

La reproduction chez les animaux

46



VOS OUTILS INTERACTIFS



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

▲ **Figure 46.1** Que sont ces minuscules sphères et où vont-elles ?

CONCEPTS CLÉS

- 46.1** Il existe deux modes de reproduction animale: sexuée et asexuée
- 46.2** La fécondation repose sur des mécanismes qui permettent la rencontre d'un spermatozoïde et d'un ovule appartenant à la même espèce
- 46.3** Les organes reproducteurs produisent et transportent les gamètes
- 46.4** L'interaction complexe entre les stimulines et les hormones sexuelles régule la reproduction chez les mammifères
- 46.5** Chez les mammifères placentaires, le développement embryonnaire se déroule entièrement dans l'utérus

La reproduction sous toutes ses formes

Peut-être pensez-vous que les minuscules sphères de la **figure 46.1** sont en train de tomber, mais, en réalité, elles sont en train de monter. Remplies de spermatozoïdes et d'ovules, ces sphères sont libérées par les polypes coralliens de couleur rose orangé qui parsèment la surface de ce récif de corail. Une fois remontées jusqu'à la surface de l'océan, ces sphères répandent leurs spermatozoïdes et leurs ovules qui, souvent, fusionnent pour former des embryons. Ces embryons deviendront des larves qui redescendront au fond de l'eau pour constituer de nouvelles colonies de coraux.

Pour les humains que nous sommes, la reproduction signifie l'accouplement d'un mâle et d'une femelle. Toutefois, la reproduction chez les animaux prend de multiples formes. Certaines espèces peuvent se reproduire sans aucune forme d'accouplement (reproduction asexuée). Chez d'autres espèces, les individus changent de sexe au cours de leur vie, ou alors ils sont à la fois mâles et femelles. Enfin, au sein de certaines espèces, telles les abeilles mellifères, seuls quelques individus peuvent se reproduire.

L'existence d'une population ne peut dépasser la durée de vie limitée de ses membres que grâce à la reproduction, c'est-à-dire à la production de nouveaux organismes à partir de ceux qui existent déjà. Dans le présent chapitre, nous étudierons la reproduction animale. Tout d'abord, nous comparerons les divers modes et mécanismes de reproduction apparus au cours de l'évolution du règne animal. Ensuite, nous examinerons plus en détail la reproduction des mammifères, en particulier celle, abondamment étudiée, de l'humain. Au prochain chapitre, nous verrons en profondeur le développement embryonnaire, mais pour le moment nous concentrerons notre étude sur la reproduction, surtout en ce qui a trait aux parents.

Il existe deux modes de reproduction animale: sexuée et asexuée

Il existe deux principaux modes de reproduction chez les animaux : sexuée et asexuée. On dit qu'il y a **reproduction sexuée** lorsque les descendants proviennent de la fusion de gamètes haploïdes donnant un **zygote** diploïde. L'animal qui se développe à partir du zygote peut à son tour engendrer des gamètes par méiose (voir la figure 13.8). Le gamète femelle, appelé **ovule**, est une cellule relativement grosse et immobile. (Pour simplifier, nous employons pour le moment le terme plus familier d'ovule, mais dans la majorité des cas, il s'agit d'un ovocyte de deuxième ordre, comme nous le verrons un peu plus loin.) Quant au gamète mâle, ou **spermatozoïde**, c'est généralement une cellule beaucoup plus petite et flagellée, donc mobile. On parle de **reproduction asexuée** lorsque les gènes des descendants proviennent d'un seul individu et qu'il n'y a pas de fusion entre un gamète femelle et un gamète mâle. Dans la plupart des cas, la reproduction asexuée repose entièrement sur la mitose. La reproduction sexuée et la reproduction asexuée sont toutes deux courantes chez les animaux.

Les mécanismes de la reproduction asexuée

Dans le règne animal, certaines formes de reproduction asexuée s'observent exclusivement chez les invertébrés. L'une d'elles est le **bourgeonnement**, un processus par lequel de nouveaux individus se forment à partir d'excroissances apparues à la face externe du parent (voir la figure 13.2). Ainsi, chez les coraux durs, le nouvel individu se forme à partir de la surface corporelle du parent et y reste associé, ce qui finira par former une colonie de plus de 1 m de diamètre qui réunit plusieurs milliers d'individus accolés. La **scissiparité** est également un mécanisme de reproduction asexuée courant chez les invertébrés, dans lequel le parent se scinde pour donner deux individus de taille à peu près égale.

Il existe un autre mécanisme de reproduction asexuée qui se déroule en deux étapes. Au cours de la **fragmentation**, le corps se dissocie en plusieurs fragments, qui subissent une **régénération**, durant laquelle les parties perdues se reconstituent. Si plus d'un morceau croît et se développe en un individu complet, il y a reproduction. Par exemple, certains annélides peuvent se scinder en plusieurs fragments, chacun devenant un ver entier en moins d'une semaine. La reproduction par fragmentation et régénération est possible chez de nombreuses espèces de coraux, d'éponges, de cnidaires et de tuniciers.

La **parthénogenèse** (de *parthenos*, qui signifie « vierge ») est un mode de reproduction plutôt singulier dans lequel un ovule se développe sans avoir été fécondé. Les invertébrés tels que certaines espèces d'abeilles, les guêpes et les fourmis se reproduisent par parthénogenèse. La progéniture peut être haploïde ou diploïde. Chez les abeilles mellifères, les mâles, appelés **faux bourdons**, sont des adultes haploïdes fertiles qui sont nés par parthénogenèse, tandis que les femelles, c'est-à-dire les ouvrières stériles et les femelles reproductrices (reines), proviennent d'ovules fécondés.

Chez les invertébrés, la parthénogenèse est réputée rare et associée à une faible densité de population. Des gardiens de zoo ont observé la parthénogenèse chez un dragon de Komodo (*Varanus komodoensis*) et chez une espèce de requin-marteau (*Sphyrna tiburo*) : dans les deux cas, les femelles avaient été gardées complètement isolées des mâles de leur espèce, mais elles s'étaient néanmoins reproduites. En 2015, une analyse d'ADN a permis de prouver un cas de parthénogenèse chez des vertébrés vivant en milieu sauvage ; il s'agissait d'un groupe de poissons-cies femelles parfaitement identiques génétiquement.

Diverses adaptations dans la reproduction sexuée

Chez de nombreuses espèces animales, dont les humains, la reproduction sexuée suppose l'accouplement d'un mâle et d'une femelle. Pour beaucoup d'animaux, toutefois, il n'est pas facile de trouver un partenaire pour s'accoupler. Des adaptations ingénieuses apparues au cours de l'évolution de certaines espèces permettent de contourner le problème en escamotant les séparations strictes entre mâles et femelles. De telles adaptations sont apparues chez les animaux sessiles (stationnaires), comme les balanes et les anatifes, des cirripèdes, chez les animaux fouisseurs, comme les palourdes (ordre des névroïdes), et chez certains parasites, comme les ténias (*Taenia spp.*). En effet, ces animaux n'ont guère d'occasions de rencontrer un représentant de l'autre sexe. L'**hermaphroditisme** leur offre une solution. Chaque individu possède un appareil génital mâle et un appareil génital femelle. (*Hermaphrodite* est la contraction d'« Hermès » et d'« Aphrodite », qui désignent respectivement le dieu grec messager des Olympiens et la déesse grecque de l'amour et de la fécondité.)

Comme chaque hermaphrodite joue alors à la fois le rôle du mâle et celui de la femelle, tous les individus rencontrés sont des partenaires potentiels. Chacun peut donner et recevoir des spermatozoïdes durant l'accouplement, comme les limaces de mer de la figure 46.2. Chez certaines espèces, dont de nombreux coraux, les hermaphrodites peuvent également s'auto-féconder, ce qui signifie qu'ils n'ont pas besoin de partenaires pour se reproduire.

▼ **Figure 46.2** La reproduction chez les hermaphrodites. Durant cet accouplement de limaces de mer, ou nudibranches (*Nembrotha chamberlaini*), chaque hermaphrodite fournit les spermatozoïdes qui fécondent les ovules de l'autre.



La girelle à tête bleue (*Thalassoma bifasciatum*), un poisson-labre qu'on trouve dans la mer des Caraïbes, est un exemple d'un mode de reproduction unique. Chaque mâle vit seul avec un harem de femelles. Lorsque cet unique mâle du harem meurt, la reproduction pourrait devenir impossible, mais il n'en est rien : la plus grande femelle du harem change de sexe et devient le nouveau mâle. En moins d'une semaine, l'individu ainsi transformé produit des spermatozoïdes au lieu d'ovules. Quelle pression sélective au cours de l'évolution des girelles à tête bleue a pu donner lieu à ce changement de sexe de la plus grosse femelle du harem ? Comme le mâle défend le harem contre les intrus, il se peut que, du point de vue de la reproduction, une grande taille présente un avantage plus important pour les mâles que pour les femelles.

Certaines espèces d'huîtres subissent également une inversion de sexe. Dans leur cas, les individus se reproduisent en tant que mâles et par la suite en tant que femelles, lorsque leur taille augmente. Comme la production de gamètes augmente habituellement avec la taille, le fait de passer du sexe mâle au sexe femelle (plutôt que l'inverse) maximise la production de gamètes femelles. Le succès reproducteur s'en trouve amélioré : les huîtres étant des animaux sédentaires qui libèrent leurs gamètes dans l'eau environnante au lieu de s'accoupler, le fait de libérer plus de gamètes augmente le nombre de descendants.

Les cycles de reproduction

Chez la plupart des animaux, l'activité de reproduction, qu'elle soit sexuée ou asexuée, suit un cycle qui est souvent associé à des changements saisonniers. Ce cycle est déterminé par des hormones dont la sécrétion dépend de déclencheurs environnementaux. De cette manière, les animaux peuvent économiser leurs ressources et s'y consacrer seulement lorsqu'ils disposent des sources d'énergie nécessaires et lorsque les conditions du milieu favorisent la survie des jeunes. Par exemple, les brebis (*Ovis aries*) ont un cycle reproducteur qui dure de 15 à 17 jours au milieu duquel elles ovulent. L'**ovulation** est la libération d'ovules (ou d'ovocytes de deuxième ordre) matures et a lieu au milieu de chaque cycle. Les cycles de la brebis ne surviennent toutefois qu'à l'automne et au début de l'hiver, et la durée de chaque grossesse est de cinq mois. Ainsi, la plupart des agneaux naissent à la fin de l'hiver ou au printemps, à un moment où leurs chances de survie sont maximales.

Étant donné que la température saisonnière est souvent un déclencheur important dans la reproduction, les changements climatiques risquent de perturber le succès reproducteur. Des chercheurs ont démontré un tel effet chez le caribou, ou renne (*Rangifer tarandus*), au Groenland. Au printemps, les caribous migrent vers des terrains de mise bas pour se nourrir de végétaux en germination, mettre bas et prendre soin de leurs petits. Avant 1993, l'arrivée du caribou sur les terrains de mise bas coïncidait avec la brève période durant laquelle les plantes étaient nutritives et digestes. Entre 1993 et 2006, les températures printanières moyennes dans ces zones de mise bas ont augmenté de plus de 4 °C, de sorte que les plantes germent maintenant deux semaines plus tôt. Comme c'est la longueur des journées qui déclenche la migration des caribous, et non la température, la mise bas des caribous ne coïncide plus avec la germination des plantes. Or, sans nutrition adéquate pour les femelles qui allaitent, le nombre de petits a baissé de 75 % depuis 1993. Pour

en savoir davantage sur les effets des changements climatiques sur les caribous et sur les autres organismes, voir la figure 56.30 Faites des liens.

On observe également des cycles de reproduction chez les animaux qui peuvent se reproduire de façon sexuée ou asexuée. Pensons, par exemple, à la puce d'eau (du genre *Daphnia*). Une puce d'eau femelle peut produire des ovules de deux types : un des deux types doit être fécondé pour se développer, tandis que l'autre n'en a pas besoin et se développe par parthénogenèse. Les daphnies se reproduisent par voie asexuée lorsque les conditions environnementales sont favorables et par voie sexuée quand elles sont exposées à un stress environnemental. Le passage de la reproduction sexuée à la reproduction asexuée est donc passablement lié à la saison.

Chez certains lézards à queue en fouet se reproduisant par voie asexuée, le cycle des comportements de parade nuptiale associé à la reproduction sexuée semble témoigner de leur évolution. Chez ces espèces du genre *Aspidoscelis*, la reproduction est exclusivement asexuée, et il n'y a pas de mâles. Néanmoins, les individus imitent les comportements de parade nuptiale et d'accouplement qu'on observe chez les espèces sexuées du même genre. Pendant la saison de reproduction, l'une des femelles du couple joue le rôle du mâle (**figure 46.3a**). Les femelles changent ainsi de rôle deux ou trois fois dans la saison. Chaque individu adopte le comportement femelle lorsque la quantité d'oestradiol est élevée, puis il adopte le comportement mâle lorsque la concentration de progestérone est à son maximum (**figure 46.3b**). Les chances que la femelle ovule sont accrues si elle est montée par un pseudo-mâle pendant la période critique du cycle hormonal. Les lézards qui vivent isolément pondent moins d'œufs que ceux qui s'accouplent, même si dans les deux cas il n'y a pas de fécondation. Il semble que les lézards parthénogénétiques, qui descendent d'espèces comprenant deux sexes chez des individus distincts, aient encore besoin d'une certaine stimulation sexuelle pour assurer le meilleur succès reproducteur.

La reproduction sexuée : une énigme dans l'évolution

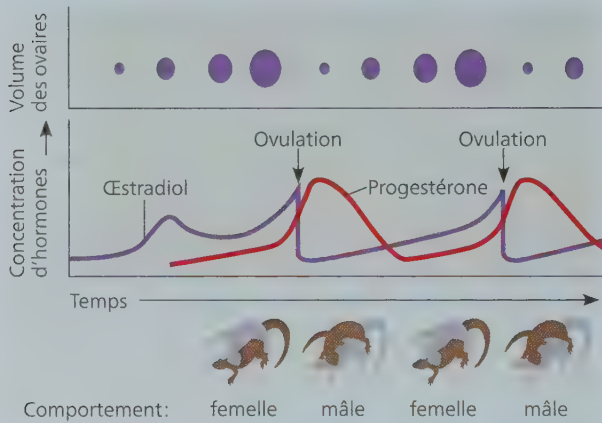
ÉVOLUTION Pour nous, il va de soi que notre espèce, comme de nombreuses autres, se reproduit par voie sexuée. Et pourtant, quand on y pense, l'existence même de la reproduction sexuée est déconcertante. Afin de comprendre pourquoi, prenons l'exemple d'une population animale dans laquelle la moitié des femelles se reproduisent par mode sexué, et l'autre moitié, par mode asexué. Nous supposons que le nombre de descendants par femelle est une constante ; dans ce cas-ci, nous supposons qu'il est de deux. Les deux descendants d'une femelle asexuée seront des filles qui donneront chacune naissance à deux autres filles capables de se reproduire. Par contre, chez la femelle sexuée, la moitié des descendants seront des mâles (**figure 46.4**). Le nombre de descendants sexués demeurera le même dans chaque génération puisqu'il faut un mâle et une femelle pour produire des descendants. Par conséquent, l'état asexué augmentera en fréquence à chaque génération. Toutefois, malgré ce « double coût », la reproduction sexuée demeure même chez les espèces animales qui peuvent aussi se reproduire de manière asexuée.

Compte tenu de ce double coût, quel avantage la reproduction sexuée comporte-t-elle ? La réponse n'est toujours pas claire. La plupart des hypothèses font valoir les combinaisons

▼ **Figure 46.3** Le comportement sexuel chez les lézards parthénogénétiques. Le lézard à queue en fouet (*Aspidoscelis uniparens*), qui vit dans les déserts semi-arides, est une espèce composée uniquement de femelles. Ces dernières se reproduisent par parthénogenèse, c'est-à-dire par la formation d'un œuf non fécondé, mais l'ovulation est favorisée par le comportement d'accouplement.



(a) Sur cette photographie, les deux lézards sont des femelles d'*A. uniparens*. La femelle du dessus joue le rôle du mâle. Deux ou trois fois pendant la saison de reproduction, les individus changent de rôle.



(b) Il y a une corrélation entre le changement de comportement sexuel d'*A. uniparens* et ses cycles d'ovulation et de sécrétion d'œstradiol et de progestérone, deux hormones sexuelles. Les dessins montrent la variation du volume des ovaires, des taux d'hormones et du comportement sexuel d'un lézard femelle (en brun).

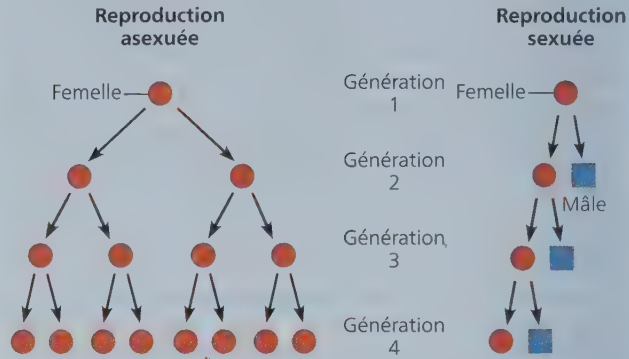
INTERPRÉTEZ LES DONNÉES ► Si vous deviez tracer les taux d'hormones pour le lézard illustré en gris, comment ce dernier différencierait-il du tracé montré en (b) ?

généétiques uniques qui dérivent des gènes parentaux lors de la recombinaison méiotique et de la fécondation : en engendrant une progéniture aux génotypes variés, la reproduction sexuée augmente le succès reproducteur des parents compte tenu des changements relativement rapides de l'environnement (y compris les agents pathogènes). En revanche, on suppose que la reproduction asexuée est plus avantageuse dans les environnements stables et favorables puisqu'elle conserve les génotypes favorables avec fidélité et précision.

Plusieurs raisons expliquent pourquoi les combinaisons génétiques uniques issues de la reproduction sexuée sont avantageuses. L'une d'elles veut que les combinaisons génétiques

▼ **Figure 46.4** Le «handicap» de la reproduction sexuée.

Ces schémas comparent le mode sexué et le mode asexué sur quatre générations, en supposant que deux individus par femelle survivent.



favorables consécutives à la recombinaison accélèrent vraisemblablement l'adaptation. L'idée semble évidente, mais cet avantage théorique ne vaut que si le taux de mutations est élevé et que la taille de la population est petite. Selon une autre explication, la recombinaison génétique associée à la reproduction sexuée permettrait peut-être à une population de se débarrasser plus rapidement des lots génétiques nuisibles.

RETOUR SUR LE CONCEPT 46.1

1. Faites la différence entre la reproduction asexuée et la reproduction sexuée, et faites ressortir les résultats de ces deux modes de reproduction.
2. La parthénogenèse est le mode de reproduction asexuée le plus répandu chez les animaux qui, autrement, se reproduisent sexuellement. Quelle caractéristique de la parthénogenèse pourrait expliquer cette observation ?
3. **ET SI ?** ► Si un hermaphrodite s'autoféconde, sa progéniture sera-t-elle identique au parent ? Expliquez votre réponse.
4. **FAITES DES LIENS** ► Chez les végétaux, quels exemples de reproduction ressemblent le plus à la reproduction asexuée des animaux ? (Voir le concept 38.2.)

Voir les réponses proposées à l'appendice A.

CONCEPT 46.2

La fécondation repose sur des mécanismes qui permettent la rencontre d'un spermatozoïde et d'un ovule appartenant à la même espèce

La **fécondation**, c'est-à-dire l'union du spermatozoïde et de l'ovule, peut être externe ou interne. Chez les espèces à **fécondation externe**, la femelle libère les ovules dans l'environnement, où le mâle les féconde (**figure 46.5**). Chez d'autres, la **fécondation est interne** : le mâle dépose les spermatozoïdes à l'intérieur

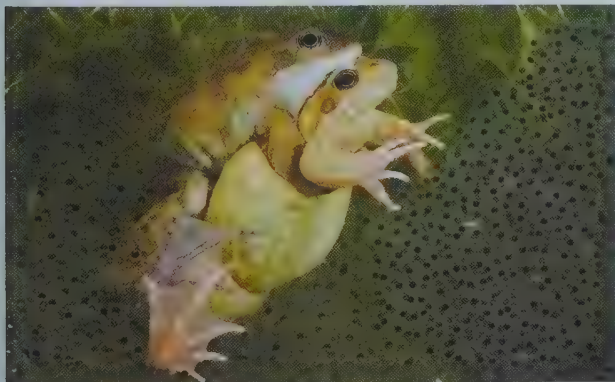
ou à l'entrée du système reproducteur de la femelle, de sorte que la fécondation se fait dans l'organisme de la femelle. (Nous aborderons en détail les mécanismes cellulaires et moléculaires de la fécondation au concept 47.1.)

La fécondation externe nécessite presque toujours un habitat humide, à la fois pour empêcher les gamètes, dont la production est généralement extrêmement abondante, de se dessécher et pour permettre aux spermatozoïdes de circuler librement jusqu'à l'ovule. De nombreux invertébrés aquatiques libèrent tout simplement leurs ovules et leurs spermatozoïdes dans le milieu externe. La fécondation s'effectue alors sans qu'il y ait contact physique entre les parents. Cependant, un certain synchronisme est nécessaire pour que les spermatozoïdes matures rencontrent des ovules mûrs.

Chez certaines espèces à fécondation externe, les individus regroupés en un même lieu libèrent leurs gamètes dans l'eau simultanément, un processus appelé *frai*. Cette synchronicité de la libération des gamètes est contrôlée soit par des substances chimiques, soit par des facteurs environnementaux. Dans certains cas, ce sont les substances chimiques libérées en même temps que les gamètes d'un des individus de la population qui déclenchent l'émission des gamètes des autres individus. Dans d'autres cas, la température ou la photopériode provoquent la libération des gamètes de tous les individus d'une population. Par exemple, le ver palolo (*Palola viridis*) du Pacifique Sud, tout comme le corail de la figure 46.1, synchronise son frai avec la saison et le cycle lunaire. Au printemps, lorsque la lune est dans son dernier quartier, les vers palolo se divisent en deux et libèrent des segments de queue gorgés de spermatozoïdes ou d'ovules. Ces segments montent à la surface de l'océan et éclatent en si grand nombre que la mer semble laiteuse. Les spermatozoïdes fécondent rapidement les ovules flottants, de sorte qu'en quelques heures seulement, la frénésie reproductrice annuelle des vers palolo est terminée.

Lorsque la fécondation externe n'est pas synchrone au sein d'une population, des individus peuvent avoir un comportement sexuel qui permet à un mâle de féconder les ovules d'une

▼ **Figure 46.5 La fécondation externe.** De nombreuses espèces d'amphibiens se reproduisent par fécondation externe. Chez la plupart de ces espèces, des adaptations comportementales font en sorte qu'un mâle est présent quand la femelle pond. Dans l'exemple de fécondation externe qu'illustre cette photographie, une grenouille femelle étreinte par un mâle (sur le dessus) vient juste de pondre dans l'eau. Au même moment, le mâle a arrosé les œufs de ses spermatozoïdes (non visibles), et la fécondation externe est alors survenue dans l'eau.



femelle (voir la figure 46.5). En provoquant la libération à la fois de spermatozoïdes et d'ovules, ce comportement augmente les chances de succès de la fécondation.

La fécondation interne est essentiellement une adaptation à la vie terrestre qui permet à un spermatozoïde d'atteindre un ovule lorsque les organismes reproducteurs vivent dans un environnement externe sec. Elle nécessite des systèmes reproducteurs complexes et compatibles, ainsi qu'une collaboration des individus qui aboutit à l'accouplement. L'organe copulateur du mâle libère les spermatozoïdes, tandis que les voies génitales de la femelle sont souvent dotées de réceptacles pour entreposer ces spermatozoïdes et les conduire jusqu'aux ovules.

Quel que soit le mode de fécondation, les animaux qui s'accouplent peuvent utiliser les *phéromones*, des médiateurs chimiques qui, libérés par un individu, influent sur la physiologie ou le comportement d'autres individus de la même espèce. Ces petites molécules volatiles ou hydrosolubles se dispersent facilement dans l'environnement et, à l'instar des hormones, sont actives à de très faibles concentrations (voir le concept 45.1). De nombreuses phéromones sont des substances qui exercent une attraction sexuelle. Un insecte mâle, comme le bombyx du mûrier (*Bombyx mori*), peut détecter les phéromones d'une femelle de son espèce se trouvant à plus de 1 km.

Les données concernant les phéromones humaines n'ont pas permis d'établir de conclusions indiscutables. On a déjà avancé que les femmes qui vivent ensemble produisaient des phéromones qui finissent par entraîner la synchronicité de leurs cycles menstruels, mais les analyses statistiques effectuées à ce sujet ne se sont pas avérées concluantes.

Assurer la survie de la progéniture

Les espèces animales à fécondation interne produisent habituellement moins de gamètes que les espèces à fécondation externe, mais les zygotes survivent en plus grand nombre. Ce taux de survie supérieur relève en partie du fait que le développement interne des zygotes met les embryons à l'abri des prédateurs potentiels. De plus, la fécondation interne est associée à des mécanismes qui assurent une meilleure protection à l'embryon et des soins parentaux aux petits. Par exemple, les embryons des oiseaux et autres reptiles ainsi que des mammifères monotrèmes se développent dans des œufs dont la coquille et les membranes internes préviennent les pertes d'eau et les dommages physiques (voir la figure 34.26). En comparaison, les œufs des poissons et des amphibiens ne sont dotés que d'un revêtement gélatineux et n'ont pas de membranes internes.

Au lieu de se développer dans une coquille protectrice, l'embryon de nombreux animaux se développe dans le système reproducteur de la femelle. Les mammifères marsupiaux comme les kangourous (famille des macropodidés) et les opossums (famille des didelphidés) n'abritent l'embryon dans leur utérus que durant un court laps de temps. Celui-ci rampe ensuite seul jusqu'à l'extérieur, pour terminer son développement accroché à une glande mammaire, dans la poche ventrale (marsupium) de la mère. Les embryons des euthériens (mammifères placentaires), quant à eux (les moutons et les humains, par exemple), se développent entièrement à l'intérieur de l'utérus. Les nutriments qui leur sont nécessaires leur viennent de la circulation sanguine maternelle par l'intermédiaire d'un organe particulier appelé *placenta*. Les embryons de certains poissons et requins

terminent également leur développement à l'intérieur de la mère, sans qu'il y ait toutefois d'échanges nutritionnels entre la mère et l'embryon.

Quand un caribou ou un kangourou naît, ou qu'un aiglon sort de son œuf, il est dépendant. Les mammifères doivent donner la tétée, et les oiseaux doivent nourrir leurs oisillons. Les exemples de soins parentaux sont beaucoup plus nombreux qu'on le pense chez les animaux, même chez certains invertébrés (figure 46.6).

La production et la rencontre des gamètes

La reproduction sexuée nécessite la présence de groupes de cellules qui sont les précurseurs des gamètes. Les cellules dédiées à cette fonction apparaissent souvent très tôt au cours du développement embryonnaire, mais elles demeurent inactives pendant que le plan d'organisation corporelle prend forme. Les cycles de croissance et de mitose augmentent ensuite le nombre de cellules disponibles pour la fabrication des ovules ou des spermatozoïdes.

Chez les animaux, les systèmes reproducteurs produisant des gamètes à partir des cellules précurseurs pour les rendre disponibles à la fécondation sont très variés. Les **gonades** sont les organes qui fabriquent les gamètes chez beaucoup d'animaux, mais il y a des exceptions, par exemple le ver palolo dont nous avons parlé plus haut. Ce ver et la plupart des polychètes (embranchement des annélides) ont des sexes séparés, mais sont dépourvus de gonades à proprement parler. Les gamètes proviennent de cellules indifférenciées qui tapissent le coelome (cavité corporelle). Au fur et à mesure que les gamètes arrivent à maturité, ils se détachent de la paroi corporelle et remplissent le coelome. Selon l'espèce, les ouvertures du système urinaire de ces vers libèrent les gamètes parvenus à maturité, ou bien le gonflement de la masse d'œufs fait éclater une portion du corps de l'individu, ce qui provoque l'éparpillement des œufs dans le milieu externe (un tel phénomène se produit également chez certains insectes).

▼ Figure 46.6 Les soins parentaux prodigués par un invertébré.

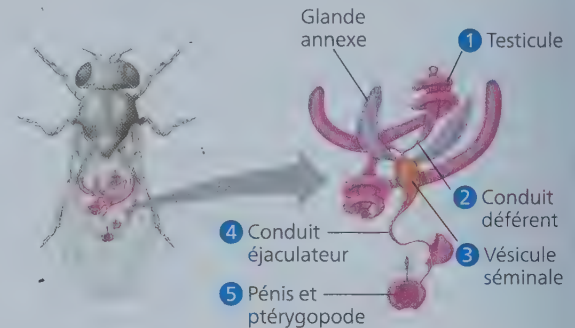
Par rapport à beaucoup d'autres insectes, la femelle de la punaise d'eau géante (*Belostoma spp.*) produit relativement peu de descendants, mais elle fournit des soins parentaux efficaces. Après la fécondation interne, la femelle colle les œufs fécondés sur le dos du mâle (sur la photo). Le mâle les porte sur son dos durant des jours. Il fait circuler de l'eau sur les œufs, afin de conserver leur humidité, de les oxygéner et de les protéger contre les parasites.



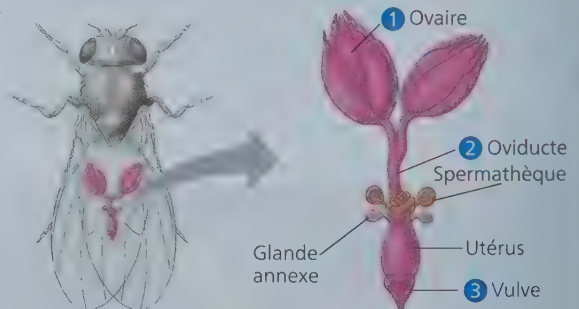
Des systèmes reproducteurs plus élaborés comportent des tubes accessoires et des glandes qui transportent, alimentent et protègent les gamètes ainsi que, quelquefois, les embryons en développement. Par exemple, les drosophiles (*Drosophila spp.*) et la plupart des insectes ont des sexes séparés et des systèmes reproducteurs complexes (figure 46.7). Chez de nombreuses espèces, le système reproducteur de la femelle comporte également une **spermathèque**, un sac dans lequel les spermatozoïdes sont entreposés durant plusieurs semaines (drosophiles), voire plusieurs années (abeilles). Comme la femelle libère des gamètes mâles de la spermathèque uniquement en réponse à certains stimulus, la fécondation a lieu dans des conditions propices au développement embryonnaire et à la survie des descendants.

Les systèmes reproducteurs des vertébrés présentent des variantes peu nombreuses mais importantes. Ainsi, chez certains vertébrés, l'utérus comporte deux branches, tandis que chez

▼ Figure 46.7 Un exemple de l'anatomie du système reproducteur d'un insecte. Les numéros encerclés indiquent l'ordre dans lequel se déplacent les spermatozoïdes et les ovules.



(a) **Drosophile mâle.** Les spermatozoïdes se forment dans les testicules, circulent dans un conduit déférent et sont entreposés dans une vésicule séminale. Au cours de l'éjaculation, le mâle libère des spermatozoïdes et du liquide provenant des glandes annexes. (Certaines espèces d'insectes et d'autres arthropodes possèdent des appendices appelés ptérygopodes qui servent à retenir la femelle pendant l'accouplement.)



(b) **Drosophile femelle.** Les ovules se forment dans les ovaires, passent dans les oviductes et se déposent dans l'utérus. Après l'accouplement, les spermatozoïdes sont entreposés dans la spermathèque, sac relié au vagin par un court conduit. La femelle utilise un spermatozoïde entreposé pour féconder chaque ovule au moment où il entre dans l'utérus avant de l'expulser par la vulve.

HABILETÉS VISUELLES ► En vous basant sur ces illustrations, décrivez le parcours des spermatozoïdes de la drosophile, depuis leur formation jusqu'à la fécondation.

d'autres, dont les humains et les oiseaux, l'utérus ne comporte qu'une cavité. Chez de nombreux vertébrés autres que les mammifères, les systèmes digestif, urinaire et reproducteur ont tous le même orifice, à l'extrémité postérieure du corps : le **cloaque**. Il en était probablement de même chez les ancêtres des vertébrés. Les mâles de ces espèces n'ont pas de pénis bien développé ; ils éjaculent par simple éversion du cloaque. Par contre, la plupart des mammifères n'ont pas de cloaque et leur système digestif possède son propre orifice, à l'extrémité postérieure du corps. De plus, la plupart des femelles ont des orifices distincts pour les systèmes urinaire et reproducteur.

Bien que la fécondation comporte l'union d'un seul ovule et d'un seul spermatozoïde, les animaux s'accouplent souvent avec plus d'un membre de l'autre sexe. De fait, la monogamie, c'est-à-dire la formation d'un couple exclusif pendant une période prolongée, est relativement rare chez les animaux, y compris la plupart des mammifères. Au cours de l'évolution, cependant, des mécanismes ont évolué de manière à favoriser le succès

reproducteur d'un mâle avec une seule femelle et réduit la possibilité que cette dernière se reproduise avec un autre partenaire. Par exemple, certains insectes mâles transfèrent des sécrétions qui rendent la femelle moins réceptive à la parade des autres mâles, réduisant ainsi les chances qu'elle s'accouple avec un autre partenaire.

Les femelles peuvent-elles également influencer le succès reproducteur relatif de leurs partenaires ? Cette question intriguait deux scientifiques et collègues européens, Rhonda Snook et David Hosken. En étudiant des drosophiles femelles qui copulaient avec un mâle puis avec un second mâle, ces chercheurs ont tenté de déterminer ce qui arrivait aux spermatozoïdes du premier accouplement. Comme le montre la **figure 46.8**, ils ont constaté que la drosophile femelle exerce une influence déterminante sur l'issue de ses accouplements multiples. Cependant, les mécanismes par lesquels les gamètes et les individus se font concurrence durant la reproduction ne sont pas encore bien compris et demeurent des domaines de recherche très actifs.

DÉMARCHE SCIENTIFIQUE

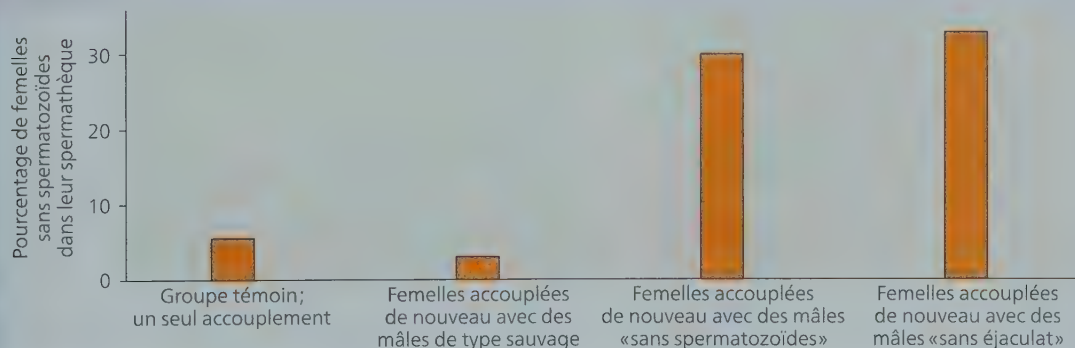
INVESTIGATION

Pourquoi l'utilisation des spermatozoïdes est-elle biaisée lorsque la drosophile femelle s'accouple deux fois ?

■ **HYPOTHÈSE** ■ Quand une drosophile s'accouple deux fois, 80 % de ses descendants sont issus du second accouplement. Des scientifiques ont émis l'hypothèse que l'éjaculat du deuxième accouplement déplaçait les spermatozoïdes entreposés.

■ **EXPÉRIENCE** ■ Pour vérifier leur hypothèse, Rhonda Snook de l'Université de Sheffield, en Angleterre, et David Hosken, de l'Université de Zurich, en Suisse, ont utilisé deux sortes de mâles mutants dont les systèmes reproducteurs n'étaient pas fonctionnels. Bien que tous puissent s'accoupler, les premiers ne produisaient pas d'éjaculat, tandis que les seconds produisaient des éjaculats sans spermatozoïdes. Les chercheurs ont accouplé une première fois des femelles avec des mâles de type sauvage, puis une seconde fois avec des mâles de type sauvage, ou avec des mâles «sans spermatozoïdes» ou avec des mâles «sans éjaculat». Les femelles du groupe témoin ne s'accouplaient qu'une fois (avec des mâles de type sauvage). Les chercheurs ont ensuite disséqué chaque femelle au microscope et noté si les spermatozoïdes étaient absents de la spermathèque, principal organe d'entreposage des spermatozoïdes.

■ RÉSULTATS ■



■ **CONCLUSION** ■ Étant donné que le second accouplement réduit l'entreposage des spermatozoïdes alors qu'aucun spermatozoïde ou liquide n'est transféré, l'hypothèse selon laquelle l'éjaculat d'un second accouplement déplace les spermatozoïdes entreposés est incorrecte. Il semble plutôt que les femelles se débarrassent parfois des spermatozoïdes entreposés en réaction à un nouvel accouplement. Cela pourrait être une façon pour elles de remplacer la réserve de spermatozoïdes probablement moins vigoureux par de nouveaux plus frais.

Source des données: R. R. Snook et D. J. Hosken, Sperm death and dumping in *Drosophila*, *Nature* 428 : 939-941 (2004).

ET SI ? ▶ Si les mâles du premier accouplement avaient un allèle mutant qui ferait en sorte que le caractère dominant corresponde à des yeux de petite taille (voir le concept 14.1), quelle fraction des femelles produiraient des descendants avec ce type d'yeux ?

1. De quelle façon la fécondation interne facilite-t-elle la vie terrestre ?
2. Quels mécanismes sont apparus au cours de l'évolution chez les animaux (a) à fécondation externe et (b) à fécondation interne pour assurer la survie de leur descendance jusqu'à l'âge adulte ?
3. **FAITES DES LIENS** ► Quelles sont les différences et les ressemblances entre l'utérus d'un insecte et l'ovaire d'une plante à fleurs ? (Voir la figure 38.6.)

Voir les réponses proposées à l'appendice A.

CONCEPT 46.3

Les organes reproducteurs produisent et transportent les gamètes

Maintenant que nous avons exploré les caractéristiques générales de la reproduction chez les animaux, nous consacrerons le reste du chapitre aux humains, en commençant par l'anatomie du système reproducteur de chaque sexe.

L'anatomie du système reproducteur de l'homme

Chez l'humain, les organes reproducteurs externes mâles sont le scrotum et le pénis. Les organes reproducteurs internes sont les gonades, qui produisent les spermatozoïdes et les hormones, les glandes annexes, qui sécrètent des substances essentielles à la mobilité des spermatozoïdes, et des conduits destinés au transport des spermatozoïdes et des sécrétions glandulaires (figure 46.9).

Les testicules

Les gonades mâles, appelées **testicules**, produisent des spermatozoïdes dans deux conduits enroulés de façon compacte et entourés de plusieurs épaisseurs de tissu conjonctif. Ces conduits sont les **tubules séminifères contournés**. Chez la plupart des mammifères, la bonne formation des spermatozoïdes se fait seulement si la température des testicules est inférieure à la température du reste du corps. C'est pourquoi les testicules des humains et de la plupart des mammifères sont situés à l'extérieur de la cavité pelvienne, dans l'enveloppe de peau qu'est le **scrotum**. Grâce à ce dernier, la température des testicules est inférieure d'environ 2 °C à celle du reste du corps.

Les testicules se forment un peu plus haut dans la cavité pelvienne et descendent dans le scrotum juste avant la naissance. Chez de nombreux rongeurs, les canaux par lesquels les testicules descendent dans le scrotum restent ouverts; les gonades peuvent donc se rétracter à l'intérieur de la cavité pelvienne entre les saisons d'accouplement, ce qui interrompt la maturation des spermatozoïdes. Chez certains mammifères dont la température corporelle est suffisamment basse pour permettre la formation des spermatozoïdes, par exemple chez les baleines et les éléphants, les testicules restent en permanence dans la cavité pelvienne.

Les conduits

Venant des tubules séminifères contournés des testicules, les spermatozoïdes pénètrent dans les canalicules efférents qui forment l'**épididyme**. Il leur faut environ trois semaines pour traverser les 6 m de canalicules qui forment chaque épididyme de l'homme. Durant cette migration, les spermatozoïdes complètent leur maturation et acquièrent leur mobilité. À l'**éjaculation**, ils sont expulsés de l'épididyme et passent par le **conduit déférent**, dont les parois sont constituées d'épaisses couches musculaires. Chacun des deux conduits déférents (un pour chaque épididyme) quitte le scrotum, contourne la vessie et rejoint derrière elle le conduit provenant de la vésicule séminale, pour former un court **conduit éjaculateur**. Les deux conduits éjaculateurs aboutissent dans l'**urètre**, conduit qui draine à la fois le système urinaire et le système reproducteur. L'urètre passe au centre du pénis et débouche sur l'extérieur par le méat urétral (situé à l'extrémité du pénis).

Les glandes annexes

Trois types de glandes annexes ajoutent leurs sécrétions aux spermatozoïdes pour former le **sperme**, le liquide qui est éjaculé : les vésicules séminales, la prostate et les glandes bulbo-urétrales. Les deux **vésicules séminales** produisent environ 60 % du volume total du sperme. Le liquide provenant des vésicules séminales est visqueux, jaunâtre et alcalin. Il renferme du mucus, du fructose (source d'énergie pour les spermatozoïdes), une enzyme de coagulation, de l'acide ascorbique et des régulateurs locaux appelés prostaglandines (voir le concept 45.1).

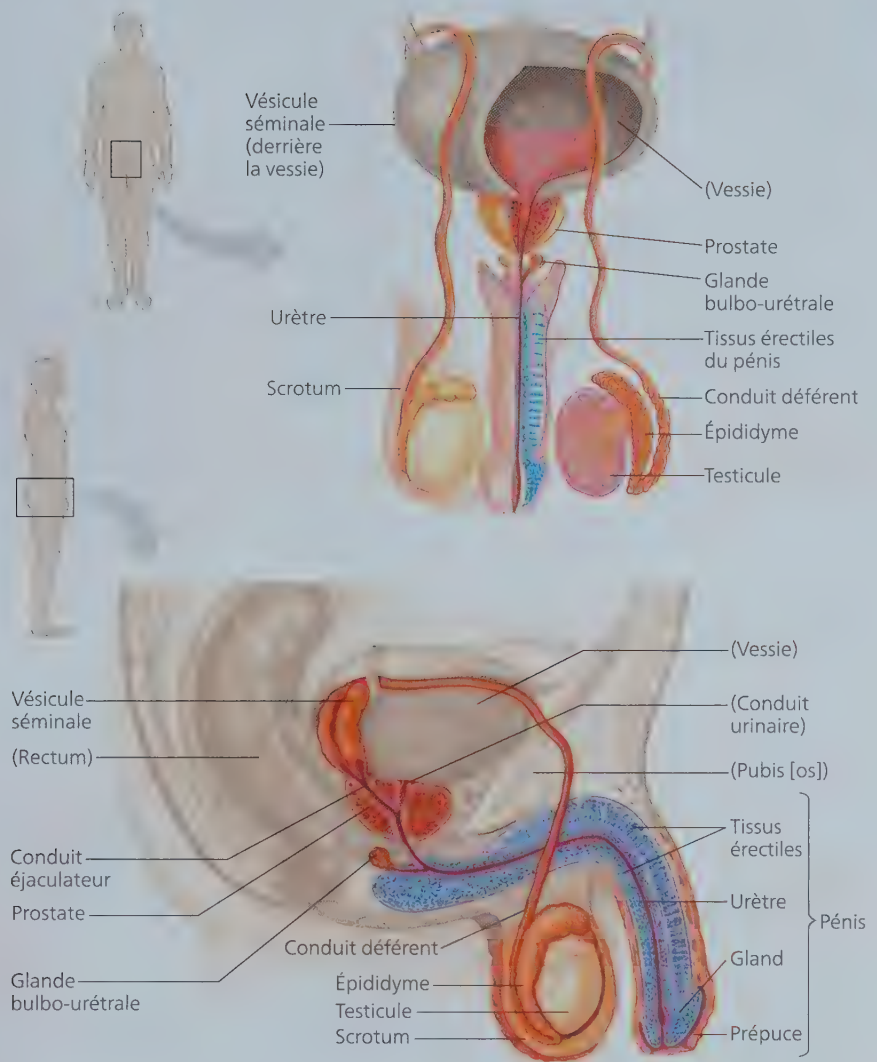
La **prostate** déverse directement ses sécrétions dans l'urètre, par des petits conduits. Le liquide prostatique, clair et laiteux, contient des enzymes anticoagulantes et du citrate (la forme ionisée de l'acide citrique, un nutriment destiné aux spermatozoïdes). La prostate est le siège de problèmes médicaux courants chez l'homme ayant dépassé la quarantaine. Plus de la moitié des hommes de ce groupe d'âge et presque tous les hommes de plus de 70 ans souffrent d'un gonflement bénin (non cancéreux) de la prostate. Le cancer de la prostate est l'un des plus courants chez l'homme, le plus souvent après l'âge de 65 ans.

Les **glandes bulbo-urétrales** (ou glandes de Cowper) sont une paire de petites glandes situées à proximité du bulbe du pénis, sous la prostate, qui déversent leurs sécrétions dans l'urètre. Avant l'éjaculation, elles sécrètent un liquide clair qui neutralise l'acidité de l'urine restant dans l'urètre. Il a été montré que le liquide bulbo-urétral entraîne avec lui des spermatozoïdes libérés avant l'éjaculation, ce qui contribue peut-être au taux d'échec élevé de la méthode contraceptive du coït interrompu.

Le pénis

Le **pénis** humain comprend l'urètre ainsi que trois cylindres de tissus érectiles spongieux. Au cours de l'excitation sexuelle, les tissus érectiles s'emplissent de sang artériel. L'augmentation progressive de la pression dans ces tissus finit par comprimer les veines drainant le pénis, lequel se gorge alors de sang. L'érection qui en résulte permet l'insertion du pénis dans le vagin. La dysfonction érectile, qui est une incapacité temporaire d'obtenir une érection, peut résulter d'une consommation d'alcool ou de certains médicaments, être la manifestation de troubles émotionnels ou être due au vieillissement. Les hommes souffrant

► **Figure 46.9** L'anatomie du système reproducteur de l'homme. En guise de guide, certaines des structures qui ne servent pas à la reproduction sont placées entre parenthèses.



d'une dysfonction érectile chronique peuvent recourir à certains médicaments, comme le Viagra, qui favorisent l'action vasodilatatrice du monoxyde d'azote (NO; voir le concept 45.1). Ce régulateur local provoque un relâchement des muscles lisses dans les vaisseaux sanguins du pénis. Le sang peut alors pénétrer abondamment dans les tissus érectiles et maintenir une érection. Bien que tous les mammifères doivent compter sur l'érection du pénis pour s'accoupler, le pénis des chiens (*Canis familiaris*), des ratons laveurs (*Procyon lotor*), des morses (*Odobenus rosmarus*) et de plusieurs autres mammifères renferme en outre un os, appelé baculum, qui semble contribuer à raidir le pénis lors de l'accouplement.

Une peau assez épaisse enveloppe le corps principal du pénis. La couche externe du **gland** du pénis (l'extrémité du pénis) est, quant à elle, beaucoup plus fine, ce qui la rend beaucoup plus sensible à la stimulation. Chez l'homme, un repli de peau appelé **prépuce** recouvre le gland. La circoncision consiste en l'ablation du prépuce.

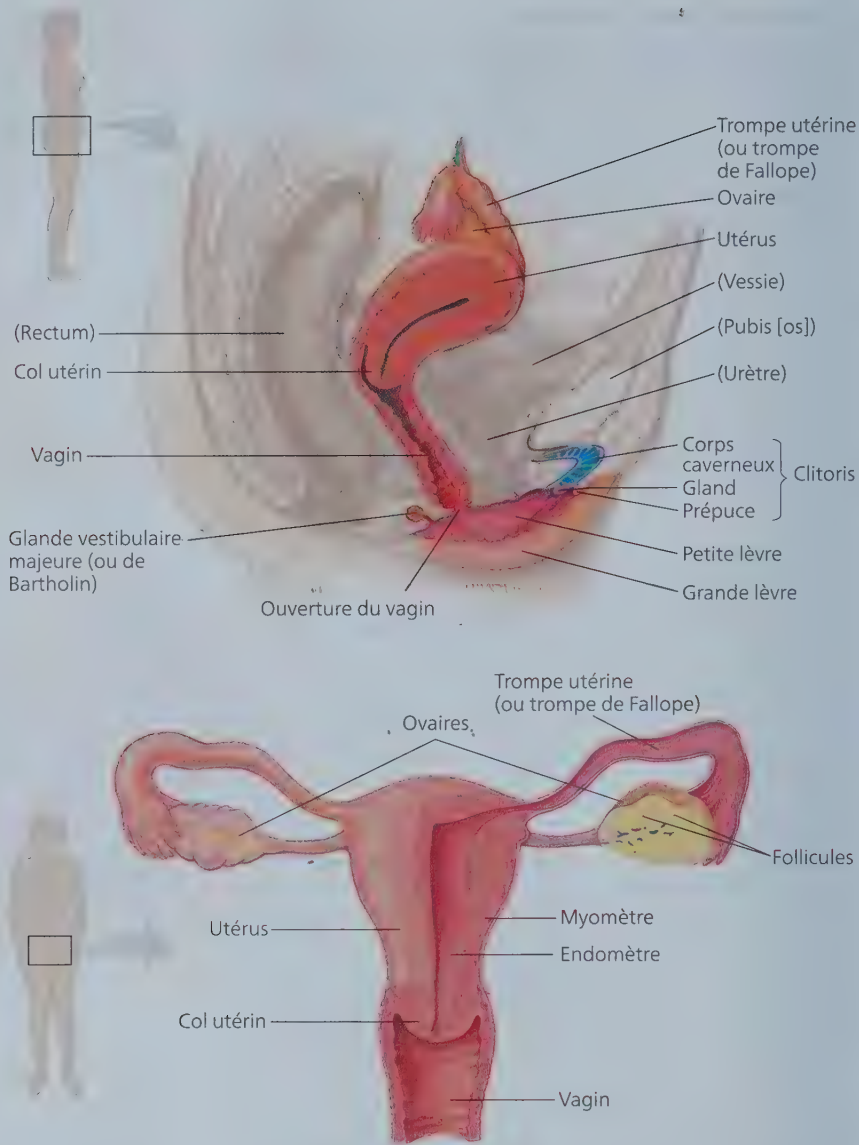
L'anatomie du système reproducteur de la femme

Chez la femme, les structures externes du système reproducteur sont le clitoris et deux paires de lèvres, situées de part et d'autre du clitoris et de l'ouverture du vagin (au milieu de ces structures se trouve le méat urinaire). Les organes reproducteurs internes comportent deux gonades, qui produisent les ovules et des hormones de reproduction, et un ensemble de conduits et de cavités qui permettent le passage des gamètes, et abritent l'embryon et le fœtus (**figure 46.10**).

Les ovaires

Les gonades femelles, appelées **ovaires**, se situent dans la cavité pelvienne, de part et d'autre de l'utérus, auquel elles sont rattachées par des ligaments. La couche extérieure de chaque ovaire est remplie de follicules. Chaque **follicule** est constitué d'un ovule immature en développement, l'**ovocyte**, entouré

► **Figure 46.10** L'anatomie du système reproducteur de la femme. En guise de guide, certaines structures qui ne servent pas à la reproduction sont placées entre parenthèses.



d'un groupe de cellules de soutien. Ces cellules nourrissent et protègent l'ovocyte durant une grande partie de sa formation et de son développement.

Les trompes utérines et l'utérus

Chez l'humain, l'oviducte, qui relie chaque ovaire avec l'utérus, est appelé **trompe utérine**, ou trompe de Fallope. Le diamètre de la trompe varie sur sa longueur. À proximité de l'utérus, la lumière d'une trompe est aussi étroite qu'un cheveu. À l'ovulation, les battements des cils de son épithélium interne permettent de recueillir l'ovocyte en produisant un effet d'aspiration sur le liquide de la cavité corporelle. Les battements des cils et des mouvements ondulatoires font aussi avancer l'ovocyte dans la trompe utérine, le conduisant dans l'**utérus**. Cet organe épais et musculéux qu'est l'utérus peut se distendre suffisamment pour contenir un fœtus de 4 kg. L'**endomètre**, revêtement

interne de l'utérus, est une muqueuse richement vascularisée. L'orifice étroit de l'utérus, appelé **col utérin**, communique avec le vagin.

Chez d'autres mammifères comme les chiens et les chats, l'utérus se ramifie dans sa partie supérieure en deux cornes utérines, chacune reliée à un oviducte. Les embryons, souvent nombreux, se développent dans les cornes utérines. Chez les marsupiaux, à l'exception des kangourous, le vagin est divisé en deux et chaque vagin mène à un utérus indépendant relié à l'oviducte. Les mâles ont un pénis bifurqué qui leur permet de pénétrer les deux vagins simultanément.

Le vagin et la vulve

Le **vagin** est une cavité à la paroi mince, musculaire et élastique qui reçoit le pénis et les spermatozoïdes au cours des rapports sexuels et qui permet le passage du bébé à l'accouchement.

Il communique avec l'extérieur par la **vulve**, le terme qui désigne l'ensemble des organes génitaux externes de la femme.

Le reste de la vulve est protégé et partiellement recouvert par des replis épais et charnus, les **grandes lèvres**. L'entrée du vagin ainsi que l'ouverture de l'urètre, un peu plus haut, sont situées dans une cavité délimitée par des replis de peau mince appelés **petites lèvres**. Chez la femme, de la naissance jusqu'aux premières relations sexuelles, ou avant si un exercice physique vigoureux cause une rupture, l'orifice vaginal est partiellement recouvert d'une mince membrane de tissu appelée **hymen**. Situé à l'extrémité antérieure des petites lèvres, le **clitoris** est constitué d'un corps caverneux (tissu érectile) court portant un gland arrondi recouvert d'une peau, le prépuce. Au cours de l'excitation sexuelle, le clitoris, le vagin et les petites lèvres se gorgent de sang et gonflent. Le clitoris, riche en terminaisons nerveuses, représente l'un des points les plus sensibles à la stimulation sexuelle. Au cours de l'excitation sexuelle, les glandes vestibulaires majeures, situées près de l'ouverture du vagin, sécrètent du mucus dans le vestibule, pour le lubrifier et faciliter la pénétration.

Les glandes mammaires

Les **glandes mammaires** sont présentes chez les deux sexes, mais ne sont fonctionnelles que chez la femme. Bien qu'elles ne fassent pas partie du système reproducteur en tant que tel, ces structures jouent un rôle important dans la reproduction. Les glandes mammaires comportent de petites alvéoles de tissu épithélial qui sécrètent le lait. Celui-ci se déverse dans un réseau de conduits débouchant au niveau du mamelon. La masse de la glande mammaire se compose de tissus conjonctifs et, principalement, de tissus adipeux. Chez le mâle, la petite quantité d'œstradiol empêche à la fois le développement des structures lactifères et le dépôt de graisses, de sorte que les seins ne sont habituellement pas saillants.

La gamétogenèse

Maintenant que nous avons survolé l'anatomie des systèmes reproducteurs de l'homme et de la femme, nous allons explorer la **gamétogenèse**, c'est-à-dire la production des gamètes. La **figure 46.11** présente ce processus chez l'homme et la femme et permet de constater le lien étroit qui existe entre la structure et la fonction des gonades.

La **spermatogenèse**, soit la formation de spermatozoïdes mûrs par le mâle adulte, est un processus continu et très productif. Pour produire des centaines de millions de spermatozoïdes par jour, des processus de division cellulaire et de développement ont lieu dans les tubules séminifères contournés des testicules. Il faut environ sept semaines pour le développement complet d'un seul spermatozoïde.

L'**ovogenèse** est la formation d'ovocytes matures (ovocytes de deuxième ordre). Chez la femme, il s'agit d'un long processus. Les ovocytes immatures se forment dans l'ovaire dès le stade embryonnaire, mais ils ne parviennent à maturité que des années plus tard, souvent des décennies.

La spermatogenèse diffère de l'ovogenèse par trois aspects importants :

- En premier lieu, au cours de la spermatogenèse, les quatre cellules filles issues de la méiose deviennent des spermatozoïdes matures, tandis que durant l'ovogenèse la cytotécine

de la méiose est inégale, de sorte que presque tout le cytoplasme se retrouve dans une seule des cellules filles, l'ovocyte de deuxième ordre. Cette grosse cellule pourra devenir un ovule, alors que les trois cellules plus petites, appelées **globules polaires**, vont dégénérer.

- En deuxième lieu, la spermatogenèse commence à l'adolescence et se poursuit tout au long de l'âge adulte ; par comparaison, les divisions mitotiques de l'ovogenèse sont vraisemblablement déjà terminées à la naissance, et la production de gamètes matures cesse vers l'âge de 50 ans.
- En troisième lieu, la spermatogenèse produit des spermatozoïdes matures sans interruption à partir de précurseurs (spermatogonies), tandis que l'ovogenèse traverse de longues périodes de dormance.

RETOUR SUR LE CONCEPT 46.3

1. Pourquoi le fait d'utiliser fréquemment un spa peut-il rendre la fécondation difficile pour un couple ?
2. Le processus de l'ovogenèse est souvent défini comme étant la production d'un ovule haploïde par méiose ; chez certains animaux, toutefois, dont les humains, cette définition n'est pas tout à fait juste. Expliquez en quoi.
3. **ET SI ?** ► Si on obturait chirurgicalement chacun des conduits déférents d'un homme, quels changements se produiraient, selon vous, dans la réponse sexuelle et la composition de l'éjaculat ?

Voir les réponses proposées à l'appendice A.

CONCEPT 46.4

L'interaction complexe entre les stimulines et les hormones sexuelles régule la reproduction chez les mammifères

Chez les mammifères, la reproduction est régie par les actions coordonnées des hormones de l'hypothalamus, de l'adénohypophyse et des gonades. La régulation de la reproduction par le système endocrinien commence dans l'hypothalamus, qui sécrète la **gonadolibérine** (GnRH). Cette hormone, à son tour, stimule la sécrétion de deux gonadotrophines par l'adénohypophyse : l'**hormone folliculostimulante** (FSH) et l'**hormone lutéinisante** (LH) (voir la figure 45.15). Ces deux hormones sont des stimulines, ce qui signifie qu'elles régulent l'activité de cellules ou glandes endocrines. On les appelle **gonadotrophines** parce qu'elles exercent leurs effets sur les gonades. La FSH et la LH régulent la gamétogenèse directement, notamment en stimulant la libération d'hormones sexuelles par les gonades.

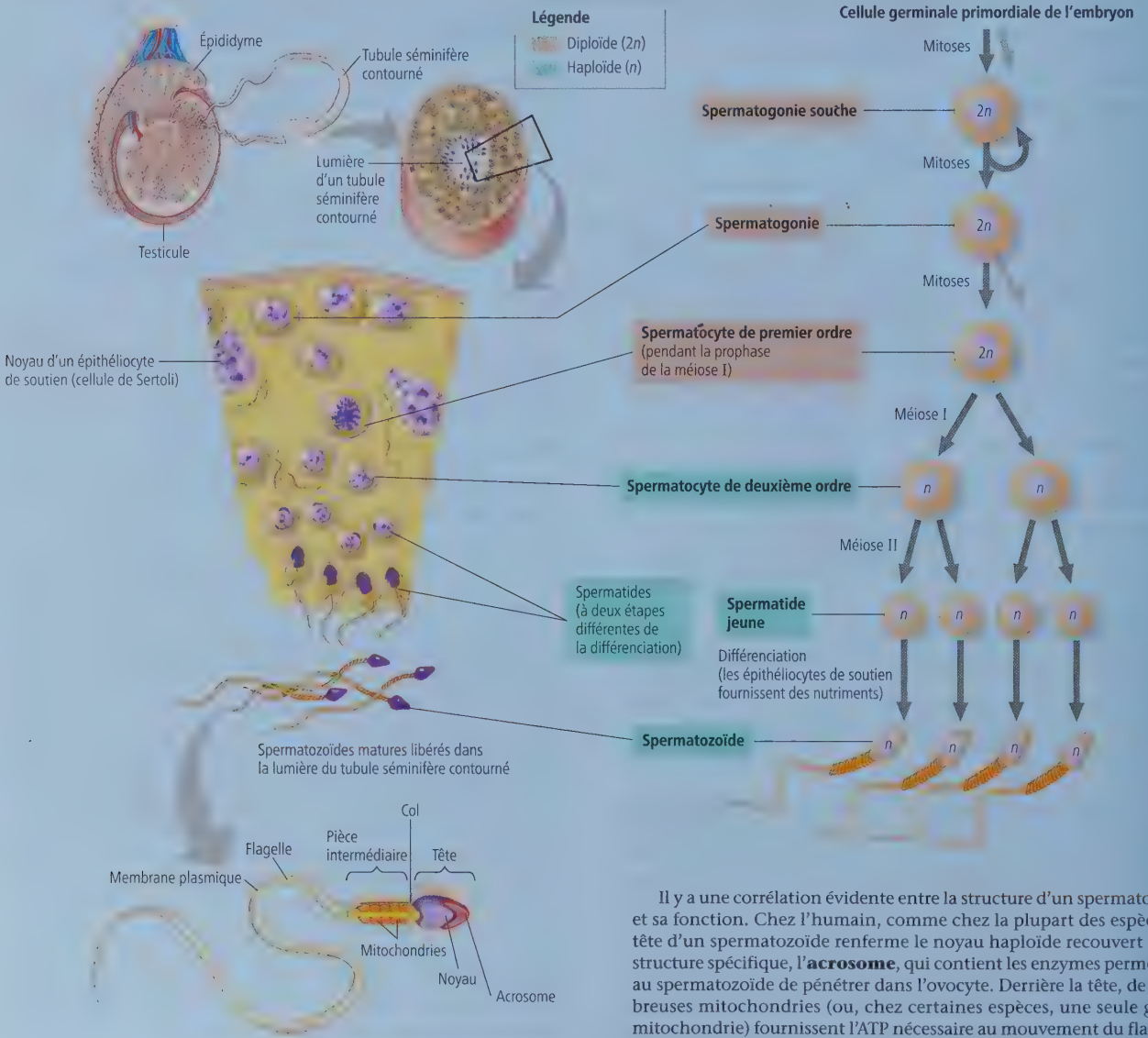
Les gonades produisent et sécrètent trois grands types d'hormones stéroïdes (qui constituent la principale catégorie d'hormones sexuelles) : les **androgènes**, surtout la **testostérone** ; les **œstrogènes**, principalement l'**œstradiol** ; et la **progestérone**. On trouve ces trois hormones tant chez les femmes que chez les hommes, mais à des concentrations très différentes. Par exemple, le taux sanguin de testostérone est

La spermatogenèse

Les cellules souches qui donnent naissance aux spermatozoïdes se trouvent en périphérie des tubules séminifères contournés. À mesure que la spermatogenèse se déroule, ces cellules se déplacent vers le centre en passant par les stades du spermatocyte et de la spermatide. Au cours de la dernière étape, le spermatozoïde mature est libéré dans la lumière du tubule. Une fois dans ce dernier, le spermatozoïde migre vers l'épididyme, dans lequel il acquiert sa mobilité.

Les cellules germinales initiales, ou *primordiales*, des testicules de l'embryon se différencient en spermatogonies souches, qui sont, de fait, des cellules souches. Ces dernières produisent deux cellules différentes

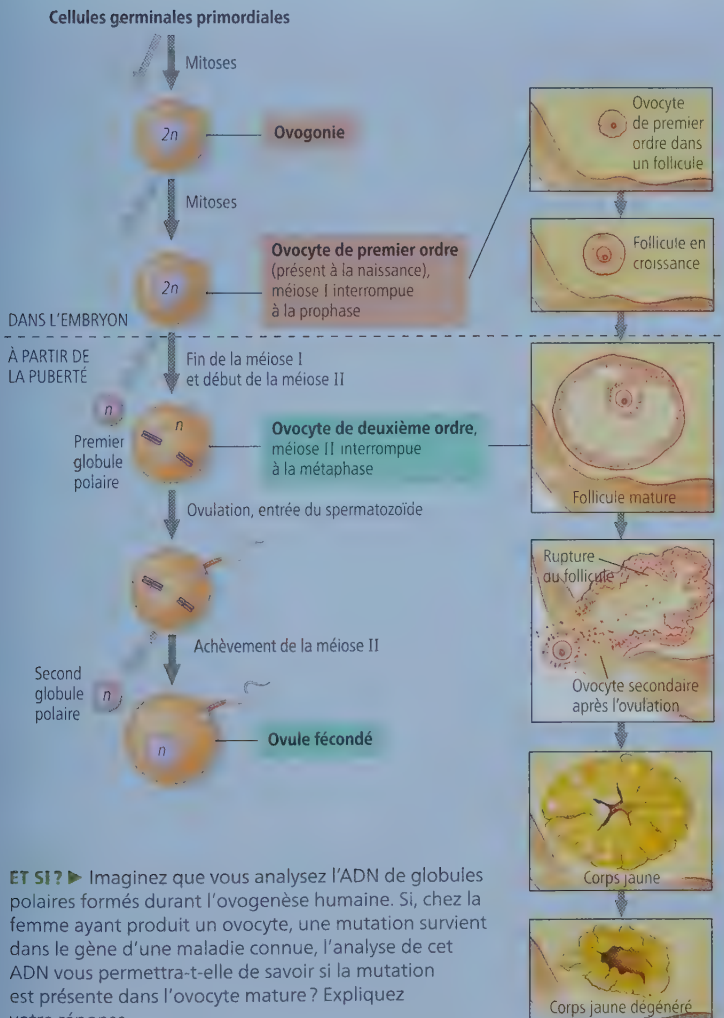
par mitose : une spermatogonie souche et une spermatogonie. Les **spermatogonies** deviennent des spermatocytes, également par mitose. (Pour simplifier, le schéma montre un seul produit pour chaque ensemble de mitoses.) Chaque spermatocyte donne naissance à quatre spermatides à l'issue de divisions cellulaires méiotiques qui réduisent le double assortiment de chromosomes homologues ($2n = 46$ chez l'humain) en un assortiment simple ($n = 23$); on dit que la cellule reproductrice passe du stade diploïde au stade haploïde (voir la figure 13.8). La forme et l'organisation des spermatides subissent des changements importants au cours de la différenciation en spermatozoïdes.



Il y a une corrélation évidente entre la structure d'un spermatozoïde et sa fonction. Chez l'humain, comme chez la plupart des espèces, la tête d'un spermatozoïde renferme le noyau haploïde recouvert d'une structure spécifique, l'**acrosome**, qui contient les enzymes permettant au spermatozoïde de pénétrer dans l'ovocyte. Derrière la tête, de nombreuses mitochondries (ou, chez certaines espèces, une seule grosse mitochondrie) fournissent l'ATP nécessaire au mouvement du flagelle.

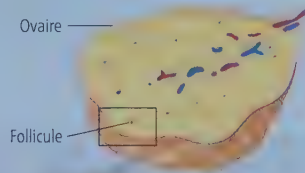
L'ovogenèse

L'ovogenèse commence dans l'embryon par la production d'**ovogonies** à partir de cellules germinales primordiales. (Le schéma montre un seul produit de chaque ensemble de mitoses.) Une ovogonie se multiplie d'abord par mitose pour former des cellules qui amorcent la méiose, mais le processus s'arrête à la prophase I avant la naissance. Ces cellules dont le développement est interrompu, appelées **ovocytes de premier ordre**, restent alors en dormance dans des petits follicules, qui sont des cavités recouvertes d'une couche de cellules protectrices. À la naissance, les ovaires contiennent entre 1 et 2 millions de follicules, mais seulement 500 follicules environ parviennent à maturité entre la puberté et la ménopause.



ET SI ? ► Imaginez que vous analysez l'ADN de globules polaires formés durant l'ovogenèse humaine. Si, chez la femme ayant produit un ovocyte, une mutation survient dans le gène d'une maladie connue, l'analyse de cet ADN vous permettra-t-elle de savoir si la mutation est présente dans l'ovocyte mature ? Expliquez votre réponse.

Selon les connaissances actuelles, tous les ovocytes de premier ordre d'une femme sont présents à la naissance ; aucun autre ne se forme par la suite. Notons, cependant, que des chercheurs ont réfuté en 2004 une conclusion semblable au sujet de la plupart des autres mammifères après avoir observé des ovogonies qui se multipliaient dans les ovaires de souris adultes et qui se développaient en ovocytes. Si l'on constate la même chose chez les humains, alors il est possible que le déclin marqué de fertilité qui survient chez les femmes vieillissantes soit causé non seulement par le vieillissement des ovocytes, mais aussi par une dégénérescence graduelle des ovogonies.



À partir de la puberté, l'hormone folliculostimulante (FSH) déclenche périodiquement la croissance d'un petit nombre de follicules, qui poursuit alors sa croissance et son développement. Habituellement, chez l'humain, un seul follicule par mois parvient à maturité, lorsque l'ovocyte de premier ordre qui s'y trouve termine la méiose I. La seconde division méiotique commence alors, mais elle s'interrompt à la métaphase. Ainsi arrêté à la méiose II, l'**ovocyte de deuxième ordre** est libéré pendant l'ovulation lorsque son follicule se rompt. L'ovocyte de deuxième ordre reprend sa méiose seulement si un spermatozoïde le pénètre. (Chez d'autres espèces animales, le spermatozoïde peut pénétrer dans l'ovocyte à cette même étape de la méiose, ou avant ou après cette étape.) Au cours des divisions méiotiques, la cytokinèse est inégale ; les plus petites cellules auxquelles elles donnent naissance deviennent des globules polaires qui dégèrent ensuite (le premier globule polaire peut encore se diviser). Donc, le produit fonctionnel de l'ovogenèse complète est un seul ovule mature contenant déjà la tête d'un spermatozoïde ; la définition proprement dite de la fécondation est la fusion des noyaux haploïdes du spermatozoïde et de l'ovocyte de deuxième ordre, même si on dit communément que c'est l'entrée du spermatozoïde dans l'ovule.

Après l'ovulation, le follicule rompu restant dans l'ovaire se transforme en **corps jaune**. Le corps jaune produit de l'œstradiol, mais aussi de la progestérone, une hormone qui entretient l'endomètre utérin pendant la grossesse. S'il n'y a pas de fécondation, le corps jaune dégénère et un nouveau follicule parvient à maturité au cycle suivant.

environ 10 fois plus élevé chez l'homme que chez la femme, tandis que le taux d'œstradiol est 10 fois plus élevé chez la femme que chez l'homme. Le taux maximal de progestérone est également bien supérieur chez la femme. Les gonades sont les principaux producteurs d'hormones sexuelles, mais les glandes surrénales en produisent également un peu.

Chez les mammifères, les hormones sexuelles commencent à exercer leurs effets dès le développement de l'embryon, en particulier les androgènes. Au cours du développement de l'embryon humain, les androgènes déterminent l'apparition des caractères sexuels primaires, c'est-à-dire les structures qui participent directement à la reproduction : les vésicules séminales et les conduits associés, ainsi que les organes reproducteurs externes. Dans la rubrique **Habiletés scientifiques**, vous interprétez les résultats d'une expérience portant sur le développement des structures reproductrices chez les mammifères.

À la puberté, les hormones sexuelles des mâles et des femelles déclenchent l'apparition des caractères sexuels secondaires, c'est-à-dire les caractères physiques et comportementaux qui ne participent pas directement à la reproduction. Les caractères

sexuels secondaires amènent souvent le dimorphisme sexuel, qui fait que les mâles adultes et les femelles adultes d'une même espèce ont une apparence différente (**figure 46.12**). Ainsi, chez l'humain, lorsque le garçon arrive à la puberté, les androgènes provoquent la mue de la voix, le développement de la pilosité sur le visage et la région pubienne, et la croissance des muscles (les androgènes stimulent la synthèse protéique). Les androgènes favorisent également certains comportements sexuels et la libido, et ils augmentent le niveau général d'agressivité. De la même façon, les œstrogènes ont des effets multiples chez la femme. À la puberté, l'œstradiol stimule le développement des seins et des poils pubiens. Il influe aussi sur le comportement sexuel féminin, entraîne l'accumulation de graisses dans les seins et les hanches, augmente la rétention d'eau et modifie le métabolisme du calcium.

Chez les mammifères parvenus à maturité sexuelle, les hormones sexuelles et les gonadotrophines jouent des rôles essentiels dans la gamétogenèse. Pour mieux comprendre cette régulation hormonale de la reproduction, commençons par explorer le système relativement simple de l'homme.

DÉMARCHE SCIENTIFIQUE

HABILETÉS SCIENTIFIQUES

Formuler une inférence et concevoir une expérience

■ QUEL EST LE RÔLE DES HORMONES DANS LA DÉTERMINATION DU SEXE D'UN MAMMIFÈRE ? ■

Chez les mammifères non ovipares, les femelles ont deux chromosomes X, tandis que les mâles ont un chromosome X et un chromosome Y. Dans les années 1940, le biologiste français Alfred Jost s'est demandé si la détermination du sexe de l'embryon mammalien par les chromosomes XX ou XY nécessitait l'intervention d'un signal hormonal de la part des gonades. Dans le présent exemple, vous interprétez les résultats de l'expérience de Jost afin de déterminer si vous pouvez trouver une réponse.

■ METHODE ■ Le chercheur a un jeu de bébés embryons de lapin qui étaient en cours de développement à un stade où le sexe n'avait pas encore été déterminé. Les chercheurs ont retiré chirurgicalement la partie de chaque embryon dans laquelle se formeraient les ovaires ou les testicules. Lorsque les lapereaux sont nés, il a noté leur sexe chromosomique et vérifié si leurs structures génitales étaient mâles ou femelles.

■ RÉSULTATS ■

Jeu de chromosomes	Apparence des parties génitales	
	Embryons non opérés	Embryons opérés (excision des gonades embryonnaires)
XY (mâle)	Mâle	Femelle
XX (femelle)	Femelle	Femelle

Source des données : A. Jost, Recherches sur la différenciation sexuelle de l'embryon de lapin. Archives d'anatomie microscopique et de morphologie expérimentale 36:4-1271-316 (1947).



INTERPRÉTEZ LES DONNÉES ▼

1. Cette expérience est un exemple de démarche scientifique dans laquelle les chercheurs formulent une inférence (déduction) au sujet d'un processus normal à partir de ce qui se produit quand on bloque le déroulement du processus normal. Quel processus normal Jost a-t-il bloqué dans son expérience ? À partir des résultats obtenus par le chercheur, quelle inférence pouvez-vous faire au sujet du rôle des gonades dans le développement des structures génitales des mammifères ?
2. Les données de l'expérience de Jost pourraient être expliquées, et non seulement inférées, si un facteur associé à la procédure chirurgicale autre que l'excision des gonades provoquait le développement de structures femelles. Si vous pouviez refaire l'expérience de Jost, comment vous y prendriez-vous pour vérifier la validité d'une telle explication ?
3. Quel résultat Jost aurait-il obtenu si le développement des structures femelles nécessitait également un signal des gonades ?
4. Concevez une autre expérience dans le but de déterminer si le signal qui contrôle le développement de structures mâles est une hormone. Vous devez formuler votre hypothèse, préciser votre prédiction et votre plan de collecte de données, et définir votre groupe témoin.

▼ **Figure 46.12** L'influence déterminante des androgènes sur l'anatomie et le comportement de l'original. Le mâle et la femelle de ce couple d'orignaux (*Alces alces*) présentent des différences anatomiques et physiologiques. Chez le mâle, le taux élevé de testostérone provoque l'apparition des caractères sexuels secondaires comme les bois (la ramure) ; il détermine également le comportement de parade nuptiale et le comportement territorial.



La régulation hormonale du système reproducteur mâle

Pour assurer la spermatogenèse, la FSH et la LH agissent sur deux types de cellules à l'intérieur des testicules (**figure 46.13**). La FSH favorise l'activité des *épithéliocytes de soutien* (aussi appelés cellules de Sertoli), dans les tubules séminifères ; ces épithéliocytes nourrissent les spermatozoïdes en développement (voir la figure 46.11). La LH, quant à elle, régule les *cellules interstitielles* (aussi appelées cellules de Leydig), situées dans le tissu conjonctif entre les tubules séminifères. Sous l'effet de la LH, ces cellules sécrètent de la testostérone et d'autres androgènes, lesquels stimulent la spermatogenèse dans les tubules.

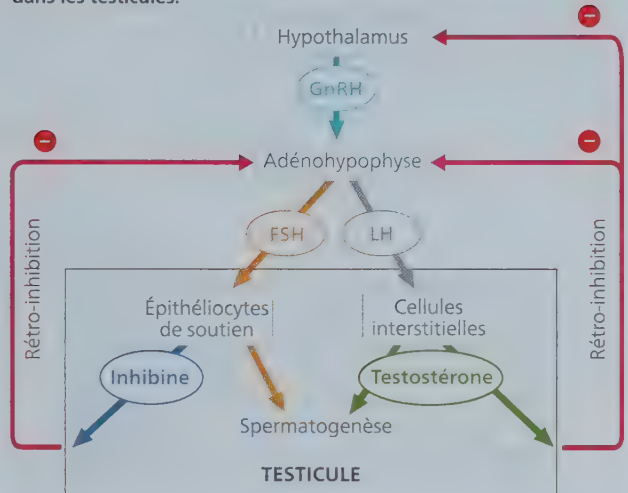
Deux mécanismes de rétro-inhibition assurent la régulation de la production hormonale chez les hommes (voir la figure 46.13). La testostérone régule les concentrations sanguines de GnRH, de FSH et de LH en inhibant l'hypothalamus et l'adénohypophyse. En outre, l'*inhibine*, une hormone produite par les épithéliocytes de soutien, agit sur l'adénohypophyse, qui réduit sa sécrétion de FSH. Ensemble, ces mécanismes de rétro-inhibition maintiennent la production d'androgènes à des niveaux optimaux.

Les cellules interstitielles n'ont pas l'unique fonction de produire de la testostérone. Elles sécrètent aussi de petites quantités de plusieurs autres hormones et régulateurs locaux, dont l'ocytocine, la rénine, l'angiotensine, la corticolibérine ou CRH (hormone de libération de la corticotrophine ou ACTH), des facteurs de croissance et des prostaglandines. Ces molécules contribuent à coordonner l'activité de reproduction avec la croissance, le métabolisme, l'homéostasie et le comportement.

La régulation hormonale des cycles reproducteurs des femelles

La production de spermatozoïdes est continue chez les hommes, tandis qu'il existe chez les femmes deux cycles étroitement reliés et régulés par le fonctionnement cyclique de la communication endocrine. Les événements cycliques qui ont lieu dans les

▼ **Figure 46.13** La régulation hormonale de l'activité dans les testicules.



ovaires déterminent le **cycle ovarien** : chaque cycle est marqué par le développement et la maturation d'un follicule, puis par la libération d'un ovocyte. Les modifications qui surviennent dans l'utérus, elles, font partie du **cycle utérin** qui, chez les humains et quelques autres primates, est un cycle menstruel. Dans chaque **cycle menstruel**, l'endomètre (muqueuse utérine) s'épaissit, se vascularise, puis se désagrège s'il n'y a pas de grossesse. On nomme **menstruation** cette désagrégation cyclique de la couche fonctionnelle de l'endomètre riche en sang, qui produit un saignement s'écoulant par le col utérin et le vagin. Le cycle menstruel humain dure en moyenne 28 jours (il peut toutefois varier de 20 à 40 jours).

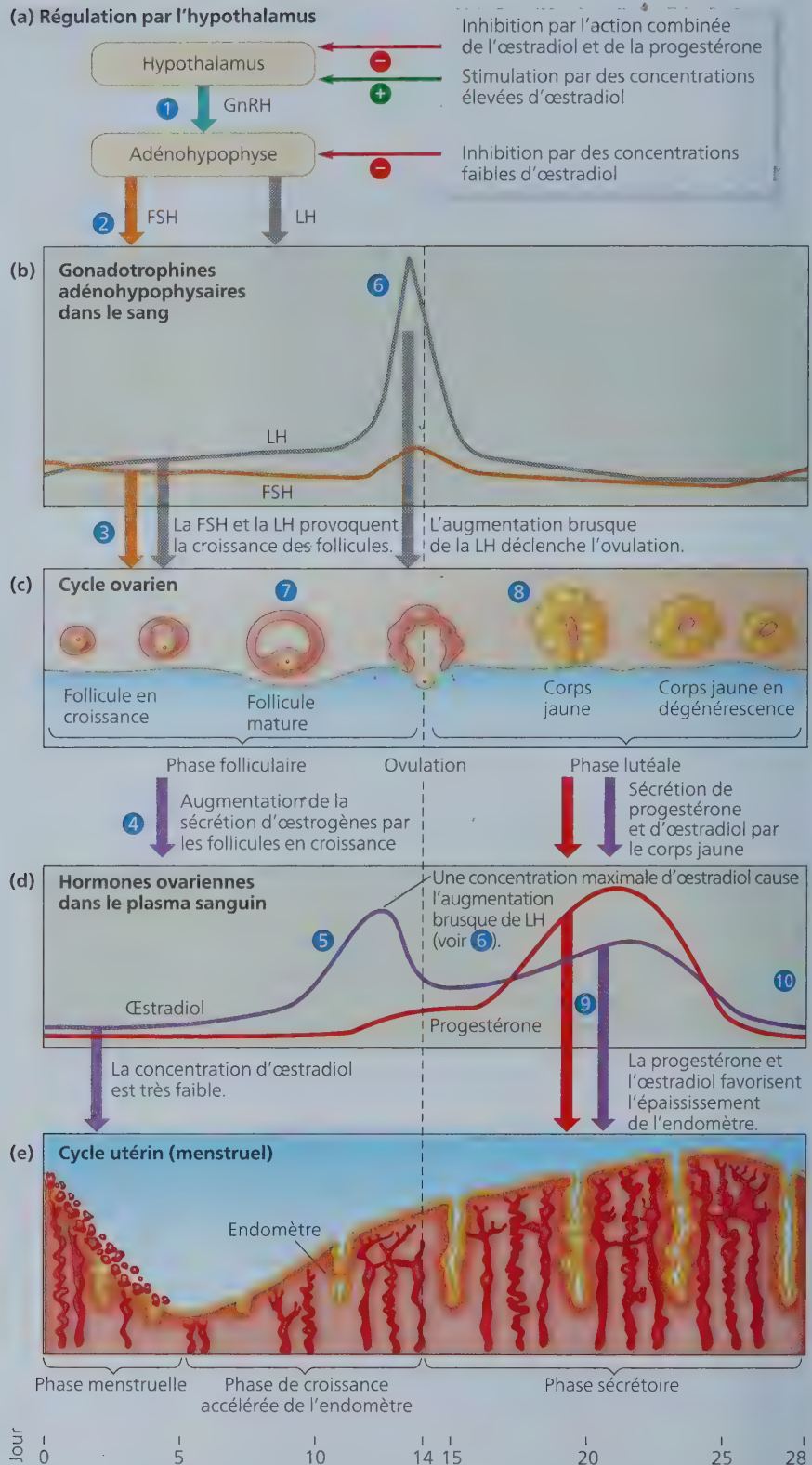
En l'absence de fécondation d'un ovocyte, donc de grossesse, et après la destruction de la muqueuse utérine, les cycles ovarien et utérin redémarrent sous le contrôle de l'activité hormonale. Celle-ci synchronise la croissance du follicule ovarien et l'ovulation avec l'épaississement de l'endomètre en vue de l'implantation et du développement d'un embryon.

La **figure 46.14** présente plus en détail le cycle reproducteur de la femme et montre l'étroite coordination dans les divers tissus de l'organisme.

Le cycle ovarien

Chez la femme comme chez l'homme, l'hypothalamus joue un rôle déterminant dans la régulation de la reproduction. Le cycle ovarien débute par la libération de la GnRH par l'hypothalamus ①, ce qui favorise la sécrétion de faibles quantités de FSH et de LH par l'adénohypophyse ②. La FSH provoque la croissance des follicules, avec l'aide de la LH ③, et les follicules commencent à sécréter de l'œstradiol ④. La concentration d'œstradiol sécrété augmente lentement durant la majeure partie de la *phase folliculaire*, alors que les follicules croissent et les ovocytes parviennent à maturité. (Plusieurs follicules commencent à croître, mais habituellement un seul, chez l'humain, arrive à maturité ; les autres subissent un processus appelé *atrésie* et dégèrent.) La faible concentration d'œstradiol inhibe la sécrétion des hormones adénohypophysaires, ce qui maintient la FSH et la LH à des concentrations relativement faibles. Durant cette

► **Figure 46.14** Le cycle reproducteur de la femme. Cette figure montre comment les variations de concentrations des hormones dans le plasma sanguin, décrites dans les parties (a), (b) et (d), assurent la régulation (c) du cycle ovarien et (e) du cycle utérin (menstruel). L'échelle de temps au bas de la figure s'applique aux parties (b) à (e).



partie du cycle, la régulation des hormones ressemble beaucoup à celle observée chez les hommes.

Lorsque la sécrétion d'œstradiol par les follicules en croissance commence à augmenter brusquement (5), les concentrations de FSH et de LH montent en flèche (6). Pourquoi ? Alors qu'une faible concentration d'œstradiol inhibe la sécrétion des gonadotrophines adénohypophysaires, une forte concentration d'œstradiol a l'effet inverse : elle stimule la sécrétion de gonadotrophines en agissant sur l'hypothalamus, qui intensifie sa production de GnRH. La forte concentration d'œstradiol rend les cellules adénohypophysaires produisant la LH encore plus sensibles à la GnRH, ce qui augmente encore la concentration de LH.

Le follicule en cours de maturation, qui contient une cavité interne pleine de liquide, finit par former une protubérance à la surface de l'ovaire (7). La phase folliculaire se termine par l'ovulation, environ un jour après l'augmentation brusque de la LH. En réponse à la FSH et au pic du taux de LH, le follicule et la paroi adjacente de l'ovaire se rompent pour libérer l'ovocyte de deuxième ordre. Certaines femmes peuvent avoir une douleur au bas-ventre au moment de l'ovulation ; elles ressentent cette douleur à gauche ou à droite, selon l'ovaire qui libère un ovocyte durant le cycle.

La *phase lutéale* du cycle ovarien suit l'ovulation. La LH déclenche la transformation des tissus folliculaires qui sont restés dans l'ovaire (8). Ces tissus deviennent le corps jaune, qui est une structure glandulaire. Sous l'effet de la LH, le corps jaune sécrète la progestérone et l'œstradiol. Au fur et à mesure que leurs concentrations augmentent, la progestérone et l'œstradiol combinent leurs actions pour exercer une rétro-inhibition sur l'hypothalamus et l'adénohypophyse. Cette rétro-inhibition réduit la sécrétion de LH et de FSH à de très faibles taux et empêche un autre ovocyte de mûrir lorsqu'il y a eu fécondation et qu'une grossesse vient de commencer.

Vers la fin de la phase lutéale, si une grossesse n'a pas lieu, le corps jaune dégénère en raison des faibles concentrations de gonadotrophines. Par conséquent, les concentrations d'œstradiol et de progestérone diminuent fortement. Cette chute libère l'hypothalamus et l'adénohypophyse de l'inhibition exercée par ces hormones ovariennes. L'adénohypophyse se met alors à sécréter une quantité suffisante de FSH pour déclencher la croissance de nouveaux follicules dans l'ovaire, marquant le début du cycle ovarien suivant.

Le cycle utérin (menstruel)

Avant l'ovulation, les hormones stéroïdes ovariennes stimulent l'utérus pour le préparer au développement de l'embryon. L'œstradiol, sécrété en quantités de plus en plus importantes par les follicules en croissance, provoque l'épaississement de l'endomètre. De cette façon, la phase folliculaire du cycle ovarien est coordonnée avec la *phase de croissance accélérée de l'endomètre* du cycle utérin. Après l'ovulation (9), l'œstradiol et la progestérone sécrétés par le corps jaune stimulent le maintien de la couche fonctionnelle de l'endomètre et la suite de son développement. Ce processus inclut le grossissement des artérioles et la croissance des glandes de la couche fonctionnelle de l'endomètre qui sécrètent un liquide contenant des nutriments. Ces nutriments permettent au jeune embryon de survivre avant qu'il ne s'implante dans la couche fonctionnelle de l'endomètre.

Il y a donc bien une coordination entre la phase lutéale du cycle ovarien et ce qu'on appelle la *phase sécrétoire* du cycle utérin.

Si, à la fin de la phase sécrétoire, un embryon ne s'est pas implanté dans l'endomètre, le corps jaune dégénère. Il s'ensuit une chute rapide de la concentration d'hormones ovariennes qui provoque la constriction des artérioles de la couche fonctionnelle de l'endomètre (10). Par suite du manque d'irrigation sanguine, les deux tiers intérieurs de la couche fonctionnelle de l'endomètre se désintègrent. Les petits vaisseaux sanguins dans l'endomètre se resserrent et libèrent le sang qu'ils contenaient, accompagné de liquide et de tissus endométriaux. C'est ce qu'on appelle la menstruation, c'est-à-dire la *phase menstruelle* du cycle utérin. Durant la menstruation, qui dure habituellement quelques jours, un ensemble de nouveaux follicules ovariens commence à croître. Par convention, on considère le premier jour de la menstruation comme étant le premier jour du cycle utérin (et ovarien).

Environ 7% des femmes en âge de procréer souffrent d'**endométriose**, une affection qui se caractérise par la migration de certaines cellules de l'endomètre vers un endroit anormal, ou **ectopique** (du grec *ektos*, « au dehors »). Une fois migré dans une structure telle qu'une trompe, un ovaire ou le gros intestin, le tissu ectopique réagit aux hormones présentes dans la circulation sanguine. Comme il le ferait dans l'endomètre, le tissu se met alors à épaissir et à se dégrader à chaque cycle ovarien, causant des douleurs pelviennes et des saignements dans l'abdomen. Les chercheurs n'ont pas encore trouvé les causes de l'endométriose, mais un traitement hormonal ou la chirurgie peut en atténuer les symptômes.

La ménopause

Après environ 500 cycles, les femmes atteignent la **ménopause**, période où l'ovulation et les menstruations s'arrêtent, habituellement entre 46 et 54 ans. Vers cet âge, les ovaires perdent la capacité de répondre aux gonadotrophines (FSH et LH) provenant de l'adénohypophyse. Il s'ensuit une diminution de la production d'œstradiol.

La ménopause est un phénomène exceptionnel. En effet, chez la plupart des espèces, les femelles et les mâles conservent toute leur vie la capacité de se reproduire. L'évolution explique-t-elle ce phénomène ? Une hypothèse intéressante avance qu'au début de l'humanité l'apparition de la ménopause après la naissance de quelques enfants permettait aux femmes de garder une meilleure forme physique. L'incapacité de se reproduire leur aurait permis de bien prendre soin de leurs enfants et de leurs petits-enfants. Cela aurait ainsi favorisé les chances de survie des individus portant leurs gènes.

Le cycle menstruel et le cycle œstral

Chez toutes les femelles des mammifères, l'endomètre s'épaissit avant l'ovulation, mais seuls les humains et quelques autres primates ont des cycles menstruels. Chez les autres mammifères, tant sauvages que domestiqués, la couche fonctionnelle de l'endomètre est réabsorbée par l'utérus lorsqu'il n'est pas gravide, et il n'y a pas ou peu de saignement. Pour les femelles de ces mammifères, les changements qui se produisent dans l'utérus font partie d'un **cycle œstral** qui régule également leur réceptivité sexuelle : alors que la femme peut se montrer réceptive

à l'activité sexuelle tout au long de son cycle menstruel, il n'en est pas de même des femelles des mammifères qui ont un cycle œstral. Celles-ci ne s'accouplent qu'au moment de l'ovulation, période d'activité sexuelle appelée œstrus (mot latin signifiant « frénésie », « passion »), qui est le seul moment où la femelle se montre réceptive à l'accouplement. L'œstrus, ou rut, porte également le nom de *chaleurs* parce que la température corporelle augmente alors légèrement.

La longueur, la fréquence et la nature des cycles œstraux varient beaucoup selon les espèces de mammifères. Les ours et les chiens ont un cycle œstral par année (l'œstrus étant de 16 à 25 jours pour l'ours et de 9 jours pour le chien). Les éléphants, quant à eux, ont plusieurs cycles par année. Le rat a des cycles tout au long de l'année, chacun ne durant que cinq jours, tandis que son ennemi juré, le chat domestique, ovule seulement au moment de l'accouplement.

La réponse sexuelle chez l'humain

Chez les humains, l'excitation sexuelle est encore plus complexe ; elle fait intervenir une variété de facteurs psychologiques aussi bien que physiques. Les structures génitales de l'homme et de la femme ont une apparence très différente, mais certaines ont des fonctions semblables quant à l'excitation sexuelle. Ces similarités reflètent leur origine développementale commune. Par exemple, le gland et le clitoris sont issus des mêmes tissus embryonnaires ; il en est également ainsi pour le scrotum et les grandes lèvres, de même que pour la peau du pénis et les petites lèvres. La réponse sexuelle humaine suit un modèle physiologique commun chez les hommes et les femmes. On observe deux types de réactions physiologiques chez l'un et l'autre sexe. Le premier type de réaction est la *vasocongestion*, qui est l'engorgement d'un tissu causé par un afflux de sang circulant dans ses artérioles. Le second est la *myotonie*, soit l'augmentation de la tension musculaire. Les muscles squelettiques et les muscles lisses peuvent effectuer des contractions continues ou rythmiques, notamment des contractions associées à l'orgasme.

On peut diviser la réponse sexuelle en quatre phases : l'excitation, le plateau, l'orgasme et la résolution. La phase d'excitation a une fonction importante consistant à préparer le vagin et le pénis en vue du **coït** (rapport sexuel). Pendant cette phase, la vasocongestion se manifeste surtout par l'érection du pénis et du clitoris, par le gonflement des testicules, des petites lèvres (repoussant les grandes lèvres vers l'extérieur) ainsi que des seins, et par la lubrification du vagin. Il peut également y avoir une myotonie provoquant l'érection des mamelons ou une tension dans les bras et les jambes.

Dans la phase de plateau, les réactions de la phase d'excitation continuent en réponse à la stimulation directe des organes génitaux. Chez la femme, il y a vasocongestion du tiers extérieur du vagin et dilatation légère, en diamètre et en longueur, des deux tiers intérieurs. S'accompagnant de l'élévation de l'utérus, ces changements produisent une dépression qui attire le sperme au fond du vagin. La respiration s'accélère, la fréquence cardiaque augmente (parfois jusqu'à 150 batt./min) et la pression artérielle s'élève. Il ne s'agit pas seulement d'une réaction à l'effort physique que représente l'activité sexuelle, mais aussi d'une réaction involontaire à la stimulation du système nerveux autonome (voir la figure 49.9).

L'orgasme se manifeste chez les deux sexes par des contractions rythmiques et involontaires de certaines parties du système reproducteur. Pendant l'orgasme masculin, les contractions des glandes et des conduits du système reproducteur projettent d'abord le sperme dans l'urètre (c'est ce qu'on appelle l'*émission*). Puis, l'urètre se contracte à son tour et expulse le sperme à l'extérieur du corps (c'est l'*éjaculation* proprement dite). Pendant l'orgasme féminin, l'utérus et le tiers du vagin situé à proximité du vestibule se contractent, mais pas les deux tiers intérieurs du vagin. Cette phase est la plus courte des phases de la réponse sexuelle. Elle ne dure habituellement que quelques secondes. Chez les deux sexes, les contractions se suivent à des intervalles d'environ 0,8 s et peuvent mettre à contribution le muscle sphincter externe de l'anus et plusieurs muscles abdominaux.

La phase de résolution termine le cycle et met un terme aux réactions des étapes précédentes. Les organes qui ont été le siège d'une vasocongestion retrouvent leur taille et leur couleur normales. Les muscles se relâchent. La plupart des modifications qui se produisent pendant la résolution prennent fin en moins de cinq minutes, mais certaines peuvent durer aussi longtemps qu'une heure. Après l'orgasme, l'homme a une période réfractaire qui peut durer de quelques minutes à plusieurs heures, durant laquelle l'érection et l'orgasme sont impossibles. La femme n'a pas de période réfractaire, de sorte qu'elle peut avoir des orgasmes multiples dans un court laps de temps.

RETOUR SUR LE CONCEPT 46.4

1. En quoi les fonctions de la FSH et de la LH sont-elles semblables chez la femelle et chez le mâle ?
2. Quelle est la différence entre un cycle œstral et un cycle menstruel ? Chez quels types d'animaux trouve-t-on les deux sortes de cycles ?
3. **ET SI ?** ► Si une femme commence à prendre de l'œstradiol et de la progestérone immédiatement après le début d'un nouveau cycle menstruel, quel effet cela aura-t-il sur l'ovulation ?
4. **FAITES DES LIENS** ► La coordination des événements développementaux est caractéristique des cycles reproducteurs de la femme et du cycle de réplication d'un virus à ARN enveloppé (voir la figure 19.8). Quelle est la nature de cette coordination dans chacun de ces cycles ?

Voir les réponses proposées à l'appendice A.

CONCEPT 46.5

Chez les mammifères placentaires, le développement embryonnaire se déroule entièrement dans l'utérus

Maintenant que nous avons exploré les cycles ovarien et utérin de la femme, nous allons nous pencher sur la reproduction à proprement parler, en commençant par les événements qui transforment un ovule en embryon.

La fécondation, le développement embryonnaire et la naissance

Lors des rapports sexuels humains, l'homme émet de 2 à 5 mL de sperme contenant des centaines de millions de spermatozoïdes. Au moment de l'éjaculation, le sperme coagule. Il semble que cette coagulation contribue à éviter la dispersion des spermatozoïdes jusqu'à ce qu'ils aient atteint le col utérin. Peu après, les anticoagulants liquéfient le sperme, et les spermatozoïdes commencent à nager vers l'utérus et les trompes utérines. La **fécondation** d'un ovule (ovocyte mature) par un spermatozoïde a lieu dans la trompe utérine (**figure 46.15a**).

Environ 24 heures après la fécondation, le zygote commence une série de divisions cellulaires appelée **segmentation**. Quatre jours plus tard, il s'est transformé en un **blastocyste** et il a pris la forme d'une sphère de cellules creusée d'une cavité remplie de liquide (le blastocœle). Quelques jours après la formation du blastocyste, l'embryon s'implante dans l'endomètre (**figure 46.15b**). La **gestation** (**grossesse** chez l'humain) est le fait de porter dans l'utérus un ou plusieurs embryons. Chez l'humain, la grossesse dure en moyenne 266 jours (38 semaines) à partir de la fécondation de l'ovule, soit 40 semaines à partir du début du dernier cycle menstruel. En comparaison, la gestation

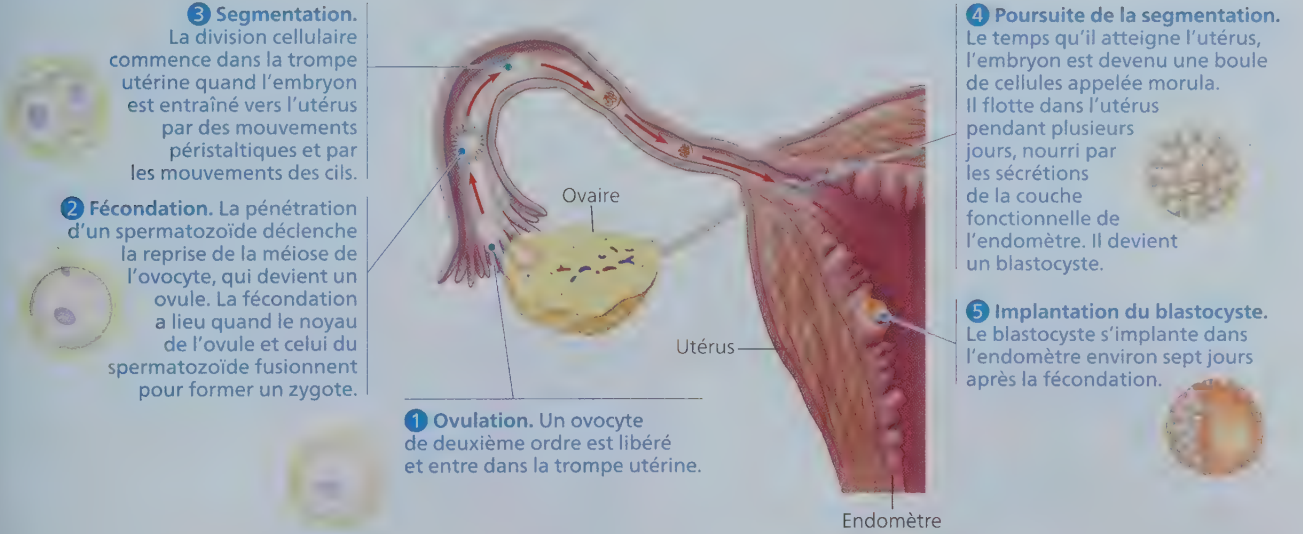
dure environ 21 jours chez beaucoup de rongeurs, 280 jours chez les bovins et plus de 600 jours chez les éléphants. Les neuf mois que dure approximativement la gestation chez l'humain sont divisés en trois *trimestres* d'égale longueur.

Le premier trimestre

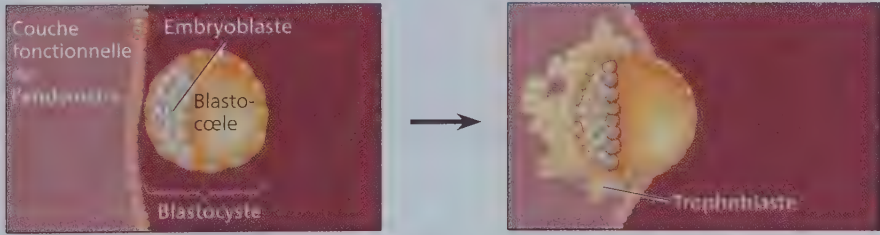
Durant le premier trimestre, l'embryon implanté sécrète des hormones qui signalent sa présence et exercent une régulation sur le système reproducteur de la mère. L'une des hormones embryonnaires, la **gonadotrophine chorionique humaine (hCG, pour human chorionic gonatotropin)**, agit de la même façon que l'hormone lutéinisante (LH) adénohypophysaire. Elle maintient la sécrétion de progestérone et d'œstradiol par le corps jaune durant les premiers mois de la grossesse. Le sang contient une telle concentration de hCG qu'une certaine quantité de cette hormone est excrétée dans l'urine. C'est d'ailleurs sur la détection de cette hormone que reposent les tests immunologiques de diagnostic précoce de la grossesse.

Ce ne sont pas tous les embryons qui se développent complètement; beaucoup meurent spontanément à cause d'anomalies chromosomiques ou développementales. Par ailleurs, il arrive que le zygote se loge dans une trompe utérine plutôt que dans

▼ **Figure 46.15** La formation du zygote humain et les événements suivant la fécondation.



(a) De l'ovulation à l'implantation (ou nidation)



(b) Implantation du blastocyste

HABILITÉS VISUELLES ► Lorsque les ovules (ovocytes de deuxième ordre) d'une femme doivent être fécondés *in vitro*, on peut les introduire directement dans l'utérus, mais pas dans les trompes utérines, dont le diamètre est extrêmement petit. En vous basant sur l'illustration, indiquez quelles conditions de culture conviendraient le mieux à un ovule fécondé et permettraient d'optimiser les chances d'obtenir une grossesse.

l'utérus. Ces grossesses sont dites tubaires, ou ectopiques; elles ne sont pas viables, et peuvent faire éclater la trompe et causer de graves hémorragies internes. Le risque de grossesse ectopique est plus grand si les trompes portent des cicatrices consécutives à une infection bactérienne contractée lors d'un accouchement (à cause des interventions médicales) ou à des infections transmissibles sexuellement.

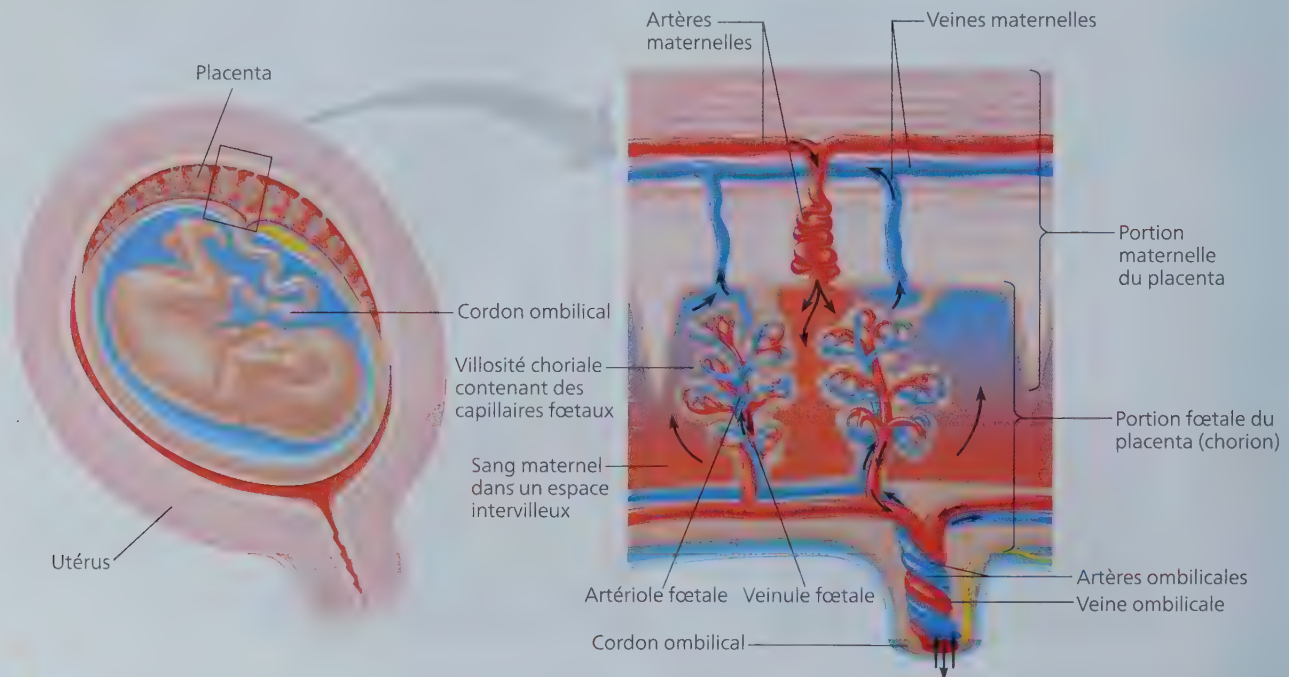
Durant les deux à quatre premières semaines de son développement, l'embryon obtient ses nutriments directement de l'endomètre. Entre-temps, la couche externe du blastocyste, appelée **trophoblaste**, sort de l'embryon en formation et pénètre dans la couche fonctionnelle de l'endomètre, contribuant ainsi à la formation ultérieure du **placenta**. Cet organe en forme de disque qui contient des vaisseaux sanguins embryonnaires et maternels grossit au point d'atteindre la taille d'une grande assiette; à la fin de la grossesse, il pèse près de 1 kg. La diffusion de matières entre les systèmes cardiovasculaires maternel et embryonnaire permet l'échange de gaz respiratoires, le transfert de nutriments et la protection immunitaire, ainsi que l'évacuation des déchets produits par l'embryon. Le sang provenant de l'embryon arrive au placenta en passant par des artères du cordon ombilical, et en repart par la veine ombilicale (**figure 46.16**).

Parfois, au cours du premier mois du développement, la division de l'embryon donne de vrais jumeaux, ou *jumeaux monozygotes* (un seul ovule). Les faux jumeaux, ou *jumeaux dizygotes*, sont plutôt issus de la maturation de deux follicules au cours du même cycle, suivie de la fécondation et de l'implantation indépendante de deux embryons génétiquement distincts.

Le premier trimestre est également la principale période où s'effectue l'**organogenèse**, c'est-à-dire la formation des organes (**figure 46.17a**) à partir de trois feuilletts cellulaires, appelés *feuilletts embryonnaires*, dont nous reparlerons au chapitre 47. C'est durant l'organogenèse que l'embryon est le plus vulnérable. Par exemple, l'alcool qui traverse le placenta et se rend au système nerveux central du fœtus en développement peut causer le syndrome d'alcoolisation fœtale. Ce syndrome se manifeste par un retard mental et des malformations congénitales graves. Le cœur de l'embryon commence à battre dès la quatrième semaine, et on peut l'entendre au stéthoscope à la fin du premier trimestre, vers la neuvième semaine. À huit semaines, l'embryon, désormais appelé **fœtus**, possède les principales structures de l'adulte sous forme rudimentaire. À la fin du troisième mois, le fœtus déjà bien différencié ne mesure toutefois que 5 cm.

Durant le premier trimestre, la forte concentration sanguine de progestérone entraîne diverses modifications chez la

▼ **Figure 46.16 La circulation placentaire.** De la quatrième semaine à la naissance, le placenta, un organe composé de tissus maternels et embryonnaires, permet le transport de nutriments et d'anticorps (IgG) maternels, l'échange de gaz respiratoires entre la mère et l'embryon ou le fœtus, et l'évacuation des déchets produits par ce dernier. Le sang maternel arrive dans le placenta par des artères, traverse des espaces sanguins intervillositaires situés dans la couche fonctionnelle de l'endomètre et ressort par des veines. Le sang embryonnaire ou fœtal, qui reste dans des vaisseaux, arrive dans le placenta par des artères et passe à travers les capillaires dans les villosités chorales digitiformes, où il absorbe les molécules d'oxygène (O_2) et les nutriments. Le sang embryonnaire ou fœtal quitte le placenta par des veines qui le ramènent au fœtus. L'échange de substances entre le lit de capillaires du fœtus et les espaces sanguins intervillositaires s'effectue par diffusion, par transport actif et par absorption sélective, selon la nature des substances.

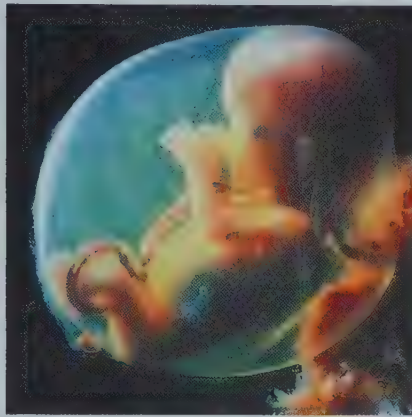


🔦 Dans une rare anomalie génétique, l'absence d'une certaine enzyme cause une augmentation de la sécrétion de testostérone. Lorsque le fœtus est atteint de cette anomalie, la pilosité de la mère, durant la grossesse, ressemble à celle d'un homme. Expliquez pourquoi.

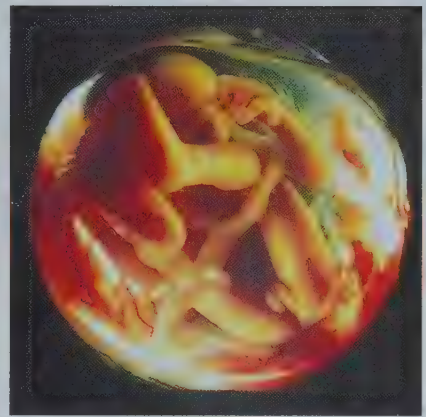
▼ **Figure 46.17** Le fœtus humain au premier trimestre et au deuxième trimestre de gestation.



(a) **5 semaines.** Les bourgeons des membres, les yeux, le cœur, le foie et les ébauches de tous les autres organes ont commencé à se former dans l'embryon, qui ne mesure que 1 cm de longueur.



(b) **14 semaines.** La croissance et le développement du nouvel individu, maintenant appelé fœtus, se poursuivent pendant le deuxième trimestre. Ce fœtus mesure 6 cm environ (à ce stade, on mesure la distance entre le point le plus élevé de la tête, ou vertex, et le coccyx).



(c) **20 semaines.** Lorsque le fœtus atteint environ 20 cm de longueur, la position fœtale s'impose (tête contre genoux) en raison de l'espace limité dont il dispose.

future mère : le mucus du col utérin devient très abondant et forme un bouchon protecteur contre l'infection, la partie maternelle du placenta grossit, le volume des seins et de l'utérus augmente, et l'ovulation et le cycle menstruel s'arrêtent. Environ 75 % des femmes enceintes ont des nausées au cours du premier trimestre.

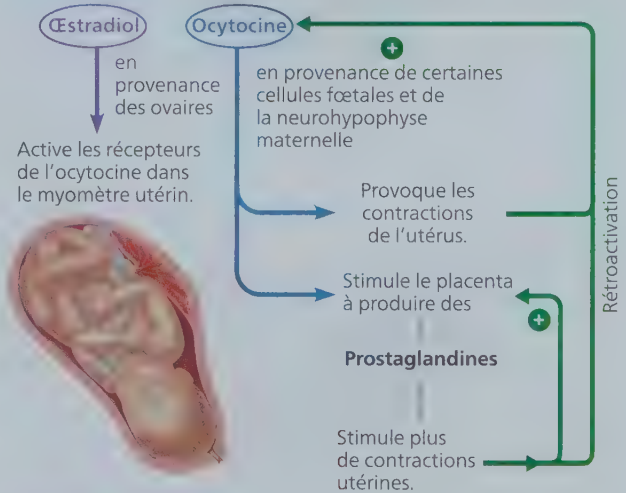
Les deuxième et troisième trimestres

Au cours du deuxième trimestre, le fœtus atteint rapidement la taille de 30 cm. Son développement se poursuit ; par exemple, les ongles se forment, ainsi que les organes génitaux externes et les oreilles (**figure 46.17b** et **c**). La mère peut sentir ses mouvements dès la première partie du deuxième trimestre, et on peut le voir bouger à travers la paroi abdominale vers le milieu de cette période. La concentration hormonale se stabilise, tandis que la quantité d'hCG diminue. Le corps jaune dégénère et le placenta sécrète sa propre progestérone, ce qui maintient la grossesse ; chez d'autres espèces de mammifères, le corps jaune persiste durant toute la gestation.

Pendant le dernier trimestre, le fœtus croît rapidement. Il atteint ainsi une taille de 50 cm environ et une masse de 3 à 4 kg. Son activité diminue au fur et à mesure qu'il remplit l'espace disponible à l'intérieur des membranes fœtales. Tandis qu'il grossit et que l'utérus s'agrandit autour de lui, les organes abdominaux de la mère se trouvent comprimés et déplacés. Cela entraîne des mictions fréquentes et des blocages du tube digestif.

L'accouchement commence par le *travail*, une série de contractions utérines de plus en plus intenses et rapprochées qui poussent le fœtus et le placenta hors du corps. Une fois le travail commencé, des régulateurs locaux (prostaglandines) et certaines hormones (surtout l'oestradiol et l'ocytocine) maintiennent les contractions régulières de l'utérus (**figure 46.18**). L'action de l'ocytocine installe une boucle de rétroactivation très importante durant le travail (voir le concept 45.2) : chaque contraction utérine stimule la sécrétion d'ocytocine qui, à son tour, déclenche la contraction suivante.

▼ **Figure 46.18** La rétroactivation du travail de l'accouchement.



HABILITÉS VISUELLES ► Examinez les circuits de rétroactivation.

À votre avis, quel est l'effet d'une seule dose d'ocytocine administrée à une femme enceinte à la fin de la 39^e semaine de gestation ?

Le travail comprend trois périodes (**figure 46.19**). La première période est celle de la dilatation du col utérin, qui s'ouvre et s'amincit. La dilatation complète du col en marque la fin. La deuxième période est celle de l'expulsion, ou naissance, de l'enfant. Les contractions vigoureuses et continues forcent le fœtus à descendre et à sortir de l'utérus et du vagin. Enfin, la troisième et dernière période est celle de la délivrance, consistant en l'expulsion du placenta, qui suit normalement la sortie de l'enfant.

La **lactation**, c'est-à-dire la production et la sécrétion de lait par les glandes mammaires, fait partie des soins postnataux propres aux mammifères. Après la naissance, la diminution de la concentration d'oestradiol ainsi que la succion du bébé font

▼ **Figure 46.19** Les trois périodes du travail.



cesser la rétro-inhibition qui s'exerçait sur l'adénohypophyse et permettent la sécrétion de prolactine. La prolactine stimule les glandes mammaires à produire du lait. La succion du bébé stimule également la sécrétion d'ocytocine par la neurohypophyse, avec pour résultat l'éjection du lait par les glandes mammaires (voir la figure 45.14).

La tolérance immunitaire de l'embryon et du fœtus de la part de la mère

Du point de vue immunologique, la grossesse constitue une énigme. En effet, comme la moitié des gènes de l'embryon

viennent du père, de nombreux marqueurs embryonnaires présents à la surface des cellules sont étrangers à la mère. Mais comment se fait-il que la mère ne rejette pas ce corps étranger comme elle rejeterait un greffon portant des antigènes venant d'une autre personne ? Le lien entre certaines maladies auto-immunes et la grossesse pourrait aider à résoudre le mystère. Par exemple, les symptômes de la polyarthrite rhumatoïde, une affection articulaire auto-immune, s'atténuent durant la grossesse. Ces observations donnent à penser que la régulation générale du système immunitaire change durant la grossesse. Les immunologistes spécialistes de la reproduction essaient de comprendre comment ces changements protègent le fœtus en développement.

La contraception et l'avortement

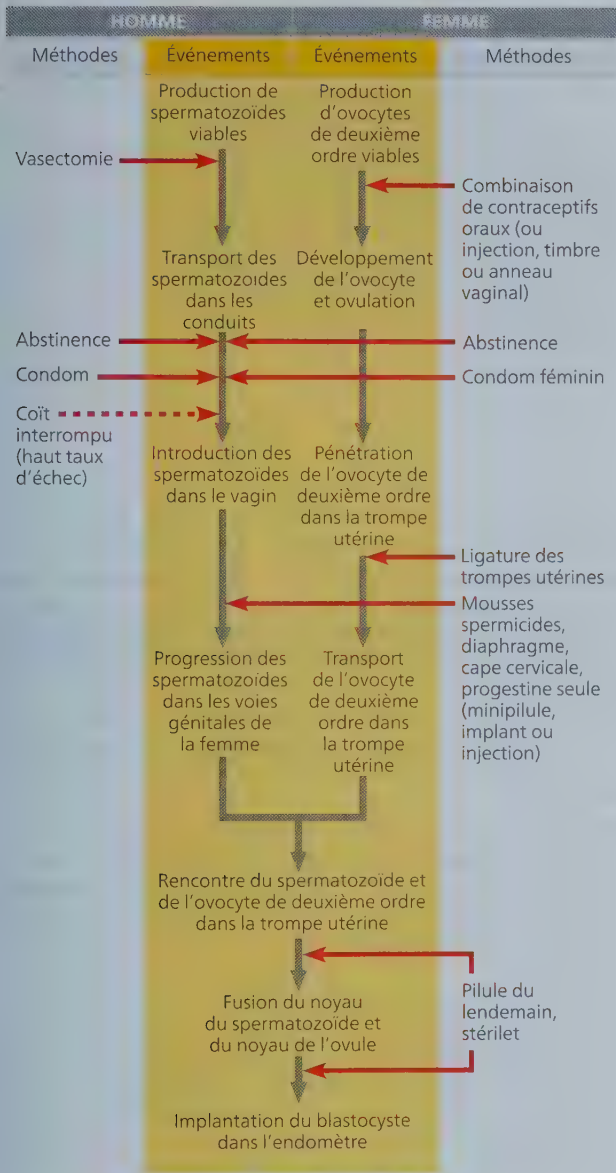
La **contraception**, c'est-à-dire le fait de provoquer une infécondité temporaire chez la femme ou chez l'homme, recourt à différentes méthodes. Certaines d'entre elles empêchent la libération d'ovocytes matures et de spermatozoïdes mûrs par les gonades. D'autres rendent la fécondation impossible en empêchant les spermatozoïdes et les ovules de se rencontrer. D'autres encore consistent à empêcher l'implantation de l'embryon. La courte présentation qui suit (**figure 46.20**) traite des aspects biologiques de ces méthodes et n'a pas les objectifs d'un guide de contraception. Pour obtenir de l'information complémentaire, on consultera un médecin ou un autre spécialiste de la santé.

On peut éviter la fécondation en s'abstenant d'avoir des relations sexuelles ou en utilisant l'un des divers types de barrières qui empêchent les spermatozoïdes d'entrer en contact avec l'ovocyte de deuxième ordre. L'abstinence périodique, parfois appelée *planification familiale naturelle*, consiste à ne pas avoir de relations sexuelles pendant la période féconde. Comme l'ovocyte peut survivre dans la trompe utérine durant 24 à 48 heures et les spermatozoïdes jusqu'à 5 jours, un couple qui pratique l'abstinence périodique devrait éviter les relations sexuelles plusieurs jours avant l'ovulation et plusieurs jours après. Les méthodes contraceptives basées sur la prévision de la date d'ovulation nécessitent une bonne connaissance des signes physiologiques associés à l'ovulation (comme le changement de consistance de la glaire cervicale). On notera d'ailleurs que le taux d'échec va de 10 à 20% chez les couples qui utilisent cette méthode. (Le « taux d'échec » est le pourcentage annuel de femmes qui deviennent enceintes durant la période où elles utilisent une méthode de contraception.)

Le *coït interrompu*, c'est-à-dire le retrait du pénis avant l'éjaculation, n'est pas une méthode de contraception fiable. En effet, les sécrétions qui précèdent l'éjaculation peuvent contenir des spermatozoïdes. De plus, l'homme ne peut pas toujours faire preuve de la maîtrise de soi nécessaire et il suffit de moins d'une seconde pour éjaculer des dizaines de millions de spermatozoïdes.

Utilisées adéquatement, les différentes barrières mécaniques qui empêchent les spermatozoïdes d'atteindre l'ovocyte connaissent un taux d'échec inférieur à 10%. Le **préservatif masculin**, ou **condom**, est une fine membrane naturelle ou un étui de latex qui s'ajuste sur le pénis de façon à recueillir le sperme. Pour les individus actifs sexuellement, seuls les condoms en latex fournissent une protection contre la transmission du VIH

▼ **Figure 46.20 Les mécanismes de certaines méthodes de contraception.** Les flèches rouges indiquent à quel moment ces méthodes, dispositifs ou produits interviennent dans le processus menant de la production de spermatozoïdes ou d'ovocytes de deuxième ordre à un embryon implanté et en développement.



et des autres *infections transmissibles sexuellement (ITS)*. (Cependant, cette protection n'est pas absolue.) Le **diaphragme**, barrière mécanique la plus utilisée par les femmes, est une coupole de caoutchouc mince qu'on place dans la partie profonde du vagin avant le rapport sexuel. L'efficacité de ces deux méthodes augmente lorsqu'on les combine avec une mousse ou un gel spermicides (qui tue les spermatozoïdes). Parmi les autres barrières mécaniques, on trouve la cape cervicale, préservatif féminin qui s'ajuste étroitement au col utérin et peut rester longtemps en place par succion, et la pochette vaginale, ou «condom féminin».

À part l'abstinence complète ou la stérilisation (abordée plus loin), les méthodes contraceptives les plus efficaces sont le stérilet et les contraceptifs oraux. Le stérilet présente un taux d'échec de 1% ou moins; c'est la méthode réversible la plus répandue à l'extérieur des États-Unis. Inséré par un médecin, le stérilet empêche la fécondation et l'implantation. Les **contraceptifs oraux** (la «pilule») connaissent eux aussi un taux d'échec inférieur à 1%.

Les contraceptifs oraux les plus utilisés se composent d'un mélange d'un œstrogène synthétique et d'une hormone synthétique semblable à la progestérone appelée progestine. Cette combinaison d'hormones reproduit la rétro-inhibition du cycle ovarien en bloquant la libération de GnRH par l'hypothalamus, ainsi que la libération de FSH et de LH par l'adénohypophyse. En empêchant la libération de LH, les progestines bloquent l'ovulation. En inhibant la sécrétion de FSH, la faible dose d'œstrogènes dans la pilule entrave le développement de tout follicule.

Il existe un autre contraceptif oral très efficace qui contient seulement de la progestine. Cette hormone prévient la fécondation principalement en provoquant l'épaississement de la glaire cervicale, afin que celle-ci bloque l'accès de l'utérus au sperme. La progestine provoque également une diminution de la fréquence de l'ovulation et des modifications de la couche fonctionnelle de l'endomètre qui empêchent l'implantation s'il y a eu fécondation. Elle peut être administrée sous forme de capsule à action retardée de la grosseur d'une allumette qu'on implante sous la peau et qui agit pendant une période pouvant atteindre cinq ans. La progestine se présente également sous forme de produit qu'on injecte tous les trois mois ainsi que sous forme de comprimé (minipilule) à prendre quotidiennement. Les taux d'échec sont minimes.

Les contraceptifs hormonaux ont des effets bénéfiques et des effets nuisibles. Ainsi, ils augmentent le risque de maladie cardiovasculaire : chez les non-fumeuses, l'augmentation est légère, mais chez les femmes qui fument régulièrement, le risque de maladie cardiovasculaire est de 3 à 10 fois plus élevé. En revanche, les contraceptifs oraux éliminent les risques liés à la grossesse; les femmes qui en prennent présentent un taux de mortalité égal à la moitié de celui des femmes enceintes. En outre, la pilule diminue les risques de cancers de l'ovaire et de l'endomètre. Il n'existe pas encore de contraceptif hormonal pour les hommes.

La stérilisation empêche la production ou la libération des gamètes dans les voies génitales de manière permanente. La **ligature des trompes** est la méthode de stérilisation la plus courante chez la femme. Elle consiste à cautériser ou à lier une section des trompes utérines afin d'empêcher la progression des ovocytes matures jusqu'à l'utérus. Chez l'homme, on procède à la **vasectomie**, c'est-à-dire à la section des conduits déférents, pour empêcher les spermatozoïdes d'entrer dans l'urètre. La stérilisation ne perturbe pas la sécrétion d'hormones sexuelles ni la fonction sexuelle, et elle n'altère pas les cycles menstruels de la femme ou le volume de l'éjaculat de l'homme. Même si la stérilisation est considérée comme définitive, les deux interventions sont réversibles par microchirurgie.

L'**avortement** (ou IVG, pour «interruption volontaire de grossesse») est l'interruption d'une grossesse en cours. L'avortement spontané, ou *fausse couche*, survient fréquemment (un cas sur trois pour l'ensemble des grossesses, souvent même

avant que la femme sache qu'elle est enceinte). Par ailleurs, chaque année, environ 200 000 femmes en France, 30 000 au Québec et 700 000 aux États-Unis choisissent l'avortement pratiqué par un médecin.

La pilule abortive RU 486 (pour *Roussel-Uclaf 486*), ou mifépristone, conçue en France dans les années 1980, permet aux femmes d'avorter dans les sept premières semaines de leur grossesse sans recourir à la chirurgie. Ayant une composition chimique semblable à celle de la progestérone, elle occupe les récepteurs de progestérone situés dans l'utérus. Elle agit comme inhibiteur compétitif et empêche la progestérone de maintenir la grossesse. On l'administre avec une petite quantité de prostaglandines afin de déclencher des contractions utérines.

Les technologies modernes en reproduction

Des découvertes scientifiques et des avancées techniques récentes ont permis de prendre des mesures à l'égard de plusieurs problèmes de reproduction, y compris les anomalies génétiques et l'infertilité.

Le dépistage des maladies durant la grossesse

Il est maintenant possible de diagnostiquer de nombreuses maladies et anomalies génétiques chez le fœtus. L'échographie, une technique non invasive qui utilise des ultrasons pour observer le fœtus, permet d'évaluer sa grosseur et son état. L'amniocentèse et la biopsie des villosités choriales sont des techniques invasives qui consistent à prélever à l'aide d'une aiguille des cellules dans le liquide ou les tissus autour de l'embryon en vue d'analyses génétiques (voir la figure 14.19).

Une technologie de la reproduction mise au point récemment permet désormais d'analyser le génome du fœtus à partir d'un échantillon sanguin de la future mère. Comme nous l'avons vu au chapitre 14, le sang d'une femme enceinte contient de l'ADN appartenant à l'embryon en développement. Comment cela se peut-il ? Eh bien, le placenta est en contact à la fois avec le sang de la mère et celui de l'embryon. Lorsque certaines cellules produites par l'embryon vieillissent et meurent, et se brisent dans le placenta, l'ADN libéré entre dans la circulation maternelle. Ainsi, bien que le sang de la mère contienne évidemment des fragments d'ADN lui appartenant, de 10 à 15 % de l'ADN qui circule dans son sang est celui de son fœtus. On peut utiliser la réaction en chaîne par polymérase (PCR) et le séquençage à haut débit pour analyser cet ADN fœtal et recueillir des données très utiles.

Malheureusement, presque toutes les maladies qu'on peut détecter de cette manière sont impossibles à soigner dans l'utérus, et beaucoup d'entre elles ne le sont pas plus après la naissance. Le dépistage génétique peut ainsi obliger les parents à faire un choix difficile : mettre fin à la grossesse ou accepter d'avoir un enfant qui pourrait souffrir d'une anomalie grave ou dont l'espérance de vie serait limitée. Il n'est pas facile de prendre de telles décisions. Cela demande une réflexion éclairée et les conseils de personnes compétentes.

Dans un proche avenir, les parents auront accès à une foule de renseignements génétiques et se heurteront à encore plus de questions. D'ailleurs, en 2012 est né le premier enfant dont on a séquencé tout le génome avant sa naissance. Pourtant, la connaissance du génome entier d'une personne ne signifie pas que l'on dispose de toute l'information possible. Pensons,

par exemple, au syndrome de Klinefelter, qui touche seulement les garçons et qui se caractérise par la présence d'un chromosome X surnuméraire. Cette maladie plutôt répandue touche 1 homme sur 1 000 et peut causer une diminution du taux de testostérone, une féminisation des traits et l'infertilité. Toutefois, bien que la maladie s'accompagne de symptômes invalidants chez certains hommes, sa forme est parfois si légère qu'elle passe inaperçue, y compris par ceux qui en sont atteints. De même, en ce qui a trait à d'autres maladies, comme le diabète, les cardiopathies ou le cancer, les séquences génomiques ne renseignent parfois que sur le degré de risque. Il est donc permis de s'interroger sur l'incidence que ces renseignements génétiques pourraient avoir sur les futurs parents, non seulement quant à leur décision de mener une grossesse à son terme, mais également quant à leur façon d'élever un enfant.

L'infertilité et la fécondation in vitro

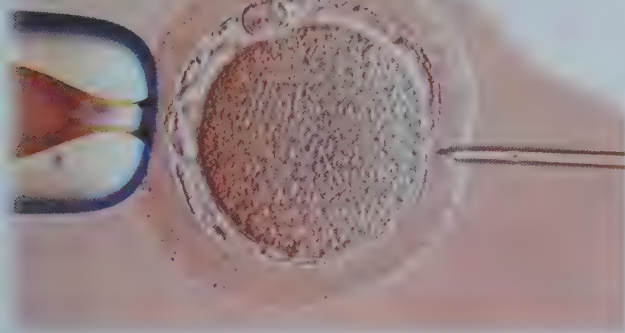
L'infertilité (incapacité de concevoir) est assez répandue. Elle touche environ 1 couple sur 10 dans le monde. Les causes de l'infertilité varient et ont leur origine chez les deux sexes dans des proportions presque égales. Chez les femmes, toutefois, la difficulté à concevoir et les risques d'anomalies génétiques fœtales augmentent graduellement après l'âge de 35 ans. Selon plusieurs études, la durée prolongée de la méiose des ovocytes serait en grande partie responsable de l'augmentation des risques.

Les ITS figurent en tête de liste des causes d'infertilité évitables. Chez les femmes de 15 à 24 ans, on rapporte environ 830 000 cas de chlamydia et de gonorrhée chaque année aux États-Unis et plus de 10 000 au Québec. Le taux de personnes infectées dans ce groupe d'âge, autant chez les jeunes hommes que chez les jeunes femmes, est en augmentation constante. Le nombre réel de femmes infectées par la chlamydia et la gonorrhée est beaucoup plus élevé, cependant, car la plupart d'entre elles ne présentent pas de symptômes et ignorent qu'elles sont infectées. Or, jusqu'à 40 % des femmes qui ne reçoivent pas de traitement contre la chlamydia ou la gonorrhée souffriront d'une maladie inflammatoire qui entraînera l'infertilité ou des complications potentiellement mortelles pour le bébé durant la grossesse.

Il est possible de remédier à certains problèmes d'infertilité. L'hormonothérapie peut parfois augmenter la production de spermatozoïdes et d'ovules, tandis que la chirurgie peut corriger des troubles comme un blocage des trompes utérines. Dans certains cas, le médecin recommande la **fécondation in vitro (FIV)**, qui consiste à mettre en présence des ovocytes et des spermatozoïdes dans des boîtes de Petri. Lorsque le zygote a atteint le stade de huit cellules, on l'insère dans l'utérus en espérant qu'il s'implante. Quand les spermatozoïdes sont peu mobiles ou trop peu nombreux, on injecte un spermatozoïde entier ou le noyau d'une spermatide directement dans un ovocyte pour le féconder (**figure 46.21**). Chaque tentative de fécondation *in vitro* est coûteuse, mais on estime que plus d'un million de couples ont réussi à concevoir grâce à cette méthode.

Peu importe comment la fécondation a eu lieu, il s'ensuit un plan de développement qui transforme le zygote unicellulaire en organisme multicellulaire. Les mécanismes de ce remarquable programme de développement chez les humains et d'autres animaux font l'objet du chapitre 47.

▼ **Figure 46.21** La fécondation *in vitro* (FIV). Dans cette méthode de FIV, on maintient l'ovule en place avec une pipette (à gauche) et, à l'aide d'une aiguille très fine, on injecte un spermatozoïde dans le cytoplasme de l'ovule (MB colorisée).



1. Pourquoi la gonadotrophine chorionique humaine (hCG) ne sert-elle aux tests de grossesse que dans les premiers mois ? Quel est son rôle dans la grossesse ?
2. En quoi la ligature des trompes est-elle semblable à la vasectomie ?
3. **ET SI ?** ► Si le noyau d'un spermatozoïde est injecté dans un ovocyte, quelles étapes de la gamétogenèse et de la fécondation évite-t-on ?

Voir les réponses proposées à l'appendice A.

RÉVISION DU CHAPITRE 46



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

Résumé des concepts clés

CONCEPT 46.1

Il existe deux modes de reproduction animale : sexuée et asexuée (p. 1120 à 1122)

- La **reproduction sexuée** nécessite la fusion de gamètes mâle et femelle pour former un **zygote** diploïde. La **reproduction asexuée** produit des descendants dont les gènes proviennent tous d'un seul parent (sans fusion de gamètes). La **scissiparité**, le bourgeonnement et la fragmentation accompagnée d'une régénération sont des mécanismes qui permettent la reproduction asexuée. La **parthénogenèse**, l'**hermaphrodisme** et l'inversion de sexe sont des variantes des deux modes de reproduction. Les cycles reproducteurs sont régulés par des hormones et des stimulus environnementaux.

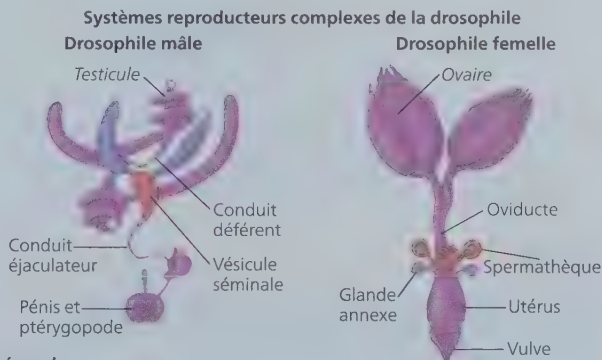
? Une paire de descendants haploïdes produits par parthénogenèse sont-ils génétiquement identiques ? Expliquez votre réponse.

CONCEPT 46.2

La fécondation repose sur des mécanismes qui permettent la rencontre d'un spermatozoïde et d'un ovule appartenant à la même espèce (p. 1122 à 1126)

- La **fécondation** peut être externe, si les spermatozoïdes et les ovules sont libérés à l'extérieur du corps, ou interne, si un des spermatozoïdes déposés par le mâle féconde un ovule se trouvant à l'intérieur du système reproducteur de la femelle. Dans les deux cas, la synchronisation est cruciale et généralement assurée par des stimulus

environnementaux, des phéromones ou des stimulus comportementaux de parade nuptiale. La fécondation interne est souvent associée à une progéniture relativement peu nombreuse et à des soins parentaux plus assidus destinés à protéger les petits. Le plus simple des systèmes reproducteurs est constitué de cellules indifférenciées qui produisent des gamètes dans la cavité pelvienne. Le plus complexe comporte des **gonades**, qui produisent des gamètes, et divers conduits et glandes annexes, qui transportent et protègent les gamètes et l'embryon en développement. Bien que la reproduction sexuée nécessite la participation d'un partenaire, elle rend également possible une compétition entre individus et entre gamètes.



Légende

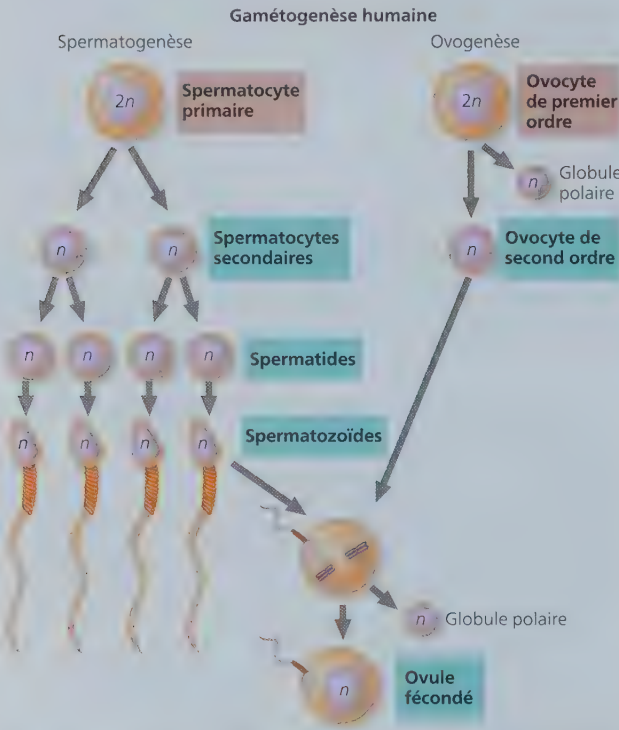
Production de gamètes

Protection et transport des gamètes

? Parmi les éléments suivants, nommez celui qui est propre aux mammifères : un utérus chez la femelle et un conduit déférent chez le mâle ; un développement interne complexe ; des soins parentaux aux petits.

Les organes reproducteurs produisent et transportent les gamètes (p. 1126 à 1129)

- Chez l'homme, les **spermatozoïdes** sont produits dans les **testicules**, qui sont suspendus à l'extérieur du corps dans le **scrotum**. Des conduits dans le scrotum relient les testicules aux glandes annexes internes et à l'extrémité du **pénis**. Les organes génitaux externes de la femme comprennent principalement les **lèvres** et le **gland du clitoris**. Les organes génitaux internes sont le **vagin**, l'**utérus**, les **trompes utérines** et les **ovaires**. Les **ovocytes** sont produits dans les ovaires; après avoir été fécondés, ils se développent dans l'utérus.
- Chez les femelles, la forme de **gamétogenèse**, c'est-à-dire la production de gamètes, est l'**ovogenèse**, tandis que chez le mâle c'est la **spermatogenèse**. La méiose de l'ovogenèse est discontinue et cyclique, et produit un seul ovocyte volumineux chez la femme. Par contre, la spermatogenèse est continue et produit quatre spermatozoïdes chez l'homme.



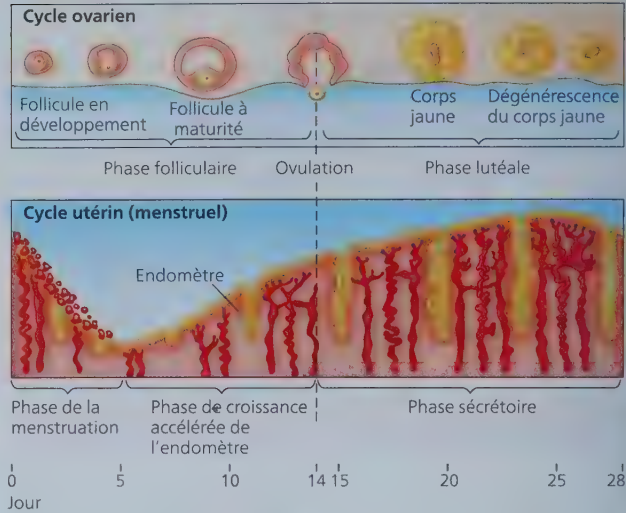
? L'ovule et le spermatozoïde présentent de grandes différences sur le plan de la taille et du contenu. Quel lien peut-on faire entre ces différences anatomiques, d'une part, et les fonctions respectives de ces gamètes dans la reproduction, d'autre part ?

CONCEPT 46.4

L'interaction complexe entre les stimulines et les hormones sexuelles régule la reproduction chez les mammifères (p. 1129 à 1136)

- Chez les mammifères, la GnRH hypothalamique régule la libération de deux hormones par l'adénohypophyse: la **FSH** et la **LH**. Chez l'homme, la FSH et la LH régissent la sécrétion des androgènes (surtout la **testostérone**) et la production de spermatozoïdes. Chez la femme, les sécrétions cycliques de FSH et de LH orchestrent les cycles ovarien et utérin par l'intermédiaire des œstrogènes, surtout l'**œstradiol**, et de la **progestérone**. Le follicule en développement et le **corps jaune**

sécrètent aussi des hormones, qui aident à coordonner les cycles ovarien et utérin par des mécanismes de rétroactivation et de rétro-inhibition.



- Dans le **cycle œstral**, l'**endomètre** ne se détache pas; il est réabsorbé. Aussi, dans ce cycle, la réceptivité sexuelle est limitée à la période des chaleurs (le rut). Chez l'homme et la femme, plusieurs caractéristiques de l'excitation sexuelle et de l'orgasme se ressemblent et témoignent de l'origine développementale commune de leurs structures reproductrices.

? Pourquoi les stéroïdes anabolisants causent-ils une diminution du nombre de spermatozoïdes ?

CONCEPT 46.5

Chez les mammifères placentaires, le développement embryonnaire se déroule entièrement dans l'utérus (p. 1136 à 1143)

- Après la fécondation de l'ovocyte et la fin de la méiose dans l'oviducte, une série de divisions cellulaires transforme le zygote en **blastocyste** avant son implantation dans l'endomètre. La formation des organes se fait en huit semaines. L'absence de rejet du fœtus de la part de la femme enceinte n'est pas encore très bien comprise, mais il est possible qu'elle résulte d'une suppression partielle de la réaction immunitaire dans l'utérus.
- Pour éviter les grossesses, on peut recourir à des méthodes de **contraception** qui empêchent les gonades de libérer des gamètes matures ainsi que la fécondation qui bloque l'implantation de l'embryon. L'**avortement** est l'interruption d'une grossesse.
- La technologie moderne contribue à détecter des problèmes avant la naissance et peut également aider à traiter l'infertilité grâce à des traitements hormonaux et à la **fécondation in vitro**.

? Quelle voie l'O₂ du sang de la mère doit-il suivre pour se rendre dans les cellules du corps du fœtus ?

Évaluation

NIVEAU 1 : CONNAISSANCES ET COMPRÉHENSION

- Parmi les phénomènes suivants, lequel caractérise la parthénogenèse ?
 - Un individu peut changer de sexe au cours de sa vie.
 - Des groupes spécialisés de cellules peuvent devenir de nouveaux individus.
 - Un organisme est d'abord mâle, puis femelle.
 - Un ovule se développe sans avoir été fécondé.

2. Chez les mammifères mâles, les systèmes urinaire et reproducteur ont en commun :
 - a) le conduit déférent.
 - b) l'urètre.
 - c) l'urètre.
 - d) la prostate.
3. Parmi les structures mâles et femelles suivantes, lesquelles sont le *plus* éloignées du point de vue de la fonction ?
 - a) Tubules séminifères contournés : col utérin.
 - b) Conduit déférent : oviducte.
 - c) Testostérone : œstradiol.
 - d) Scrotum : grandes lèvres.
4. Les pics de production d'hormone lutéinisante (LH) et d'hormone folliculostimulante (FSH) se produisent :
 - a) pendant la phase menstruelle du cycle menstruel (utérin).
 - b) au début de la phase folliculaire du cycle ovarien.
 - c) juste avant l'ovulation.
 - d) pendant la phase sécrétoire du cycle menstruel.
5. Au cours de la grossesse, les ébauches de tous les organes se forment :
 - a) pendant le premier trimestre.
 - b) pendant le deuxième trimestre.
 - c) pendant le troisième trimestre.
 - d) au stade du blastocyste.
7. Parmi les nombres suivants, lequel est le même durant l'ovogenèse et la spermatogenèse ?
 - a) Le nombre de fois que la méiose s'interrompt.
 - b) Le nombre de gamètes fonctionnels produits par méiose.
 - c) Le nombre de divisions méiotiques requis pour produire chaque gamète.
 - d) Le nombre de types de cellules produits par méiose.
8. Parmi les énoncés suivants au sujet de la reproduction humaine, lequel est *faux* ?
 - a) La fécondation a lieu dans la trompe utérine.
 - b) La spermatogenèse et l'ovogenèse requièrent des températures différentes.
 - c) L'ovocyte termine la méiose après qu'un spermatozoïde a pénétré à l'intérieur.
 - d) Les premières étapes de la spermatogenèse se déroulent tout près de la lumière des tubules séminifères contournés.

NIVEAU 3 : SYNTHÈSE ET ÉVALUATION

9. **FAITES UN DESSIN ►** Au cours de la spermatogenèse humaine, la mitose des cellules souches (spermatogonies souches) donne naissance à une cellule qui reste à l'état de cellule souche et à une autre cellule qui devient une spermatogonie. (a) Dessinez quatre divisions mitotiques pour une cellule souche, puis indiquez les cellules filles. (b) Pour une spermatogonie, dessinez les cellules qu'elle produira après une division mitotique suivie d'une méiose. Identifiez les cellules, puis indiquez la mitose et la méiose. (c) Expliquez ce qui arriverait si les cellules souches se divisaient comme les spermatogonies.

Voir les réponses proposées à l'appendice A.

NIVEAU 2 : APPLICATION ET ANALYSE

6. Parmi les énoncés suivants, lequel est vrai ?
 - a) Tous les mammifères ont des cycles menstruels.
 - b) La couche fonctionnelle de l'endomètre se détache dans le cycle menstruel, alors qu'elle est généralement réabsorbée dans le cycle œstral.
 - c) Le cycle œstral se produit plus souvent que le cycle menstruel.
 - d) Dans le cycle œstral, l'ovulation se produit avant l'épaississement de l'endomètre.

