, mais il retourne dans le cœur par les *veines pulmonaires*. Le sang quitte le cœur une seconde fois pour circuler à travers les tissus. Ce système est dit à **double circulation** : l'une entre le cœur et les poumons, appelée **circulation pulmonaire**, et une autre entre le cœur et le reste du corps, appelée **circulation systémique**.

Circulation chez les amphibiens

Idéalement, le sang oxygéné venant des poumons devrait aller directement dans les tissus, plutôt que d'être mélangé dans le cœur avec le sang désoxygéné revenant de la périphérie. Le cœur des amphibiens a deux particularités structurales qui contribuent à réduire ce mélange (figure 49.6). D'abord, l'atrium est divisé en deux chambres, les oreillettes : l'oreillette droite reçoit le sang désoxygéné de la circulation systémique, et l'oreillette gauche reçoit le sang oxygéné des poumons. Ces deux types de sang ne se mélangent donc pas dans un atrium commun.

Puisque le cœur des amphibiens n'a qu'un seul ventricule, la séparation des circulations pulmonaire et systémique est incomplète. Cependant, le mélange reste faible quand le sang provenant des deux oreillettes entre dans le ventricule grâce à des canaux internes créés par des dépressions dans la paroi ventriculaire. Le cône artériel est partiellement divisé par une cloison, qui dirige le sang désoxygéné dans les artères pulmonaires et le sang oxygéné dans l'*aorte*, l'artère principale de la circulation systémique.

Les amphibiens qui vivent dans l'eau peuvent obtenir un surplus d'oxygène par diffusion transcutanée (voir chapitre 48). Ainsi, ces animaux disposent d'un circuit *pulmo-cutané* qui envoie le sang dans les poumons et la peau. La respiration cutanée existe également chez de nombreux reptiles aquatiques comme les tortues marines.

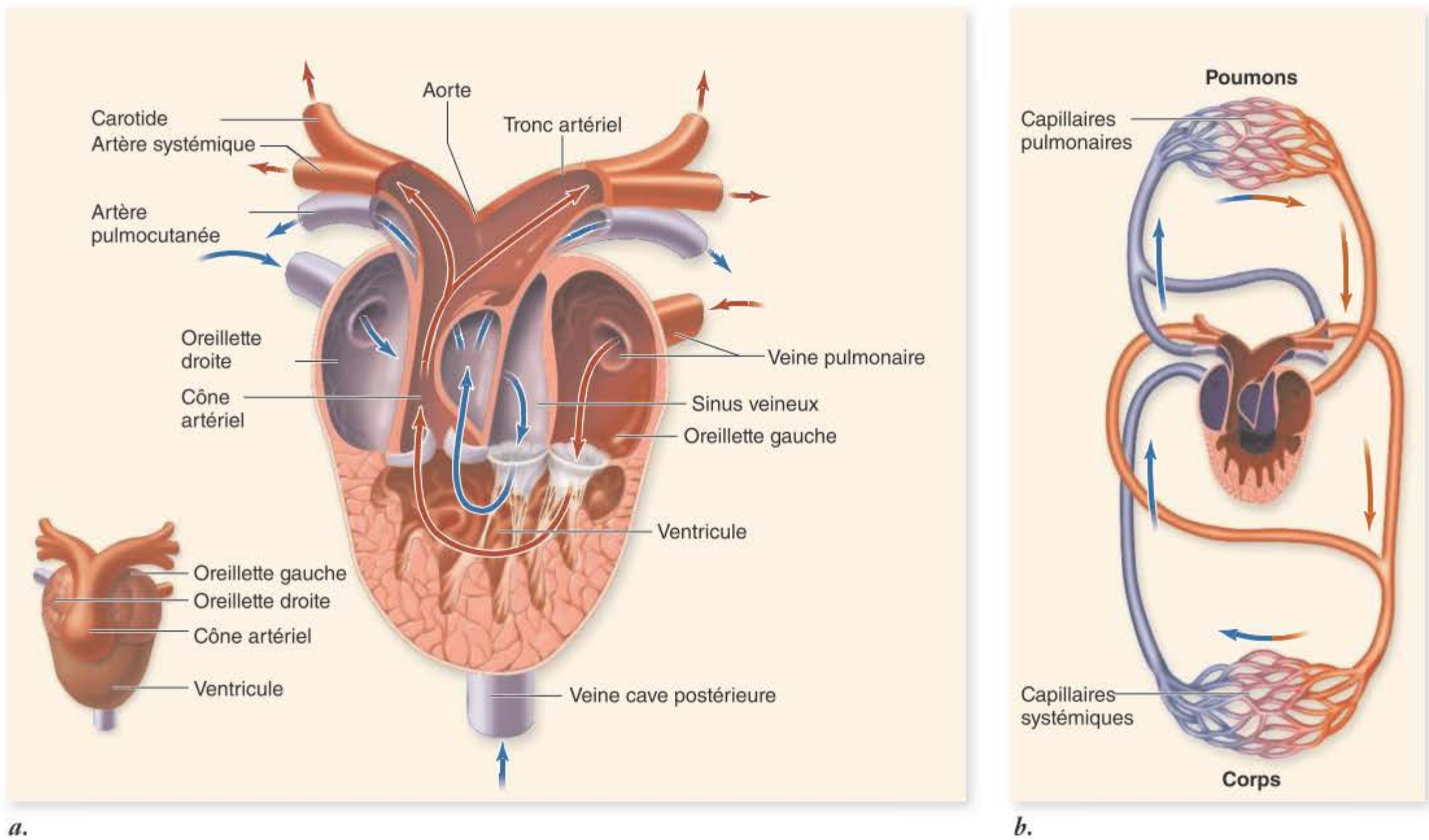


Figure 49.6 Le cœur et la circulation chez un amphibien. *a.* Le cœur à trois chambres d'une grenouille comprend deux oreillettes mais un seul ventricule, qui pompe le sang à la fois vers les poumons et vers le corps. *b.* Malgré l'absence de séparation, le sang oxygéné (en rouge) et le sang désoxygéné (en bleu) se mélangent très peu lorsqu'ils sont pompés vers le corps et les poumons. Le sang est également oxygéné par un échange gazeux à travers la peau.

Circulation chez les reptiles

Chez les reptiles, des modifications supplémentaires ont encore réduit davantage le mélange sanguin dans le cœur. En plus d'avoir deux oreillettes séparées, les reptiles ont un septum qui subdivise partiellement le ventricule. La séparation est complète dans un ordre de reptiles, les crocodiliens, qui ont deux ventricules séparés par un septum complet (décrit plus loin dans cette section). Un autre changement dans la circulation des reptiles est l'incorporation du cône artériel dans le tronc des grandes artères quittant le cœur.

Les mammifères, les oiseaux et les crocodiliens ont deux systèmes circulatoires complètement séparés

Les mammifères, les oiseaux et les crocodiles ont un cœur à quatre chambres avec deux oreillettes séparées et deux ventricules séparés (figure 49.7). Les cœurs des oiseaux et des crocodiles montrent certaines différences, mais en général sont très semblables, ce qui n'est pas surprenant étant donné l'étroite parenté évolutive (figure 49.8). Cependant, l'extrême similitude du cœur des oiseaux et des mammifères, si semblables qu'une seule figure suffit pour illustrer les deux (voir figure 49.7), est un cas remarquable d'évolution convergente (voir figure 49.8).

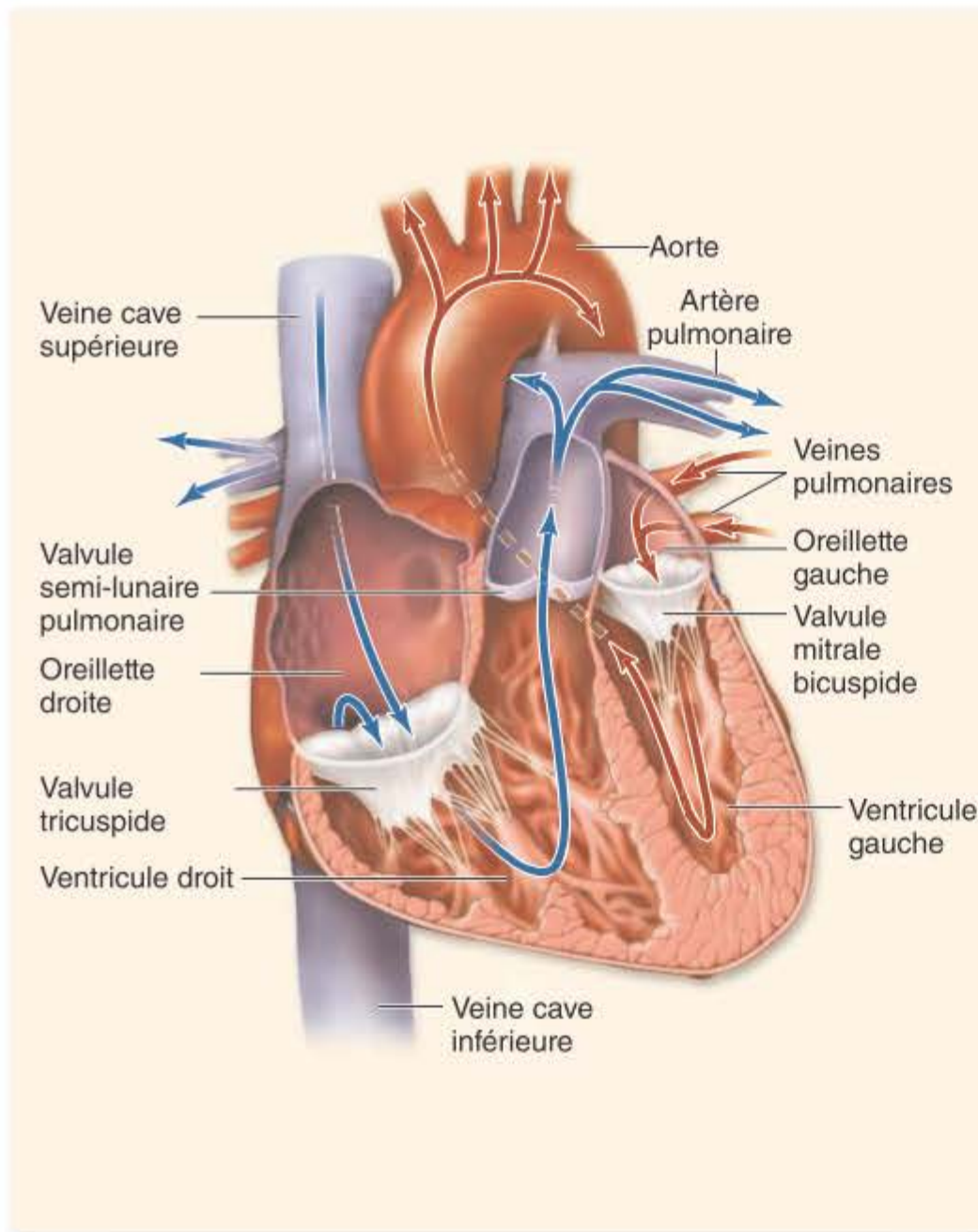
Dans un cœur à quatre chambres, l'oreillette droite reçoit le sang désoxygéné de la périphérie et le livre au ventricule droit, qui le pompe

dans les poumons. L'oreillette gauche reçoit le sang oxygéné des poumons et le livre au ventricule gauche, qui le pompe dans le reste du corps (voir figure 49.7).

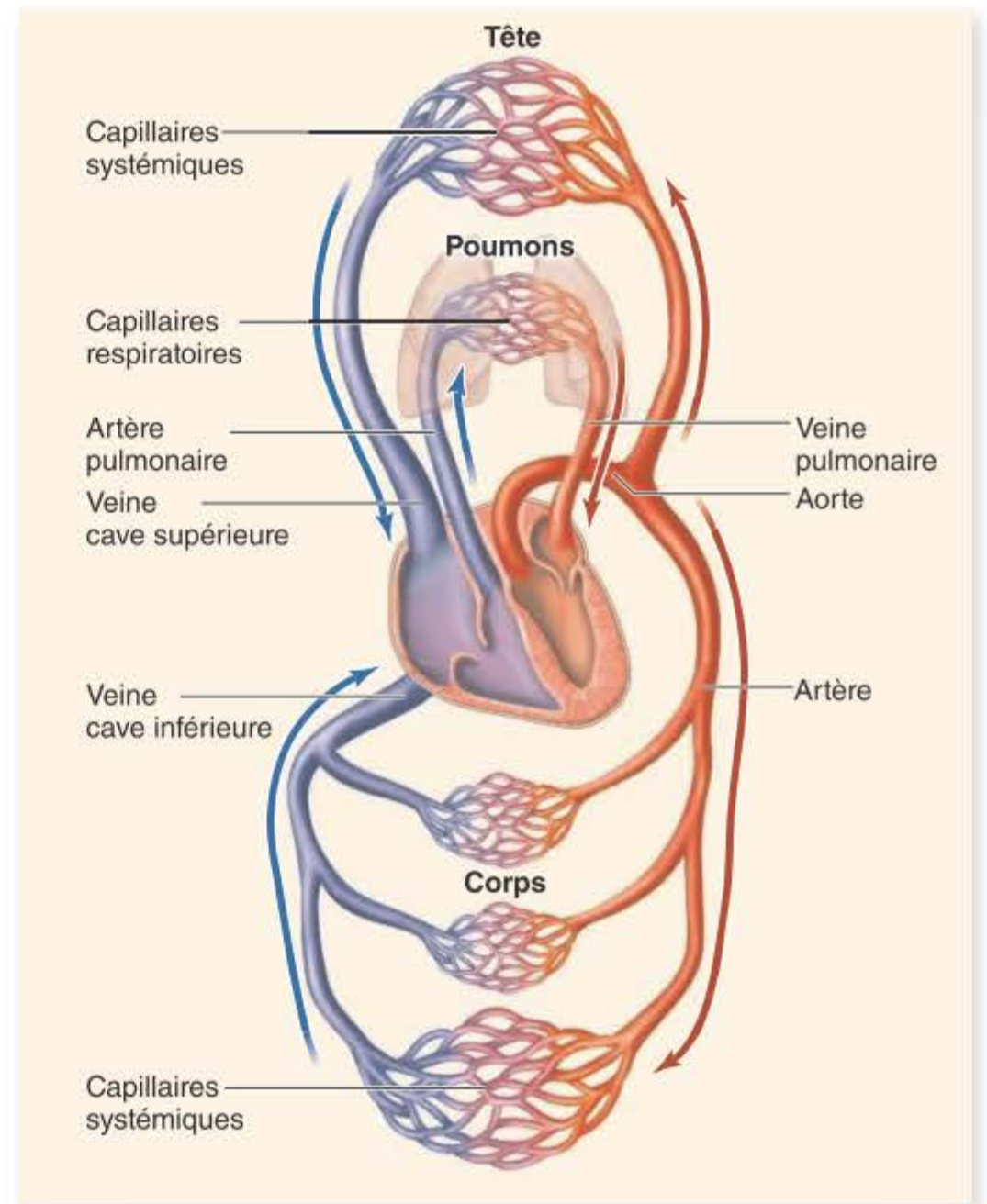
Le cœur chez ces vertébrés est une pompe à deux cycles. Les deux oreillettes se remplissent de sang et se contractent simultanément, se vidant dans les ventricules. Les deux ventricules se contractent en même temps, propulsant le sang simultanément dans les circulations pulmonaire et systémique.

L'efficacité accrue du système de double circulation chez les mammifères et les oiseaux aurait été importante pour l'évolution de l'endothermie. En effet, une circulation plus performante était nécessaire pour répondre aux besoins métaboliques élevés requis pour le maintien d'une température interne autour du point de référence.

Au long de l'histoire évolutive du cœur des vertébrés, le sinus veineux a servi de stimulateur électrique (pacemaker), c'est-à-dire de site générant les impulsions qui déclenchent les battements cardiaques. Bien qu'il constitue une chambre majeure dans le cœur des poissons, sa taille est réduite chez les amphibiens et l'est encore plus chez les reptiles. Chez les mammifères et les oiseaux, le sinus veineux n'apparaît plus comme une chambre séparée, mais il n'a pas complètement disparu. Une partie de son tissu est restée dans la paroi de l'oreillette droite. Ce tissu, appelé *nœud sino-atrial* (SA), est encore le site qui déclenche chaque battement cardiaque, comme nous le verrons plus loin à la section 49.4.



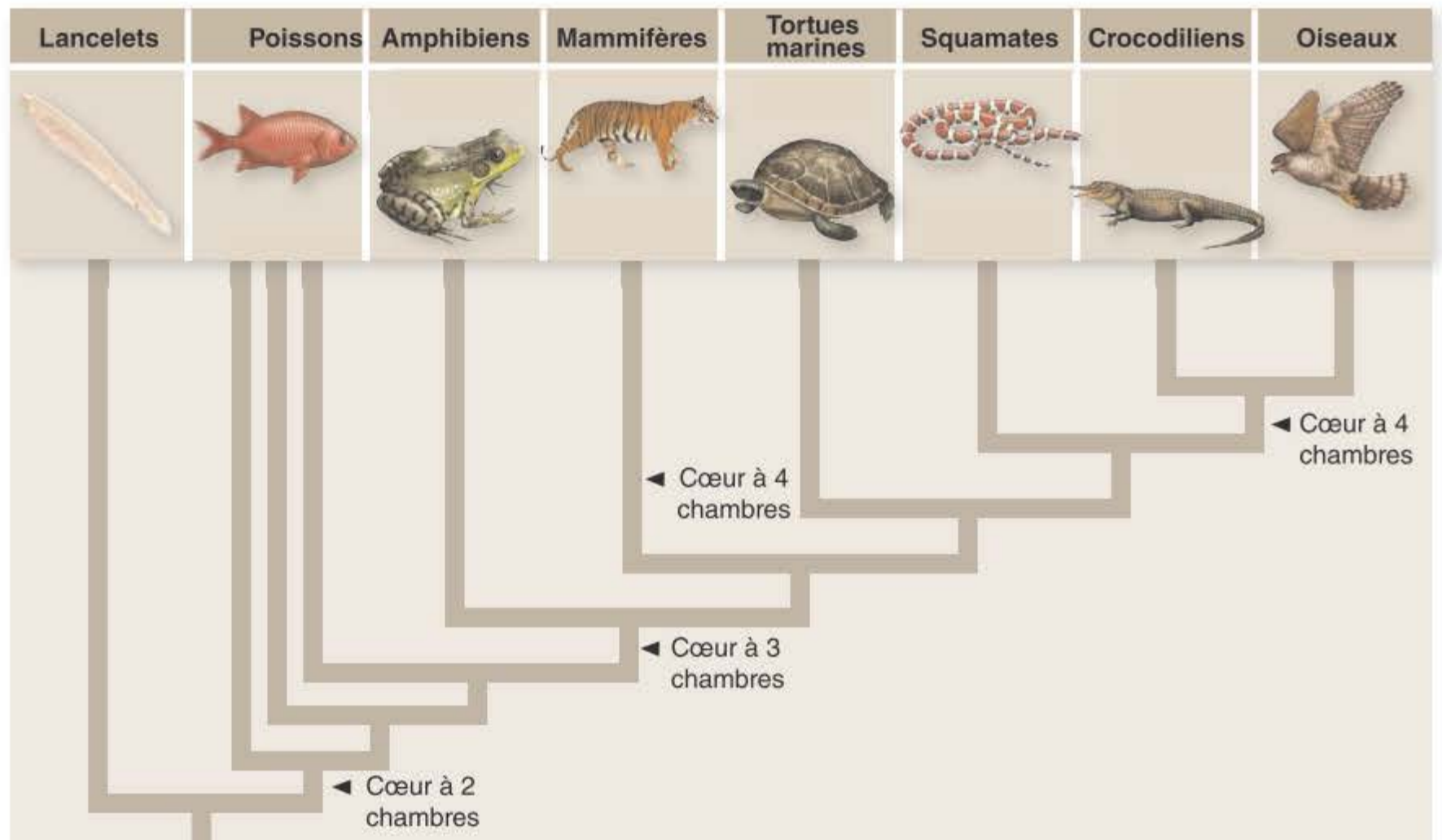
a.



b.

Figure 49.7 Le cœur et la circulation chez les mammifères et les oiseaux. *a.* Passage du sang à travers le cœur à quatre chambres. *b.* La partie droite du cœur reçoit le sang désoxygéné et le pompe vers les poumons; la partie gauche du cœur reçoit le sang oxygéné et le pompe vers le corps. De cette manière, les circulations pulmonaire et systémique sont maintenues complètement séparées.

Figure 49.8 Évolution du cœur chez les vertébrés. Malgré leurs similitudes, les cœurs à quatre chambres des mammifères et des oiseaux proviennent d'une évolution convergente.



Synthèse 49.3

Le cœur des cordés a évolué à partir de la région musculaire d'un vaisseau jusqu'au cœur à quatre chambres des crocodiliens, des oiseaux et des mammifères, en passant par le cœur à deux chambres des poissons et celui à trois chambres des amphibiens et de la plupart des reptiles. Le sang désoxygéné parcourt le circuit pulmonaire, qui va de l'oreillette droite dans le ventricule droit puis dans les poumons ; il revient dans l'oreillette gauche. Le sang oxygéné parcourt le circuit systémique, qui va de l'oreillette gauche, dans le ventricule gauche puis en périphérie ; il revient dans l'oreillette droite

- *Quel est l'avantage physiologique d'avoir des ventricules séparés ?*

49.4 Le cœur à quatre chambres et les vaisseaux sanguins

Objectifs

1. *Expliquer comment se déroule le cycle cardiaque.*
2. *Décrire le rôle des cellules autorythmiques du nœud SA.*
3. *Définir la pression sanguine et décrire comment on la mesure.*

Le cœur des mammifères, des oiseaux et des crocodiliens passe par deux cycles de contraction, une contraction des oreillettes pour envoyer le sang dans les ventricules et une autre des ventricules pour envoyer le sang dans les circuits pulmonaire et systémique. Ces deux contractions, plus la période de repos entre les deux, constituent le **cycle cardiaque** complet se manifestant par les pulsations cardiaques

Le système cardiovasculaire fonctionne sur base du cycle cardiaque

Le cœur a deux paires de valvules. Une paire, les **valvules atrio-ventriculaires (AV)**, contrôle le passage entre les oreillettes et les ventricules. La valvule AV du côté droit est la **valvule tricuspide**, et la valvule AV du côté gauche est la **valvule bicuspidale** ou **mitrale**. Une autre paire, les valvules semi-lunaires, contrôle les sorties des ventricules vers le système artériel ; la **valvule pulmonaire** est située à la sortie du ventricule droit, et la **valvule aortique** à la sortie du ventricule gauche. Le cycle cardiaque est ainsi rythmé par l'ouverture et la fermeture des valvules. Leur fermeture produit les sons typiques « Tap-poum » perçus au stéthoscope.

Le cycle cardiaque est illustré dans la figure 49.9. Il commence quand le sang revient dans le cœur au repos par les veines qui se vident dans les oreillettes droite et gauche. Celles-ci se remplissent et la pression à l'intérieur augmente, les valvules AV s'ouvrent alors pour laisser passer le sang dans les ventricules, qui se remplissent à environ 80 %. La contraction des oreillettes expulse les 20 % restants des 80 mL de sang que les ventricules reçoivent en moyenne chez une personne au repos. Ces événements se déroulent pendant que les ventricules sont relâchés, une phase appelée **diastole** ventriculaire.

Après un bref délai, les ventricules se contractent pendant la phase dite **systole** ventriculaire. La contraction de chaque ventricule

augmente la pression dans chaque chambre, ce qui cause la fermeture des valvules AV empêchant le reflux du sang dans les oreillettes et le son « Tap » caractéristique. Immédiatement après la fermeture des valvules AV, la pression dans les ventricules force les valvules semi-lunaires à s'ouvrir, et propulse le sang dans le système artériel. Lorsque les ventricules se relâchent, la fermeture des valvules semi-lunaires prévient le reflux et produit le son « poum ».

Les contractions du muscle cardiaque sont déclenchées par des cellules autorythmiques

Comme dans les autres types de muscle, la contraction du muscle cardiaque est stimulée par dépolarisation membranaire (voir chapitres 43 et 46). Dans les muscles squelettiques, seuls les signaux émis par les motoneurones peuvent déclencher la dépolarisation, alors que le cœur lui contient des cellules spécialisées qui se dépolarisent spontanément, appelées fibres autorythmiques, qui peuvent induire périodiquement des potentiels d'action sans activation neurale.

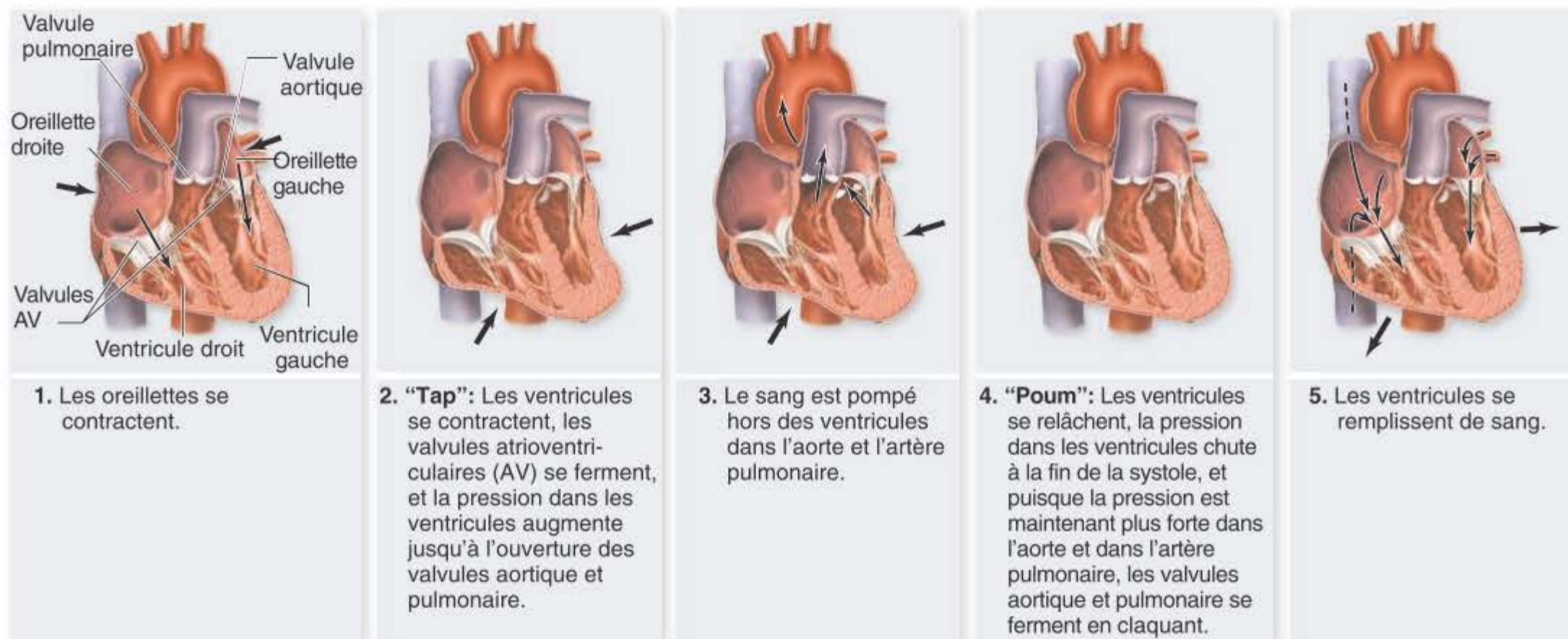
Le groupe le plus important de cellules autorythmiques est le nœud sino-atrial (SA), décrit à la section 49.3 (figure 49.10). Situé dans la paroi de l'oreillette droite le nœud SA agit comme un stimulateur électrique (pacemaker) pour le reste du cœur en produisant spontanément une dépolarisation à un rythme plus rapide que celui des autres cellules autorythmiques. Ces potentiels d'action spontanés sont dus à une fuite constante d'ions Na^+ dans la cellule, ce qui dépolarise la membrane. Lorsque le seuil est atteint, un potentiel d'action se forme. À la fin du potentiel d'action, la membrane se retrouve à nouveau sous le seuil et le processus recommence. Les cellules du nœud SA génèrent un potentiel d'action toutes les 0,6 sec, ce qui équivaut à environ 100 par minute. Comme nous le verrons à la section 49.6, le système nerveux autonome peut moduler ce rythme.

Chaque dépolarisation déclenchée par ce stimulateur suit deux voies de fibres spécialisées dans la conduction : une vers les fibres musculaires cardiaques de l'oreillette gauche, et l'autre vers l'oreillette droite et le nœud atrioventriculaire (AV). Une fois déclenchées, les dépolarisations se répandent rapidement d'une fibre musculaire à une autre en une vague qui envahit les oreillettes droite et gauche presque simultanément. Cette diffusion rapide de la dépolarisation est rendue possible par des fibres conductrices spéciales et par le fait que les cellules musculaires cardiaques sont connectées par des groupes de jonctions communicantes localisées dans les *disques intercalaires* (voir chapitre 43).

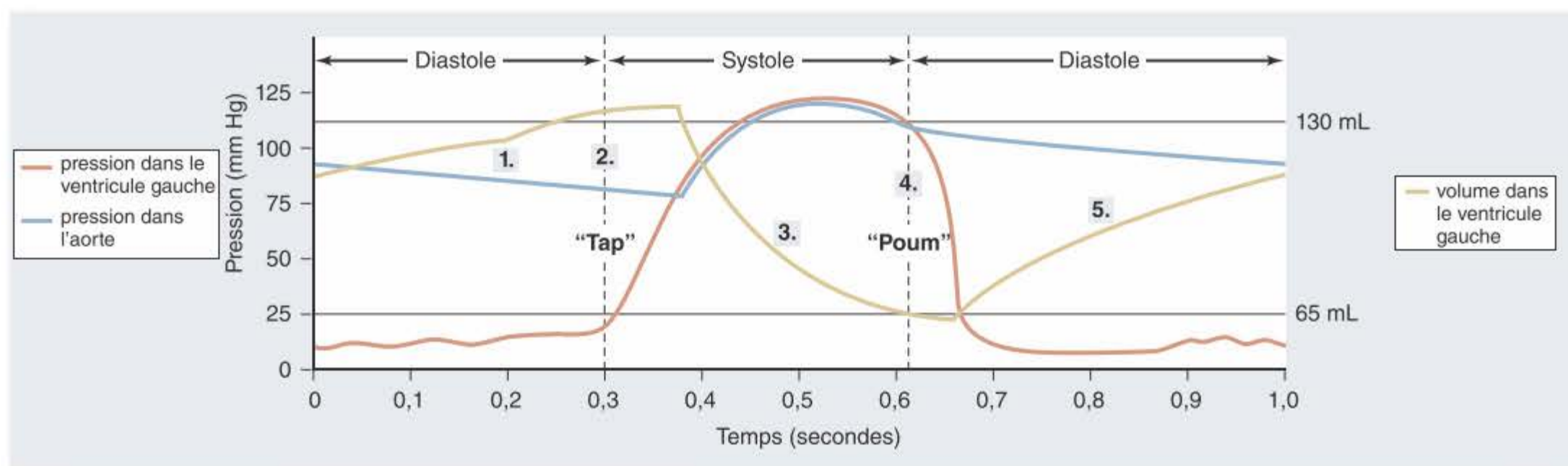
Un feuillet de tissu conjonctif séparant les oreillettes des ventricules bloque la diffusion de l'excitation par les fibres musculaires d'une chambre à l'autre. Le nœud AV fournit la seule voie de conduction de la dépolarisation des oreillettes vers les ventricules. Les fibres du nœud AV ralentissent la conduction des signaux dépolarisants, retardant la contraction du ventricule d'environ 0,1 seconde. Ce délai permet aux oreillettes de finir de se contracter et de se vider de leur sang dans les ventricules avant que ceux-ci ne se contractent.

Du nœud AV, l'onde de dépolarisation est conduite rapidement dans les deux ventricules par un réseau de fibres appelées faisceau atrioventriculaire ou faisceau de His. Ces fibres relaient la dépolarisation vers les fibres de Purkinje, qui stimulent directement les cellules myocardiques des ventricules gauche et droit, causant leur contraction quasi simultanément.

La stimulation des cellules myocardiques produit un potentiel d'action qui déclenche la contraction. Celle-ci est contrôlée par le Ca^{2+} et le système troponine/tropomyosine semblable à celui du muscle sque-



a.



b.

Figure 49.9 Le cycle cardiaque. a. Les contractions et les relâchements des oreillettes et des ventricules déplacent le sang dans le cœur. b. La figure illustre les changements de pression sanguine et de volume pour le ventricule gauche au cours du cycle cardiaque.

lettique (voir chapitre 46), mais la forme du potentiel d'action est différente. La phase initiale due à un influx de Na^+ par les canaux volaiques à Na^+ est suivie par une phase en plateau qui prolonge la contraction. Cette phase en plateau est due à l'ouverture des canaux volaiques à Ca^{2+} . L'influx résultant de Ca^{2+} garde la membrane dépolarisée lorsque les canaux à Na^+ sont inactivés. Ceci, à son tour, ouvre davantage de canaux volaiques à Ca^{2+} dans le réticulum sarcoplasmique. Cet apport supplémentaire de Ca^{2+} dans le cytoplasme induit une contraction plus soutenue. Le Ca^{2+} est extrait du cytoplasme par une pompe du réticulum sarcoplasmique semblable à celle du muscle squelettique, et par un transporteur de la membrane plasmique qui pompe le Ca^{2+} dans l'espace interstitiel.

L'activité électrique cardiaque peut être enregistrée à la surface du corps au moyen d'électrodes placées sur les membres et sur la poitrine. L'enregistrement, appelé électrocardiogramme (ECG), montre comment les cellules cardiaques se dépolarisent et se repolarisent au cours du cycle cardiaque (figure 49.10). La dépolarisation cause la contraction du cœur, tandis que la repolarisation cause son relâchement.

Le premier pic de l'enregistrement, P, est produit par la dépolarisation des oreillettes, et accompagne donc la systole atriale. Le second pic, plus grand, QRS, est produit par la dépolarisation ventriculaire ; pendant ce temps, les ventricules se contractent (systole ventriculaire). Le dernier pic, T, est produit par la repolarisation ventriculaire ; à ce moment-là, les ventricules passent en diastole.

Les artères et les veines se ramifient vers et à partir de toutes les parties du corps

Les **artères pulmonaires** droite et gauche transportent le sang dépourvu d'oxygène du ventricule droit vers les poumons droit et gauche, d'où le sang revient, comme mentionné à la section 49.3, dans l'oreillette gauche par les **veines pulmonaires**.

L'**aorte** et toutes ses ramifications constituent le réseau des artères systémiques, transportant le sang riche en oxygène à partir du ventricule gauche vers toutes les parties du corps. Les **artères coronaires** sont les premières ramifications de l'aorte ; elles irriguent le

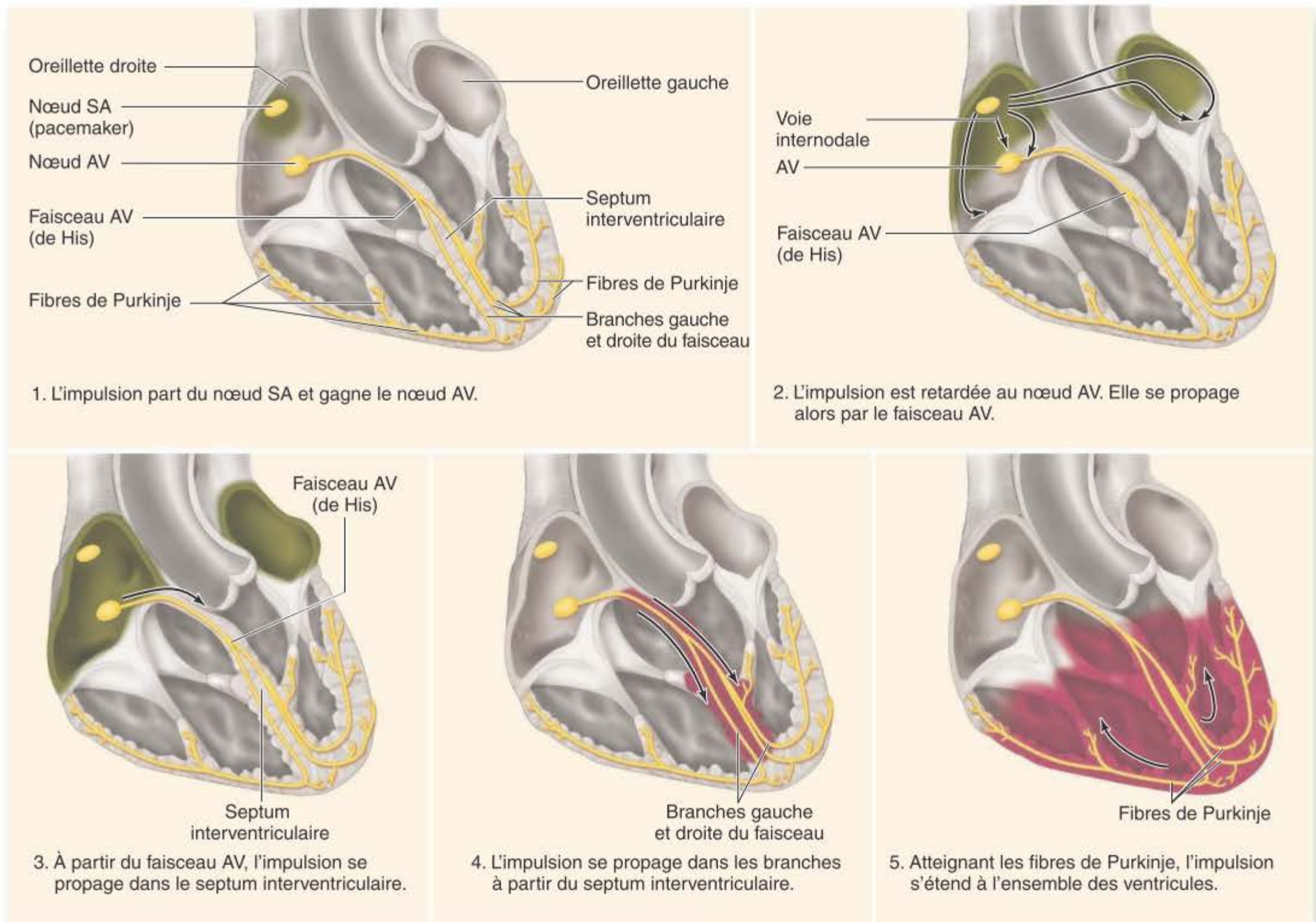
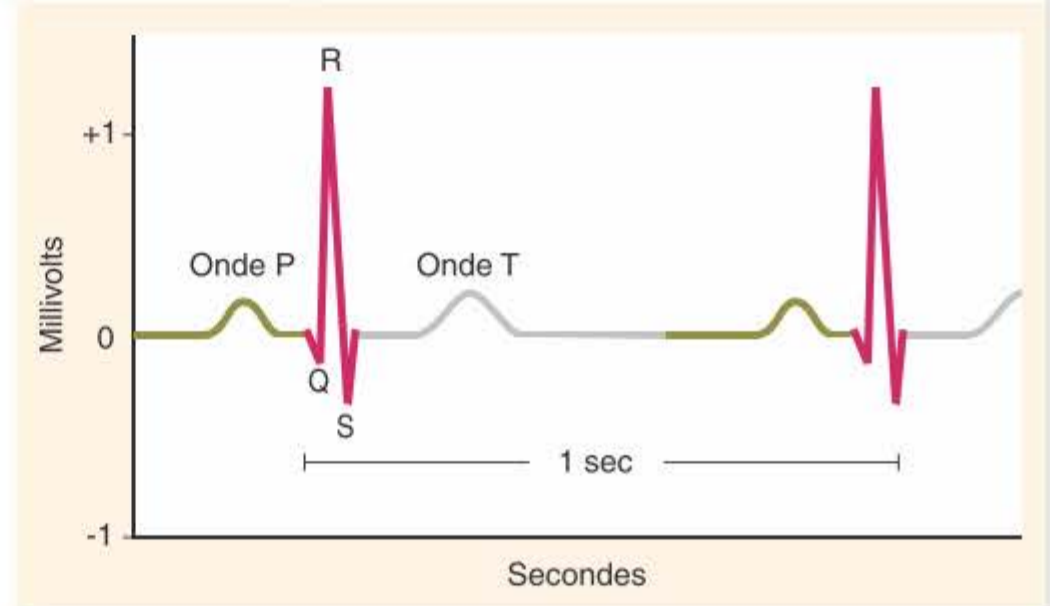


Figure 49.10 La voie de l'excitation électrique dans le cœur.

Les événements qui ont lieu lors de la contraction cardiaque peuvent être suivis par la mesure de l'activité électrique au moyen de l'électrocardiogramme (ECG). La dépolarisation et la contraction des oreillettes sont représentées en vert ci-dessus et correspondent à l'onde P de l'ECG (en vert). La dépolarisation et la contraction du ventricule sont indiquées en rouge ci-dessus et correspondent à l'onde QRS de l'ECG. L'onde T sur l'ECG correspond à la repolarisation des ventricules. La repolarisation auriculaire est masquée par l'onde QRS.



muscle cardiaque lui-même (voir figure 49.7b). D'autres artères systémiques se détachent de l'aorte quand elle forme un arc au-dessus du cœur, et quand elle descend et traverse les cavités thoracique et abdominale.

Le sang provenant des organes, appauvri en oxygène, retourne dans le cœur par les veines systémiques. Celles-ci finalement débouchent dans deux veines principales : la **veine cave supérieure**, qui draine la partie supérieure du corps, et la **veine cave inférieure**, qui draine la partie inférieure. Ces veines aboutissent à l'oreillette droite et bouclent ainsi la circulation systémique.

Le courant sanguin dans les artères, les capillaires et les veines est assuré par la pression générée par la contraction ventriculaire. Les ventricules doivent se contracter avec une force suffisante pour déplacer le sang à travers le système circulatoire entier.

La pression artérielle peut être mesurée

La contraction ventriculaire génère une pression élevée dans les artères partout dans le corps au moment de l'ouverture des valvules aortiques. Le pouls que vous pouvez détecter au poignet ou dans le cou résulte des

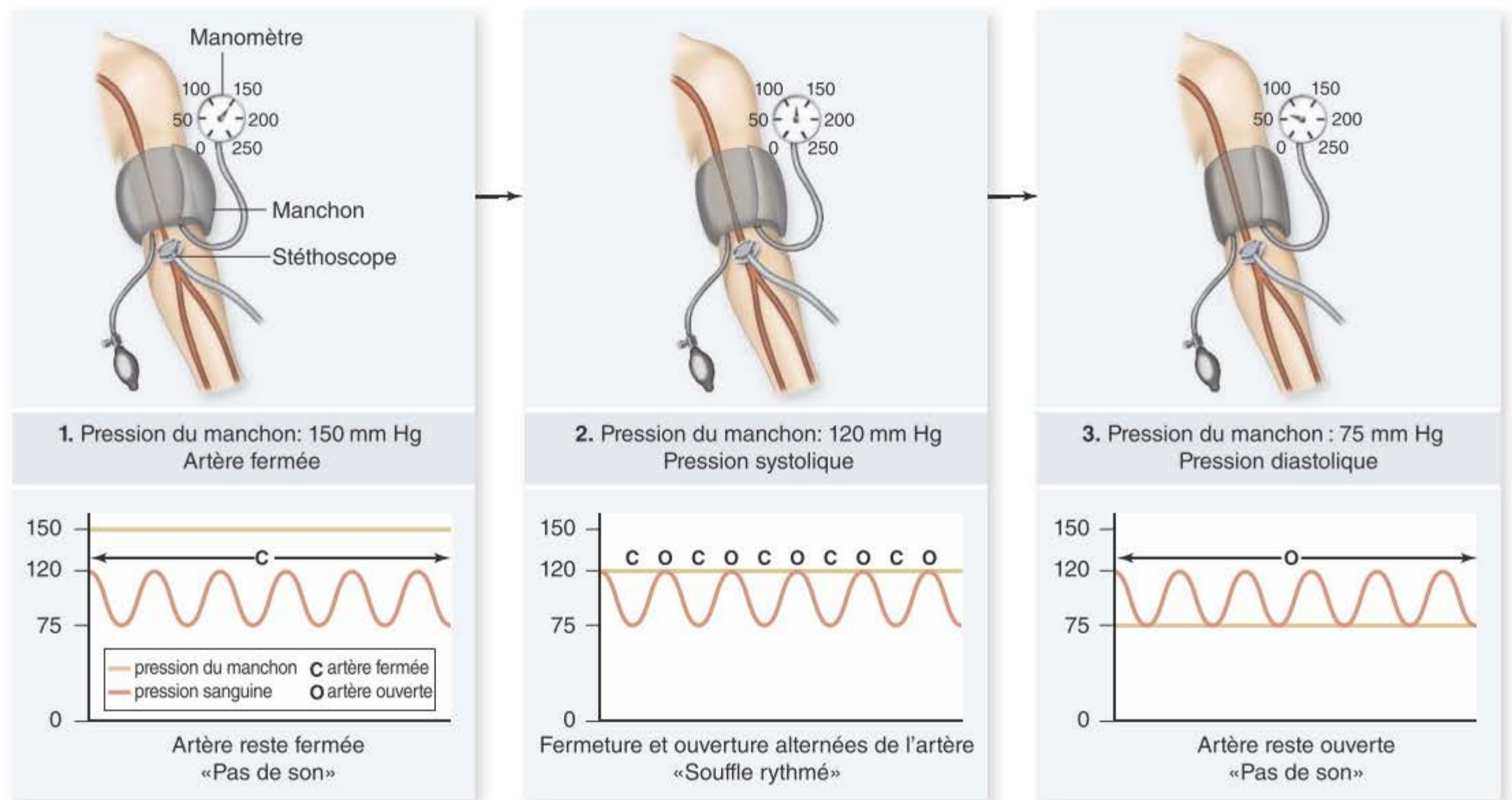


Figure 49.11 Mesure de la pression artérielle. Le manchon est serré autour du bras afin d'arrêter le flux sanguin dans l'artère brachiale. Quand on relâche la pression du manchon, la pression maximale (systolique) dépasse la pression du brassard et le sang peut passer par moment, produisant un souffle audible au stéthoscope. La pression enregistrée à ce point est dite systolique. La pression du manchon continuant à baisser, la pression artérielle devient supérieure à la pression du brassard pendant la plus grande partie du cycle cardiaque. Finalement, même la pression minimale au cours du cycle dépasse la pression du manchon ; à ce moment-là l'artère n'est plus comprimée et le silence du flux laminaire remplace le souffle. Lorsque celui-ci n'est plus perçu, la pression enregistrée est dite diastolique.

changements de pression alors que les artères élastiques se dilatent et se contractent avec le flux sanguin périodique. Les médecins mesurent la tension sanguine pour évaluer l'état cardiovasculaire de leurs patients, diverses affections pouvant augmenter ou diminuer la pression.

La pression sanguine dans l'artère brachiale située à la partie interne du bras, est mesurée, à hauteur du coude, au moyen d'un sphygmomanomètre ou tensiomètre (figure 49.11). Un manchon autour de la partie supérieure du bras est gonflé suffisamment pour arrêter le flux sanguin vers l'avant-bras. Lorsque le manchon est dégonflé, le sang recommence à passer par saccades dans l'artère, ce qui génère un souffle audible au stéthoscope. Le point auquel le souffle devient audible marque le pic de la pression, ou **pression systolique** ; elle correspond à la contraction des ventricules. Pendant le relâchement progressif du manchon, la pression que celui-ci génère devient inférieure à la pression sanguine de tout le cycle cardiaque. À ce moment-là, le vaisseau sanguin n'étant plus comprimé, le souffle disparaît. Ce point marque la pression minimale entre les battements cardiaques ; c'est la **pression diastolique**, qui correspond à la phase de relâchement des ventricules.

La pression sanguine est exprimée comme le rapport de la pression systolique sur la pression diastolique. Pour une personne en bonne santé d'une vingtaine d'années, la pression sanguine est de 120/75 (exprimée en millimètres de mercure ou mm Hg). On parle d'**hypertension** (pression sanguine élevée) lorsque la pression systolique atteint ou dépasse 140 mm Hg ou une pression diastolique qui atteint ou dépasse 90 mm Hg.

Synthèse 49.4

Le cycle cardiaque consiste en systole et diastole ; les ventricules se contractent à la systole et se relâche à la diastole. Le nœud SA dans l'oreillette droite lance des vagues de dépolarisation qui stimulent d'abord les oreillettes, puis se propagent vers le nœud AV, qui stimule les ventricules. La pression sanguine est exprimée comme le rapport de la pression systolique sur la pression diastolique ; elle est mesurée au moyen d'un tensiomètre.

- Qu'arriverait-il en absence de délai entre la contraction des oreillettes et celle des ventricules ?

49.5 Caractéristiques des vaisseaux sanguins

Objectifs

1. Décrire les quatre couches tissulaires des vaisseaux sanguins.
2. Expliquer les distinctions entre artères, capillaires et veines.
3. Décrire comment le système lymphatique fonctionne.

Vous savez déjà que le sang quitte le cœur par des vaisseaux appelés **artères**. Celles-ci se ramifient continuellement, formant un « arbre » creux qui pénètre dans chaque organe du corps. Les ramifications les plus fines, de taille microscopique, de l'arbre artériel sont les **artérioles**. Le sang des artérioles passe dans les capillaires, un réseau complexe de tubes très étroits, à paroi mince. Après avoir traversé les capillaires, le sang est repris par les **veinules**, puis dans des vaisseaux plus larges, les **veines**, qui ramènent le sang dans le cœur.

Les grands vaisseaux sont composés de quatre couches tissulaires

Les artères, les artérioles, les veines et les veinules ont toutes la même structure de base (figure 49.12). La couche interne est un feuillet épithélial appelé *endothélium*, enveloppé d'une fine couche de fibres élastiques, d'une couche de muscles lisses et d'une couche de tissu conjonctif. La paroi de ces vaisseaux est donc épaisse assez que pour réduire fortement les échanges entre le sang et les tissus extravasculaires.

Par contre, la paroi des capillaires ne comporte qu'un endothélium ; ainsi, les molécules et les ions peuvent quitter le plasma sanguin par diffusion, par filtration à travers les pores entre les cellules de la paroi des capillaires, et par transport à travers les cellules endothéliales. Dès lors, lorsque le sang passe par les capillaires, les gaz et les métabolites sont échangés avec le liquide interstitiel et les cellules de l'organisme.

Les artères et artérioles ont évolué afin de supporter la pression

Les artères les plus grandes contiennent plus de fibres élastiques dans leur paroi que les autres vaisseaux sanguins, leur permettant de se dilater

chaque fois qu'ils reçoivent un volume de sang pompé par le cœur. Les artères plus petites et les artérioles sont moins élastiques ; leur couche de muscles lisses, proportionnellement plus épaisse, leur permet d'éviter les ruptures.

Plus étroit est le vaisseau, plus grande est la résistance frictionnelle au flux. En fait, un vaisseau qui a un diamètre de moitié plus petit qu'un autre oppose une résistance frictionnelle *16 fois* plus élevée. En effet, la résistance au flux sanguin est inversement proportionnelle à la quatrième puissance du rayon du vaisseau. Dès lors, dans un arbre artériel, ce sont les petites artères et les artérioles qui freinent le plus le courant sanguin.

La contraction de la couche de muscles lisses des artérioles cause une **vasoconstriction**, qui augmente fortement la résistance et réduit le débit. Le relâchement de la couche musculaire lisse s'accompagne d'une **vasodilatation**, qui réduit la résistance et augmente l'apport de sang à un organe. Une vasoconstriction chronique des artérioles peut élever la pression sanguine et aboutir à l'hypertension.

La vasoconstriction et la vasodilatation sont des moyens importants de réguler la température corporelle chez les animaux ectothermes et endothermes (figure 49.13). en augmentant le flux sanguin cutané, un animal peut accélérer l'échange calorique, ce qui est bénéfique pour gagner ou perdre de la chaleur. Inversement, détourner le sang de la peau est efficace lorsque l'animal a besoin de minimiser ses échanges caloriques, comme cela peut être le cas lorsqu'il fait froid.

Les capillaires forment un vaste réseau pour l'échange de diverses substances

Le nombre considérable de capillaires et leur forte ramification permettent que chaque cellule de l'organisme se situe à une distance maximale de 100 micromètres (mm) d'un capillaire. En moyenne, les capillaires ont une longueur d'environ 1 millimètre et un diamètre de 8 mm, à peine plus que celui d'un globule rouge (5 à 7 mm). Malgré, cet ajustement étroit, les globules rouges sont suffisamment souples pour s'insinuer dans les capillaires sans difficulté.

Bien que chaque capillaire soit très étroit, leur nombre est tellement grand que la somme de leur section offre une surface totale la plus vaste de tous les autres types de vaisseaux. Par conséquent, le courant sanguin dans les capillaires est plus lent, ce qui lui laisse plus de temps pour les échanges avec le liquide extracellulaire environnant. Au moment où le sang atteint l'extrémité du capillaire, il a libéré une partie de son oxygène et des nutriments et a capté le dioxyde de carbone et d'autres déchets. Le sang perd de sa pression et de sa vitesse pendant qu'il passe dans les artérioles et dans

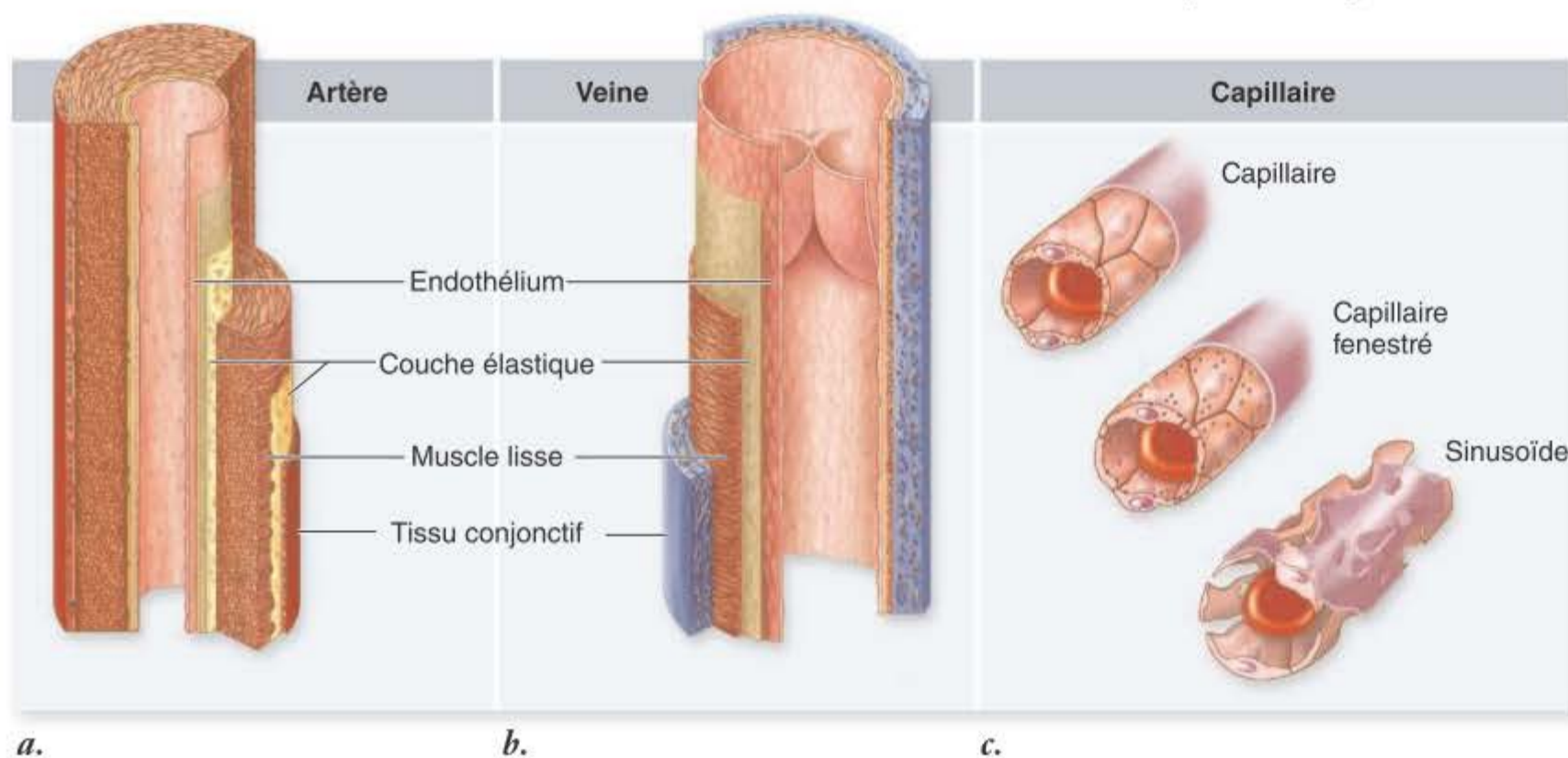
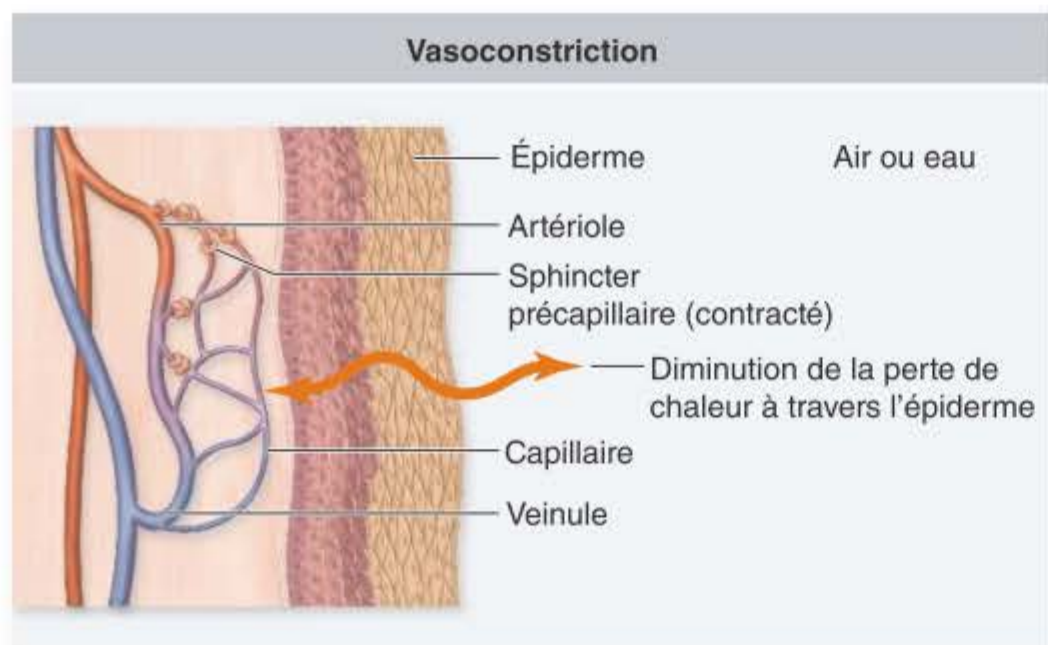
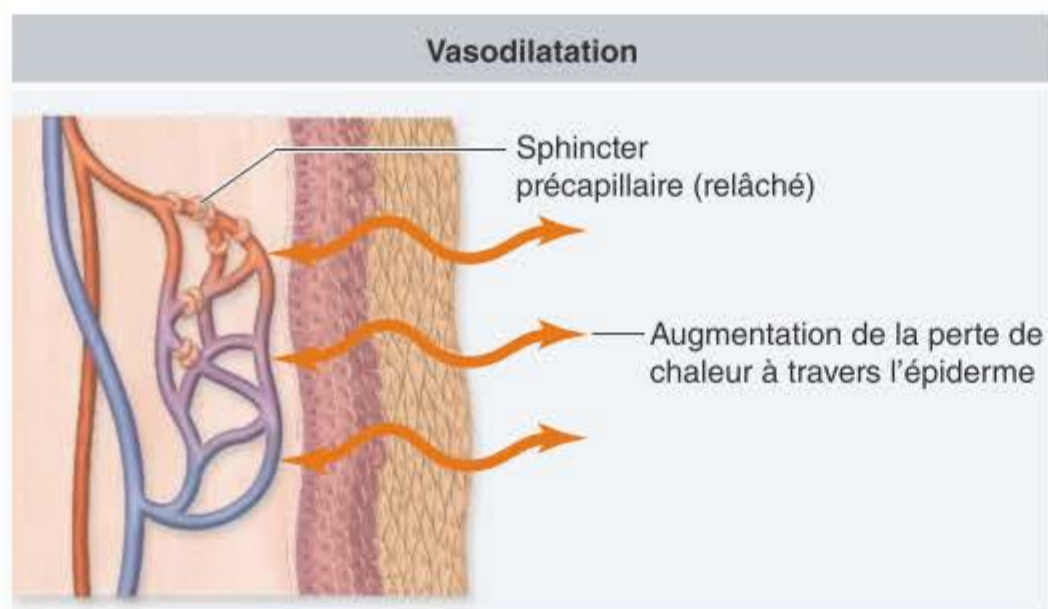


Figure 49.12 Structure des vaisseaux sanguins. Les artères (a.) et les veines (b.) ont les mêmes couches tissulaires, mais les artères ont une couche musculaire beaucoup plus épaisse et deux couches élastiques. (c.) Les capillaires sont composés d'une simple couche de cellules endothéliales. (Échelle non respectée.)

Analyse de données Si un vaisseau sanguin a un rayon de 60 mm et un capillaire dans le même système a un rayon de 4 mm, quelle est la différence dans la résistance au flux sanguin dans les deux ?



a.



b.

Figure 49.13 Régulation des échanges de chaleur. La quantité de chaleur perdue ou acquise à la surface du corps peut être régulée par le contrôle du flux sanguin à la surface. *a.* La constriction des vaisseaux sanguins de surface limite le flux et la perte de chaleur lorsque l'animal est plus chaud que l'air environnant; lorsque l'animal est plus froid que l'air environnant (non montré), la constriction minimise le gain de chaleur; *(b.)* la dilatation de ces vaisseaux augmente le flux et l'échange de chaleur.

les capillaires, mais comme la surface des sections diminue du côté veineux, la vitesse augmente.

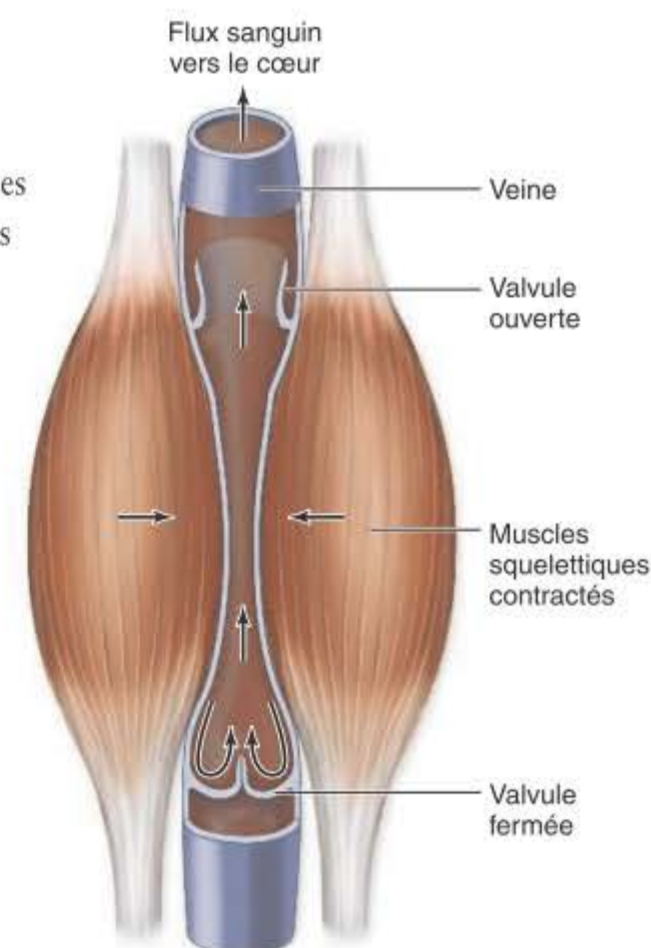
La couche musculaire lisse est plus mince dans les veinules et les veines

Les veinules et les veines ont les mêmes couches tissulaires que les artères, mais la couche de tissu musculaire lisse est plus mince. Il faut moins de muscle puisque la pression dans les veines est dix fois moindre que celle des artères. La majeure partie du sang du système cardiovasculaire est contenue dans les veines, qui peuvent se dilater lorsqu'elles doivent contenir de plus grandes quantités de sang. Vous pouvez constater cette expansion des veines, en examinant vos pieds après une longue station debout.

La pression veineuse seule n'est pas suffisante pour ramener le sang dans le cœur à partir des pieds et des jambes, mais d'autres mécanismes interviennent. Le plus significatif, est la contraction des muscles squelettiques qui entourent les veines. En comprimant les veines, elle permet au sang de progresser; on parle dans ce cas de **pompe veineuse**. Le sang veineux se déplace dans une seule direction, vers le cœur, grâce à la présence de **valvules veineuses** (figure 49.14). Lorsque les veines d'une personne se gonflent de sang de manière excessive, les valvules

Figure 49.14

Flux sanguin unidirectionnel dans les veines. Des valvules veineuses obligent le sang à circuler dans une seule direction, vers le cœur.



peuvent devenir inopérantes, et le sang s'accumule alors dans les veines, ce qui les déforme, on dit alors qu'elles sont devenues variqueuses.

Le système lymphatique recueille les fluides qui quittent le système cardiovasculaire

Le système cardiovasculaire est considéré comme un système fermé puisque tous ses vaisseaux sont connectés les uns avec les autres, aucun n'a une extrémité ouverte. Cependant, une certaine quantité d'eau et de solutés dans le plasma sanguin filtre à travers la paroi des capillaires pour former le liquide interstitiel (tissulaire). La majeure partie du liquide est filtrée à partir des capillaires près de l'extrémité des artérioles, où la pression sanguine est la plus élevée, et retourne dans les capillaires à leurs extrémités proches des veinules (figure 49.15).

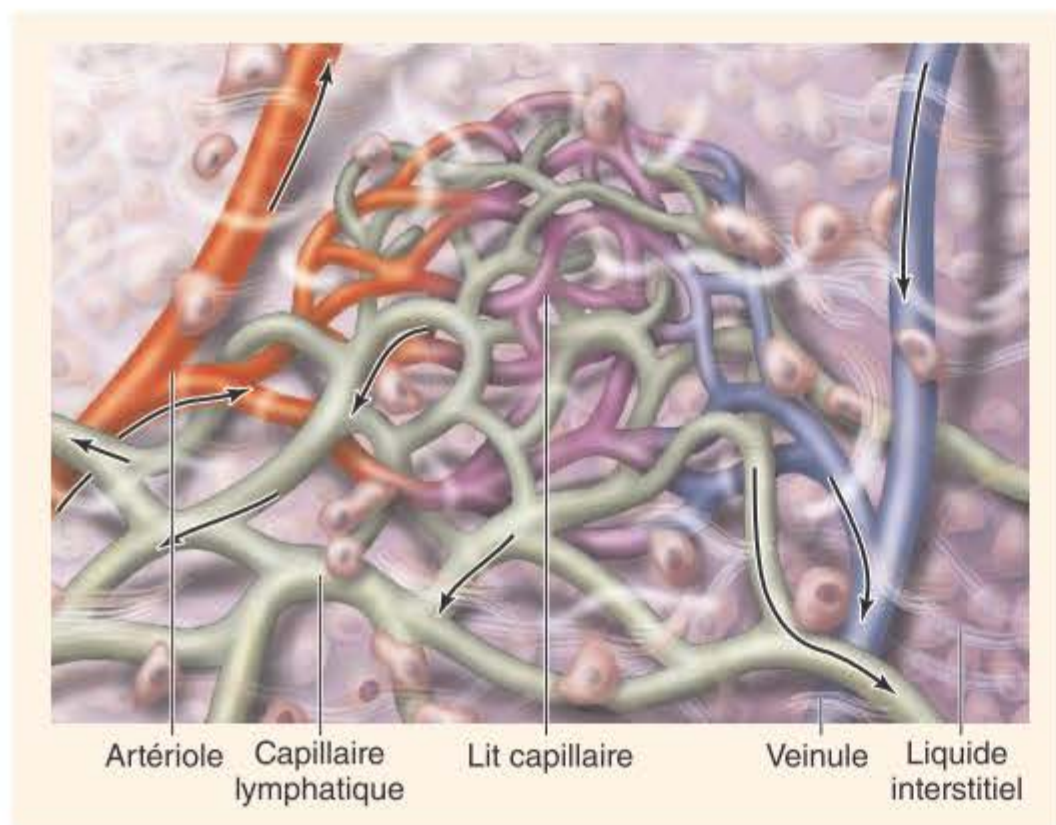
Ce retour du liquide dépend de l'osmose (voir chapitre 5). La plupart des protéines plasmatiques ne peuvent échapper à travers les pores capillaires à cause de leur grande taille, et dès lors la concentration protéique dans le plasma est plus grande que celle du liquide interstitiel. La différence de concentration protéique génère un gradient de pression osmotique, responsable du passage de l'eau dans les capillaires à partir de l'espace interstitiel.

Une pression sanguine élevée dans les capillaires peut provoquer une accumulation excessive de liquide interstitiel. Un exemple est celui des femmes enceintes, chez qui le fœtus, en comprimant les veines, augmente la pression sanguine capillaire dans les membres inférieurs de la mère. L'augmentation de volume du liquide interstitiel peut causer un gonflement des tissus, ou **œdème**, des pieds.

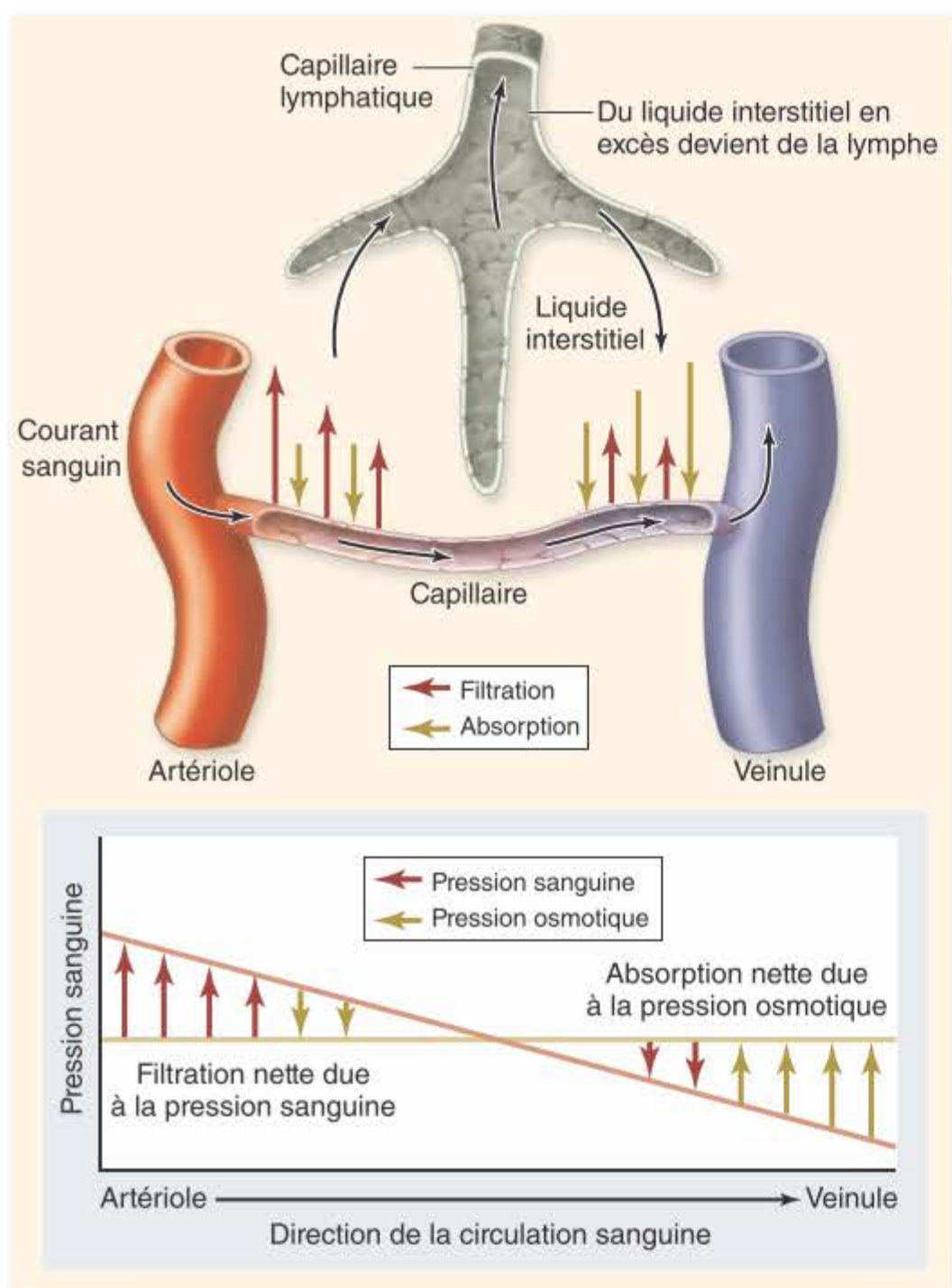
L'œdème peut aussi résulter d'une diminution de la concentration protéique du plasma. Le liquide ne retourne pas dans les capillaires, mais reste comme liquide interstitiel. La cause peut être une maladie hépatique, puisque le foie produit la plupart des protéines plasmatiques, ou une malnutrition protéique à la suite d'une famine.

Même dans des conditions normales, la quantité de liquide qui sort des capillaires excède celle qui y retourne par osmose. Cependant, la fraction résiduelle rejoint finalement le système cardiovasculaire par la voie d'un système circulatoire ouvert, appelé **système lymphatique**.

Le système lymphatique comprend les capillaires lymphatiques, les vaisseaux lymphatiques, les ganglions lymphatiques et les organes



a.



b.

Figure 49.15 Relation entre le sang, la lymphe et le liquide interstitiel. a. Les vaisseaux des systèmes circulatoire et lymphatique avec des flèches indiquant la direction du courant. b. Le liquide plasmatique, moins les protéines, filtre en dehors des capillaires et forme le liquide interstitiel qui baigne les tissus. Une grande partie de ce liquide revient dans les capillaires par osmose due à la concentration protéique plus élevée du plasma. Un excédent du liquide interstitiel est repris par des capillaires lymphatiques borgnes (à extrémité en cul-de-sac), qui ramènent finalement le liquide dans le système cardiovasculaire.

lymphoïdes, notamment la rate et le thymus. Le liquide en excès dans les tissus est drainé dans les capillaires lymphatiques, dont l'extrémité est fermée, mais dont la paroi est très perméable. Ce fluide, appelé alors **lymphe**, passe dans des vaisseaux lymphatiques progressivement plus grands, qui ressemblent à des veines et ont des valvules unidirectionnelles (semblables à celles de la figure 49.14). La lymphe entre finalement dans deux vaisseaux lymphatiques majeurs, qui débouchent dans les veines sous-clavières gauche et droite situées sous les clavicules.

Le mouvement de la lymphe chez les mammifères est assuré par les muscles squelettiques comprimant les vaisseaux lymphatiques suivant un mécanisme semblable à la pompe veineuse qui déplace le sang dans les veines. Dans certains cas, les vaisseaux lymphatiques se contractent également de manière rythmique. Chez de nombreux poissons, chez tous les amphibiens et les reptiles, ainsi que chez les embryons d'oiseaux et certains oiseaux adultes, la lymphe est propulsée par des **cœurs lymphatiques**.

Lorsque la lymphe traverse les ganglions lymphatiques et les organes lymphoïdes, elle est modifiée par des cellules phagocytaires (voir chapitre 4) qui bordent les canaux de ces organes. De plus, les ganglions lymphatiques et les organes lymphoïdes contiennent des *centres germinatifs*, où les lymphocytes sont activés et prolifèrent.

Les maladies cardiovasculaires affectent le système de distribution

Les maladies cardiovasculaires constituent la première cause de mort aux États-Unis ; plus de 80 millions de gens souffrent de l'une ou l'autre forme de maladie cardiovasculaire et plus de 600.000 en meurent chaque année. De nombreuses maladies résultent d'altérations artérielles telles qu'un blocage ou une rupture.

L'**athérosclérose** ou **durcissement des artères** est une accumulation, dans la paroi artérielle, de lipides, de cholestérol, de fibrine, de divers débris cellulaires, associée à une prolifération anormale des muscles lisses. Ces obstacles ralentissent le débit sanguin (figure 49.16) et peuvent favoriser la formation d'un caillot, qui réduit encore davantage la lumière (l'intérieur) de l'artère. Dans les cas les plus sévères, l'artère peut être complètement bouchée.

L'accumulation de cholestérol dans les vaisseaux est favorisée par plusieurs facteurs, notamment la concentration sérique totale de cholestérol et les taux des différentes protéines transporteuses de cholestérol. Puisque cette molécule n'est pas très soluble dans l'eau, elle est transportée dans le sang sous forme de complexes avec des lipoprotéines. Deux formes principales se distinguent par leur différence de densité : les lipoprotéines de basse densité (LDL, *low-density lipoproteins*) et les lipoprotéines de haute densité (HDL, *high-density lipoproteins*), souvent appelées respectivement « mauvais cholestérol » et « bon cholestérol ». La raison en est que les HDL tendent à enlever le cholestérol de la circulation en le transportant dans le foie en vue de son élimination, alors que les LDL servent à sa distribution à toutes les cellules de l'organisme. Le problème survient lorsque les cellules ont suffisamment de cholestérol. Ce qui diminue le nombre de récepteurs des LDL, augmentant leur concentration dans le sang et le risque de dépôts dans les vaisseaux sanguins.

L'athérosclérose est favorisée par des facteurs génétiques, par le tabagisme, l'hypertension (pression sanguine élevée) et les effets du cholestérol dont il vient d'être question. Arrêter de fumer est la mesure la plus efficace qu'un fumeur puisse prendre pour réduire le risque d'athérosclérose.

L'**artériosclérose** est liée aux dépôts calciques dans les parois artérielles. Elle tend à se développer lorsque l'athérosclérose est grave. Non seulement de telles artères ont un débit sanguin réduit, mais elles perdent la faculté de se dilater comme des artères normales. Cette perte



Figure 49.16 Athérosclérose. *a.* L'artère coronaire est légèrement obstruée. *b.* L'artère est atteinte d'athérosclérose grave; le passage est en grande partie obstrué par une expansion de la paroi intérieure de l'artère. *c.* L'artère coronaire est complètement bouchée.

de souplesse force le cœur à travailler plus durement, car la pression sanguine augmente afin de maintenir le débit.

Les **attaques cardiaques** (infarctus myocardique) sont la cause principale de mort d'origine cardiovasculaire aux États-Unis, ce qui représente environ un cinquième de tous les décès. Une attaque cardiaque résulte d'un apport sanguin insuffisant à l'une ou l'autre région du muscle cardiaque, ce qui cause la mort des cellules myocardiques de cette région. L'attaque peut être due à un caillot sanguin qui s'est formé quelque part dans les artères coronaires, qui fournissent le sang au muscle cardiaque. Le caillot bloque le passage du sang dans ces vaisseaux, mais un blocage peut aussi être causé par l'athérosclérose. Se rétablir après une attaque cardiaque est possible si la partie cardiaque endommagée est suffisamment petite, laissant au cœur la possibilité de se contracter et d'assurer sa fonction.

L'**angine de poitrine**, qui littéralement veut dire « douleur dans le thorax », survient pour des raisons semblables à celles qui causent les attaques cardiaques, mais elle est moins grave. La douleur peut survenir dans la région du cœur, mais aussi dans le bras gauche et l'épaule. L'angine de poitrine est un signe précurseur d'une insuffisance d'apport sanguin au muscle cardiaque, mais l'irrigation reste suffisante pour la survie des cellules myocardiques.

Les **attaques cérébrales**, ou **accidents vasculaires cérébraux (AVC)**, sont causées par une interruption de la circulation sanguine dans le cerveau. Les AVC peuvent survenir à la suite d'une rupture vasculaire (AVC hémorragique) ou lorsque le courant sanguin dans une artère cérébrale est bloqué par un thrombus (caillot sanguin) ou par l'athérosclérose (AVC ischémique). Les conséquences d'une attaque cérébrale dépendent de l'étendue des dommages et du site de la lésion.

Synthèse 49.5

Les quatre couches des vaisseaux sanguins sont (1) l'endothélium, (2) une couche élastique, (3) des muscles lisses et (4) du tissu conjonctif. Au contraire, les capillaires n'ont qu'un endothélium. Les artères ont plus de muscle dans leur paroi que les veines afin de mieux résister à une pression plus forte : les grandes artères ont aussi plus de fibres élastiques afin de pouvoir se dilater. Le système lymphatique, qui est unidirectionnel, ramène l'excès de liquide interstitiel, appelé lymph, dans le système cardiovasculaire.

- Quelle est la connexion entre les systèmes lymphatique et circulatoire ?

49.6 Régulation du courant sanguin et de la pression sanguine

Objectifs

1. Décrire comment l'exercice modifie le débit cardiaque.
2. Expliquer comment des hormones régulent le volume sanguin.

Bien que le système nerveux autonome ne déclenche pas les battements cardiaques, il module le rythme et la force des contractions. En outre, plusieurs mécanismes régulent les caractéristiques du système cardiovasculaire, notamment le débit cardiaque, la pression sanguine et le volume sanguin.

Le système nerveux peut accélérer ou ralentir le rythme cardiaque

Le rythme cardiaque est sous le contrôle du système nerveux autonome. Le centre cardiaque du bulbe rachidien (une partie du cerveau postérieur ; voir chapitre 43) comprend deux centres neuronaux qui modulent le rythme cardiaque. Le **centre cardio-accélérateur** envoie des signaux par la voie des nerfs sympathiques accélérateurs du cœur vers le nœud SA, le nœud AV et le myocarde. Ces nerfs sécrètent de la noradrénaline, qui augmente le rythme cardiaque. La stimulation du système nerveux sympathique peut aussi augmenter la contractilité du muscle cardiaque lui-même, lui faisant ainsi éjecter plus de sang par contraction (volume d'éjection).

Le **centre cardio-inhibiteur** envoie des signaux par les fibres parasympathiques du nerf vagal vers les nœuds SA et AV. Le nerf vague sécrète de l'acétylcholine, qui inhibe le développement des potentiels d'action et ralentit ainsi le rythme cardiaque.

Le débit cardiaque augmente avec l'exercice

Le **débit cardiaque** est le volume de sang que chaque ventricule pompe par minute. Il est calculé en multipliant le rythme cardiaque par le *volume d'éjection* ou, qui est le volume de sang éjecté par chaque ventricule

à chaque contraction. Par exemple, si le rythme cardiaque est de 72 battements par minute et le volume d'éjection de 70 millilitres, le débit cardiaque est de 5 litres par minute, ce qui correspond à la moyenne approximative d'une personne au repos.

Le débit cardiaque s'élève durant l'exercice en raison d'une augmentation du rythme et du volume d'éjection. Lorsque l'exercice commence, le rythme cardiaque s'accélère jusqu'à environ 100 pulsations par minute. Avec l'intensification de l'exercice, les muscles squelettiques compriment les veines plus vigoureusement, ce qui ramène le sang au cœur plus rapidement. En plus, les ventricules se contractent plus fort, ils se vident ainsi plus complètement à chaque battement.

Durant l'exercice, le débit cardiaque augmente jusqu'à un maximum d'environ 25 litres par minute chez un jeune adulte moyen. Bien que le débit cardiaque ait augmenté de cinq fois, tous les organes ne reçoivent pas cinq fois plus de sang ; certains reçoivent plus, d'autres moins. Cette répartition inégale s'explique par la constriction des artérioles dans certains organes, par exemple dans le système digestif, alors que les artérioles dans les muscles sollicités et le cœur se dilatent.

Analyse de données Si le cœur d'une personne au repos bat typiquement à 72 pulsations par minute, un volume de 70 mL étant propulsé par contraction, de combien faudra-t-il augmenter le nombre de pulsations et le volume pour atteindre un débit de 25 L/min ?

Le réflexe des barorécepteurs maintient l'homéostasie de la pression sanguine

La pression sanguine artérielle (PS) dépend de deux facteurs : le débit cardiaque (DC) et la résistance (R) que le flux sanguin rencontre dans le système vasculaire. Cette relation peut être exprimée par :

$$PS = DC \times R$$

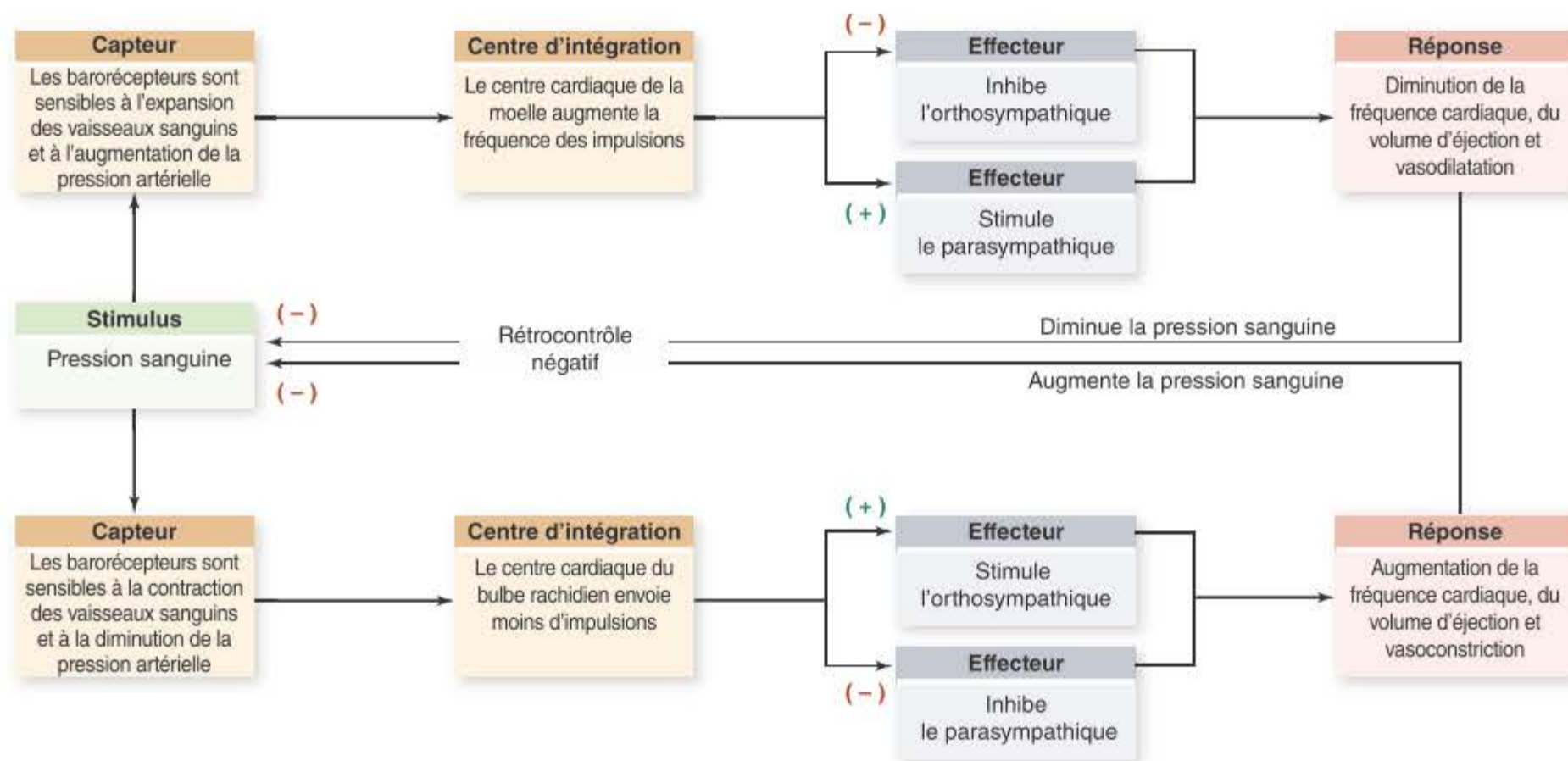


Figure 49.17 Les boucles de rétrocontrôle négatif des barorécepteurs contrôlent la pression sanguine. Les barorécepteurs constituent la partie afférente d'une boucle de rétroaction qui contrôle la pression artérielle. La fréquence des impulsions nerveuses envoyées par ces récepteurs d'étirement augmente avec la pression artérielle. Ces informations sont traitées dans le centre cardiaque du bulbe rachidien. La partie efférente de la boucle implique des nerfs orthosympathiques et parasymphatiques qui innervent le cœur. Ce contrôle peut augmenter ou diminuer la fréquence cardiaque et le volume systolique afin d'élever et de baisser la pression artérielle en réponse à la signalisation venant des barorécepteurs.

Une augmentation de la pression sanguine, dès lors, pourrait être due soit à une augmentation du rythme cardiaque ou du volume sanguin (les deux accroissent le débit cardiaque), ou encore à une vasoconstriction, qui augmente la résistance au courant sanguin. Inversement, la tension sanguine chute si le cœur ralentit ou si le volume sanguin est réduit, par exemple par déshydratation ou un saignement excessif (hémorragie).

Les changements de la pression sanguine artérielle sont détectés par des **barorécepteurs** situés dans l'arc de l'aorte et dans les artères carotides (voir chapitre 44). Ces capteurs sont des récepteurs d'étirement sensibles à l'expansion et à la contraction des artères. Lorsque les barorécepteurs détectent une chute de la pression sanguine, le nombre d'impulsions vers le centre cardiaque diminue, ce qui aboutit à une stimulation orthosympathique accrue et à une stimulation parasymphatique moindre du cœur et d'autres cibles. Le rythme cardiaque, le volume d'éjection et, dès lors, le débit cardiaque sont ainsi augmentés. Une autre conséquence est la vasoconstriction des vaisseaux sanguins dans la peau et les viscères, avec augmentation de la résistance. Cette combinaison augmente la pression sanguine, ce qui ferme la boucle de ce rétrocontrôle dans cette direction (figure 49.17, au-dessus).

Lorsque les barorécepteurs détectent une augmentation de la pression sanguine, le nombre d'impulsions vers le centre cardiaque augmente. Ce qui exerce l'effet opposé, à savoir une diminution de la stimulation orthosympathique et une augmentation de la stimulation parasymphatique du cœur. Ce qui diminue le rythme cardiaque et le volume d'éjection et, donc le débit cardiaque. Le centre cardiaque envoie également des signaux qui causent une vasodilatation des vaisseaux sanguins de la peau et des viscères, ce qui diminue la résistance. Cette combinaison diminue la pression sanguine, fermant ainsi la boucle de rétrocontrôle dans cette direction. Ainsi, le réflexe des barorécepteurs forme une boucle de rétrocontrôle négatif répondant aux changements de la pression sanguine (figure 49.17, au-dessous).

Le volume sanguin est régulé par des hormones

La pression sanguine dépend en partie du volume sanguin total car celui-ci peut modifier le débit cardiaque. Si tout reste égal, une réduction du volume sanguin fait baisser la pression sanguine. La régulation du volume sanguin dépend des effets de quatre hormones : (1) l'hormone antidiurétique, (2) l'aldostérone, (3) le peptide atrial natriurétique et (4) l'oxyde nitrique.

L'hormone antidiurétique (HAD), appelée aussi **vasopressine**, est sécrétée par la partie postérieure de la glande hypophyse en réponse à une augmentation de la concentration osmotique du plasma sanguin (voir chapitre 45). La déshydratation, par exemple, entraîne une diminution du volume sanguin. Les osmorécepteurs de l'hypothalamus déclenchent alors la sensation de soif et stimulent la sécrétion d'HAD par la partie postérieure de l'hypophyse. L'HDA, à son tour, agit sur les reins, qui sous l'action de cette hormone, retiennent plus d'eau dans le plasma, et en excrètent moins dans l'urine. Une personne déshydratée boit donc plus et urine moins, ce qui contribue à augmenter le volume sanguin et à restaurer l'homéostasie.

Chaque fois que les reins subissent une réduction du courant sanguin, un groupe de cellules rénales se mettent à libérer dans le sang une enzyme connue sous le nom de **rénine**. Celle-ci active une protéine sanguine, l'angiotensine, qui induit une vasoconstriction dans tout l'organisme tout en stimulant la sécrétion de l'hormone **aldostérone** par le cortex surrénalien. Cette hormone stéroïde agit sur les reins pour qu'ils retiennent plus de Na^+ et plus d'eau dans le sang (voir chapitre 45).

Lorsque l'organisme est confronté à des quantités excessives de Na^+ , les surrénales sécrètent moins d'aldostérone. Ainsi, moins de Na^+

est retenu par les reins. L'excrétion de Na^+ dans l'urine est favorisée par une autre hormone, l'**hormone natriurétique atriale**. Elle est sécrétée par l'oreillette cardiaque droite en réponse à une expansion de l'oreillette par un volume sanguin accru. L'action de l'hormone natriurétique atriale ferme une boucle de rétrocontrôle négatif, en réduisant le volume sanguin et la pression.

L'**oxyde nitrique (NO)** est un gaz produit par les cellules endothéliales des vaisseaux sanguins. Comme décrit au chapitre 45, il est un des nombreux régulateurs paracrines des vaisseaux sanguins. En solution, le NO passe dans les couches cellulaires sous-jacentes du vaisseau et cause le relâchement des muscles lisses qui entourent le vaisseau et, dès lors, sa dilatation (élargissement). Depuis plus d'un siècle, les patients cardiaques ont été traités par la nitroglycérine pour soulager leurs douleurs thoraciques, mais ce n'est que récemment que l'on a réalisé que la nitroglycérine agissait en libérant de l'oxyde nitrique.

Synthèse 49.6

Le débit cardiaque est égal au rythme cardiaque multiplié par le volume d'éjection. En cours d'exercice, il augmente pour rencontrer les besoins de l'organisme. La pression sanguine dépend du débit cardiaque et de la résistance au courant sanguin due à la constriction artérielle. Le volume sanguin est régulé par l'hormone antidiurétique, l'aldostérone et l'hormone natriurétique atriale ; l'oxyde nitrique cause une vasodilatation qui diminue la résistance.

- Quelles sont les relations entre les régulations du rythme cardiaque et du rythme respiratoire ?



Résumé

49.1 Composants du sang

Le plasma sanguin est une matrice liquide.

Le plasma, composé de 92 % d'eau, contient des nutriments, des hormones, des ions, des protéines et des déchets (figure 49.1)

Les éléments figurés comprennent les cellules circulantes et les plaquettes.

Les cellules sanguines comprennent les érythrocytes (globules rouges), les leucocytes (globules blancs) et les plaquettes. Les érythrocytes contiennent l'hémoglobine pour le transport de l'oxygène ; les leucocytes font partie du système immunitaire. Les plaquettes contribuent à la formation du caillot sanguin (figure 49.3)

La coagulation sanguine est un exemple de cascade enzymatique.

La coagulation, à la suite d'une cascade enzymatique, aboutit à la transformation du fibrinogène, normalement dissous dans le plasma, en fibrine, une protéine insoluble. Au cours de la cicatrisation, le caillot doit être dissous.

Les éléments figurés proviennent de cellules souches.

La différenciation des cellules sanguines, ou hématopoïèse, se déroule dans la moelle osseuse à partir de cellules souches pluripotentes (figure 49.2).

49.2 Systèmes circulatoires des invertébrés

Les systèmes circulatoires ouverts déplacent les fluides dans une voie unidirectionnelle.

Les éponges font passer l'eau par des canaux, et les cnidaires font circuler l'eau dans une cavité gastrovasculaire. De petits animaux peuvent utiliser les fluides de leur cavité corporelle comme système circulatoire.

Les systèmes circulatoires fermés déplacent les fluides en boucle.

Les systèmes fermés ont un liquide circulant distinct, comme le sang, enfermé dans des vaisseaux et transporté en boucle.

49.3 Systèmes circulatoires des vertébrés

Chez les poissons, une circulation plus efficace s'est développée en parallèle avec les branchies.

Les poissons ont un cœur linéaire avec deux chambres servant de pompes, ce qui augmente l'efficacité de la circulation sanguine à travers les branchies ; à partir des branchies, le sang irrigue le reste du corps (figure 49.5).

Chez les amphibiens et la plupart des reptiles, les poumons requièrent une circulation séparée.

La circulation pulmonaire pompe le sang dans les poumons, et la circulation systémique pompe le sang vers le reste de l'organisme.

Le cœur des amphibiens a deux oreillettes, qui séparent les courants sanguins pulmonaire et périphérique, et un seul ventricule (figure 49.6). Le cœur de la plupart des reptiles contient un septum qui divise partiellement le ventricule, ce qui réduit le mélange du sang venant des oreillettes.

Les mammifères, les oiseaux et les crocodiliens ont deux systèmes circulatoires complètement séparés.

Le cœur à quatre chambres a deux ventricules (figure 49.7). La ressemblance extrême entre le cœur des mammifères et celui des oiseaux est un exemple d'évolution convergente.

49.4 Le cœur à quatre chambres et les vaisseaux sanguins

Le système cardiovasculaire fonctionne sur base du cycle cardiaque.

Le caractère unidirectionnel du flux sanguin dans le cœur est maintenu par deux valves atrioventriculaires (figure 49.9). Au cours de la diastole, les ventricules se relâchent et les oreillettes se contractent ; au cours de la systole, les ventricules se contractent.

Les contractions du muscle cardiaque sont déclenchées par des cellules autorythmiques.

La contraction est déclenchée à partir du nœud SA, un stimulateur électrique naturel. Les impulsions gagnent alors le nœud AV (figure 49.10).

Les artères et les veines se ramifient vers et à partir de toutes les parties du corps.

Les artères et les artérioles transportent le sang oxygéné dans tout l'organisme ; les veines et les veinules ramènent le sang désoxygéné dans le cœur (figure 49.7).

La pression artérielle peut être mesurée.

Un tensiomètre sert à mesurer la pression sanguine, au moment du pic (systolique) et au moment où elle est la plus basse (diastolique). La pression sanguine est exprimée comme le rapport de la systolique sur la diastolique.

49.5 Caractéristiques des vaisseaux sanguins

Les grands vaisseaux sont composés de quatre couches tissulaires.

Les parois des artères et des veines comprennent un endothélium, des fibres élastiques, des muscles lisses et du tissu conjonctif (figure 49.12). Les capillaires n'ont qu'un endothélium.

Les artères et artérioles ont évolué afin de supporter la pression.

Les artères et les artérioles ont une couche musculaire plus épaisse et plus de fibres élastiques afin de contrôler le débit sanguin et s'adapter aux changements de pression sanguine.

Les capillaires forment un vaste réseau pour l'échange de diverses substances.

Les capillaires constituent la partie du système circulatoire où les échanges ont lieu avec les tissus de l'organisme (figure 49.13).

La couche musculaire lisse est plus mince dans les veinules et les veines.

Le retour du sang dans le cœur par les veines est facilité par les contractions des muscles squelettiques et des valves unidirectionnelles (figure 49.14).

Le système lymphatique recueille les fluides qui quittent le système cardiovasculaire.

Le liquide du plasma filtre hors des capillaires, puis retourne dans la circulation par le système lymphatique, qui est unidirectionnel (figure 49.15). Le système lymphatique se connecte à la circulation sanguine à hauteur des veines sous-clavières.

Les maladies cardiovasculaires affectent le système de distribution.

L'athérosclérose est une accumulation de substances lipidiques dans les artères ; elle est une cause d'attaque cardiaque, qui est la conséquence d'un apport sanguin insuffisant au muscle cardiaque. Les AVC sont causés par blocage de l'apport sanguin au cerveau.

49.6 Régulation du courant sanguin et de la pression sanguine.

Le système nerveux peut accélérer ou ralentir le rythme cardiaque.

La noradrénaline des neurones orthosympathiques accélère le rythme cardiaque ; l'acétylcholine des neurones parasymphathiques le ralentit.

Le débit cardiaque augmente avec l'exercice.

Le rythme cardiaque et le volume d'éjection augmentent avec l'exercice.

Le réflexe des barorécepteurs maintient l'homéostasie de la pression sanguine.

La pression artérielle est contrôlée par des barorécepteurs dans l'arc aortique et les artères carotides, qui relaient les impulsions vers le centre cardiaque (figure 49.17).

Le volume sanguin est régulé par des hormones.

La régulation du volume sanguin et de la résistance artérielle est sous le contrôle de quatre hormones : (1) l'hormone antidiurétique, (2) l'aldostérone, (3) l'hormone natriurétique atriale et (4) l'oxyde nitrique.



Questions

COMPRÉHENSION

- Un ECG mesure
 - les changements de potentiel électrique pendant le cycle cardiaque.
 - la concentration de Ca^{2+} des ventricules en diastole.
 - la force de contraction des oreillettes pendant la systole.
 - le volume de sang pompé pendant le cycle de contraction.
- La systole est extrêmement importante pour la fonction cardiaque et débute dans le cœur avec
 - l'activation du nœud AV.
 - l'activation du nœud SA.
 - l'ouverture des canaux voltagés à potassium.
 - l'ouverture des valvules semi-lunaires.

3. Lequel des énoncés suivants est la séquence correcte des événements dans la circulation du sang ?
 - a. Cœur → artères → artérioles → capillaires → veinules → lymphes → cœur
 - b. Cœur → artères → artérioles → capillaires → veines → veinules → cœur
 - c. Cœur → artères → artérioles → capillaires → veinules → veines → cœur
 - d. Cœur → artérioles → artères → capillaires → veinules → veines → cœur
4. Lequel des énoncés suivants n'est pas vrai ?
 - a. Seules les artères transportent du sang oxygéné.
 - b. Les artères et les veines ont une couche de muscle lisse.
 - c. Les artères et les veines se diversifient en lits capillaires.
 - d. Des sphincters précapillaires régulent le débit sanguin dans les capillaires.
5. Parmi les caractéristiques suivantes, quelle est celle que le système lymphatique partage avec le système circulatoire ?
 - a. des ganglions qui filtrent des agents pathogènes.
 - b. un réseau d'artères.
 - c. des capillaires.
 - d. ce sont tous deux des systèmes fermés.
6. Quelle association structure et fonction est incorrecte ?
 - a. Érythrocytes : transport de l'oxygène
 - b. Plaquettes : coagulation du sang
 - c. Plasma : transport de déchets
 - d. Tous ces éléments sont corrects.
7. Quand un tensiomètre est utilisé,
 - a. les pulsations sont perçues dans l'artère lorsque la pression systolique est supérieure à la pression causée par le manchon.
 - b. les pulsations cessent lorsque la pression sanguine est inférieure à la pression systolique.
 - c. le sang ne se déplace pas dans l'artère lorsque la pression du manchon est supérieure à la pression artérielle maximale.
 - d. la pression du manchon cesse de diminuer quand elle atteint le niveau de la pression systolique.
8. Les caillots sanguins sont composés de
 - a. fibrine
 - b. fibrinogène
 - c. prothrombine
 - d. Tous ces éléments sont corrects
2. Une molécule de CO₂ qui est générée dans le muscle cardiaque du ventricule gauche ne passerait pas à travers laquelle des structures suivantes avant de quitter le corps ?
 - a. Oreillette droite
 - b. Oreillette gauche
 - c. Ventricule droit
 - d. Ventricule gauche
3. Les caillots de sang sont faits de
 - a. fibrine.
 - b. fibrinogène.
 - c. prothrombine.
 - d. tous ces éléments.
4. La différence entre le cœur d'amphibiens et de mammifères est
 - a. dans le cœur des amphibiens, le sang oxygéné et désoxygéné se mélange complètement dans le ventricule unique.
 - b. dans le cœur des amphibiens, il y a deux nœuds SA de telle sorte que les contractions se produisent simultanément dans tout le cœur.
 - c. dans le ventricule du cœur des amphibiens, des canaux internes réduisent le mélange de sang.
 - d. dans le cœur des amphibiens, seule l'aorte gauche pompe l'oxygène obtenu par diffusion à travers la peau.
5. La contraction de la couche musculaire lisse des artérioles
 - a. augmente la résistance de frottement du flux de sang.
 - b. peut être un moyen d'augmenter les échanges de chaleur par la peau.
 - c. peut augmenter le courant sanguin dans un organe.
 - d. comprend tout ce qui précède.

RÉVISION

1. Les humains ont un certain nombre de mécanismes qui aident à maintenir la pression artérielle, en particulier quand elle tombe trop bas. Expliquez comment les reins et le système endocrinien contribuent à maintenir la pression artérielle.
2. Quelle est la différence entre le sang, la lymphe et l'hémolymphe ?
3. L'évolution du cœur à quatre cavités est-elle liée à l'évolution de l'endothermie ?
4. Quels sont les symptômes cliniques qui suggèrent qu'une personne requiert l'implantation chirurgicale d'un stimulateur cardiaque ?

APPLICATION

1. Dans le cœur des vertébrés, les oreillettes se contractent à partir du haut, et les ventricules se contractent à partir du bas. Comment est-ce possible ?
 - a. La dépolarisation à partir du nœud SA traverse les oreillettes à partir du haut ; la dépolarisation du nœud AV est transmise vers le bas des ventricules avant qu'elle ne se répande dans le tissu ventriculaire.
 - b. La dépolarisation du nœud SA est lancée par des neurones moteurs qui descendent de notre cerveau ; la dépolarisation du nœud AV est lancée à partir des motoneurons provenant de notre moelle épinière.
 - c. La gravité entraîne la dépolarisation du nœud SA vers le bas à partir du haut du cœur ; la contraction du diaphragme force la dépolarisation provenant du nœud AV à se répandre de bas en haut.
 - d. Cette affirmation est fautive ; les deux se contractent à partir du bas.