

TORTORA

DERRICKSON

Anatomie et physiologie humaines

6^e édition

Best Seller
Mondial

+ EN LIGNE

OFFERT

Les solutions des questions
des figures

deboeck **B**
SUPÉRIEUR

Anatomie et physiologie humaines

Chez le même éditeur

BENTZ M., MORAND CONSTANT M., Exercices illustrés d'anatomie et de physiologie

BOMMAS-EBERT U., TEUBNER P., VOSS R., Cours d'anatomie

BRASSET C., SPEAR M., Anatomie 143 planches à colorier

DALLEY A.F., MOORE K.L., AGUR A.M.R., Anatomie médicale. Aspects fondamentaux et applications cliniques, 4^e éd.

FIX J.D., BRUECKNER J., J. GOULD D., Neuroanatomie, 5^e éd.

GANONG W., BARMAN S., BARRETT K., BOITANO S., BROOKS H., Physiologie médicale, 3^e éd.

LARSEN W., SCHOENWOLF G.C., BLEYL S.B., BRAUER P.R., FRANCIS-WEST P., Embryologie humaine, 4^e éd.

RAVEN P.H., JOHNSON G.B., LOSOS J.B., MASON K.A., SINGER S.S., Biologie, 5^e éd.

SANDER A., SCHWARZ S., Anatomie de poche.

SCHUNKE M., SCHULTE E., SCHUMACHER U., Atlas d'anatomie Prométhée. Anatomie générale et système locomoteur

SCHUNKE M., SCHULTE E., SCHUMACHER U., Atlas d'anatomie Prométhée. Tête, cou et neuroanatomie

SCHUNKE M., SCHULTE E., SCHUMACHER U., Atlas d'anatomie Prométhée. Organes internes

SHERWOOD L., Physiologie humaine, 3^e éd.

THIELE C., Anatomie et physiopathologie humaines de poche

TORTORA G.J., DERRICKSON B., Manuel d'anatomie et de physiologie humaines, 3^e éd.

TUNSTALL R., SHAH N., Anatomie de surface

VALERIUS K.P., ALEJANDRE LAFONT E., FRANK A., HAMILTON C., KLOSTER B.C., KREUTZER R., Les muscles

YAMIN J., Apprendre l'anatomie du corps humain par le dessin

Tortora | Derrickson

Anatomie et physiologie humaines

6^e édition

Traduction de la 16^e édition américaine
par Renan Bain et Frédéric Pariaud

Ouvrage original

Cet ouvrage est une version française de *Principles of Anatomy and Physiology*, 16th Edition, de Gerard J. Tortora et Bryan Derrickson publiée et vendue à travers le monde par John Wiley & Sons, Inc.

Copyright © 2021 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

French translation @ 2022, De Boeck Supérieur.

All rights reserved. This translation published under license with the original publisher John Wiley & Sons, Inc.

Pour toute information sur notre fonds et les nouveautés dans votre domaine de spécialisation, consultez notre site web: **www.deboecksuperieur.com**

© De Boeck Supérieur s.a., 2022
Rue du Bosquet, 7, B-1348 Louvain-la-Neuve
Pour la traduction française

6^e édition

Tous droits réservés pour tous pays.

Il est interdit, sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, de reproduire (notamment par photocopie) partiellement ou totalement le présent ouvrage, de le stocker dans une banque de données ou de le communiquer au public, sous quelque forme et de quelque manière que ce soit.

Dépôt légal :
Bibliothèque Nationale, Paris : juin 2022
Bibliothèque royale de Belgique, Bruxelles : 2022/13647/095

ISBN 978-2-8073-3444-1

Les auteurs



JERRY TORTORA est professeur de biologie et ancien coordinateur en biologie au Bergen Community College de Paramus, dans le New Jersey, où il enseigne l'anatomie humaine, la physiologie et la microbiologie. Il a obtenu une licence en biologie de l'Université Fairleigh Dickinson et une maîtrise en sciences de l'éducation du Mont-Clair State College.

Jerry est, avant tout, dédié à ses étudiants et à leurs aspirations. En reconnaissance de cet engagement, Jerry a reçu le prix commémoratif du président de la MACUB en 1992. En 1996, il a reçu un prix d'excellence du NISOD (National Institute for Staff and Organizational Development) de l'Université du Texas et a été choisi pour représenter le Bergen Community College dans le cadre d'une campagne visant à mieux faire connaître les contributions de certaines universités (ou collèges communautaires) à l'enseignement supérieur.

Jerry est l'auteur de plusieurs manuels de sciences et de cahiers de travaux pratiques qui ont beaucoup de succès. La rédaction de ces ouvrages lui demande souvent plus de 40 heures de travail par semaine, en plus de ses responsabilités pédagogiques. Néanmoins, il a encore du temps pour quatre ou cinq séances d'entraînements sportifs hebdomadaires incluant le cyclisme et la course à pied. Il aime également assister à des matchs de basket-ball universitaire et de hockey professionnel et à des représentations au Metropolitan Opera.

À mes enfants : Lynne, Gerard Jr., Kenneth, Anthony, et Drew, dont l'amour et le soutien ont été le vent sous mes ailes. GJT



BRYAN DERRICKSON est professeur de biologie au Valencia College à Orlando, en Floride, où il enseigne l'anatomie et la physiologie humaines, ainsi que la biologie générale et la sexualité humaine. Il a obtenu sa licence en biologie du Morehouse College et son doctorat en physiologie de l'Université Duke. Lorsque Bryan étudiait à l'Université de Duke il a intégré la division de physiologie du département de biologie cellulaire. Par conséquent, bien qu'il soit diplômé en biologie cellulaire, il a axé sa formation sur la physiologie. À l'Université de Valence, il participe fréquemment au recrutement de nouveaux professeurs. Il a été membre du Conseil de l'Université, qui est l'organe directeur du Collège, et du Comité Académique de l'Université (aujourd'hui l'Académie de l'Enseignement et de l'Apprentissage), qui définit les normes pour l'acquisition de postes permanents par les membres du corps professoral. À l'échelle nationale, il est membre de la Société d'Anatomie Humaine et de Physiologie (HAPS) et de l'Association Nationale des Professeurs de Biologie (NABT). Bryan a toujours voulu enseigner. Inspiré par plusieurs professeurs de biologie à l'université, il a décidé de poursuivre dans le domaine de la physiologie pour l'enseigner au niveau universitaire. Il est totalement impliqué dans le succès de ses étudiants et il aime particulièrement les défis liés à la diversité de la population estudiantine en termes d'âge, d'ethnie et de capacités académiques. Il a à cœur de pouvoir tous les convaincre de l'intérêt de sa discipline malgré leurs différences. Ses étudiants ont reconnu ses efforts pédagogiques et l'ont proposé pour le prix du « Mérite pour le Professeur qui fait du Collège de Valence le meilleur endroit pour étudier ». Bryan a reçu ce prix trois fois.

À ma famille : Rosalind, Hurley, Cherie et Robb. Votre soutien et votre motivation ont été précieux pour moi. B.H.D.

Avant-propos

Bienvenue dans votre cours d'anatomie et de physiologie ! Vous êtes nombreux à suivre ce cours parce que vous espérez faire carrière dans l'un des domaines connexes de la santé ou des soins infirmiers. Ou peut-être, simplement, cela vous intéresse d'en apprendre davantage sur votre propre corps. Quelle que soit votre motivation, *Anatomie et physiologie humaines*, 6^{ème} édition a tout le contenu et les outils dont vous avez besoin pour naviguer avec succès dans cet apprentissage qui peut être très difficile.

Au cours des précédentes éditions de ce texte, nous avons fait tous les efforts nécessaires pour vous fournir une présentation précise, clairement rédigée et illustrée, de manière experte, de la structure et de la fonction du corps humain et pour examiner en détails les mises en applications pratiques et pertinentes de vos connaissances dans la vie de tous les jours et au cours de votre carrière. Cette seizième édition reste fidèle à ces objectifs. Elle se distingue des éditions précédentes par des illustrations mises à jour.

Eponymes et terminologie anatomique officielle

Depuis de nombreuses années, nous avons progressivement réduit le nombre d'éponymes utilisés et augmenté le nombre des termes anatomiques acceptés officiellement. Nous avons procédé ainsi afin de permettre une transition progressive pour les enseignants et les étudiants et leur permettre de se familiariser petit à petit avec cette nomenclature au fur et à mesure des éditions de cet ouvrage. Dans cette édition, nous avons quasiment éliminé tous les éponymes et les avons remplacés par la nomenclature anatomique moderne. Nous en avons quand même conservé quelques-uns comme le syndrome de Down et la maladie d'Alzheimer car ils sont encore très couramment utilisés dans la littérature et les examens médicaux ainsi que par le grand public. Vous constaterez qu'à chaque fois qu'un éponyme apparaît pour la première fois dans le texte et les illustrations, il est référencé en italique et il fait directement suite au terme officiel de la nouvelle nomenclature en caractères gras. En outre, même si ces éponymes sont retrouvés dans le glossaire et dans l'index, ils sont toujours associés à la nouvelle terminologie. Vous trouverez également dans l'appendice F une liste des éponymes médicaux avec leurs nouveaux noms. Cela vous permettra d'effectuer plus facilement des liens entre ces éponymes et les termes qui doivent être utilisés pour les nommer dans la nouvelle nomenclature.

Concernant la terminologie anatomique, nous nous sommes basés sur les termes anatomiques officiels référencés dans la Terminologia Anatomica (seconde édition, 2019) et pour les termes cytologiques et histologiques, nous avons utilisés les termes de la Terminologia Histologica (2008). Encore une fois, il nous est arrivé de conserver certains termes non-officiels à cause de leur usage commun dans la littérature scientifique. Parmi ces termes que nous avons conservés, prenons l'exemple de la membrane plasmique et non plasmalemmme ou encore celui de la jonction neuromusculaire et non de la synapse neuromusculaire. Lorsque ces termes sont retrouvés dans le texte,

c'est d'abord le terme officiel qui est présenté en caractères gras puis le terme non-officiel qui est présenté en caractères italiques. Comme pour les éponymes, tous les termes non-officiels sont listés dans le glossaire et dans l'index et directement liés à leurs traductions en nouvelle nomenclature, là encore, pour faciliter l'établissement de liens entre ces deux terminologies.

Points forts de la sixième édition

Dans cette nouvelle édition d'*Anatomie et physiologie humaines*, nous avons scrupuleusement suivi les conseils de nos différents groupes de pairs et intégré la terminologie moderne ainsi que les récentes découvertes en anatomie et en physiologie. Nous avons également enrichi considérablement notre offre d'apprentissage et les aspects esthétiques de nos illustrations.

Dans les précédentes éditions, notre ouvrage a utilisé l'homéostasie comme fil rouge des différentes explications données. Nos corps sont exposés à de nombreuses contraintes internes et externes au quotidien. Fort heureusement, nous mettons en place un certain nombre de mécanismes pour contrebalancer les effets de ces contraintes afin de nous maintenir en bonne santé. Il s'agit de l'homéostasie qui correspond à notre capacité à maintenir un état corporel interne stable en réponse aux éventuelles agressions extérieures ou intérieures. Nous avons mis l'accent sur ce thème de l'homéostasie de différentes manières tout au long de l'ouvrage.

Les illustrations spécifiques montrant les différentes étapes des cycles de régulation de l'homéostasie. Bon nombre de ces illustrations ont été améliorées et certaines autres ajoutées, notamment dans le chapitre 18.

Les intérêts cliniques. La présentation de ces intérêts cliniques, toujours en lien avec le thème abordé, permettent aux étudiants de mieux comprendre les mises en applications cliniques, professionnelles ou dans la vie de tous les jours des différents points abordés en anatomie ou en physiologie. Chacun de ces intérêts cliniques est placé directement après l'évocation du thème dans le corps du texte. Nous avons modifié bon nombre de ces intérêts cliniques et ajoutés plusieurs nouveaux cas, la plupart avec une illustration, comme l'intérêt clinique du chapitre 23 à propos de la trachéotomie, des intubations endotrachéales et des respirateurs. Quelques photos en rapport avec les intérêts cliniques et dans les en-têtes de chapitre ont été prises avant la pandémie de Covid 19, c'est la raison pour laquelle les sujets ne sont pas masqués.

Les déséquilibres homéostatiques. Ces parties se retrouvent à la fin de la plupart des chapitres et comprennent de rapides présentations de certaines pathologies et troubles causés par des ruptures de l'équilibre homéostatique. Elles donnent de nombreuses réponses aux questions des étudiants sur ces pathologies.

Focus sur l'homéostasie. Il s'agit en général d'un résumé sur une page entière à la fin d'un chapitre ou d'un ensemble de chapitres pour chacun des systèmes corporels. L'objectif est de permettre aux étudiants de mieux comprendre comment les différents systèmes corporels participent directement à l'homéostasie ou par ses interac-

tions avec les autres systèmes. Ils ont tous été modifiés dans cette nouvelle édition. Voir p. 171 à la fin du chapitre 5.

Les questions d'ouverture de chaque chapitre et leurs illustrations. Les questions médicales, illustrées par des photos, soulignent un des principaux sujets du chapitre et ont été choisies pour motiver les étudiants à chercher la réponse avant même de lire le chapitre. Comme ces questions et illustrations sont orientées vers la clinique, elles participent à une meilleure compréhension des équilibres entre le normal et le pathologique et de leurs liens avec l'homéostasie. Par exemple, comment sont diagnostiquées les pathologies, quelles sont

les mauvaises graisses, quel cancer est difficile à traiter, pourquoi les femmes sont plus touchées que les hommes par l'ostéoporose, quelle est la cause du syndrome fémoro-patellaire, quels sont les effets nocifs des stéroïdes anabolisants, pourquoi sont prescrits des examens sanguins, comment le cancer se diffuse à l'intérieur du corps et quelle est la cause d'un accident vasculaire pour n'en citer que quelques-unes.

Le remplacement quasi-total des éponymes par les termes utilisés en nouvelle nomenclature basé sur l'Anatomie de la *Terminologia Anatomica* (2^e, 2019) et pour l'histologie sur la *Terminologia Histologica* (2008).

Remerciements

La 6^{ème} édition de l'*Anatomie et physiologie humaines* n'aurait pas été possible sans l'aide de nombreuses personnes, en particulier de nos collègues universitaires, véritables compagnons de route. Nous sommes très reconnaissants à Wiley d'avoir chargé un conseil consultatif en anatomie et en physiologie de jouer un rôle de conseil sur les problèmes, les défis et les solutions liés au cours. En particulier, nous remercions les membres du conseil qui ont une expertise dans le cours des deux semestres : DJ Hennager, Kirkwood Community College ; Heather Labbe, Université de Montana-Missoula ; Tom Lancraft, St. Petersburg College ; Russel Nolan, Collège communautaire de Baton Rouge ; et Terry Thompson, Collège communautaire Wor-Wic.

Nous souhaitons remercier tout particulièrement plusieurs collègues universitaires pour leurs contributions utiles à cette édition. Les améliorations et ajouts apportés à cette édition ont été possibles en grande partie grâce à l'expertise et à la participation des personnes suivantes :

Matthew Abbott, Des Moines Area Community College
 Ayanna Alexander-Street, Lehman College of New York
 Donna Balding, Macon State College
 Celina Bellanceau, Florida Southern College
 Dena Berg, Tarrant County College
 Betsy Brantley, Valencia Community College
 Susan Burgoon, Armadillo College
 Steven Burnett, Clayton State University
 Heidi Bustamante, University of Colorado, Boulder
 Anthony Contento, Colorado State University
 Liz Csikar, Mesa Community College
 Kent Davis, Brigham Young University, Idaho
 Kathryn Durham, Lorain County Community College
 Kaushik Dutta, University of New England
 Karen Eastman, Chattanooga State Community College
 John Erickson, Ivy Tech Community College of Indiana
 Tara Fay, University of Scranton
 John Fishback, Ozark Tech Community College
 Linda Flora, Delaware County Community College
 Aaron Fried, Mohawk Valley Community College
 Sophia Garcia, Tarrant County Community College
 Lynn Gargan, Tarrant County Community College
 Caroline Garrison, Carroll Community College
 Harold Grau, Christopher Newport University
 Mark Hubley, Prince George's Community College
 Jason Hunt, Brigham Young University, Idaho
 Lena Garrison, Carroll Community College
 Geoffrey Goellner, Minnesota State University, Mankato
 DJ Hennager, Kirkwood Community College
 Lisa Hight, Baptist College of Health Sciences

Alexander Imholtz, Prince George's Community College
 Michelle Kettler, University of Wisconsin
 Cynthia Kincer, Wytheville Community College
 Tom Lancraft, St. Petersburg College
 Claire Leonard, William Paterson University
 Jerri Lindsey, Tarrant County Community College
 Alice McAfee, University of Toledo
 Shannon Meadows, Roane State Community College
 Shawn Miller, University of Utah
 Erin Morrey, Georgia Perimeter College
 Qian Moss, Des Moines Area Community College
 Mark Nielsen, University of Utah
 Margaret Ott, Tyler Junior College
 Eileen Preseton, Tarrant County College
 Saeed Rahmanian, Roane State Community College
 Sandra Reznik, St. John's University
 Laura Ritt, Burlington Community College
 Amanda Rosenzweig, Delgado Community College
 Jeffrey Spencer, University of Akron
 Sandy Stewart, Vincennes University
 Jane Torrie, Tarrant County College
 Maureen Tubbiola, St. Cloud State
 Jamie Weiss, William Paterson University

Enfin, nous tirons nos chapeaux à toute l'équipe de Wiley. Nous aimons collaborer avec cette équipe enthousiaste, dévouée et talentueuse de professionnels de l'édition. Nos remerciements à toute l'équipe : Natalie Ruffatto, rédactrice en chef ; Patrick Farac, rédacteur en chef indépendant ; Linda Muriello, conceptrice de produit sénior ; Laura Byrnes, développeur de cours sénior ; Lauren Freestone, spécialiste sénior des opérations de production de cours ; Trish McFadden, éditrice ; Georgia Larsen, assistante éditoriale ; Samantha Hart, adjointe à la rédaction ; Tom Nery, graphiste ; Brtittany Hamond, directeur du marketing ; et l'agence Lumina Datamastics.

GERARD J. TORTORA

*Department of Biology and Horticulture,
 School of Lath Science and Technology
 Bergen Community College
 400 Paramus Road*

BRYAN DERRICKSON

*Department of Science, PO Box 3028
 Valencia Collegue
 Orlando, FL 32802
 bderrickson@valenciacollege.edu*

AVANT-PROPOS vi

- 1** Introduction au corps humain **1**
- 2** Le niveau chimique de l'organisation **29**
- 3** Le niveau cellulaire d'organisation **63**
- 4** Le niveau tissulaire d'organisation **111**
- 5** Le système tégumentaire **149**
- 6** Le système squelettique : tissu osseux **177**
- 7** Le système squelettique : le squelette axial **202**
- 8** Le système squelettique : le squelette appendiculaire **242**
- 9** Les articulations **269**
- 10** Le tissu musculaire **305**
- 11** Le système musculaire **344**
- 12** Le tissu nerveux **419**
- 13** La moelle spinale et les nerfs spinaux **461**
- 14** L'encéphale et les nerfs crâniens **493**
- 15** Le système nerveux autonome **546**
- 16** La sensibilité, la motricité et l'intégration **569**
- 17** Les organes des sens **600**
- 18** Le système endocrinien **647**
- 19** Le système cardiovasculaire : le sang **696**
- 20** Le système cardiovasculaire : le cœur **727**
- 21** Le système cardiovasculaire : vaisseaux sanguins et hémodynamique **771**
- 22** Le système lymphatique et l'immunité **846**
- 23** Le système respiratoire **891**
- 24** Le système digestif **941**

- 25** Le métabolisme et la nutrition **1000**
- 26** Le système urinaire **1042**
- 27** Les équilibres hydrique, électrolytique et acido-basique **1087**
- 28** Les systèmes génitaux (reproducteurs) **1106**
- 29** Le développement et l'hérédité **1160**

ANNEXE **A** Les unités de mesure **A-1**

ANNEXE **B** Le tableau périodique des éléments **B-3**

ANNEXE **C** Les valeurs de référence pour quelques analyses sanguines **C-4**

ANNEXE **D** Les valeurs de référence pour quelques analyses d'urine **D-6**

ANNEXE **E** Réponses aux questions de réflexion **E-8**

ANNEXE **F** Éponymes médicaux **F-14**

GLOSSAIRE **G-1**

INDEX **I-1**

Table des matières

1 Introduction au corps humain 1

- 1.1 Définition de l'anatomie et de la physiologie 2
- 1.2 Niveaux d'organisation des structures et des systèmes corporels 3
- 1.3 Caractéristiques de l'organisme humain vivant 8
- 1.4 Homéostasie 9
- 1.5 Terminologie anatomique de base 14
- 1.6 Vieillessement et homéostasie 21
- 1.7 Imagerie médicale 22

Résumé du chapitre 25 / Questions de réflexion 28 /
Réponses aux questions des figures 28

2 Le niveau chimique de l'organisation 29

- 2.1 Organisation de la matière 30
- 2.2 Liaisons chimiques 34
- 2.3 Réactions chimiques 37
- 2.4 Composés inorganiques et solutions 40
- 2.5 Vue d'ensemble des composés organiques 44
- 2.6 Glucides 45
- 2.7 Lipides 47
- 2.8 Protéines 51
- 2.9 Acides nucléiques 56
- 2.10 Adénosine triphosphate 58

Résumé du chapitre 59 / Questions de réflexion 61 /
Réponses aux questions des figures 61

3 Le niveau cellulaire d'organisation 63

- 3.1 Parties de la cellule 64
- 3.2 Membrane plasmique 65
- 3.3 Transport transmembranaire 68
- 3.4 Cytoplasme 78
- 3.5 Noyau 89
- 3.6 Synthèse protéique 93
- 3.7 Division cellulaire 96
- 3.8 Diversité cellulaire 104
- 3.9 Vieillessement et cellules 104

Résumé du chapitre 107 / Questions de réflexion 110 /
Réponses aux questions des figures 110

4 Le niveau tissulaire d'organisation 111

- 4.1 Types de tissus 112
- 4.2 Jonctions cellulaires 113
- 4.3 Comparaison entre les tissus épithéliaux et conjonctifs 114
- 4.4 Tissu épithélial 115
- 4.5 Tissu conjonctif 127
- 4.6 Les membranes 139
- 4.7 Tissu musculaire 141
- 4.8 Tissu nerveux 143
- 4.9 Cellules excitables 143
- 4.10 Réparation des tissus : retour à l'homéostasie 144
- 4.11 Vieillessement et tissus 145

Résumé du chapitre 146 / Questions de réflexion 148 /
Réponses aux questions des figures 148

5 Le système tégumentaire 149

- 5.1 Structure de la peau 150
- 5.2 Structures accessoires de la peau 157
- 5.3 Types de peau 163
- 5.4 Fonctions de la peau 164
- 5.5 Maintien de l'homéostasie :
la cicatrisation des lésions cutanées 165
- 5.6 Développement du système tégumentaire 167
- 5.7 Vieillessement et système tégumentaire 169

Résumé du chapitre 175 / Questions de réflexion 176 /
Réponses aux questions des figures 176

6 Le système squelettique : tissu osseux 177

- 6.1 Fonctions des os et
du système squelettique 178
- 6.2 Structure des os 178
- 6.3 Histologie du tissu osseux 180
- 6.4 Vascularisation et innervation du tissu osseux 184
- 6.5 Formation des os 185
- 6.6 Fracture et réparation osseuse 192
- 6.7 Rôle de l'os dans l'homéostasie du calcium 195
- 6.8 Exercice et tissu osseux 196
- 6.9 Vieillessement et tissu osseux 197

Résumé du chapitre 199 / Questions de réflexion 200 /
Réponses aux questions des figures 201

7 Le système squelettique : le squelette axial 202

- 7.1 Divisions du système squelettique 203
- 7.2 Types d'os 205
- 7.3 Reliefs osseux 205
- 7.4 Crâne : généralités 206
- 7.5 Os de la cavité crânienne 207
- 7.6 Os de la face 216
- 7.7 Repères du crâne 218
- 7.8 Os hyoïde 223
- 7.9 Colonne vertébrale 223
- 7.10 Régions de la colonne vertébrale 226
- 7.11 Thorax 233

Résumé du chapitre 239 / Questions de réflexion 240 /
Réponses aux questions des figures 241

8 Le système squelettique : le squelette appendiculaire 242

- 8.1 Ceinture scapulaire (épaule) 243
- 8.2 Membre supérieur (extrémité) 246
- 8.3 Ceinture pelvienne 251
- 8.4 Grand et petit bassins 253
- 8.5 Comparaison du bassin féminin avec le bassin masculin 255
- 8.6 Membre inférieur 255
- 8.7 Développement et système squelettique 263

Résumé du chapitre 267 / Questions de réflexion 268 /
Réponses aux questions des figures 268

9 Les articulations 269

- 9.1 Classification des articulations 270
- 9.2 Articulations fibreuses 270
- 9.3 Articulations cartilagineuses 272
- 9.4 Articulations synoviales 272
- 9.5 Types de mouvements dans les articulations synoviales 276
- 9.6 Types d'articulations synoviales 281
- 9.7 Facteurs affectant le contact et l'amplitude des mouvements des articulations synoviales 284
- 9.8 Exemples d'articulations du corps 284
- 9.9 Articulation temporo-mandibulaire 287
- 9.10 Articulation gléno-humérale (épaule) 288
- 9.11 Articulation du coude 292
- 9.12 Articulation de la hanche 293
- 9.13 Articulation du genou 295
- 9.14 Vieillesse et articulations 298
- 9.15 Arthroplastie 299

Résumé du chapitre 302 / Questions de réflexion 304 /
Réponses aux questions des figures 304

10 Le tissu musculaire 305

- 10.1 Vue d'ensemble du tissu musculaire 306
- 10.2 Structure du tissu musculaire squelettique 307
- 10.3 Contraction et relaxation des fibres musculaires squelettiques 316
- 10.4 Métabolisme musculaire 325
- 10.5 Contrôle de la tension musculaire 328
- 10.6 Types de fibres musculaires squelettiques 332
- 10.7 Exercice et tissu musculaire squelettique 333
- 10.8 Tissu musculaire cardiaque 334
- 10.9 Tissu musculaire lisse 335
- 10.10 Régénération du tissu musculaire 337
- 10.11 Développement des muscles 338
- 10.12 Vieillesse et tissu musculaire 339

Résumé du chapitre 341 / Questions de réflexion 343 /
Réponses aux questions des figures 343

11 Le système musculaire 344

- 11.1 Comment les muscles squelettiques produisent les mouvements 345
- 11.2 Comment sont nommés les muscles squelettiques 351
- 11.3 Vue d'ensemble des principaux muscles squelettiques 353
- 11.4 Muscles de la tête responsables des expressions faciales 353
- 11.5 Muscles de la tête mobilisant les bulbes oculaires (muscles extra-oculaires) et les paupières supérieures 355
- 11.6 Muscles mobilisant la mandibule et participant à la mastication et au langage articulé 359
- 11.7 Muscles de la tête mobilisant la langue et participant à la mastication et à la phonation 359
- 11.8 Muscles antérieurs du cou participant à la déglutition et à la phonation 362
- 11.9 Muscles du cou mobilisant la tête 364
- 11.10 Muscles de l'abdomen protégeant les viscères abdominaux et mobilisant la colonne vertébrale 366
- 11.11 Muscles du thorax participant à la ventilation 369
- 11.12 Muscles du plancher pelvien soutenant les viscères pelviens et assurant une fonction de sphincter 372
- 11.13 Muscles du périnée 374
- 11.14 Muscles du thorax mobilisant la ceinture scapulaire 375
- 11.15 Muscles du thorax et de l'épaule mobilisant l'humérus 378
- 11.16 Muscles du bras mobilisant le radius et l'ulna 382
- 11.17 Muscles de l'avant-bras mobilisant le poignet, la main, le pouce et les doigts 385
- 11.18 Muscles de la paume mobilisant les doigts – Muscles intrinsèques de la main 391
- 11.19 Muscles du cou et du dos mobilisant la colonne vertébrale 394
- 11.20 Muscles de la région glutéale mobilisant le fémur 399

- 11.21** Muscles de la cuisse mobilisant le fémur, le tibia et la fibula **404**
- 11.22** Muscles de la jambe mobilisant le pied et les orteils **406**
- 11.23** Muscles intrinsèques du pied mobilisant les orteils **411**
- Résumé du chapitre 416 / Questions de réflexion 418 / Réponses aux questions des figures 418

12 Le tissu Nerveux **419**

- 12.1** Vue d'ensemble du système nerveux **420**
- 12.2** Histologie du système nerveux **422**
- 12.3** Vue d'ensemble des signaux électriques dans les neurones **430**
- 12.4** Potentiel membranaire de repos **434**
- 12.5** Potentiels gradués **436**
- 12.6** Potentiels d'action **438**
- 12.7** Transmission du signal au niveau des synapses **444**
- 12.8** Neurotransmetteurs **451**
- 12.9** Circuits neuronaux **454**
- 12.10** Régénération et réparation du tissu nerveux **455**
- Résumé du chapitre 458 / Questions de réflexion 460 / Réponses aux questions des figures 460

13 La moelle spinale et les nerfs spinaux **461**

- 13.1** Anatomie de la moelle spinale **462**
- 13.2** Nerfs spinaux **469**
- 13.3** Plexus cervical **471**
- 13.4** Plexus brachial **473**
- 13.5** Plexus lombaire **476**
- 13.6** Plexus sacral et coccygien **478**
- 13.7** Moelle spinale, physiologie **480**
- Résumé du chapitre 490 / Questions de réflexion 491 / Réponses aux questions des figures 491

14 L'encéphale et les nerfs crâniens **493**

- 14.1** Organisation, protection et vascularisation de l'encéphale **494**
- 14.2** Liquide cérébro-spinal **497**
- 14.3** Tronc cérébral et formation réticulaire **502**
- 14.4** Cervelet **507**
- 14.5** Diencephale **509**
- 14.6** Cerveau **512**
- 14.7** Organisation fonctionnelle du cortex cérébral **517**
- 14.8** Vue d'ensemble des nerfs crâniens **524**
- 14.9** Nerf olfactif (I) **524**
- 14.10** Nerf optique (II) **525**
- 14.11** Les nerfs oculomoteur (III), trochléaire (IV) et abducens (V) **527**

- 14.12** Nerf trijumeau (V) **528**
- 14.13** Nerf facial (VII) **530**
- 14.14** Nerf vestibulo-cochléaire (VIII) **530**
- 14.15** Nerf glossopharyngien (IX) **531**
- 14.16** Nerf vague (X) **533**
- 14.17** Nerf accessoire (XI) **535**
- 14.18** Le nerf hypoglosse (XII) **535**
- 14.19** Développement du système nerveux **536**
- 14.20** Vieillissement et système nerveux **539**

Résumé du chapitre 542 / Questions de réflexion 545 / Réponses aux questions des figures 545

15 Le système nerveux autonome **546**

- 15.1** Comparaison entre le système nerveux somatique et le système nerveux autonome **547**
- 15.2** Anatomie des voies motrices du système nerveux autonome **549**
- 15.3** Neurotransmetteurs et récepteurs du SNA **558**
- 15.4** Physiologie du SNA **560**
- 15.5** Intégration et contrôle des fonctions du SNA **563**

Résumé du chapitre 566 / Questions de réflexion 568 / Réponses aux questions des figures 568

16 La sensibilité, la motricité et l'intégration **569**

- 16.1** Sensibilité **570**
- 16.2** Sensations somatiques **574**
- 16.3** Voies sensitives somatiques **580**
- 16.4** Contrôle des mouvements du corps **584**
- 16.5** Fonctions intégratives du cerveau **592**

Résumé du chapitre 597 / Questions de réflexion 598 / Réponses aux questions des figures 599

17 Les organes des sens **600**

- 17.1** Olfaction (sens de l'odorat) **601**
- 17.2** Gustation (sens du goût) **604**
- 17.3** Vue d'ensemble de la vision **607**
- 17.4** Structures annexes de l'œil **608**
- 17.5** Anatomie du bulbe de l'œil **611**
- 17.6** Physiologie de la vision **616**
- 17.7** Audition **625**
- 17.8** Équilibre **634**
- 17.9** Développement des yeux et des oreilles **639**
- 17.10** Vieillissement et organes des sens **642**

Résumé du chapitre 644 / Questions de réflexion 645 / Réponses aux questions des figures 645

18 Le système endocrinien 647

- 18.1 Comparaison des mécanismes de régulation des systèmes nerveux et endocriniens 648
 - 18.2 Glandes endocrines 648
 - 18.3 Activité hormonale 650
 - 18.4 Mécanismes de l'action hormonale 653
 - 18.5 Contrôle de la sécrétion hormonale 655
 - 18.6 Hypothalamus et hypophyse 655
 - 18.7 Glande thyroïde 665
 - 18.8 Glandes parathyroïdes 669
 - 18.9 Glandes surrénales 672
 - 18.10 Îlots pancréatiques 676
 - 18.11 Ovaires et testicules 681
 - 18.12 Glande pinéale et thymus 681
 - 18.13 Autres tissus et organes endocrines, eicosanoïdes et facteurs de croissance 682
 - 18.14 Réponse au stress 684
 - 18.15 Développement du système endocrinien 686
 - 18.16 Vieillesse et système endocrinien 687
- Résumé du chapitre 692 / Questions de réflexion 695 /
Réponses aux questions des figures 695

19 Le système cardiovasculaire : le sang 696

- 19.1 Fonctions et propriétés du sang 697
 - 19.2 Formation des cellules sanguines 701
 - 19.3 Globules rouges 703
 - 19.4 Globules blancs 707
 - 19.5 Plaquettes 710
 - 19.6 Greffe de cellules souches issues de la moelle osseuse ou du sang de cordon ombilical 712
 - 19.7 Hémostase 713
 - 19.8 Systèmes et groupes sanguins 717
- Résumé du chapitre 724 / Questions de réflexion 726 /
Réponses aux questions des figures 726

20 Le système cardiovasculaire : le cœur 727

- 20.1 Anatomie du cœur 728
 - 20.2 Valves du cœur et circulation du sang 735
 - 20.3 Tissu musculaire cardiaque et système de conduction du cœur 742
 - 20.4 Cycle cardiaque 748
 - 20.5 Débit cardiaque 752
 - 20.6 Effets de l'exercice sur le cœur 756
 - 20.7 Traitement des cœurs défaillants 757
 - 20.8 Développement du cœur 759
- Résumé du chapitre 768 / Questions de réflexion 769 /
Réponses aux questions des figures 769

21 Le système cardiovasculaire : vaisseaux sanguins et hémodynamique 771

- 21.1 Structure et fonction des vaisseaux sanguins 772
 - 21.2 Échanges capillaires 781
 - 21.3 Hémodynamique : Facteurs affectant le flux sanguin 784
 - 21.4 Contrôle de la pression artérielle et du flux sanguin 787
 - 21.5 Évaluation de la circulation 792
 - 21.6 Choc et homéostasie 793
 - 21.7 Voies de la circulation sanguine : Circulation systémique 796
 - 21.8 Aorte et ses branches 798
 - 21.9 Aorte : Partie ascendante 801
 - 21.10 Arc de l'aorte 802
 - 21.11 Aorte thoracique 806
 - 21.12 Aorte abdominale 809
 - 21.13 Artères du pelvis et des membres inférieurs 814
 - 21.14 Veines de la circulation générale 817
 - 21.15 Veines de la tête et du cou 819
 - 21.16 Veines des membres supérieurs 821
 - 21.17 Veines du thorax 825
 - 21.18 Veines de l'abdomen et du pelvis 827
 - 21.19 Veines des membres inférieurs 829
 - 21.20 Voies de la circulation sanguine : Circulation porte du foie 833
 - 21.21 Voies de la circulation sanguine : Circulation pulmonaire 834
 - 21.22 Voies de la circulation sanguine : Circulation fœtale 836
 - 21.23 Développement des vaisseaux sanguins et du sang 838
 - 21.24 Vieillesse et système cardiovasculaire 839
- Résumé du chapitre 842 / Questions de réflexion 844 /
Réponses aux questions des figures 845

22 Le système lymphatique et l'immunité 846

- 22.1 Concept d'immunité 847
- 22.2 Vue d'ensemble du système lymphatique 847
- 22.3 Vaisseaux lymphatiques et circulation de la lymphe 849
- 22.4 Organes et tissus lymphatiques 851
- 22.5 Développement embryonnaire du tissu lymphatique 858
- 22.6 Immunité innée 859
- 22.7 Immunité adaptative 864
- 22.8 Réponse immunitaire à médiation cellulaire 870
- 22.9 Immunité humorale 874
- 22.10 Reconnaissance et tolérance du soi 879
- 22.11 Stress et immunité 880

22.12 Vieillesse et système lymphatique 881

Résumé du chapitre 887 / Questions de réflexion 889 /

Réponses aux questions des figures 889

23 Le système respiratoire 891**23.1 Vue d'ensemble du système respiratoire 892****23.2 Système respiratoire supérieur 894****23.3 Système respiratoire inférieur 897****23.4 Ventilation pulmonaire 912****23.5 Volumes et capacités respiratoires 917****23.6 Échanges d'oxygène et de dioxyde de carbone 918****23.7 Transport de l'oxygène et du dioxyde de carbone 922****23.8 Contrôle de la respiration 927****23.9 Exercice physique et système respiratoire 931****23.10 Développement du système respiratoire 932****23.11 Vieillesse et système respiratoire 933**

Résumé du chapitre 938 / Questions de réflexion 940 /

Réponses aux questions des figures 940

24 Le système digestif 941**24.1 Vue d'ensemble du système digestif 942****24.2 Couches du tube digestif 943****24.3 Innervation du tube digestif 945****24.4 Péritoine 946****24.5 Bouche 948****24.6 Pharynx 955****24.7 Œsophage 955****24.8 Déglutition 956****24.9 Estomac 958****24.10 Pancréas 964****24.11 Foie et vésicule biliaire 966****24.12 Intestin grêle 971****24.13 Gros intestin 983****24.14 Différentes phases de la digestion 988****24.15 Développement du système digestif 991****24.16 Vieillesse et système digestif 991**

Résumé du chapitre 996 / Questions de réflexion 998 /

Réponses aux questions des figures 998

25 Le métabolisme et la nutrition 1000**25.1 Réactions métaboliques 1001****25.2 Transfert d'énergie 1002****25.3 Métabolisme des glucides 1003****25.4 Métabolisme des lipides 1013****25.5 Métabolisme des protéines 1017****25.6 Molécules clés au carrefour des voies métaboliques 1019****25.7 Adaptations métaboliques 1020****25.8 Équilibre énergétique 1025****25.9 Régulation de la température du corps 1029****25.10 Nutrition 1032**

Résumé du chapitre 1039 / Questions de réflexion 1041 /

Réponses aux questions des figures 1041

26 Le système urinaire 1042**26.1 Vue d'ensemble du système urinaire 1043****26.2 Anatomie des reins 1044****26.3 Néphron 1048****26.4 Vue d'ensemble de la physiologie rénale 1053****26.5 Filtration glomérulaire 1055****26.6 Réabsorption tubulaire et sécrétion tubulaire 1059****26.7 Production de l'urine diluée et de l'urine concentrée 1067****26.8 Évaluation de la fonction rénale 1072****26.9 Transport de l'urine, stockage et élimination 1075****26.10 Traitement des déchets dans les autres systèmes de l'organisme 1079****26.11 Développement du système urinaire 1079****26.12 Vieillesse et système urinaire 1080**

Résumé du chapitre 1084 / Questions de réflexion 1086 /

Réponses aux questions des figures 1086

27 Les équilibres hydrique, électrolytique et acido-basique 1087**27.1 Compartiments liquidiens et équilibre hydrique 1088****27.2 Électrolytes des liquides de l'organisme 1094****27.3 Équilibre acido-basique 1098****27.4 Vieillesse et équilibres hydrique, électrolytique et acido-basique 1103**

Résumé du chapitre 1104 / Questions de réflexion 1105 /

Réponses aux questions des figures 1105

28 Les systèmes génitaux (reproducteurs) 1106**28.1 Système génital masculin (reproducteur) 1107****28.2 Système génital féminin (reproducteur) 1121****28.3 Cycle reproducteur de la femme 1137****28.4 Réponses sexuelles 1143****28.5 Méthodes de contraception et l'avortement 1143****28.6 Développement des systèmes génitaux 1147****28.7 Vieillesse et systèmes génitaux 1149**

Résumé du chapitre 1156 / Questions de réflexion 1158 /

Réponses aux questions des figures 1159

29 Le développement et l'hérédité 1160

- 29.1** Vue d'ensemble du développement 1161
- 29.2** Deux premières semaines de la période embryonnaire 1161
- 29.3** Autres semaines de la période embryonnaire 1169
- 29.4** Période fœtale 1177
- 29.5** Agents tératogènes 1180
- 29.6** Tests de diagnostic prénatal 1181
- 29.7** Effets de la grossesse chez la mère 1183
- 29.8** Exercice et grossesse 1186
- 29.9** Accouchement 1186
- 29.10** Adaptations du nouveau-né à la naissance 1188
- 29.11** Physiologie de la lactation 1189
- 29.12** Hérédité 1191

Résumé du chapitre 1198 / Questions de réflexion 1200 /
Réponses aux questions des figures 1200

- ANNEXE **A** Les unités de mesure **A-1**
- ANNEXE **B** Le tableau périodique des éléments **B-3**
- ANNEXE **C** Les valeurs de référence pour quelques analyses sanguines **C-4**
- ANNEXE **D** Les valeurs de référence pour quelques analyses d'urine **D-6**
- ANNEXE **E** Les réponses aux questions de réflexion **E-8**
- ANNEXE **F** Les éponymes médicaux **F-14**

- GLOSSAIRE **G-1**

- INDEX **I-1**

CHAPITRE 1



(A) Inspection de la cavité orale (bouche)



(B) Palpation des ganglions lymphatiques du cou



(C) Auscultation des poumons



(D) Percussion des poumons

Voir la partie 1.2, intérêt clinique : technique de diagnostic non-invasive expliquant pourquoi LES PROFESSIONNELS DE SANTÉ OBSERVENT, PALPENT, ÉCOUTENT ET PERCUTENT VOTRE CORPS DE DIFFÉRENTES MANIÈRES POUR DIAGNOSTIQUER UNE MALADIE

Introduction au corps humain

Le corps humain et l'homéostasie

L'homéostasie est l'état de relative stabilité de notre environnement interne, les Hommes maintiennent leur homéostasie de nombreuses manières. La rupture de cet état d'équilibre entraîne souvent la mise en route des cycles correctifs, encore appelés boucles de rétrocontrôle, qui participent au maintien de la santé et de la vie.

Notre fascinant voyage à travers du corps humain débute par un survol de l'anatomie et de la physiologie, suivi par la description de l'organisation du corps humain et des propriétés qu'il partage avec tous les êtres vivants. Ensuite, vous découvrirez comment l'organisme régule son environnement interne ; ce mécanisme continu, appelé

homéostasie, est le thème majeur de chaque chapitre de ce livre. Enfin, nous présenterons le vocabulaire de base qui vous aidera à vous exprimer à propos du corps d'une manière compréhensible par les scientifiques et les professionnels de la santé.

1.1

Définition de l'anatomie et de la physiologie

OBJECTIF

- **Définir** l'anatomie et la physiologie et nommer quelques branches de ces sciences.

L'anatomie et la physiologie sont deux branches de la science qui décrivent les fondements nécessaires à la compréhension des parties du corps et de leur fonctionnement. L'**anatomie** est la science qui décrit la structure du corps et les relations entre-elles. Elle est d'abord étudiée par la **dissection**, autrement dit le découpage minutieux des structures du corps pour en définir leurs corrélations. Aujourd'hui, de nombreuses techniques d'imagerie (voir **Tableau 1.3**) peuvent également contribuer à l'avancement des connaissances anatomiques. Alors que l'anatomie concerne les structures de l'organisme, la **physiologie** est la science qui en décrit le fonctionnement : comment les

différentes structures du corps travaillent. Le **Tableau 1.1** décrit quelques-unes des branches de l'anatomie et de la physiologie.

Parce que la structure et le fonctionnement sont si intimement reliés, vous apprendrez le corps humain par l'étude concomitante de son anatomie et de sa physiologie. La structure d'une partie de l'organisme est souvent le reflet de sa fonction. Par exemple, les os du crane sont si solidement articulés qu'ils forment une boîte qui protège le cerveau. Inversement, les os des doigts sont bien moins solidement fixés les uns aux autres si bien qu'ils autorisent toute une variété de mouvements. Les parois des alvéoles pulmonaires sont si fines qu'elles permettent l'échange rapide de l'oxygène inhalé avec le sang.

Révision

1.

Quelle est la fonction de l'organisme qu'un pneumologue pourrait s'efforcer d'améliorer ? Qu'elles sont les structures impliquées ?

2.

Donnez un exemple d'une structure de l'organisme qui est en relation avec sa fonction.

TABLEAU 1.1 Quelques branches d'Anatomie et de Physiologie

BRANCHE DE L'ANATOMIE	ETUDE DE(S)	BRANCHE DE LA PHYSIOLOGIE	ETUDE DE(S)
Biologie du développement	Le développement complet d'un individu depuis la fécondation jusqu'à sa mort.	Anatomie pathologique	Modifications de structures (macroscopiques ou microscopiques) associées aux maladies.
Embryologie	Huit premières semaines de croissance et de développement après la fécondation de l'ovocyte humain ; première étape de la biologie du développement.	Physiologie moléculaire	Fonctions de molécules telles que des protéines ou de l'ADN.
Biologie cellulaire	Structures et fonctions de la cellule.	Neurophysiologie	Propriétés fonctionnelles des cellules nerveuses.
Histologie	Structures microscopiques des tissus.	Endocrinologie	Hormones (régulateurs chimiques présents dans le sang) et manière dont elles contrôlent les fonctions de l'organisme.
Anatomie générale	Structures qui peuvent être étudiées sans l'aide d'un microscope.	Physiologie cardiovasculaire	Fonctionnement du cœur et des vaisseaux sanguins.
Anatomie systémique	Structure de systèmes spécifique du corps tels les systèmes nerveux ou respiratoire.	Immunologie	Défenses de l'organisme contre les agents responsables de maladies.
Anatomie régionale	Régions spécifiques du corps telles la tête ou la poitrine.	Physiologie respiratoire	Fonctions des voies respiratoires et des poumons.
Anatomie de surface (topographique)	Marques à la surface du corps permettant de comprendre l'anatomie interne par la visualisation et la palpation.	Physiologie rénale	Fonctions des reins.
Imagerie	Structures du corps pouvant être visualisées par des techniques telles que les rayons-X, la résonnance magnétique nucléaire ou le scanner.	Physiologie du mouvement	Modifications des fonctions cellulaires et des organes liées à l'activité musculaire.
Anatomie clinique	Anatomie au service de la pratique de la médecine, de la dentisterie, et des autres sciences de la santé, par exemple pour soutenir le diagnostic et le traitement d'une maladie.	Physiopathologie	Modifications fonctionnelles associées aux maladies et au vieillissement.

1.2 Niveaux d'organisation des structures et des systèmes corporels

Les niveaux d'organisation d'un langage –lettres, mots, phrases, paragraphes, etc..., peuvent être comparés aux niveaux d'organisation du corps humain. Votre exploration du corps humain commence aux atomes et molécules jusqu'à la personne entière. Du plus petit au plus grand, six niveaux d'organisation vont vous aider à comprendre l'anatomie et la physiologie : les niveaux chimique, cellulaire, tissulaire, des organes, des systèmes, et de l'organisme entier (**Figure 1.1**).

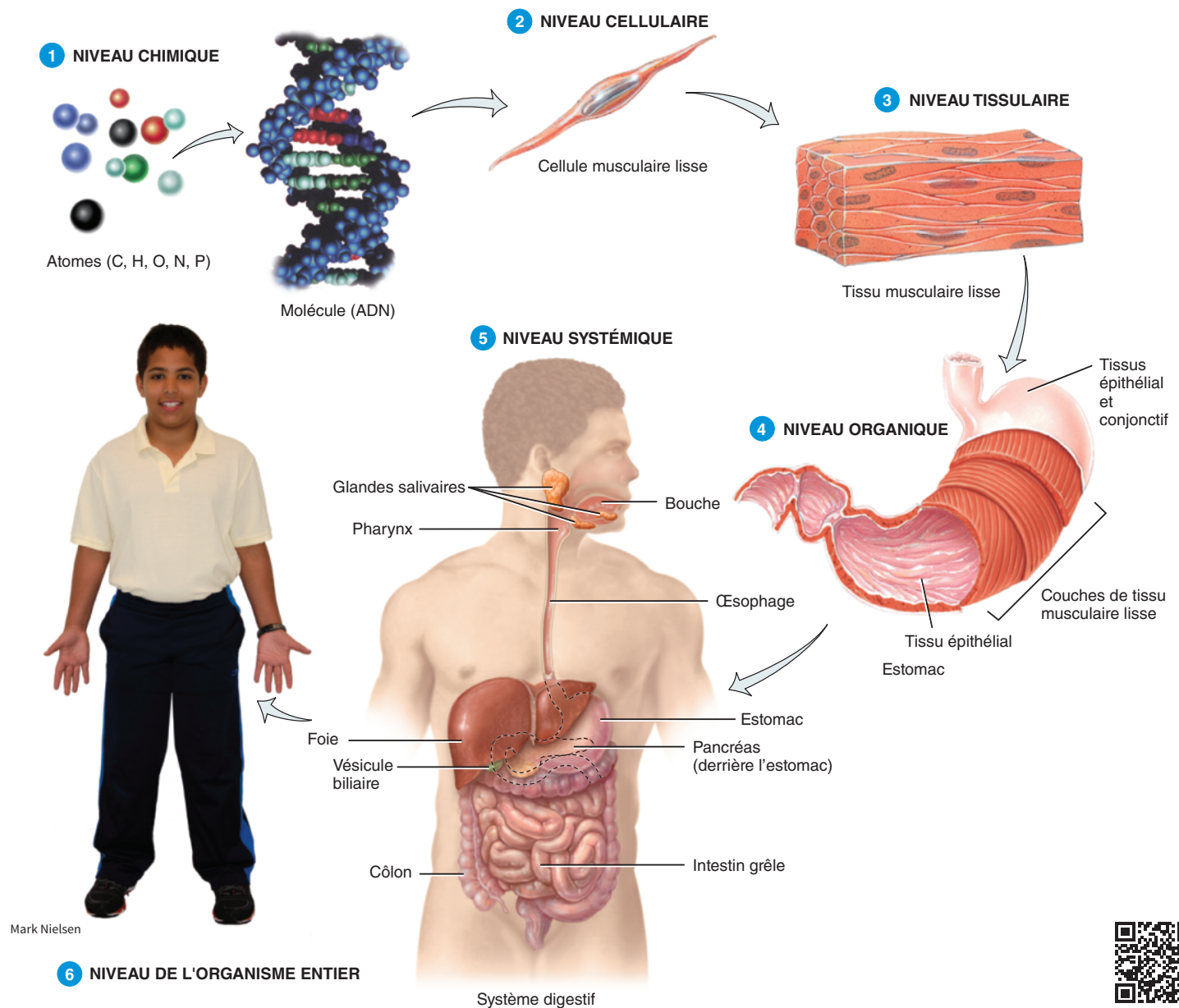
OBJECTIFS

- **Décrire** les six niveaux d'organisation des structures corporelles.
- **Lister** les 11 systèmes du corps humain, les organes les plus représentatifs qui les constituent, ainsi que leurs fonctions générales.

- 1 **Le niveau chimique.** Ce niveau très inférieur peut être comparé aux lettres de l'alphabet et inclus les **atomes**, les plus petites unités de la matière qui participent aux réactions chimiques, et les **molécules** constituées de deux atomes ou plus liés entre eux. Certains atomes comme le carbone (C), l'hydrogène (H), l'oxygène (O), l'azote (N), le phosphore (P), le calcium (Ca)

FIGURE 1.1 Niveaux d'organisation structurelle du corps humain.

Les niveaux d'organisation de la structure sont : chimique, cellulaire, tissulaire, organique, systémique et organismel.



Q Quel niveau d'organisation de la structure est composé de deux ou plus différents types de tissus qui collaborent pour effectuer une fonction spécifique ?



et le soufre (S) sont essentiels à la vie. Deux molécules sont, par exemple, très présentes dans l'organisme : l'acide désoxyribonucléique (ADN), le matériel génétique transmis d'une génération à l'autre, et le glucose, communément connu comme étant le sucre présent dans le sang. Les chapitres 2 et 25 sont consacrés à ce niveau chimique de l'organisation du corps.

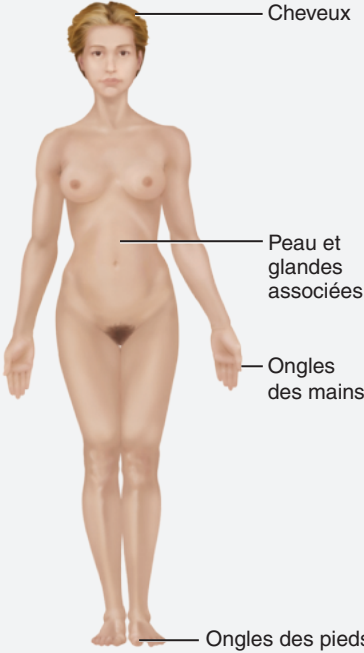
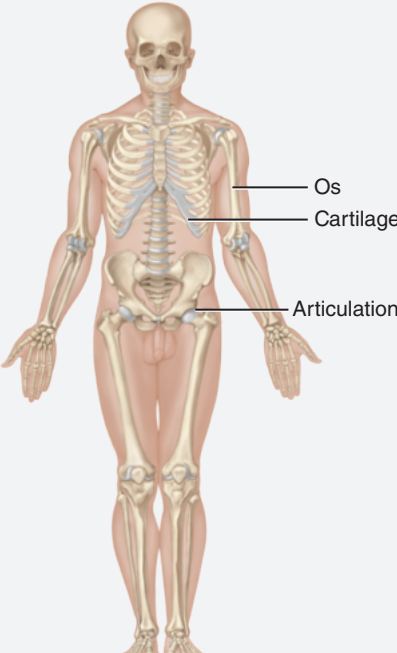
2 **Le niveau cellulaire.** Les molécules se combinent pour former des **cellules**, ces dernières sont les unités structurales de base et fonctionnelles d'un organisme, et sont elles-mêmes composées d'éléments chimiques. Comme les *mots* qui sont les plus petits éléments compréhensibles du langage, les cellules sont les plus petits éléments vivants du corps humain. Parmi les nombreux types de cellules de votre corps, on retrouve les fibres musculaires (cellules), les cellules nerveuses et épithéliales. La **Figure 1.1** présente une cellule musculaire lisse, un des trois types de cellules musculaires du corps. Le niveau d'organisation cellulaire est présenté au Chapitre 3.

3 **Le niveau tissulaire.** Les **tissus** sont des groupes composés de cellules et du matériel qui les entourent et qui collaborent pour réaliser une fonction particulière, tout comme les mots sont assembler pour former des *phrases*. Il n'y a que quatre types tissulaires de base au sein de votre organisme : le tissu épithélial, le tissu conjonctif, le tissu musculaire et le tissu nerveux. Les *tissus épithéliaux* couvrent les surfaces du corps, tapissent les organes creux et les cavités, et forment les glandes. Le *tissu conjonctif* connecte, supporte et protège les organes corporels et constitue les vaisseaux qui distribue le sang aux autres tissus. Les *tissus musculaires* se contractent pour faire se mouvoir certaines parties du corps et génèrent de la chaleur. Le tissu nerveux transporte des informations d'une partie du corps vers d'autres via les impulsions nerveuses. Le Chapitre 4 décrit le niveau

d'organisation tissulaire de manière plus détaillée. La **Figure 1.1** présente du tissu musculaire lisse, lequel est constitué de cellules musculaires lisses finement imbriquées.

4 **Le niveau organique.** Différents types de tissus s'associent pour constituer les organes. Comme lors de l'association de phrases forment des *paragraphes*, les **organes** sont des structures composées de deux types de tissus, voire plus ; ils ont des fonctions spécifiques et ont généralement des formes reconnaissables. Des exemples d'organes sont l'estomac, la peau, les os, le cœur, le foie, les poumons et le cerveau. La **Figure 1.1** montre comment différents tissus constituent l'estomac. La couche externe de l'estomac est une couche de tissu épithélial et conjonctif qui réduit la friction lorsque l'estomac bouge et glisse sur les autres organes. Il y a trois couches sous-jacentes de tissu musculaire appelées *tissu musculaire lisse* responsables de la contraction de l'estomac pour mélanger et malaxer les aliments avant de les pousser vers l'organe digestif suivant, l'intestin grêle. La couche de couverture la plus interne est une *couche de tissu épithélial* qui produit les liquides et réactifs responsables de la digestion au sein de l'estomac.

5 **Le niveau systémique.** Un **système** (un *chapitre* au niveau de notre analogie au langage) est constitué d'organes (*paragraphes*) connectés qui ont une fonction commune. Le système digestif est un exemple de niveau systémique ; il est responsable de la fragmentation des aliments et de leur absorption. Cet organe est constitué de la bouche, des glandes salivaires, du pharynx (la gorge), de l'œsophage, de l'estomac, de l'intestin grêle, du côlon, du foie, de la vésicule biliaire et du pancréas. Parfois un organe fait partie du plusieurs systèmes. Le pancréas par exemple, fait partie du système digestif et du système endocrinien producteur d'hormones.

TABLEAU 1.2 Les onze systèmes du corps humain	
LE SYSTÈME TÉGUMENTAIRE (CHAPITRE 5)	LE SYSTÈME SQUELETTIQUE (CHAPITRES 6 à 9)
Composants : Peau et structures associées tels les poils, les ongles des doigts et des pieds, les glandes sudoripares et les glandes sébacées. Fonctions : Protège le corps, participe à la régulation de la température, élimine certains déchets, participe à la fabrication de la vitamine D ; détecte certaines sensations telles le touché, la douleur, le chaud et le froid ; stocke des graisses et est un isolant.	Composants : Os et articulations du corps et leurs cartilages associés. Fonctions : Soutient et protège le corps ; fournit des zones de fixation aux muscles, participe aux mouvements du corps ; héberge les cellules qui produisent les cellules sanguines ; stocke des minéraux et de la graisse.
	

Intérêt clinique

Techniques de diagnostic non-invasives

Les professionnels de la santé comme les étudiants en anatomie et physiologie utilisent fréquemment diverses techniques de diagnostic non-invasives pour étudier certains aspects de la structure et de la fonction de l'organisme. Une **technique de diagnostic non-invasive** est une technique qui ne nécessite pas l'introduction d'un instrument ou d'un appareil au travers de la peau ou via l'ouverture du corps. Voir les photos au début de ce chapitre. Lors de l'**examen clinique**, l'examineur observe l'organisme pour y détecter des changements par rapport à la normale. Par exemple, un médecin examine la cavité buccale pour y détecter une maladie (Figure A). Après l'examen, une ou plusieurs techniques additionnelles peuvent être employées. Lors de la **palpation**, le praticien palpe les surfaces du corps avec ses mains. La palpation abdominale en est un exemple, on y recherche la présence d'un organe interne anormalement développé ou tendu, ou encore la présence

de masses abdominales (Figure B). Lors de l'**auscultation**, le docteur écoute les bruits du corps pour évaluer le fonctionnement de certains organes, parfois à l'aide d'un stéthoscope pour amplifier les sons. Un exemple est l'auscultation des poumons durant la respiration pour y détecter la présence de crépitements associés à la présence d'une accumulation anormale de liquide (Figure C). La **percussion** consiste à frapper la surface du corps avec la pointe des doigts pour écouter le bruit qui en résulte. Les cavités creuses et les espaces produisent des sons différents des organes solides. Par exemple, la percussion peut révéler la présence anormale de liquide dans les poumons ou de gaz dans les intestins (Figure D). Elle peut également renseigner quant à la taille, la consistance et la position des structures sous-jacentes. La compréhension de l'anatomie est très importante pour l'application efficace de la plupart de ces techniques de diagnostic.

6 Le niveau de l'organisme entier. Un **organisme** ou chaque individu, peut être comparé à un *livre* dans notre analogie. Toutes les parties du corps humain fonctionnant ensemble constituent un organisme complet.

Dans les chapitres qui vont suivre, vous étudierez l'anatomie et la physiologie des systèmes corporels. Le **Tableau 1.2** liste les composants et introduit les fonctions de ces systèmes. Vous découvrirez également que tous ces systèmes s'influencent les uns et les autres. Lorsque vous étudierez chacun de ces systèmes corporels plus en détails, vous comprendrez comment ils travaillent ensemble au maintien

de la santé, vous protégez des maladies, et permettent la reproduction de l'espèce humaine.

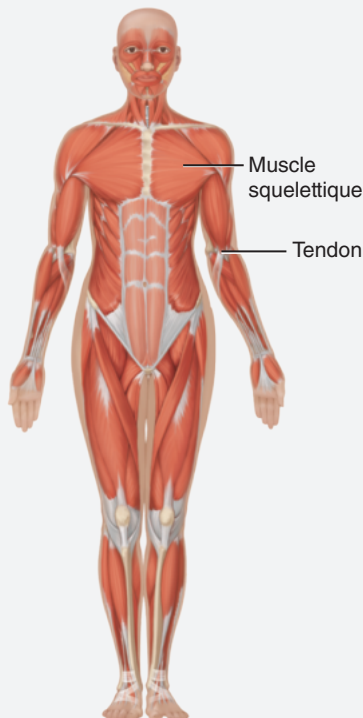
Révision

3. Définissez les termes suivants : atome, molécule, cellule, tissu, organe, système et organisme.
4. À quel niveau d'organisation un physiologiste physique étudie le corps humain (conseil : référez-vous au **Tableau 1.1**.)
5. En vous référant au **Tableau 1.2**, quels systèmes corporels participent à l'élimination des déchets ?

LE SYSTÈME MUSCULAIRE (CHAPITRES 10 et 11)

Composants : Uniquement le **tissu musculaire squelettique** ou muscles attachés aux os (les autres tissus musculaires étant les muscles lisses et le muscle cardiaque).

Fonctions : Participe aux mouvements du corps comme la marche ; maintien postural ; et est la principale source de production de chaleur.



LE SYSTÈME NERVEUX (CHAPITRES 12 à 17)

Composants : Cerveau, moelle épinière, nerfs et certains organes des sens spécifiques tels que les yeux et les oreilles.

Fonctions : Génère des potentiels d'action (des impulsions nerveuses) pour réguler les activités corporelles, détecter des modifications environnementales internes et externes au corps, et y répondre en induisant des contractions musculaires ou des sécrétions glandulaires.

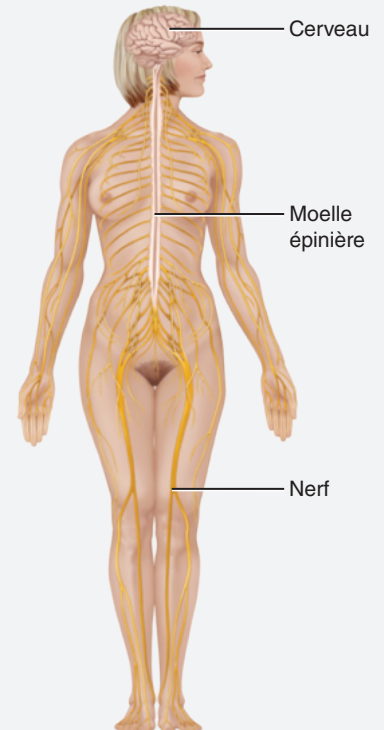
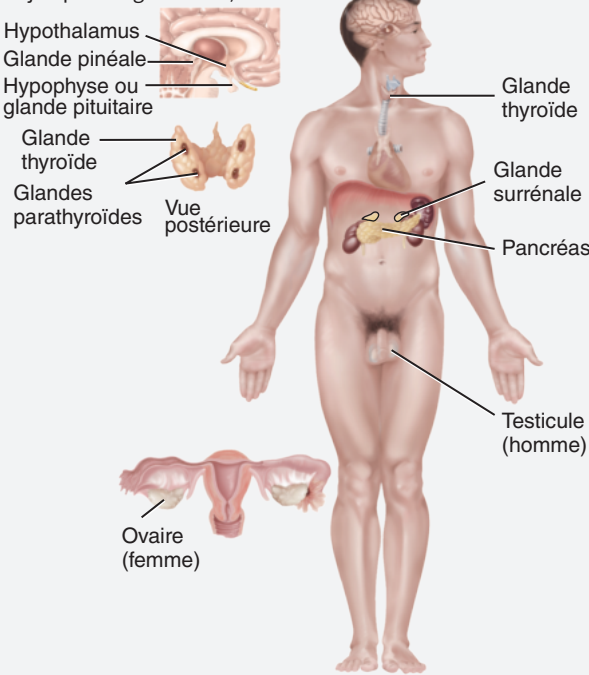
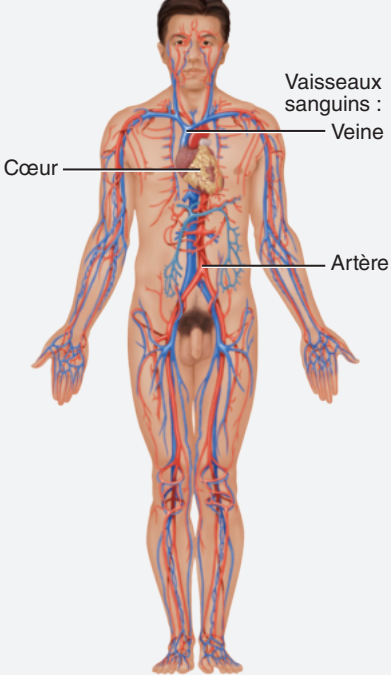
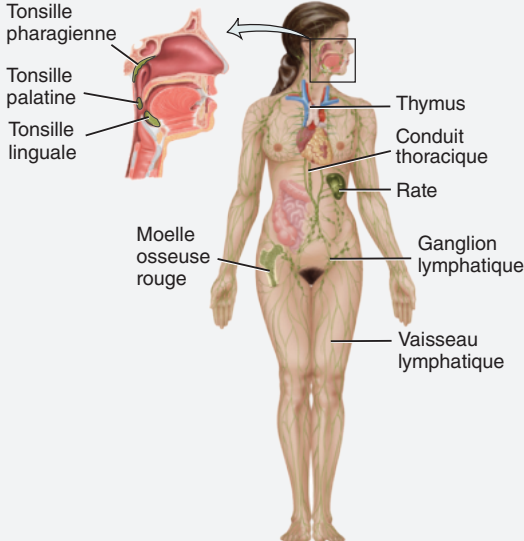
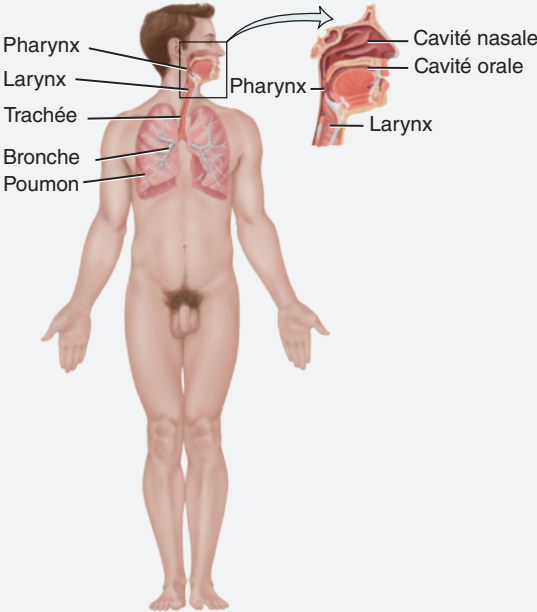


Tableau 1.2 à suivre

TABLEAU 1.2 Les onze systèmes du corps humain (Suite)

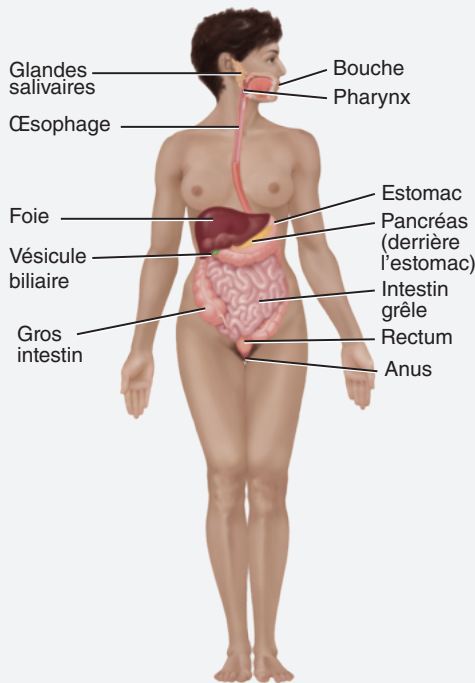
LE SYSTÈME ENDOCRINIEN (CHAPITRE 18)	LE SYSTÈME CARDIOVASCULAIRE (CHAPITRES 19 à 21)
Composants : Glandes productrices d'hormones (glande pinéale, hypothalamus, hypophyse, thymus, thyroïde, parathyroïdes, glandes surrénales, pancréas, ovaires et testicules) et les cellules productrices d'hormones au sein de divers organes. Fonctions : Régule les activités corporelles via la sécrétion d'hormones (messagers chimiques transportés par voie sanguine depuis la glande ou le tissu endocrine jusqu'à l'organe cible).  Labels: Hypothalamus, Glande pinéale, Hypophyse ou glande pituitaire, Glande thyroïde, Glandes parathyroïdes, Vue postérieure, Glande thyroïde, Glande surrénale, Pancréas, Testicule (homme), Ovaire (femme).	Composants : Sang, cœur et vaisseaux sanguins. Fonctions : Le cœur pompe le sang au travers des vaisseaux sanguins ; le sang transporte l'oxygène et les nutriments vers les cellules et en élimine le dioxyde de carbone et les déchets, participe au maintien de l'équilibre acide-base, de la température et de la charge hydrique des fluides corporels ; des composants sanguins participent à la défense contre les maladies ainsi qu'à la réparation des vaisseaux sanguins endommagés.  Labels: Vaisseaux sanguins : Veine, Cœur, Artère.
LES SYSTÈMES LYMPHATIQUE ET IMMUNITAIRE (CHAPITRE 22)	LE SYSTÈME RESPIRATOIRE (CHAPITRE 23)
Composants : Lymphes et vaisseaux lymphatiques ; rate, thymus, ganglions lymphatiques et tonsilles ; cellules responsables de la réponse immunitaire (Lymphocytes B, Lymphocytes T, et autres). Fonctions : Ramène les protéines et la lymphe (NdT : fluide dans lequel baignent les cellules) vers le sang ; transporte les graisses du tractus gastro-intestinal vers le sang, contient les sites de maturation et de prolifération des lymphocytes B et T qui protègent le corps des microbes responsables de maladies.  Labels: Tonsille pharyngienne, Tonsille palatine, Tonsille linguale, Thymus, Conduit thoracique, Rate, Moelle osseuse rouge, Ganglion lymphatique, Vaisseau lymphatique.	Composants : Poumons et voies aériennes tels que le pharynx (gorge), larynx, trachée, voies bronchiques conduisant l'air vers et hors des poumons. Fonctions : Transfert de l'oxygène depuis l'air inhalé vers le sang et le dioxyde de carbone depuis le sang vers l'air exhalé ; participe à la régulation de l'équilibre acido-basique des fluides corporels ; l'air expulsé des poumons produit des sons en passant par les cordes vocales.  Labels: Pharynx, Larynx, Trachée, Bronche, Poumon, Cavité nasale, Cavité orale, Pharynx, Larynx.

LE SYSTÈME DIGESTIF (CHAPITRE 24)

Composants :

Organes du tube digestif (tractus gastro-intestinal) : un long tube incluant la **bouche**, le **pharynx** (gorge), l'**œsophage**, l'**estomac**, l'**intestin grêle**, le **côlon** et l'**anus** ; il inclut également les glandes accessoires qui aident à la digestion telles que les **glandes salivaires**, le **foie**, la **vésicule biliaire**, et le **pancréas**.

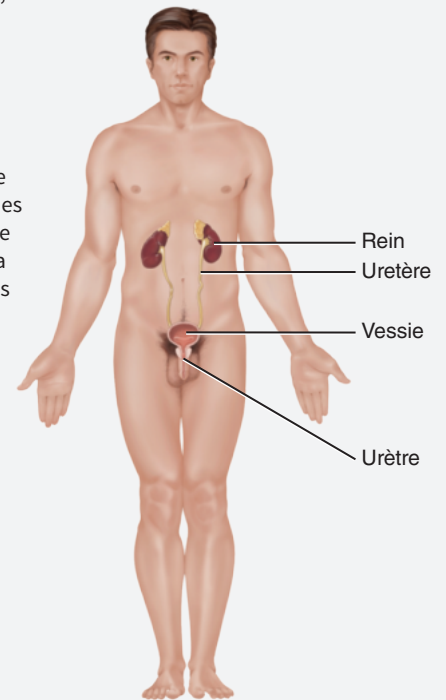
Fonctions : Dissocie les aliments en leurs composants essentiels, absorbe les nutriments, élimine les déchets solides.



LE SYSTÈME URINAIRE (CHAPITRE 26)

Composants : Reins, uretères, vessie et urètre.

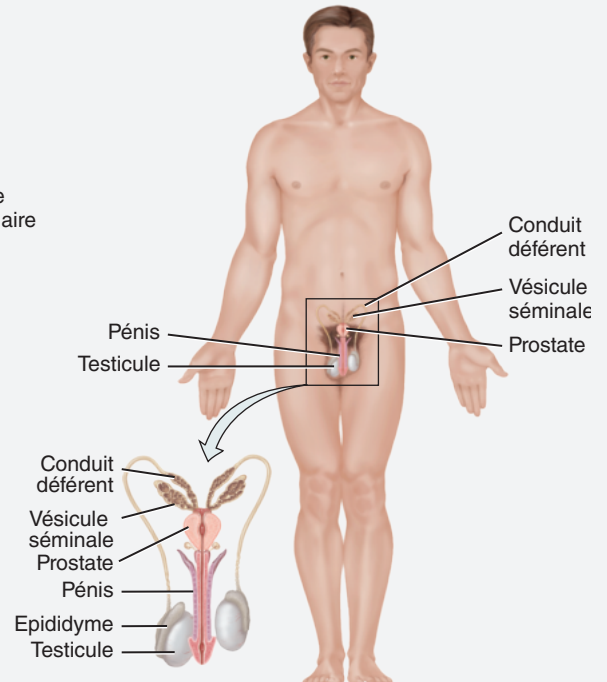
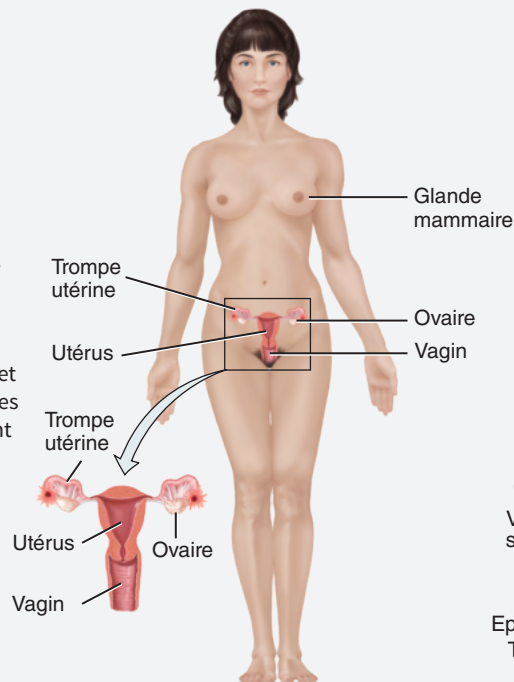
Fonctions : Produit, stocke et élimine l'urine ; élimine les déchets et régule le volume et la composition chimique du sang ; participe au maintien de l'équilibre acide-base des fluides corporels ; maintient l'équilibre minéral du corps, participe à la régulation de la production des globules rouges.



LES SYSTÈMES GÉNITAUX (REPRODUCTEURS) (CHAPITRE 28)

Composants : Gonades (testicules chez l'homme et ovaires chez la femme) et organes associés (trompes utérines, utérus, vagin, clitoris et glandes mammaires chez la femme et épидидymes, conduits déférents, glandes séminales, prostate et pénis chez l'homme).

Fonctions : Les gonades produisent des gamètes (spermatozoïde ou ovocyte) dont l'union recrée un nouvel individu ; les gonades produisent également des hormones qui régulent la reproduction et d'autres processus corporels ; les organes sexuels annexes transportent et stockent les gamètes ; les glandes mammaires produisent le lait



1.3 Caractéristiques de l'organisme humain vivant

OBJECTIF

- **Définir** les processus vivants importants du corps humain.

Caractéristiques de base du vivant

Certaines caractéristiques permettent de distinguer les organismes vivants du non-vivant. Les six caractéristiques les plus importantes du vivant chez l'Homme sont :

1. Le **métabolisme** qui représente la somme de toutes les réactions chimiques de l'organisme. Une des phases du métabolisme est le **catabolisme** qui est le démantèlement des molécules chimiques complexes en des molécules plus simples. L'autre phase du métabolisme est l'**anabolisme** qui est l'assemblage de substances chimiques complexes à partir de composés plus petits et plus simples. Par exemple, les processus digestifs catabolisent les protéines en acides aminés. Les acides aminés sont ensuite anabolisés en nouvelles protéines qui constituent les structures corporelles telles que les muscles et les os.
2. La **réactivité** est l'aptitude du corps à détecter et répondre aux changements. Par exemple, l'augmentation de la température corporelle lors d'une fièvre représente une modification de l'environnement interne (à l'intérieur du corps), tout comme la rotation de votre tête vers l'origine d'un coup de frein est une réaction à un changement de l'environnement externe (hors du corps) pour préparer le corps à une menace éventuelle. Différentes cellules de l'organisme répondent à des modifications environnementales de manières caractéristiques. Les cellules nerveuses répondent en générant des signaux électriques ou influx nerveux (les potentiels d'action). Les cellules musculaires répondent par des contractions, ce qui génère des forces qui meuvent le corps.
3. Le **mouvement** inclut la mobilité de l'ensemble du corps, d'organes individuels, de cellules isolées, et même de petites structures au sein de la cellule. Par exemple, l'action coordonnée des muscles des jambes permet le déplacement de l'ensemble du corps d'un endroit à l'autre lorsque vous marchez ou courez. Après un repas contenant des graisses, votre vésicule biliaire se contracte pour libérer la bile dans l'intestin pour aider à leur digestion. Lorsqu'un tissu est endommagé ou infecté, certains globules blancs sortent du flux sanguin vers le tissu affecté pour participer à son entretien et à sa réparation. Au sein d'une cellule, de nombreuses structures telles que les vésicules de sécrétion (voir [Figure 3.20](#)), se déplacent d'un endroit à l'autre pour remplir leurs fonctions.
4. La **croissance** est une augmentation de la taille du corps résultant de l'augmentation de la taille des cellules existantes, d'une augmentation du nombre de cellules, ou des deux. De plus, la taille d'un organe augmente parfois du fait de l'augmentation de la quantité de matériel entre les cellules. Dans l'os en croissance, c'est l'accumulation d'un dépôt minéral entre les cellules osseuses qui induit l'augmentation de l'os en longueur et en largeur.

5. La **différenciation** correspond au développement d'une cellule d'un état indifférencié vers un état différencié. De telles cellules indifférenciées capables de se diviser pour donner naissance à de multiples cellules qui entament leur différenciation, sont appelées des **cellules souches**. Comme vous le verrez plus loin dans le texte, chaque cellule de l'organisme est caractérisée par une structure ou une fonction spécialisée qui diffère de la cellule précurseur dont elle provient. Par exemple, toutes les cellules sanguines proviennent d'un seul type de cellule précurseur de la moelle osseuse rouge. Voir [Figure 19.3](#).

6. La **reproduction** fait référence soit à (1) la formation de nouvelles cellules liées à la croissance d'un tissu, sa réparation ou son remplacement, ou (2) à la production d'un nouvel individu. La formation de nouvelles cellules dépend de la division cellulaire. La production d'un nouvel individu dépend de la fécondation d'un ovocyte par un spermatozoïde pour former un zygote, qui est suivie par de nombreuses divisions cellulaires et différenciation de ces dernières.

Lorsqu'un des processus caractéristiques du vivant cesse de fonctionner correctement, il en résulte la mort de ces cellules et des tissus, ce qui peut conduire à la mort de l'organisme. Cliniquement, l'arrêt des battements cardiaques, l'absence de respiration spontanée, ou la perte des fonctions cérébrales est un indicateur de la mort d'une personne.

Intérêt clinique

L'autopsie

Une **autopsie** est un examen *post-mortem* du corps et la dissection de ces organes pour confirmer ou définir la cause du décès. Une autopsie peut permettre de définir la cause de la mort alors qu'elle n'avait pas été identifiée avant, de déterminer l'étendue des lésions et d'expliquer comme ces lésions ont contribué au décès de la personne. Elle permet d'apprendre plus d'informations à propos d'une maladie, de participer à la collecte de données statistiques et d'éduquer des étudiants en médecine. De plus, une autopsie peut permettre de comprendre ce qui a causé la mort *in utero* ou la naissance d'un enfant mort-né (comme les anomalies cardiaques congénitales). Parfois une autopsie est réalisée à la demande des autorités, comme lors d'une enquête criminelle. Elle peut parfois aider à résoudre des conflits entre des héritiers et une compagnie d'assurance en identifiant la cause du décès.



Fuse/Getty Images

Révision

6. Listez les six plus importants processus de corps humain.

1.4 Homéostasie

OBJECTIFS

- **Définir** l'homéostasie.
- **Décrire** les composants d'un rétrocontrôle.
- **Opposer** les rétrocontrôles positif et négatif.
- **Expliquer** comment un déséquilibre homéostatique est relié aux maladies.

L'**homéostasie** est la condition d'équilibre de l'environnement interne liée à l'interaction constante de tous les mécanismes de régulation du corps. L'homéostasie est une condition dynamique. En réponse aux changements de conditions, l'équilibre corporel peut varier étroitement autour d'un point de consigne compatible avec le maintien de la vie. Par exemple, le taux de glucose dans le sang est normalement maintenu entre 70 et 110 milligrammes de glucose par 100 millilitres de sang. Chaque structure, depuis le niveau cellulaire jusqu'au niveau systémique, contribue pour une part au maintien de l'environnement interne dans les valeurs de consigne.

Homéostasie et fluides corporels

Un aspect important de l'homéostasie concerne le maintien du volume et de la composition des **liquides corporels** – solutions aqueuses diluées et contenant des composés dissouts et qu'on retrouve tant à l'intérieur des cellules qu'autour d'elles (voir [Figure 27.1](#)). Le fluide contenu au sein des cellules est le **liquide intracellulaire**, abrégé **LIC**. Le fluide situé hors du corps des cellules est le **liquide extracellulaire (LEC)**. Le LEC qui remplit les espaces étroits entre les cellules est le **liquide interstitiel**. Au cours de vos études, vous apprendrez que le LEC est différent en fonction de l'endroit où il se trouve au sein du corps : le LEC situé dans les vaisseaux sanguins est le **plasma sanguin**, celui au sein des vaisseaux lymphatiques est la **lymphe**, et celui autour du cerveau et de la moelle épinière est le **liquide cérébro-spinal (LCS)**, dans les articulations il s'agit du **liquide synovial** et les LEC des yeux sont appelés l'**humeur aqueuse** et l'**humeur vitrée**.

Le bon fonctionnement des cellules de l'organisme dépend de la régulation précise de la composition du liquide interstitiel qui les entoure. Puisque le liquide extracellulaire entoure les cellules du corps, le liquide interstitiel sert d'*environnement interne* du corps. Par opposition, l'*environnement externe* du corps est l'espace qui entoure complètement le corps.

La [Figure 1.2](#) représente une vue simplifiée du corps qui montre comment de nombreux organes permettent les échanges de substances entre les environnements externe et interne et finalement avec les cellules de l'organisme dans le but de maintenir l'homéostasie. Notez que le système tégumentaire recouvre l'ensemble de la surface externe du corps. Depuis l'environnement externe, l'oxygène entre dans le plasma sanguin via le système respiratoire et les nutriments entrent dans le plasma sanguin via le système digestif. Après être entrées dans le plasma sanguin, ces substances sont transportées dans tout le corps par le système cardiovasculaire. L'oxygène et les nutriments quittent éventuellement le plasma sanguin et entrent dans le liquide interstitiel en traversant la paroi des capillaires sanguins, les plus petits vaisseaux du corps. Les capillaires sanguins sont spécialisés pour permettre le transfert de matériaux entre le plasma sanguin et le liquide interstitiel. Depuis le liquide interstitiel, l'oxygène et les nutriments sont captés par les cellules et métabolisés pour produire de l'énergie. Durant ce processus, les cellules produisent des déchets qui retournent vers le liquide interstitiel puis traversent la paroi capillaire vers le plasma sanguin. Le système cardiovasculaire transporte ces déchets vers les organes appropriés en vue de leur élimination hors du corps dans l'environnement extérieur. Le CO₂ est éliminé du corps via le système respiratoire, les déchets contenant de l'azote, tels que l'urée et l'ammoniac, sont éliminés du corps par le système urinaire.

Contrôle de l'homéostasie

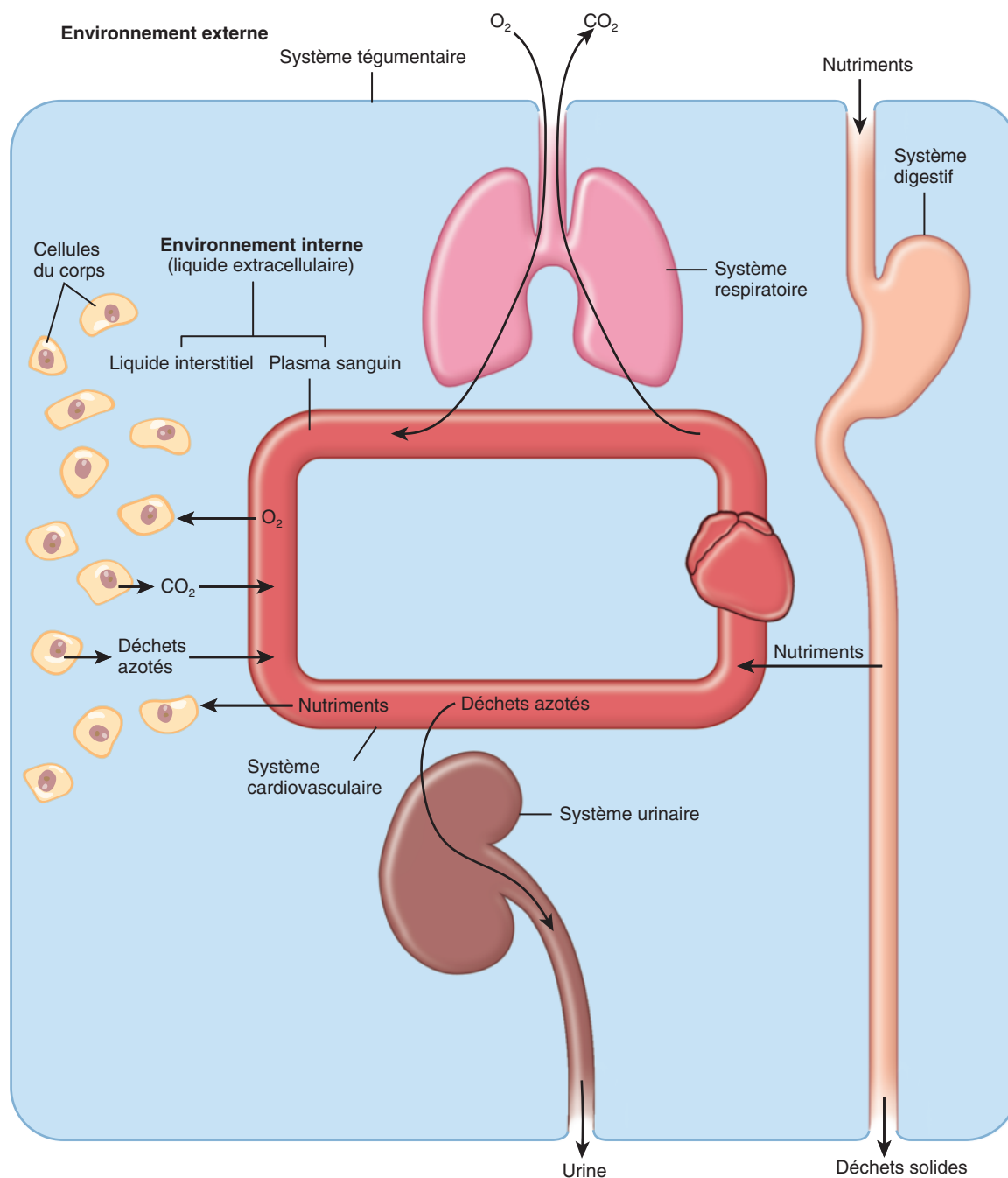
L'homéostasie du l'organisme humain est sans cesse perturbée. Certains déséquilibres proviennent de l'environnement extérieur sous la forme d'agressions physiques comme la chaleur intense d'un jour d'été, ou le manque d'oxygène lors d'une course de 3 kilomètres. D'autres déséquilibres proviennent de l'environnement interne comme un taux de glucose sanguin qui descend trop bas lorsque vous ne mangez pas votre déjeuner. Des déséquilibres homéostatiques peuvent même survenir à cause de stress psychologiques liés à notre mode de vie en société – trop de travail à l'école, par exemple. Dans la plupart des cas, cette rupture d'équilibre est peu importante et passagère, et la réaction des cellules de notre corps corrige rapidement l'équilibre de notre environnement interne. Cependant, les déséquilibres de l'homéostasie peuvent parfois être intenses et prolongés, comme lors d'une intoxication, la surexposition à des températures extrêmes, une infection grave, ou lors d'une opération chirurgicale importante.

Bien heureusement, l'organisme possède de nombreux systèmes régulateurs qui sont normalement capable de rétablir l'équilibre de l'environnement interne. Le plus souvent, le système nerveux et le système endocrinien, travaillant indépendamment ou de concert prennent les mesures correctrices nécessaires. Le système nerveux régule l'homéostasie en envoyant des signaux électriques, encore appelés les *impulsions nerveuses* (des *potentiels d'action*), vers les organes capables de contrebalancer les changements perturbateurs. Le système endocrinien est constitué des nombreuses glandes capables de sécréter dans le sang des molécules messagers, encore appelées *hormones*. Les impulsions nerveuses induisent typiquement des modifications rapides, alors que les hormones agissent plus lentement. Cependant, les deux systèmes de régulation opèrent dans le même but, normalement via des boucles de rétrocontrôles négatifs.

*L'annexe A décrit les mesures du système métrique.

FIGURE 1.2 Vue simplifiée des échanges entre les environnements externe et interne. Notez bien que les lignes délimitant les systèmes respiratoire, digestif et urinaire sont un continuum avec l'environnement externe.

Le liquide extracellulaire (liquide interstitiel et plasma sanguin) qui entoure les cellules de l'organisme constitue l'environnement interne du corps.



Q Comment un nutriment présent dans l'environnement externe peut atteindre le corps d'une cellule ?

www.lienmini.fr/33444-01

Les boucles de rétroaction L'organisme peut réguler son environnement interne via de nombreuses boucles de rétrocontrôle. Une **boucle de rétroaction** est un cycle d'événements par le biais duquel une condition corporelle est contrôlée, évaluée, modifiée, réévaluée, etc... Chaque variable monitorée comme la température corporelle, la pression sanguine ou le taux de glucose sanguin, est

appelée une **variable contrôlée**. Chaque modification qui perturbe une variable contrôlée est un **stimulus**. Une boucle de rétroaction est composée de trois éléments de base : un récepteur, un centre de contrôle et un effecteur (**Figure 1.3**).

1. Un récepteur est une structure du corps qui surveille une variable contrôlée et envoie les informations afférentes à un centre



de régulation. Cette voie métabolique est dénommée la *voie afférente* puisque l'information circule vers le centre de régulation. Typiquement, cet envoi de données prend la forme d'impulsions nerveuses ou d'un signal chimique. Par exemple, certaines terminaisons nerveuses de la peau sont sensibles à la température et sont à même de détecter des modifications comme un brutal refroidissement.

2. Un **centre de régulation** du corps comme par exemple le cerveau, détermine un intervalle de valeurs au sein de laquelle une variable contrôlée doit être maintenue (la consigne), évalue les données qu'il reçoit de la part des récepteurs, et génère des actions correctrices lorsque c'est nécessaire. Les efférences issues d'un centre de régulation prennent la forme d'impulsions nerveuses, d'hormones ou d'autres signaux chimiques. Cette voie métabolique est dénommée la *voie efférente* puisque l'information circule depuis le centre de régulation. Dans notre exemple de température cutanée, le cerveau agit comme le centre de régulation recevant des impulsions

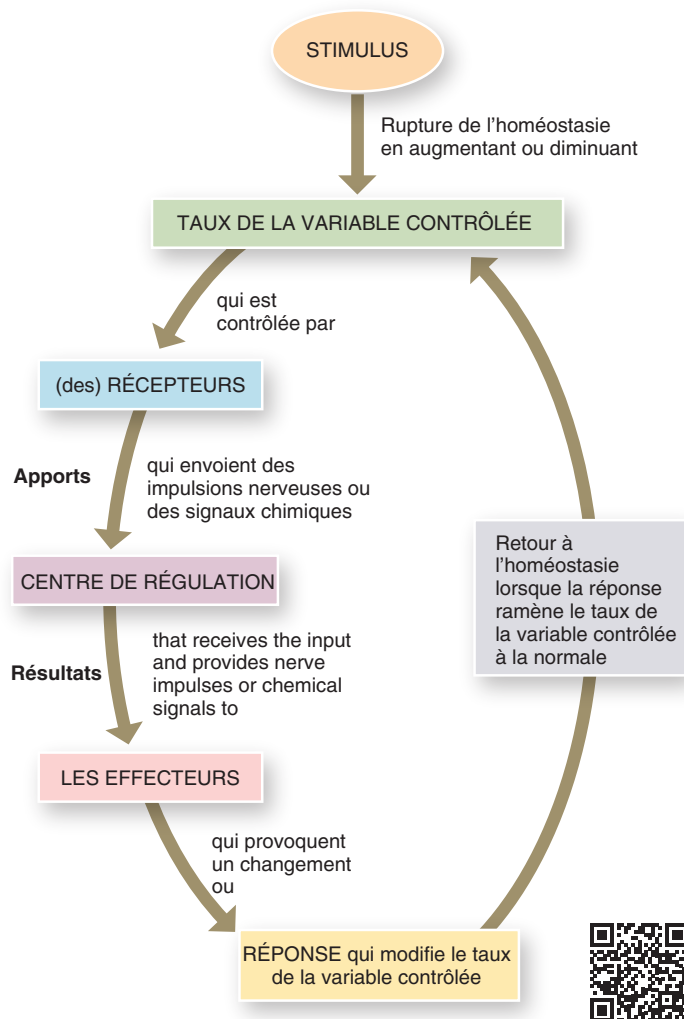
nerveuses depuis la peau, et réagit en générant des impulsions nerveuses efférentes.

3. Un **effecteur** est une structure corporelle qui reçoit les informations efférentes issues du centre de régulation, et qui produit une **réponse** : il effectue une action correctrice qui modifie la variable contrôlée. Pratiquement chaque organe ou tissu de l'organisme est à même de se comporter comme un effecteur. Lorsque la température corporelle chute fort, votre cerveau (le centre de régulation) envoie des impulsions nerveuses (les efférences) vers vos muscles squelettiques (les effecteurs). Il en résulte des tremblements qui génèrent de la chaleur et qui font remonter la température corporelle.

Un groupe de récepteurs et d'effecteurs qui communiquent avec leur groupe de contrôle forme un groupe de rétroaction à même de réguler une variable contrôlée de l'environnement interne du corps. Dans les systèmes de rétroaction, la réponse du système corrige la variable contrôlée de deux façons, soit de manière négative, la rétroaction négative, soit de manière positive, la rétroaction positive.

FIGURE 1.3 Fonctionnement d'une boucle de rétroaction.

Les trois composants de base d'une boucle de rétroaction sont le récepteur, le centre de contrôle et l'effecteur.



LES BOUCLES DE RÉTROACTIONS NÉGATIVES Une **boucle de rétroaction négative** inverse une modification d'une variable contrôlée. Considérons la régulation de la pression sanguine. La pression sanguine (NdT encore appelée tension artérielle (TA)) est la force exercée par le sang sur les parois des vaisseaux sanguins. Lorsque le cœur se met à battre plus vite ou plus fort, la TA augmente. Lorsque des stimuli internes ou externes font augmenter la TA (la variable contrôlée), la séquence suivante d'événements survient (Figure 1.4). Les *récepteurs barométriques* ou barorécepteurs (les récepteurs) qui sont des cellules nerveuses sensibles à la pression et localisées dans la paroi vasculaire de certains vaisseaux, détectent cette modification de la TA. Les barorécepteurs envoient des impulsions nerveuses (les afférences) vers le cerveau (centre de contrôle), qui interprète ces informations et répond en envoyant des impulsions nerveuses (les efférences) vers le cœur et les gros vaisseaux (les effecteurs). La fréquence cardiaque diminue et les vaisseaux sanguins se dilatent, ce qui entraîne une diminution de la TA (la réponse). Cette séquence d'événements ramène rapidement la condition contrôlée (pression sanguine) vers la normale, et l'homéostasie est restaurée. Notez que l'activité de l'effecteur induit la baisse de la TA, un résultat qui contrecarre l'effet de la stimulation originale (une augmentation de la TA). C'est pour cette raison que ceci est appelé une boucle de rétroaction négative.

LES BOUCLES DE RÉTROACTIONS POSITIVES À l'opposé des boucles de rétrocontrôle négatives, les **boucles de rétroactions positives** tendent à renforcer une modification d'une des variables contrôlées du corps. Dans une boucle de rétroaction positive, la réponse affecte la variable contrôlée différemment que dans une boucle de rétroaction négative. Le centre de régulation commande l'effecteur, mais cette fois l'effecteur effectue une réponse physiologique qui renforce la modification initiale de la variable contrôlée. L'effet de la rétroaction positive continuera jusqu'au moment où elle sera interrompue par un autre mécanisme.

L'accouchement nous donne un bon exemple de rétroaction positive (Figure 1.5). Les premières contractions du travail (le stimulus) poussent le fœtus sur le col utérin (la partie inférieure de l'utérus) qui s'ouvre dans le vagin. Les cellules sensibles à l'étirement (les récepteurs) suivent l'importance de l'étirement du col (la variable contrôlée). Lorsque l'étirement augmente, elles envoient plus d'impulsions

Q Quel est la principale différence entre des boucles de rétroactions positive et négative ? www.lienmini.fr/33444-01

FIGURE 1.4 Régulation homéostatique de la pression sanguine par le biais d'un système de rétroaction négative. La flèche discontinue qui remonte et qui est associée au signe négatif encerclé symbolise une rétroaction négative.

Le système opère via une rétroaction négative lorsque la réponse inverse l'action du stimulus.

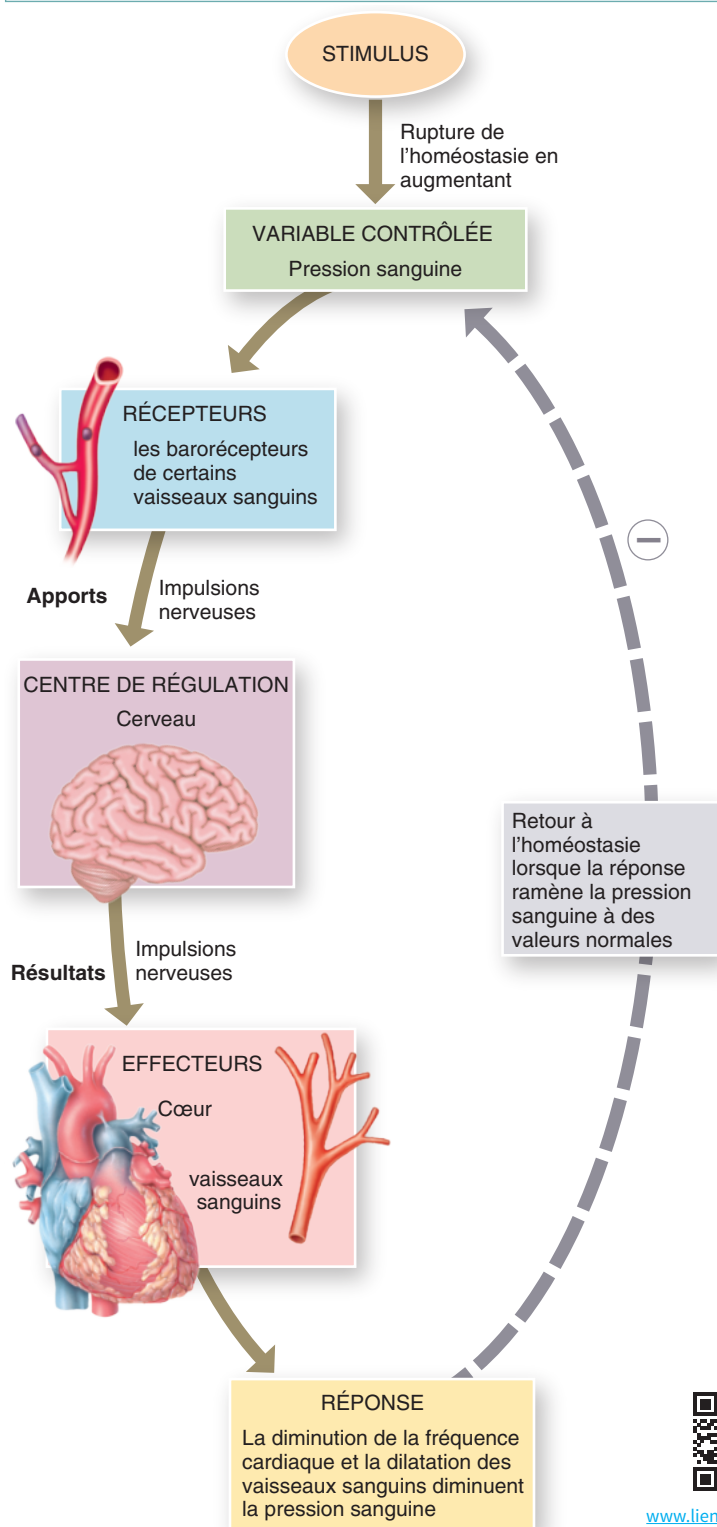
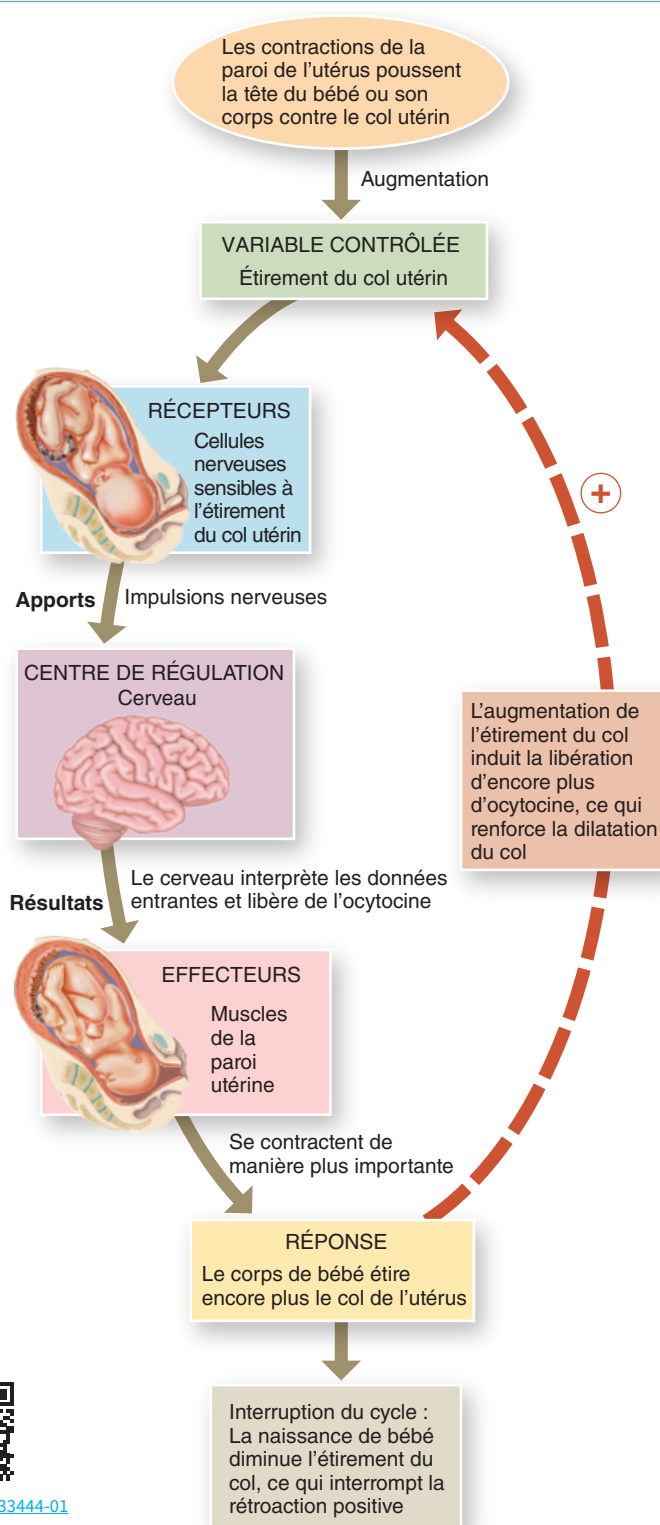


FIGURE 1.5 Contrôle des contractions liées au travail lors de la naissance d'un enfant via un système de rétroaction positive. La flèche discontinue qui remonte et qui est associée au signe positif encerclé symbolise le feedback positif.

Si la réponse amplifie ou augmente l'action d'un stimulus, alors le système fonctionne via un rétrocontrôle positif.



www.lienmini.fr/33444-01

Q Qu'advient-il de la fréquence cardiaque si un stimulus entraîne une diminution de la pression sanguine ? Cette réponse se produira-t-elle grâce à une boucle de rétroaction positive ou négative ?

Q Pourquoi est-ce que les boucles de rétroaction positive faisant partie d'une réponse physiologique normale intègrent un dispositif qui arrête le système ?

nerveuses (les afférences) vers le cerveau (le centre de contrôle), qui a son tour libère l'hormone ocytocine (les efférences) dans le sang. L'ocytocine agit sur les muscles de la paroi de l'utérus (NdT : le myomètre) qui se contractent encore plus fort. Les contractions poussent le fœtus à descendre plus bas dans l'utérus, ce qui étire encore plus le col. Ce cycle d'étirements, de libération hormonale et de contractions de plus en plus fortes est interrompu avec la naissance de l'enfant. A ce moment, l'étirement du col cesse, et l'ocytocine cesse d'être libérée.

Un autre exemple de rétroaction positive est observé lorsque vous avez perdu beaucoup de sang. Dans les conditions normales, le cœur pompe le sang avec suffisamment de pression vers les cellules du corps pour les fournir en oxygène et nutriments, et cela de manière à assurer le maintien de l'homéostasie. Lors d'une hémorragie sévère (NdT : grosse perte de sang), la pression sanguine s'effondre et les cellules sanguines, y compris le cœur, reçoivent moins d'oxygène et en conséquence, fonctionnent moins efficacement. Si la perte de sang se poursuit, les cellules cardiaques s'affaiblissent, l'action de la pompe cardiaque s'affaiblit encore et la pression sanguine continue de diminuer. Voici un exemple de rétroaction positive qui peut avoir de fâcheuses conséquences éventuellement mortelles s'il n'y a pas d'intervention médicale rapide. Comme nous le verrons dans le chapitre 19, la coagulation sanguine est également un exemple de rétroaction positive.

Ces exemples démontrent quelques-unes des différences importantes qu'il y a entre les rétroactions positives et négatives. Puisqu'une boucle de rétroaction positive renforce continuellement la modification d'une variable contrôlée, c'est un événement externe au système qui doit l'interrompre. Si l'activité d'une boucle de rétroaction positive n'est pas arrêtée, elle peut s'emballer et amener à des conditions mettant en péril la survie. À l'inverse, l'action d'une boucle de rétroaction négative va se réduire et même s'arrêter lorsque la condition contrôlée retourne à sa situation normale. Habituellement, une boucle de rétroaction positive renforce des conditions qui n'arrivent pas souvent, alors que les boucles de rétroaction négative régulent des conditions qui doivent rester stables pour de très longues périodes.

Déséquilibres homéostatiques

Nous avons défini l'homéostasie comme étant la condition où l'environnement interne de l'organisme est maintenu stable. La capacité du corps à maintenir son homéostasie lui donne un pouvoir de guérison énorme et une résistance remarquable aux excès. Les processus physiologiques responsables de l'équilibre homéostatique sont également responsables du maintien en bonne santé.

Pour la plupart des gens, être en bonne santé n'est pas quelque chose qui demande beaucoup d'efforts. Les nombreux facteurs impliqués dans cet équilibre qui est de vivre en bonne santé sont :

- L'environnement et votre manière de vivre.
- Votre patrimoine.
- L'air que vous respirez, la nourriture que vous mangez, et même votre manière de penser.

La façon dont vous vivez peut soit favoriser, soit contrecarrer la manière dont votre organisme maintient son homéostasie et réciproquement des stress inévitables de la vie.

De nombreuses maladies sont fréquemment le résultat d'années de comportements qui nuisent à la façon naturelle dont votre

corps maintient son homéostasie. Les maladies liées au tabac en sont un exemple classique. Fumer du tabac expose les tissus pulmonaires sensibles à une multitude de composés chimiques qui induisent le cancer ou altèrent les capacités des poumons à se régénérer. Parce que des maladies telles que l'emphysème ou le cancer du poumon sont difficiles à soigner et guérissent rarement, il est plus adapté d'arrêter de fumer ou encore mieux de ne jamais commencer, plutôt que d'espérer qu'un médecin vous guérisse une fois le diagnostic de maladie pulmonaire établi. Adapter un mode de vie qui travaille de concert plutôt que contre les processus de maintien de l'homéostasie du corps, vous aide à maximiser votre potentiel personnel en ayant une santé ainsi qu'un bien-être optimaux.

Aussi longtemps que les conditions contrôlées de votre organisme resteront entre des limites assez étroites, les cellules de votre corps fonctionneront de manière adéquate, votre homéostasie sera maintenue et vous resterez en bonne santé. Si un ou plusieurs composants de votre organisme perd cette capacité à contribuer à l'homéostasie, c'est tout l'équilibre normal de l'ensemble du corps qui est altéré. Lorsque le déséquilibre homéostatique n'est que modéré, une maladie peut en résulter, s'il est important, cela peut conduire au décès.

Un **trouble** est une anomalie de structure ou de fonction. La **maladie** est un terme plus spécifique pour désigner un trouble identifiable par un ensemble de signes et de symptômes. Une *maladie locale* affecte une partie ou une région limitée du corps (par exemple, une sinusite) ; une *maladie systémique* affecte l'ensemble du corps ou plusieurs parties de celui-ci (par exemple, la grippe). Les maladies affectent les structures et les fonctions de l'organisme de manière spécifique. Une personne malade présente des **symptômes**, ou modifications subjectives des fonctions du corps qui ne sont pas apparentes pour un observateur. Des nausées, maux de tête ou de l'anxiété sont des symptômes. Les modifications objectives qu'un clinicien peut observer et mesurer sont des signes cliniques. Les **signes cliniques** d'une maladie peut être d'ordre anatomique, comme un gonflement ou une rougeur, ou physiologiques comme de la fièvre, une hypertension ou une paralysie.

Intérêt clinique

Le diagnostic d'une maladie

Le **diagnostic** est la compétence permettant de distinguer un désordre ou une maladie parmi les autres. Les symptômes et signes cliniques d'un patient, son histoire médicale, son examen clinique et les résultats d'examens de laboratoire permettent d'établir un diagnostic. S'enquérir de l'histoire médicale du patient consiste à collecter des informations à propos d'événements qui sont potentiellement en relation avec la maladie actuelle. Ceci inclut la plainte principale (la raison principale justifiant les plaintes du malade), l'histoire de la maladie actuelle et des problèmes antérieurs, les problèmes familiaux, l'histoire sociale du patient et une révision des symptômes. Un examen clinique est une évaluation systématique du corps et de ses fonctions. Ceci inclut des techniques d'examen non invasives d'inspection, tels la palpation, l'auscultation et les percussions dont nous avons parlé précédemment dans ce chapitre, associés aux mesures de signes cliniques (température, pulsations, fréquence respiratoire, tension artérielle), et parfois d'examens de laboratoire.

La science qui s'occupe de comprendre pourquoi, comment et où les maladies surviennent et comment elles se transmettent entre individus s'appelle l'**épidémiologie**. La **pharmacologie** est la science qui s'occupe des effets et de l'utilisation des médicaments lors du traitement d'une maladie.

Révision

7. Décrivez où se situent le liquide intracellulaire, le liquide extracellulaire et le plasma sanguin.
8. Pourquoi est-ce que le liquide interstitiel est dénommé l'environnement intérieur de l'organisme ?
9. Quels types de perturbations peuvent agir en tant que stimuli qui démarrent une boucle de rétroaction ?
10. Définissez un récepteur, un centre de régulation, et un effecteur.
11. Quels est la différence entre les symptômes et les signes cliniques d'une maladie ? Donnez un exemple pour chacun d'eux.

1.5 Terminologie anatomique de base

OBJECTIFS

- **Décrire** la position anatomique.
- **Mettre en relation** la nomenclature anatomique et le nom correspondant de différentes régions du corps humain.
- **Définir** les plans anatomiques, les coupes anatomiques et les termes directionnels utilisés pour décrire le corps humain.
- **Décrire** les limites des grandes cavités du corps, les organes qu'elles contiennent et les revêtements qui les tapissent.

Les scientifiques comme les professionnels de la santé utilisent un langage commun de termes spécifiques lorsqu'ils se réfèrent à des structures corporelles et aux fonctions de l'organisme. Le langage anatomique qu'ils utilisent a des significations précisément définies qui leur permettent de communiquer clairement et précisément. Par exemple, est-il correct de dire : « Le poignet est situé au-dessus des doigts » ? Cela peut être vrai si vos membres supérieurs pendent à vos côtés. Mais si vous maintenez vos mains au-dessus de votre tête, vos doigts peuvent être au-dessus de vos poignets. Pour empêcher ce type de confusion, les anatomistes utilisent des positions anatomiques standards et un vocabulaire spécial pour mettre en relation les parties du corps entre elles.

Positions du corps

Les descriptions de chaque région ou partie du corps humain implique qu'il y ait une position standard de référence appelée **position anatomique**. Concernant la position anatomique, le sujet est placé droit

face à l'observateur avec la tête et les yeux regardant devant lui. Les membres inférieurs sont parallèles et les pieds sont à plat sur le sol et dirigés vers l'avant, tandis que les membres supérieurs pendent sur les côtés du corps avec les paumes tournées vers l'avant (**Figure 1.6**). Deux termes définissent un corps couché. Si un corps est couché avec la face vers le bas, il est en **décubitus ventral**. Si le corps est couché avec la face vers le haut, il est en **décubitus dorsal**.

Nomenclature des régions anatomiques

Le corps humain est divisé en plusieurs régions anatomiques majeures qui peuvent être identifiées aisément. Les principales régions sont la tête, le cou, le tronc, les membres supérieurs et inférieurs (**Figure 1.6**). La **tête** est formée d'os et de tissus mous associés comme la peau, les muscles et les structures du système nerveux. Les os du crâne comprennent les os de la cavité crânienne qui enveloppent et protègent le cerveau et les os de la face qui forment la partie antérieure de la tête et qui servent de soutien pour les yeux, le nez, la bouche, le front, les joues et le menton. Le **cou** supporte la tête et l'attache au tronc. Le **tronc** consiste en la poitrine, l'abdomen et le bassin. Chaque **membre supérieur** est fixé au tronc et est constitué de l'épaule, l'aisselle, le bras (portion du membre située entre l'épaule et le coude), l'avant-bras (portion du membre située entre le coude et le poignet), le poignet et la main. Chaque **membre inférieur** est également attaché au tronc et consiste en la fesse, la cuisse (portion du membre située entre la fesse et le genou), la jambe (portion du membre située entre le genou et la cheville), la cheville et le pied. L'**aine** est la surface frontale du corps marquée par un pli de chaque côté, et où la cuisse se fixe sur le tronc.

La **Figure 1.6** décrit les noms anatomiques et communs des principales parties du corps. Par exemple, lorsqu'on vous injecte le vaccin antitétanique dans la région glutéale, vous recevez une injection dans la fesse. Parce que le terme anatomique d'une région du corps est basé sur des mots latin ou grec, il peut apparaître très différent du nom commun de la même partie du corps. Par exemple, le terme latin *axilla* est le terme latin de l'aisselle. D'où le nerf axillaire est un des nerfs qui traverse le creux axillaire. Vous en apprendrez plus sur les racines latines et grecques des termes anatomiques et physiologiques en lisant ce livre.

Termes directionnels

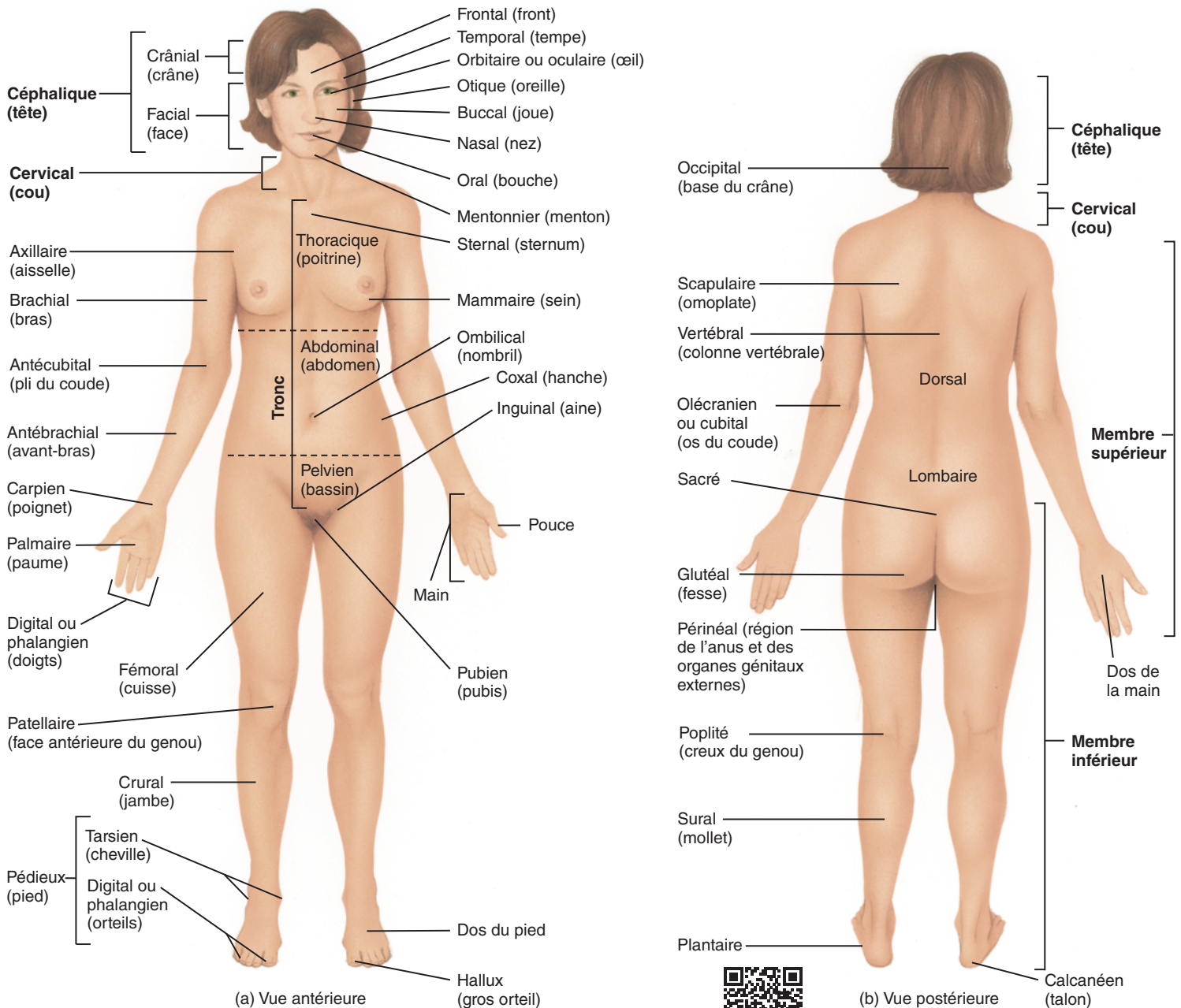
Afin de localiser les différentes structures corporelles, les anatomistes utilisent des **termes directionnels** spécifiques, des mots qui décrivent la position d'une partie du corps par rapport à d'autres. Plusieurs termes directionnels sont regroupés par paires qui ont des significations opposées, telles que : antérieur (frontal) et postérieur (dorsal). L'**Encadré 1** et la **Figure 1.7** présentent les principaux termes directionnels.

Plans et coupes

Vous allez également étudier les **plans** relatifs au corps, c'est-à-dire des surfaces imaginaires qui traversent les parties du corps (**Figure 1.8**). Un **plan médian** ou *plan sagittal médian* est un plan vertical qui divise le corps en parties gauche et droite. Plus précisément, lorsqu'un tel plan passe par la ligne médiane du corps ou d'un organe

FIGURE 1.6 La position anatomique. Les noms anatomiques ainsi que les noms communs correspondants (entre parenthèses) sont indiqués pour chaque région du corps. Par exemple, la région céphalique du corps correspond à la tête.

Dans la position anatomique, le sujet est debout, face à l'observateur, la tête droite et les yeux regardant devant lui. Les membres inférieurs sont parallèles et les pieds à plat sur le sol et dirigés vers l'avant, les membres supérieurs pendent le long du corps avec la paume des mains tournées vers l'avant.



Q Quelle est l'utilité de définir une seule position anatomique standard ?



www.lienmini.fr/33444-01

et le divise en parties gauche et droite équivalentes, il est appelé **plan paramédian** ou *plan para-sagittal*. La **ligne médiane** est une ligne verticale imaginaire qui divise le corps en parties gauche et droite égales. Si le plan sagittal ne passe pas par la ligne médiane mais divise plutôt le corps ou un organe en parties gauche et droite inégales, on parle alors de **plan paramédian** ou *plan para-sagittal*. Un **plan coronal** (frontal) divise le corps ou un organe en parties antérieure (frontale) et postérieure (dorsale). Un **plan transversal** divise

le corps ou un organe en parties supérieure et inférieure. Il y a d'autres noms pour un plan transversal tel que plan horizontal ou coupe transversale. Les plans médian, paramédian, coronal et transversal sont tous à angle droit les uns des autres. À l'opposé, un plan oblique traverse le corps ou un organe avec un angle oblique (tout angle différent d'un angle à 90°).

La coupe anatomique est souvent utilisée lorsque vous étudiez une région du corps. Une **coupe** est une section du corps ou d'un de

ses organes, réalisée selon les plans décrits précédemment. Il est important de connaître le plan de coupe de manière à pouvoir comprendre les relations entre les organes. Les **Figure 1.9a–c** indiquent comment différentes coupes – *médiane*, *coronale* et *transversale* –, apportent différentes vues du cerveau.

Cavités du corps

Les **cavités du corps** sont des espaces qui contiennent les organes internes. Elles sont nommées d’après les os qui les entourent ou les

organes qu’elles contiennent. Les os, muscles, ligaments et autres structures séparent les différentes cavités du corps les unes des autres (**Figure 1.10**).

Les os de la cavité crânienne forment un espace creux dans la tête, appelé **cavité crânienne**, qui contient le cerveau. Les os de la colonne vertébrale forment le **canal vertébral**, qui contient la moelle épinière. La cavité crânienne et le canal vertébral communiquent l’un avec l’autre. Trois couches de tissus protecteurs, les **méninges**, et un liquide amortissant les chocs (liquide cérébro-spinal), entourent le cerveau et la moelle épinière.

ENCADRÉ 1 Termes directionnels (Figure 1.7)

OBJECTIF

- **Décrire** chaque terme directionnel utilisé pour la description du corps humain.

Vue d’ensemble

La plupart des termes directionnels utilisés pour décrire la relation entre une partie du corps et une autre, peuvent être groupés par paires de significations opposées. Par exemple, **supérieur** signifie vers la partie haute du corps, et **inférieur** signifie vers la partie basse du corps. Il est important de comprendre que ces termes ont des significations relatives ; qu’ils n’ont de sens que lorsqu’ils

sont utilisés pour décrire la position d’une structure par rapport à une autre. Par exemple, votre nez est supérieur à votre bouche, même si les deux sont situés dans la partie supérieure du corps. Etudiez les termes directionnels ci-dessous ainsi que l’exemple qui montre comment ils sont utilisés. Lorsque vous lisez les exemples, regardez sur la **Figure 1.7** pour situer où se trouve chaque structure.

Révision

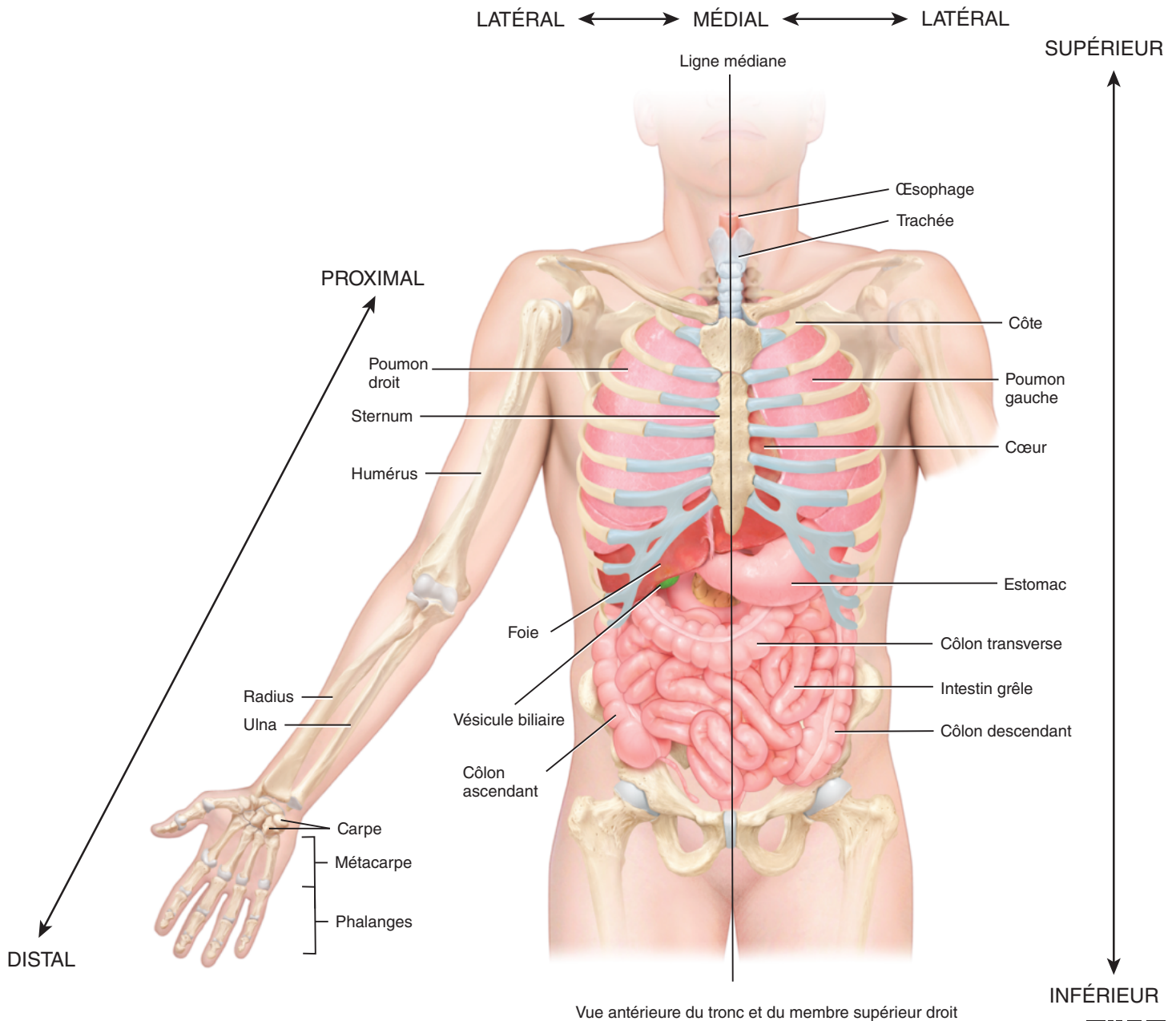
12. Quels termes directionnels peuvent être utilisés pour spécifier les relations entre (1) le coude et l’épaule, (2) les épaules gauche et droite, (3) le sternum et l’humérus, et (4) le cœur et le diaphragme?

TERME DIRECTIONNEL	DÉFINITION	EXEMPLE D’UTILISATION
Supérieur (<i>Céphalique ou crânial</i>)	Vers la tête, ou la partie supérieure d’une structure. Non utilisé pour les positions relatives des membres.	Le cœur est supérieur au foie
Inférieur (<i>caudal</i>)	Eloigné de la tête, ou la partie basse d’une structure Non utilisé pour les positions relatives des membres.	L’estomac est inférieur aux poumons
Antérieur (<i>ventral</i>)*	Le plus près de, ou sur la face avant du corps	Le sternum est antérieur au cœur
Postérieur (<i>dorsal</i>)	Le plus près de, ou sur la face arrière du corps	L’œsophage est postérieur à la trachée
Médial	Le plus près de la ligne médiane (une ligne imaginaire qui coupe le corps en deux parties égales gauche et droite)	L’ulna est médian par rapport au radius
Latéral	Au plus loin de la ligne médiane	Les poumons sont latéraux par rapport au cœur
Intermédiaire	Entre deux structures	Le côlon transverse est intermédiaire aux côlons ascendant et descendant
Ipsilatéral	Du même côté du corps qu’une autre structure	La vésicule biliaire et le côlon ascendant sont ipsilatéraux
Controlatéral	Du côté opposé du corps par rapport à une autre structure	Les côlons ascendant et descendant sont controlatéraux
Proximal	Au plus près de l’origine d’une structure ou d’un membre	L’humérus est proximal au radius
Distal	Au plus loin de l’origine d’une structure ou d’un membre	Les phalanges sont distales par rapport au carpe
Superficiel	Vers la surface du corps	Les côtes sont superficielles par rapport aux poumons
Profond	Eloigné de la surface du corps	Les côtes sont plus profondes que la peau de la poitrine et du dos

*Notez que les termes *antérieur* et *ventral* signifient la même chose chez l’homme. Cependant chez les quadrupèdes, *ventral* se réfère à l’abdomen et est donc synonyme de *inférieur*. De manière similaire, les termes *postérieur* et *dorsal* signifient la même chose chez l’homme, mais chez les quadrupèdes, *dorsal* se réfère à la face dorsale et est donc synonyme de *supérieur*.

FIGURE 1.7 Termes directionnels.

Les termes directionnels localisent précisément les différentes parties du corps par rapport aux autres.



Q Est-ce que le radius est proximal à l'humérus ? Est-ce que l'œsophage est antérieur à la trachée ? Est-ce que les côtes sont superficielles aux poumons ? Est-ce que la vessie est médiale par rapport au côlon ascendant ? Est-ce que le sternum est latéral par rapport au côlon descendant ?



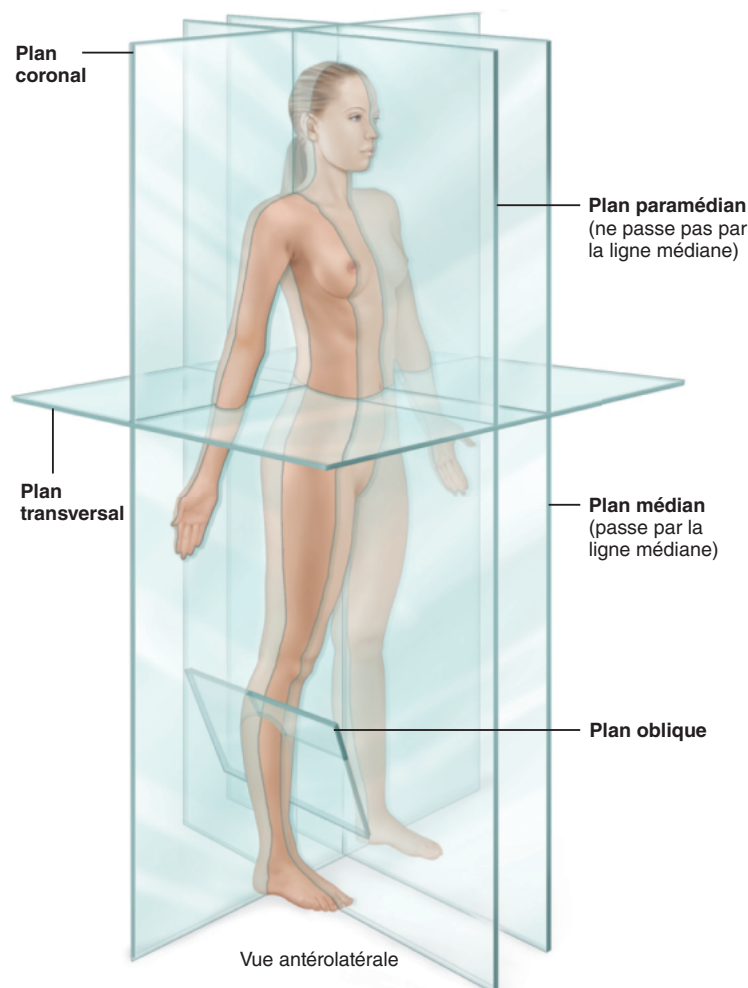
www.lienmini.fr/33444-01

Les plus grandes cavités du tronc sont les cavités thoracique et abdomino-pelvienne. La **cavité thoracique** (Figure 1.11) est formée par les côtes, les muscles de la poitrine, le sternum et la portion thoracique de la colonne vertébrale. Dans la cavité thoracique se trouvent la **cavité péricardique**, un espace rempli de liquide qui entoure le cœur, et deux espaces remplis de liquide et appelés **cavités pleurales**

autour de chaque poumon. La partie centrale de la cavité thoracique est une région anatomique appelée **médiastin**. Il est situé entre les poumons, s'étend depuis le sternum jusqu'à la colonne vertébrale et depuis la première côte jusqu'au diaphragme (Figure 1.11a, b). Le médiastin contient tous les organes thoraciques excepté les poumons eux-mêmes. Parmi les structures médiastinales se trouvent le cœur,

FIGURE 1.8 Plans du corps.

Les plans médian, paramédian, coronal, transversal et oblique divisent le corps de manière spécifique.



Q Quel plan divise le cœur en parties antérieure et postérieure ?

www.lienmini.fr/33444-01

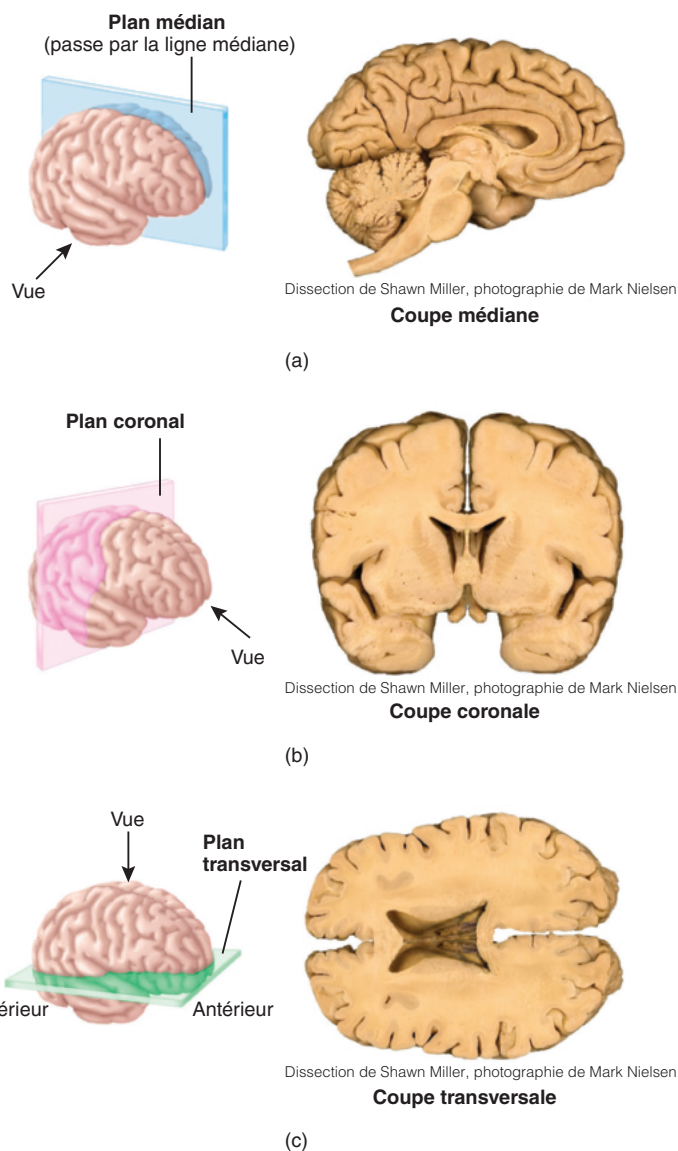


l'œsophage, la trachée, le thymus et les gros vaisseaux qui entrent et sortent du cœur. Le **diaphragme** est un muscle en forme de dôme qui sépare la cavité thoracique de la cavité abdominopelvienne.

La **cavité abdominopelvienne** (voir **Figure 1.10**) s'étend depuis le diaphragme jusqu'aux aines et est circonscrite par la paroi musculaire abdominale ainsi que par les os et les muscles du bassin. Comme son nom l'indique, la cavité abdomino-pelvienne est divisée artificiellement en deux parties, même si aucune paroi de les sépare (**Figure 1.12**). La partie supérieure, la **cavité abdominale**, contient l'estomac, la rate, le foie, la vésicule biliaire, l'intestin grêle ainsi que la plus grande partie du côlon. La partie inférieure, la **cavité pelvienne** (de *pelvis* = bassin), contient la vessie, des portions du côlon, et les organes internes des systèmes génitaux. Les organes situés dans les cavités thoracique et abdomino-pelvienne sont appelés les **viscères**.

FIGURE 1.9 Plans et coupes à travers différentes parties du cerveau. Les images de gauche montrent les plans tandis que les photographies de droite montrent les coupes. La flèche « Vue » de chaque image indique la direction à partir de laquelle chaque section est visualisée. Cette méthode sera conservée tout au long de l'ouvrage pour indiquer les perspectives de visualisation.

Les plans divisent le corps de différentes manières pour produire des coupes.



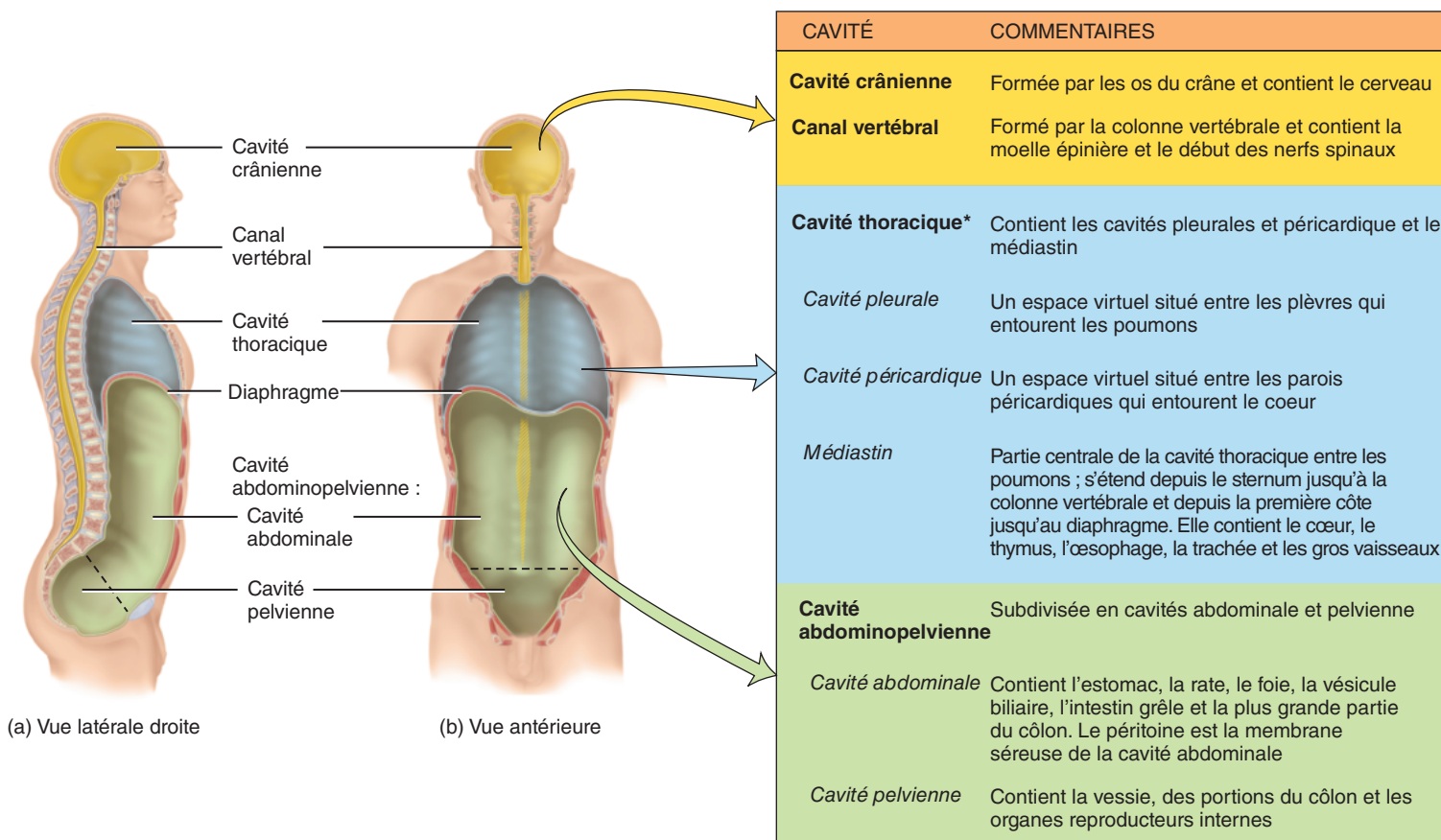
Q Quelle coupe divise le cerveau en parties gauche et droite inégales ?

Membranes des cavités thoracique et abdominale

Une **membrane** est un tissu mince et flexible qui recouvre, coupe, divise ou connecte des structures. La **membrane séreuse** qui est une membrane glissante et double qui limite les cavités corporelles sans être connectée avec l'extérieur en est un bon exemple. Elle couvre les viscères au sein des cavités thoracique et abdominale et se poursuit en recouvrant les parois du thorax et de l'abdomen. La membrane

FIGURE 1.10 Les cavités du corps. Les lignes pointillées noires indiquent les limites entre les cavités abdominale et pelvienne.

Les cavités thoracique et abdominopelvienne sont les plus grandes cavités du tronc.



* Voir Figure 1.11 pour les détails de la cavité thoracique.

Q Dans quelles cavités sont situés les organes suivants : la vessie, l'estomac, le cœur, l'intestin grêle, les poumons, les organes génitaux internes féminins, le thymus, la rate, le foie ? Utilisez les symboles suivants pour vos réponses : T = cavité thoracique, A = cavité abdominale ou P = cavité pelvienne.



www.lienmini.fr/33444-01

séreuse se divise en (1) une *couche pariétale*, un fin épithélium qui recouvre les parois des cavités, et (2) la *couche viscérale*, un fin épithélium qui recouvre et adhère aux viscères de la cavité. Un espace potentiel est présent entre ces deux couches et contient une petite quantité de liquide lubrifiant (le *liquide séreux*). Ce liquide permet aux viscères de glisser lorsqu'ils bougent, et aux poumons de se gonfler et dégonfler au cours de la respiration.

La séreuse des cavités pleurales est appelée la **plèvre**. La *plèvre viscérale* est fixée à la surface des poumons tandis que la *plèvre pariétale* recouvre la paroi de cavité thoracique et la surface supérieure du diaphragme (voir Figure 1.11a). La *cavité pleurale* se trouve entre les deux feuillets, elle contient une petite quantité d'un liquide lubrifiant les séreuses (voir Figure 1.11). La séreuse de la cavité péricardique est le **péricarde**. Le *péricarde viscéral* recouvre la surface du cœur ; le *péricarde pariétal* recouvre la paroi thoracique. La *cavité péricardique* se trouve entre les deux feuillets, elle contient une petite quantité d'un liquide lubrifiant les séreuses (voir Figure 1.11). Le **péritoine** est la séreuse de la cavité abdominale. Le *péritoine viscéral* recouvre les viscères abdominaux, et le *péritoine pariétal* recouvre la paroi abdo-

minale et la face inférieure du diaphragme. La *cavité péritonéale* se trouve entre les deux feuillets, elle contient une petite quantité d'un liquide lubrifiant les séreuses. La plupart des organes abdominaux sont recouverts par le péritoine. Certains ne le sont pas parce qu'ils sont situés derrière lui. Ces organes sont dits *rétro-péritonéaux*. Les reins, les surrénales, le pancréas, le duodénum, les côlons ascendant et descendant, des parties de l'aorte et de la veine cave inférieure sont rétro-péritonéaux.

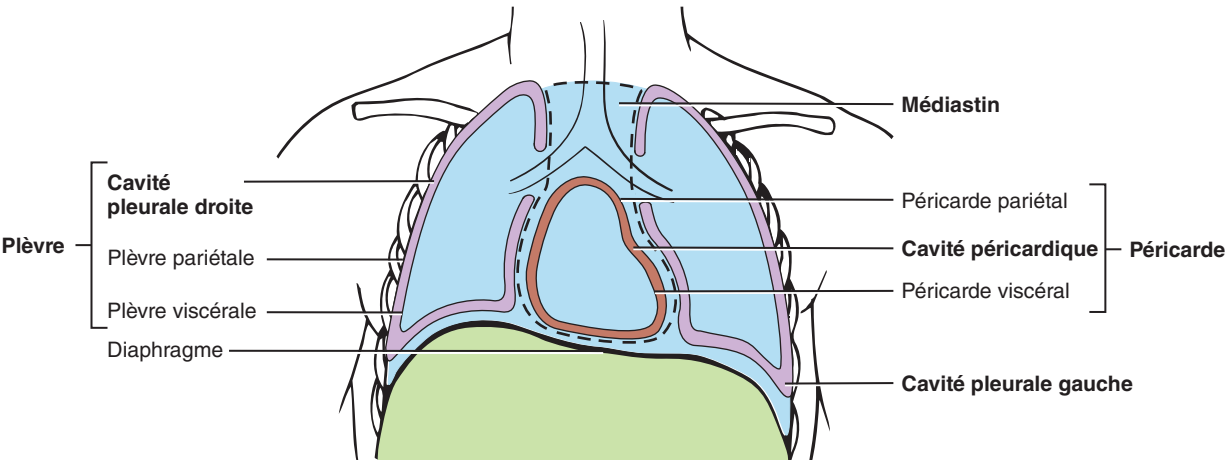
En plus des principales cavités du corps que nous venons de décrire, vous verrez d'autres cavités corporelles dans les chapitres suivants. Elles incluent la *cavité buccale* (*bouche*), qui contient la langue et les dents, (voir Figure 24.5); les *cavités nasales* du nez (voir Figure 23.1); les *cavités orbitaires* qui contiennent les bulbes oculaires (voir Figure 7.3); la *cavité tympanique* qui contient les osselets de l'ouïe et les muscles associés (Figure 17.19); et les *cavités synoviales* présentes au sein des articulations mobiles et qui contiennent le liquide synovial (voir Figure 9.3).

Un résumé des principales cavités corporelles et de leurs membranes est présenté au sein du tableau inclus dans la Figure 1.10.

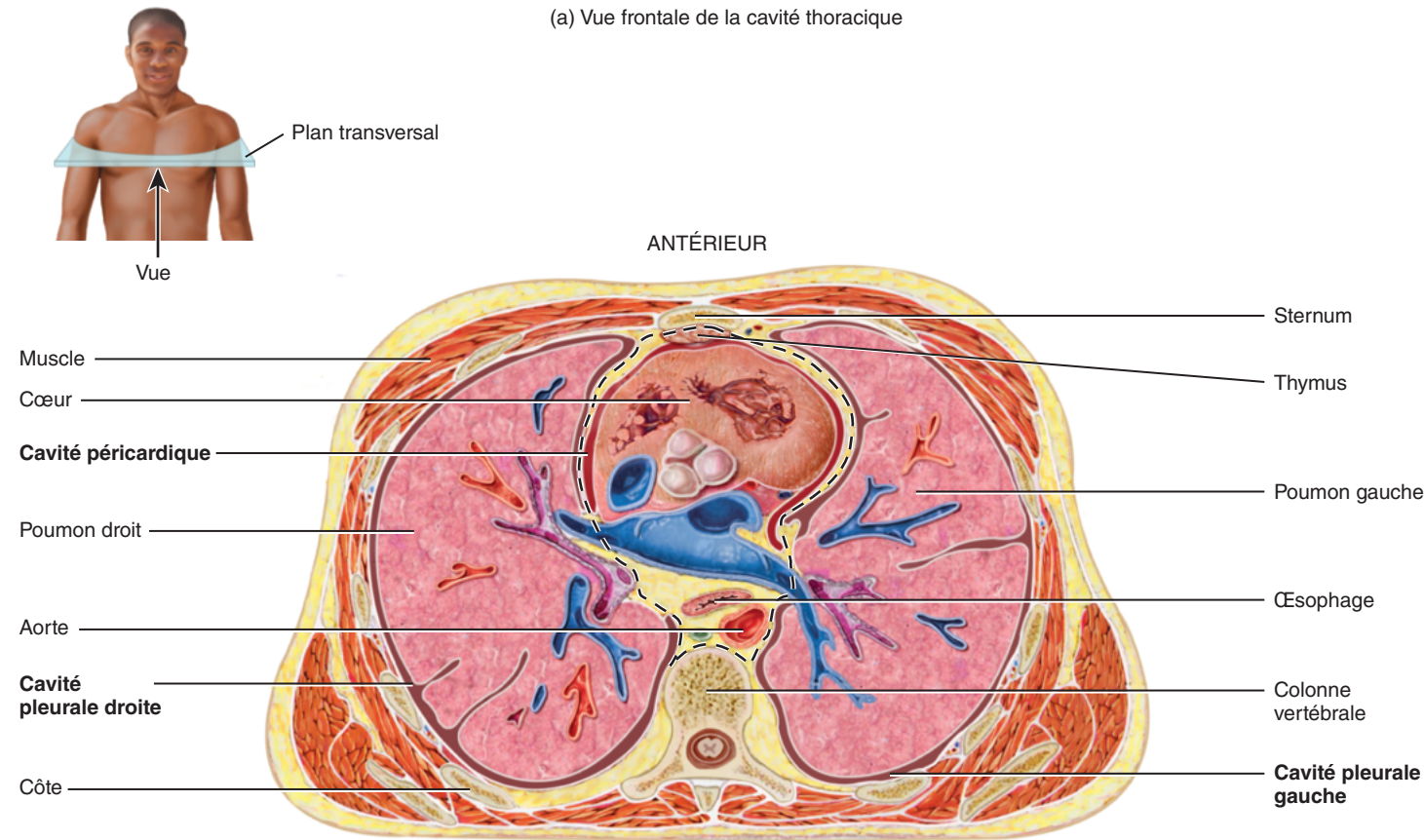
FIGURE 1.11 La cavité thoracique. Les lignes pointillées noires indiquent les limites du médiastin.

Note: Lorsque des coupes transversales sont visualisées du dessous, la partie antérieure du corps apparaît au-dessus et la partie gauche du corps apparaît à droite de l'image.

La cavité thoracique contient trois plus petites cavités et le médiastin.



(a) Vue frontale de la cavité thoracique



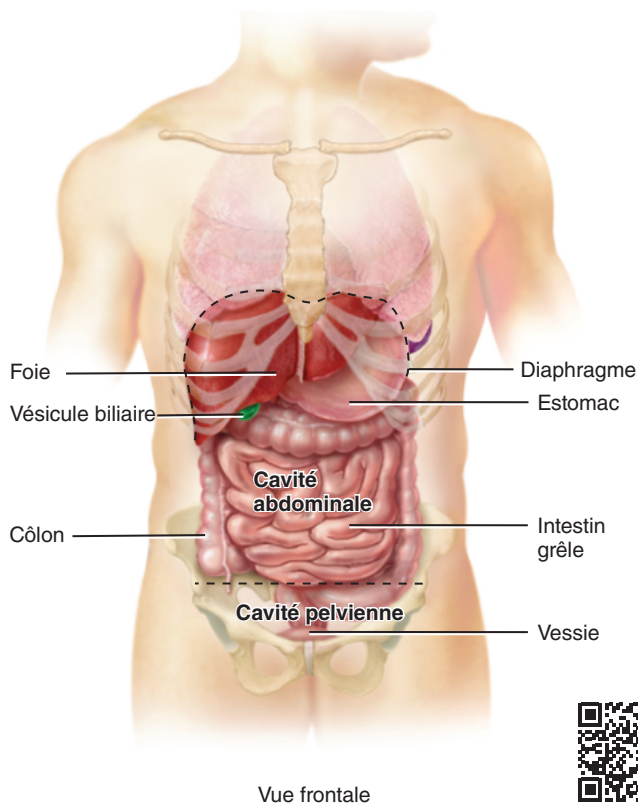
(b) Vue inférieure de coupe transversale de la cavité thoracique

Q Quel est le nom de la cavité qui entoure le cœur ? Quelles cavités entourent les poumons ?



FIGURE 1.12 La cavité abdominopelvienne. La ligne pointillée noire du bas montre la limite approximative entre les cavités abdominale et pelvienne.

La cavité abdomino-pelvienne s'étend du diaphragme aux aines.



www.lienmini.fr/33444-01

Q À quels systèmes appartiennent les organes montrés ici au sein des cavités abdominale et pelvienne ?
(Conseil : référez-vous au [Tableau 1.2.](#))

Régions abdominopelviennes et quadrants

Pour situer plus facilement les organes abdominaux et pelviens, les anatomistes et les cliniciens utilisent deux méthodes pour diviser la cavité abdominopelvienne en des zones plus réduites. Dans la première méthode, deux lignes horizontales et deux lignes verticales alignées comme dans une grille de mots croisés, divisent cette cavité en neuf **sous-régions abdominopelviennes** ([Figure 1.13a](#)). La ligne horizontale supérieure, la *ligne sous-costale*, passe au travers du niveau inférieur des 10^e cartilages costaux (voir également la [Figure 7.22b](#)); la ligne horizontale inférieure, la *ligne transtuberculaire* passe au travers de la marge supérieure des crêtes iliaques des os gauche et droit de la hanche (voir [Figure 8.9](#)). Deux lignes verticales, les *lignes mi-claviculaires* gauche et droite sont dessinées à partir du milieu de la clavicule, juste à l'intérieur des mamelons. Ces quatre lignes divisent la cavité abdominopelvienne en une grande région centrale et des petites régions gauche et droite. Les noms de ces neuf régions abdominopelviennes sont l'**hypochondre droit**, l'**épigastre**, l'**hypochondre gauche**, le **flanc droit**, la **région ombilicale**, le **flanc gauche**, la **région inguinale droite**, l'**hypogastre**, et la **région inguinale gauche**.

La seconde méthode est plus simple et divise la cavité abdominopelvienne en **quadrants**, comme montré dans la [Figure 1.13b](#). Dans cette méthode une ligne sagittale médiane (ligne médiane) ainsi qu'une ligne transverse passent par l'ombilic (nombril). Les noms des quadrants abdominopelviens sont les **quadrant supérieur droit (CSD)**, **quadrant supérieur gauche (CSG)**, **quadrant inférieur droit (CID)** et **quadrant inférieur gauche (CIG)**. La division en neuf régions est plus largement utilisée pour les études anatomiques, et les quadrants sont plus utilisés par les cliniciens pour décrire le site d'une douleur abdominopelvienne, une tumeur ou tout autre anomalie.

Révision

13. Localisez chaque région décrite dans la [Figure 1.6](#) sur votre propre corps, et ensuite identifiez les par son nom anatomique et son nom commun correspondant.
14. Quelles structures séparent les différentes cavités corporelles les unes des autres ?
15. Localisez les neuf régions abdominopelviennes ainsi que les quatre quadrants abdominopelviens sur vous-même, et listez quelques-uns des organes trouvés au sein de chacun d'eux.

1.6 Vieillesse et homéostasie

OBJECTIF

- **Décrire** quelques changements anatomiques et physiologiques qui surviennent avec l'âge.

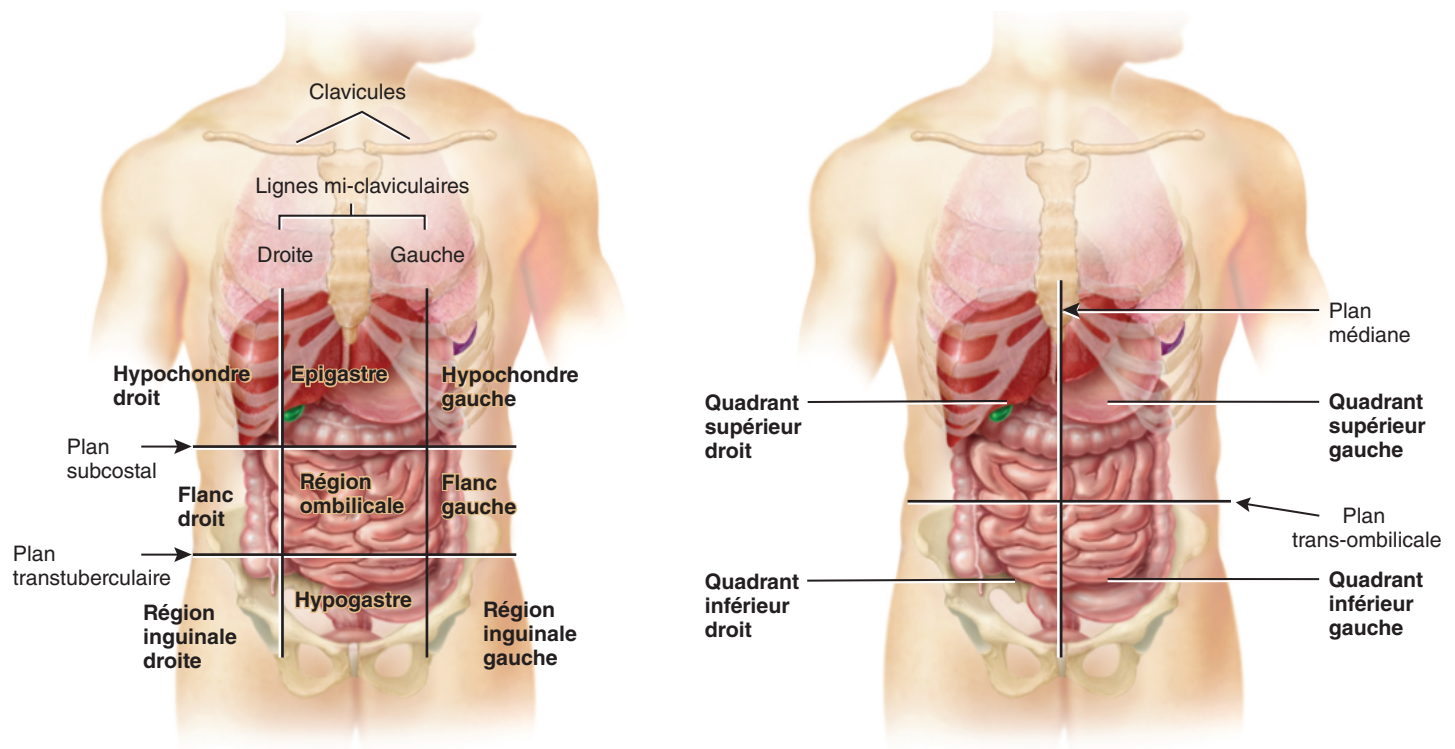
Comme vous le verrez plus tard, le **vieillesse** est un processus normal caractérisé par un déclin progressif des aptitudes du corps à maintenir l'homéostasie. Le vieillissement induit des changements observables de la structure et de la fonction et augmente la vulnérabilité au stress et aux maladies. Les changements associés au vieillissement sont apparents dans tous les systèmes du corps. La peau ridée, les cheveux gris, la perte de masse osseuse, la diminution de la masse et de la force musculaire, la diminution des réflexes, la diminution de la production de certaines hormones, la plus grande incidence des maladies cardiaques, la plus grande susceptibilité de développer des infections ou des cancers, la diminution de la capacité respiratoire, la moindre efficacité du système digestif, la diminution de la fonction rénale, la ménopause, l'élargissement de la prostate en sont des exemples. Ces effets et d'autres effets du vieillissement seront vus plus tard en détails dans les chapitres suivants.

Révision

16. Citez quelques signes de vieillissement?

FIGURE 1.13 Régions et quadrants de la cavité abdominopelvienne.

La désignation en neuf régions est utilisée pour les études anatomiques ; la désignation en quadrants est utilisée pour localiser le site d’une douleur, d’une tumeur ou de toute autre anomalie.



(a) Vue antérieure montrant la localisation des régions abdominopelviennes (b) Vue antérieure montrant la localisation des quadrants abdominopelviens

Q Dans quelle région abdominopelvienne se situent les organes suivants : la plus grande partie du foie, le côlon ascendant, la vessie et la plupart de l’intestin grêle ? Dans quel quadrant abdominopelvien peut-on situer la douleur de l’appendicite (inflammation de l’appendice) ?



www.lienmini.fr/33444-01

1.7 Imagerie médicale

OBJECTIF

- **Décrire** les principes et l’importance des procédures d’imagerie médicale dans l’évaluation des fonctions des organes et le diagnostic des maladies.

L’**imagerie médicale** fait référence aux techniques et procédures utilisées pour créer des images du corps humain. Différents types d’imageries médicales permettent la visualisation de structures internes de notre corps et sont hautement utiles pour permettre le diagnostic précis d’un grand nombre de désordres anatomiques et physiologiques. La radiographie conventionnelle (rayons X) est l’ancêtre de toutes les techniques d’imagerie médicales, et est utilisée depuis la

fin des années 1940 . Les nouvelles technologies d’imagerie ne contribuent pas seulement au diagnostic des maladies, mais elles permettent également des avancées dans la compréhension de l’anatomie et de la physiologie normales. Le **Tableau 1.3** décrit certaines des techniques d’imagerie médicale les plus communément utilisées. D’autres méthodes d’imagerie, comme la cathétérisation cardiaque, seront discutées dans les chapitres suivants.

Révision

17. Quelle forme d’imagerie médicale devrait être utilisée pour montrer une obstruction d’une artère du cœur ?
18. Des techniques d’imagerie médicale présentées dans le **Tableau 1.3**, quelle est celle qui révèle le mieux la physiologie d’une structure ?
19. Quelles techniques d’imagerie médicale utiliseriez-vous pour détecter une fracture osseuse ?

TABEAU 1.3 Procédures d'imagerie médicales classiques

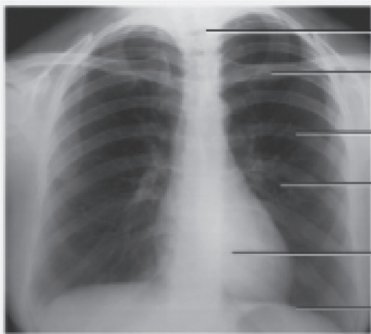
LA RADIOGRAPHIE

Procédure : un flux de rayons-X passe au travers du corps, produisant une image des structures internes sur un film sensible aux rayons X. L'image bidimensionnelle qui en résulte est une radiographie, communément appelée une radio.

Commentaires : Bon marché, simple et rapide à réaliser, les radios procurent d'abondantes informations pour le diagnostic. Les rayons X ne passent pas facilement au travers de structures denses, si bien que les os apparaissent blancs. Les structures creuses, comme les poumons, apparaissent en noir. Les structures de densité intermédiaires comme la peau, la graisse et les muscles apparaissent avec différentes nuances de gris. A faibles doses, les rayons X sont

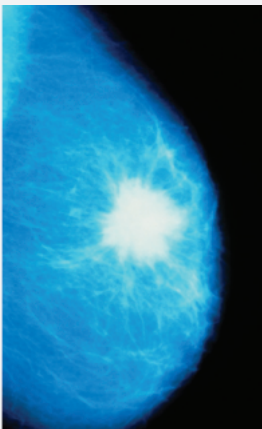
pratiques pour examiner des tissus mous comme les seins (**mammographie**) et pour déterminer la densité osseuse (**densitométrie osseuse**).

Il est nécessaire d'utiliser une substance appelée produit de contraste pour rendre visibles des structures creuses ou remplies de liquide. Les rayons X font que les structures qui contiennent du produit de contraste apparaissent en blanc. Le produit de contraste peut également être injecté, avalé ou introduit dans le rectum en fonction des structures à observer. Dans ces cas, les rayons X peuvent être utilisés pour visualiser des vaisseaux sanguins (**angiographie**), le système urinaire (**urographie intraveineuse**) et le tractus gastro-intestinal (**transit baryté**).



Dick Luria/Science Source

Radiographie du thorax, vue antérieure



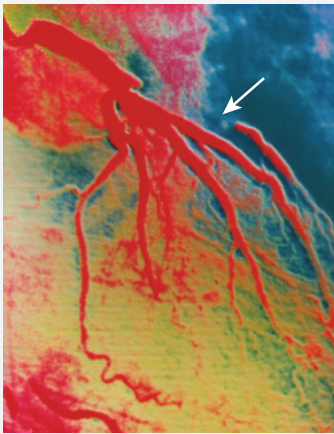
East Cancer Unit, Kings College Hospital, London/Science Source

Mammographie du sein d'une femme présentant une tumeur cancéreuse (masse blanche aux bords inégaux)



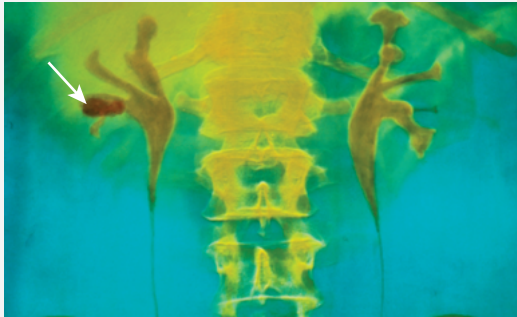
Zephyr/Photo Researchers, Inc.

Densitométrie osseuse de la colonne lombaire, vue ventrale



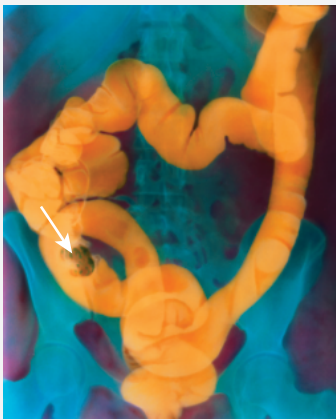
Cardio-Thoracic Centre, Freeman Hospital, Newcastle-Upon-Tyne/Science Source

Coronarographie (angiographie cardiaque) d'un adulte montrant une obstruction de l'artère coronaire



CNRI/SPL/Science Source

Urographie intraveineuse montrant un calcul rénal (flèche) au rein droit



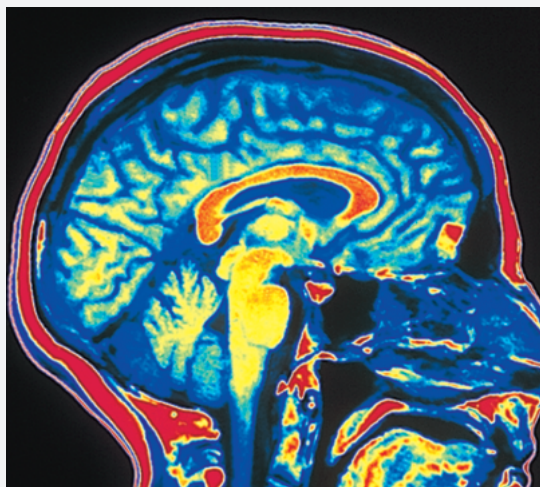
Science Photo Library/Science Source

Transit baryté montrant une tumeur cancéreuse du côlon ascendant (flèche)

IMAGERIE PAR RÉSONNANCE MAGNÉTIQUE (IRM)

Procédure : Le corps est exposé à un fort champ magnétique, qui oriente les protons (petites charges positives au sein des atomes, tel que l'hydrogène) des fluides corporels et des tissus en fonction du champ magnétique. Ensuite une impulsion d'ondes radio lit la manière dont les ions sont orientés, et une image en couleur est générée sur un écran. Il en résulte une image en deux ou trois dimensions de la biochimie cellulaire.

Commentaires : Technique peu agressive mais qui ne peut pas être utilisée chez des patients qui ont des métaux dans leur corps. Montre des détails très fins des tissus mous mais pas des os. Très pratique pour différencier les tissus normaux des tissus anormaux. Utilisé pour détecter des tumeurs ou des athéromes ; met en évidence des anomalies cérébrales, et détecte toute une variété de désordres musculo-squelettiques, hépatiques et rénaux.



Scott Camazine/Science Source

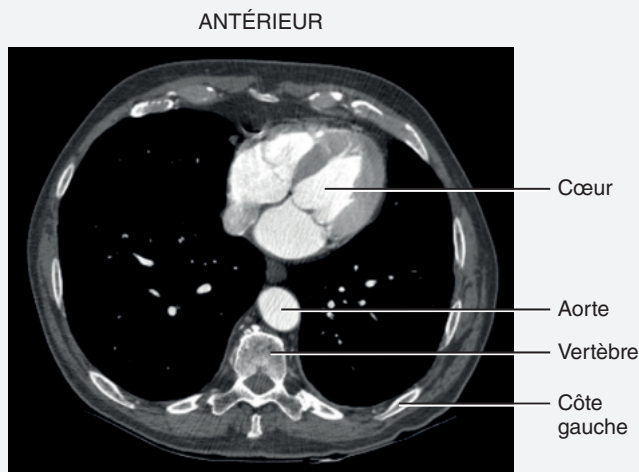
Coupe sagittale du cerveau par IRM

SCANNER

Précédemment appelé « *computerized axial tomography* » ou *CT scan*]

Procédure : Dans cette forme de radiographie assistée par ordinateur, un faisceau de rayons X trace un arc à angles multiples autour d'une coupe du corps. La section transverse du corps qui en résulte, appelée CT scan, est visualisée sur un écran.

Commentaires : Permet de visualiser les tissus mous et les organes avec plus de détails que les radiographies conventionnelles. Les tissus de densités différentes sont visualisés grâce à des nuances de gris. Des sections multiples peuvent être assemblées pour construire une vue en trois dimensions des structures (décrit ci-dessous). Un scanner du corps entier cible généralement le torse et semble être la meilleure méthode pour détecter les cancers du poumon, les maladies des artères coronaires et les cancers rénaux.



Living Art Enterprises/Science Source

ANTÉRIEUR

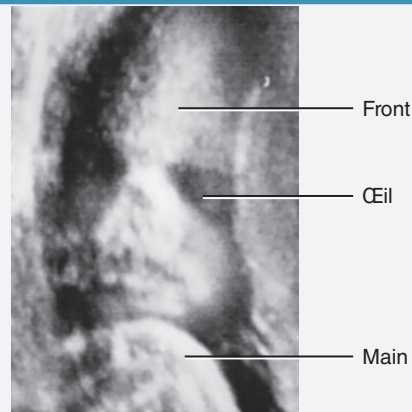
POSTÉRIEUR

Vue inférieure d'un scanner thoracique

ÉCHOGRAPHIE

Procédure : Les ondes sonores à hautes fréquences émises à partir d'une sonde tenue à la main se réfléchissent sur les tissus corporels et sont détectées par le même instrument. L'image, qui peut être figée ou mobile, est appelée un sonogramme et est présentée sur un écran vidéo.

Commentaires : Non agressif, non invasif, indolore et n'utilise aucune coloration ni produit de contraste. Utilisé également pour observer la taille, la position ainsi que l'activité des organes et le débit sanguin dans les vaisseaux sanguins (**écho doppler**).

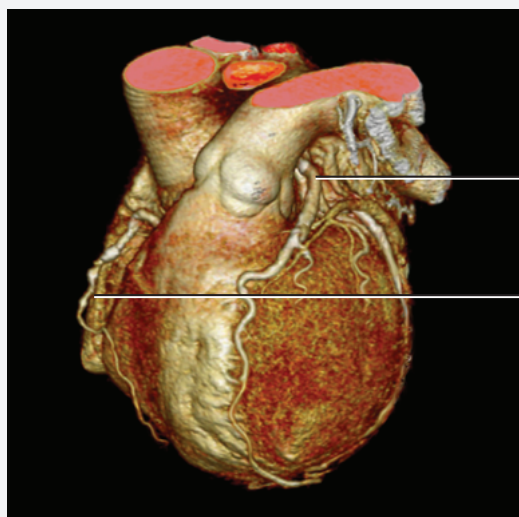


Echographie d'un fœtus (avec l'aimable autorisation de Andrew Joseph Tortora et de Damaris Soler)

TABEAU 1.3 Procédures d'imagerie médicales communes (*Suite*)**TOMODENSITOMÉTRIE CORONAIRE
ANGIOGRAPHIE CORONAIRE PAR IRM**

Procédure : Dans cette forme de radiographie assistée par ordinateur, un produit de contraste iodé est injecté par voie veineuse et un bêtabloquant est administré pour ralentir la fréquence cardiaque. Ensuite, de nombreux faisceaux de rayons X tracent un arc autour du cœur et un scanner détecte ces rayons X et les transmet à un ordinateur qui transforme l'information en une image tridimensionnelle des vaisseaux coronaires, affichée sur un écran. L'image produite est appelée tomodensitométrie coronaire et peut être générée en moins de 20 secondes.

Commentaires : Utilisée d'abord pour déterminer s'il y a une obstruction coronaire (par exemple une plaque athéromateuse ou du calcium) qui pourrait justifier une intervention telle une angioplastie ou le placement d'un stent. La tomodensitométrie coronaire peut être tournée, élargie et déplacée selon n'importe quel angle. Cette procédure est à même de prendre des milliers d'images du cœur pendant la durée d'un simple battement, elle est à même de produire quantités de détails concernant la structure du cœur et son fonctionnement.



ISM/Phototake

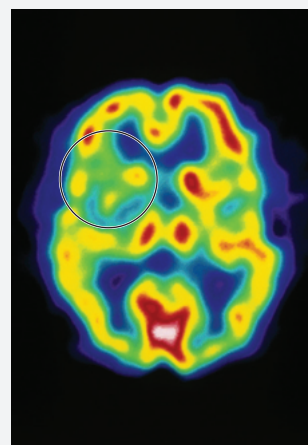
Tomodensitométrie des artères coronaires

TOMOGRAPHIE PAR ÉMISSION DE POSITRONS (PET SCAN)

Procédure : Une substance émettrice de positrons (particules chargées positivement) est injectée dans le corps où elle est captée par les tissus. La collision des positrons avec des électrons chargés négativement produit des rayons gamma (similaires aux rayons X), lesquels sont détectés par des caméras gamma positionnées autour du patient. Un ordinateur reçoit les signaux des caméras gamma et construit une image de PET scan, affichée en couleurs sur un écran vidéo. Le PET scan montre où la substance injectée est utilisée dans l'organisme. Sur l'image de PET scan affichée ci-dessous, les couleurs noire et bleue indiquent des activités minimales ; les couleurs rouge, orange, jaune et blanche indiquent les zones de plus grandes activités.

Commentaires : Utilisée pour étudier la physiologie des structures corporelles, tel que le métabolisme dans le cerveau ou le cœur.

ANTÉRIEUR



Département de Médecine Nucléaire, Charing Cross Hospital / Photo Researchers, Inc.

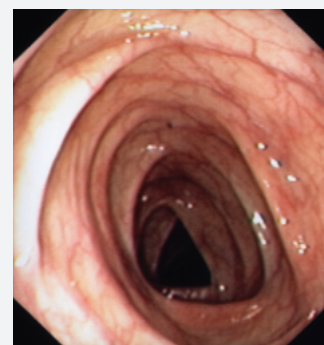
POSTÉRIEUR

PET Scan d'une coupe transversale du cerveau du cerveau (la surface entourée au-dessus et à gauche montre où un accident vasculaire cérébral a eu lieu)

ENDOSCOPIE

Procédure : L'endoscopie est l'observation visuelle de l'intérieur des organes du corps ou des cavités à l'aide d'un appareil lumineux équipé de lentilles et appelé un endoscope. L'image est observée au travers de l'oculaire de l'endoscope ou est projetée sur un écran.

Commentaires : La *colonoscopie* (examen de l'intérieur du côlon), la *laparoscopie* (examen de la cavité abdominopelvienne), et l'*arthroscopie* (examen de l'intérieur d'une articulation, habituellement le genou) en sont des exemples.



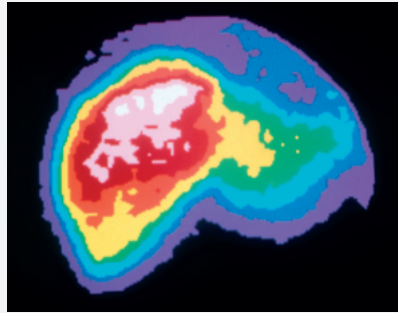
© Camal/Phototake

Vue intérieure du côlon telle qu'observée par colonoscopie

SCINTIGRAPHIE

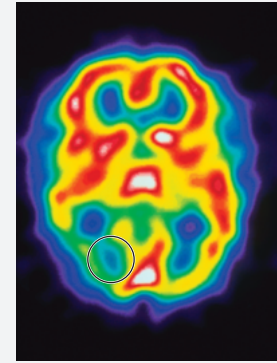
Procédure : Un radionucléide (substance radioactive) est injectée en intraveineuse dans l'organisme et transporté par le sang jusqu'au tissu à observer. Les rayons X émis par le radionucléide sont détectés par des caméras gamma situées hors du corps, et les informations envoyées à un ordinateur. Ce dernier construit l'image et l'affiche en couleurs sur un écran vidéo. Les zones de couleurs intenses représentent les zones où les radionucléides sont les plus présents et concernent les zones de hautes activités tissulaires ; les zones où les couleurs sont moins intenses représentent les zones de moindres activités. La **tomographie par émission monophotonique (TEMP)** est une sorte de scanner par radionucléides qui est très utile pour étudier le cerveau, le cœur, les poumons et le foie.

Commentaires : Utilisé pour étudier l'activité d'un tissu ou d'un organe, comme la mise en évidence de tumeurs malignes ou de cicatrices qui peuvent interférer avec le fonctionnement du muscle cardiaque.



Publiphoto/Science Source

Scintigraphie ou scanner par radionucléides d'un foie adulte normal



Dept. of Nuclear Medicine, Charing Cross Hospital/Science Source

Tomographie par émission monophotonique d'une coupe transversale du cerveau (la plupart des zones vertes en bas à gauche indiquent une attaque migraineuse)

Résumé du chapitre

1.1 Définitions de l'anatomie et de la physiologie

1. L'anatomie est la science qui décrit les structures du corps et les relations entre les structures ; la physiologie est l'étude des fonctions de l'organisme.
2. La dissection est le démantèlement précis des structures du corps afin d'apprendre leurs interconnexions.
3. Certaines branches de l'anatomie sont l'embryologie, la biologie du développement, la biologie cellulaire, l'histologie, l'anatomie générale, anatomie systémique, l'anatomie de surface, l'anatomie régionale, l'anatomie radiologique, l'anatomie clinique et l'anatomie pathologique (voir [Tableau 1.1](#)).
4. Certaines branches de la physiologie sont la neurophysiologie, endocrinologie, la physiologie cardiovasculaire, l'immunologie, la physiologie respiratoire, la physiologie rénale, la médecine physique et la physiopathologie (voir [Tableau 1.1](#)).

1.2 Niveaux d'organisation des structures et des systèmes corporels

1. L'organisation structurelle du corps humain est composée de 6 niveaux : chimique, cellulaire, tissulaire ; organe, système, et l'organisme entier.
2. Les cellules sont les unités vivantes à la base de la structure et de la fonction d'un organisme et sont les plus petites unités vivantes de l'organisme humain.
3. Les tissus regroupent les cellules et les structures qui les entourent et qui fonctionnent ensemble à la réalisation d'une fonction particulière.
4. Les organes sont composés de deux ou plus tissus différents ; ils ont des fonctions spécifiques et sont généralement reconnaissables par leur forme.
5. Les systèmes sont formés d'organes reliés ayant une fonction commune.
6. Tout individu vivant est un organisme.

7. Le [Tableau 1.2](#) introduit les 11 systèmes de l'organisme humain ; les systèmes tégumentaire, squelettique, musculaire, nerveux, endocrinien, cardiovasculaire, lymphatique, respiratoire, digestif, urinaire et génital .

1.3 Caractéristiques de l'organisme humain vivant

1. Tous les organismes vivants possèdent certains processus qui les distinguent du non-vivant.
2. Parmi les processus vivant chez les humains, vous avez le métabolisme, la réactivité, le mouvement, la croissance, la différenciation et la reproduction.

1.4 Homéostasie

1. L'homéostasie est une condition d'équilibre de l'environnement interne du corps atteinte par l'interdépendance de tous les mécanismes de régulation de l'organisme.
2. Les fluides corporels sont des liquides aqueux, assez dilués. Le liquide intracellulaire (LIC) est situé dans les cellules, et le liquide extracellulaire (LEC) est en-dehors. Le plasma est le LEC situé dans le système vasculaire. Le liquide interstitiel est le LEC qui remplit les espaces des cellules ; et parce qu'il entoure toutes les cellules du corps, le liquide interstitiel est appelé l'environnement interne de l'organisme.
3. Les ruptures d'homéostasie résultent de stimuli externe et interne ou sont liés aux conditions stressantes. Lors que ces ruptures ne sont pas trop importantes et sont temporaires, la réponse des cellules de l'organisme est rapide et restore rapidement l'équilibre de l'environnement interne. Lorsque la rupture est brutale, la correction de l'homéostasie peut ne pas être suffisante.
4. Très souvent, les systèmes nerveux et endocrinien agissent ensemble ou indépendamment pour réguler l'homéostasie. Le système nerveux détecte les changements et envoie des impulsions nerveuses pour contrecarrer les

changements de manière contrôlée. Le système endocrinien régule l'homéostasie en sécrétant des hormones.

5. Les systèmes de rétroaction sont composés de trois éléments : (1) le récepteur qui surveille les modifications d'une variable contrôlée et qui envoie des messages afférents au centre de régulation (la voie afférente), (2) le centre de régulation qui décide de la consigne de la condition contrôlée, qui évalue les messages afférents qu'il reçoit du récepteur par la voie afférente, et qui génère des messages efférents lorsque c'est nécessaire. (3) Les effecteurs reçoivent les messages efférents provenant du centre de régulation et produisent une réponse qui modifie la variable contrôlée.

6. Lorsque la réponse inverse le stimulus de départ, on parle de boucle de rétroaction négative. Si la réponse amplifie le stimulus de départ, on parle de boucle de rétroaction positive.

7. La régulation de la pression sanguine est un exemple de boucle de rétroaction négative. Lorsqu'un stimulus augmente la pression sanguine (la condition contrôlée), les barorécepteurs (des cellules nerveuses sensibles à la pression, le récepteur) des vaisseaux sanguins envoient des impulsions (voie afférente) vers le cerveau (centre de contrôle). Le cerveau envoie des impulsions (voie efférente) vers le cœur (effecteur). Il en résulte que la fréquence cardiaque diminue (la réponse) et que la pression sanguine revient à la normale (retour vers l'homéostasie).

8. Un exemple de boucle de rétroaction positive survient pendant la naissance du bébé. Lorsque le travail commence, le col de l'utérus est étiré (le stimulus), et les cellules sensibles à l'étirement du col envoient des impulsions nerveuses au cerveau (le centre de contrôle). Le cerveau répond en libérant de l'ocytocine (voie efférente), ce qui stimule l'utérus à se contracter encore plus fort (la réponse). L'avancée du fœtus au travers du col l'étire encore plus, et encore plus d'ocytocine est libérée, ce qui induit encore plus de contractions utérines. Le cycle s'arrête avec la naissance de l'enfant.

9. La rupture d'homéostasie, ou déséquilibre homéostatique, peuvent amener à des désordres, des maladies, ou même à la mort. Un désordre est un terme général pour toute anomalie de structure ou de fonction. Une maladie est une pathologie caractérisée par un ensemble de signes cliniques et de symptômes.

10. Les symptômes sont des changements subjectifs des fonctions corporelles non observables ; les signes cliniques sont des changements objectifs qui peuvent être observés et mesurés.

1.5 Terminologie anatomique de base

1. Les descriptions de toutes les régions du corps impliquent que le corps soit dans sa position anatomique, position dans laquelle le sujet se tient debout face à l'observateur avec la tête droite et regardant devant lui. Les pieds sont à plats sur le sol et orientés vers l'avant, les membres supérieurs le long du corps avec les paumes tournées vers l'avant. Un corps couché face vers le sol est en décubitus ventral, face vers le haut en décubitus dorsal.

2. Les noms des régions du corps sont des termes correspondants à des régions spécifiques de l'organisme. Les régions principales sont la tête, le cou, le tronc, les membres supérieurs et inférieurs. Au sein de ces régions, les parties spécifiques du corps possèdent des noms anatomiques correspondants à des noms communs. En voici deux exemples : le thorax (la poitrine) et le carpe (le poignet).

3. Les termes de direction indiquent la relation entre une partie du corps par rapport à une autre. L'**Encadré 1** résume les termes directionnels communs.

4. Les plans sont des surfaces planes et virtuelles qui sont utilisées pour diviser le corps ou des organes afin de visualiser les structures internes. Le plan médian divise le corps ou un organe en parties gauche et droite *équivalentes*.

Un plan paramédian divise le corps ou un organe en parties gauche et droite *inégaux*. Un plan coronal divise le corps ou un organe en parties antérieure et postérieure. Un plan transversal divise le corps ou un organe en parties supérieure et inférieure. Un plan oblique divise le corps ou un organe par une coupe oblique.

5. Les coupes divisent le corps ou ses organes le long d'un plan. Elles sont nommées en fonction du plan de coupe et correspondent à des coupes médiane, coronale et transversale.

6. La **Figure 1.10** résume les cavités du corps et leurs membranes. Les cavités du corps sont des espaces corporels qui participent à la protection, la séparation et le support des organes internes. La cavité crânienne contient le cerveau et le canal vertébral contient la moelle épinière. Les méninges sont des tissus protecteurs qui recouvrent la cavité crânienne ainsi que le canal vertébral. Le diaphragme sépare les cavités thoracique et abdominale. Les viscères sont les organes contenus dans les cavités thoracique et abdominale. Une séreuse en recouvre les parois et adhère aux viscères.

7. La cavité thoracique est subdivisée en trois plus petites cavités : une cavité péricardique qui contient le cœur, et deux cavités pleurales dont chacune contient un poumon. La partie centrale de la cavité thoracique est une région thoracique appelée médiastin. Il est localisé entre les deux cavités pleurales, s'étend depuis le sternum jusqu'à la colonne vertébrale, et depuis la première côte jusqu'au diaphragme. Il contient toutes les viscères thoraciques à l'exception des poumons.

8. La cavité abdominopelvienne est divisée en cavité abdominale supérieure et en cavité pelvienne inférieure. Les viscères de la cavité abdominale sont constitués de l'estomac, la rate, le foie, la vésicule biliaire, l'intestin grêle, ainsi que la plupart du gros intestin. Les viscères de la cavité pelvienne comprennent la vessie, des parties du gros intestin et les organes génitaux internes.

9. Les séreuses sont des membranes qui recouvrent les parois des cavités thoraciques et abdominales ainsi que leurs organes. Ils incluent les plèvres associées aux poumons, le péricarde associé au cœur et le péritoine associé à la cavité abdominale.

10. Pour décrire plus aisément la localisation des organes, la cavité abdominopelvienne est divisée en neuf régions : l'hypochondre droite, la région épigastrique, l'hypochondre gauche, le flanc droit, la région ombilicale, le flanc gauche, la région inguinale droite, l'hypogastre (la région pubienne), la région inguinale gauche. En clinique, pour localiser le sites d'anomalies abdominopelviennes, la cavité abdominopelvienne est divisée en quadrants : le quadrant supérieur droit (QSD), le quadrant supérieur gauche (QSG), le quadrant inférieur droit (QID), le quadrant inférieur gauche (QIG).

1.6 Vieillesse et homéostasie

1. Le vieillissement induit des modifications observables de la structure et du fonctionnement et augmente la vulnérabilité au stress et aux maladies.

2. Les changements liés au vieillissement surviennent au niveau de toutes les structures corporelles.

1.7 Imagerie médicale

1. L'imagerie médicale fait référence aux techniques et procédures utilisées pour créer des images du corps. Elle permet la visualisation des structures internes pour le diagnostic d'anomalies anatomiques et des déviations par rapport à la physiologie normale.

2. Le **Tableau 1.3** résume et illustre différentes techniques d'imagerie médicale.

Questions de réflexion

1. Vous étudiez votre premier examen d'anatomie et de physiologie et désirez savoir quelle zone de votre cerveau travaille le plus lors de votre étude. Votre camarade de classe vous suggère que vous pourriez faire un scanner pour définir les zones de votre cerveau qui travaillent. Est-ce la meilleure méthode pour définir les niveaux d'activité cérébrale ? Pourquoi ou pourquoi pas ?
2. Il y a beaucoup d'intérêts dans l'utilisation de cellules souches pour traiter des maladies telles que le diabète de type 1 qui est lié à une dysfonction de

certaines des cellules normales du pancréas. Qu'est-ce qui fait que les cellules souches sont intéressantes pour le traitement de maladies ?

3. Lors de votre premier examen d'anatomie et de physiologie, l'examineur définit l'homéostasie comme étant « La condition dans laquelle le corps s'approche de la température ambiante et s'y maintient ». Etes-vous d'accord avec sa définition ?

Réponses aux questions des figures

- 1.1 Les organes sont composés de deux ou plus tissus différents qui collaborent à la réalisation d'une fonction spécifique.
- 1.2 Un nutriment est déplacé depuis l'environnement externe vers le plasma sanguin via le système digestif, puis vers le liquide interstitiel et ensuite vers la cellule.
- 1.3 La différence entre les systèmes de rétroactions négatives et positives consiste au fait que la rétroaction négative va à contre-sens du stimulus original, alors qu'une rétroaction positive renforce le stimulus original.
- 1.4 Lorsqu'un événement induit une diminution de la pression sanguine, la fréquence cardiaque augmente du fait de l'action de cette rétroaction négative.
- 1.5 Parce que les systèmes de rétroactions positives renforcent ou intensifient continuellement le stimulus original, un autre mécanisme est nécessaire pour arrêter cette réponse.
- 1.6 En n'ayant qu'une position anatomique standard, cela permet aux termes directionnels d'être clairement définis si bien que chaque partie du corps peut être décrite en relation avec les autres parties.
- 1.7 Non, le radius est *distal* par rapport à l'humérus. Non, l'œsophage est *postérieur* à la trachée. Oui, les côtes sont *superficielles* aux poumons. Oui,

la vessie est *médiale* par rapport au côlon ascendant. Non, le sternum est *médian* au côlon ascendant.

- 1.8 Le plan coronal divise le cœur en parties antérieure et postérieure.
- 1.9 Le plan paramédian (pas montré dans cette figure) divise le cerveau en parties gauche et droite inégales.
- 1.10 Vessie = P, estomac = A, intestin grêle = A, poumons = T, organes génitaux féminins internes = P, thymus = T, rate = A, foie = A.
- 1.11 La cavité péricardique entoure le cœur, et les cavités pleurales entourent les poumons.
- 1.12 Les organes illustrés de la cavité abdominale appartiennent tous au système digestif (foie, vésicule biliaire, estomac, intestin grêle et la plupart du gros intestin). Les organes illustrés de la cavité pelvienne appartiennent au système urinaire (la vessie) et au système digestif (partie du gros intestin).
- 1.13 Le foie est principalement situé dans la région épigastrique ; le côlon ascendant est dans le flanc droit ; la vessie est dans la région hypogastrique ; la plupart de l'intestin grêle est situé dans la région ombilicale. La douleur associée à une appendicite sera localisée au sein du quadrant inférieur droit (CID).



Oleksandr Prokopenko/123RF



lightwise/123RF

Voir la partie 2.7, Intérêt clinique : Les graisses et leurs implications dans la santé et la maladie pour comprendre pourquoi CERTAINES DES GRAISSES QUE NOUS CONSOMMONS SONT BONNES POUR LA SANTÉ ALORS QUE D'AUTRES NON

Le niveau chimique de l'organisation

Chimie et homéostasie

Maintenir de manière appropriée les bonnes proportions et quantités de milliers de composés chimiques différents dans votre organisme, et contrôler les interactions de ces composés entre eux, sont deux aspects importants de l'homéostasie.

Vous avez appris dans le Chapitre 1 que le niveau chimique de l'organisation, le plus bas niveau de l'organisation de l'organisme, est constitué d'atomes et de molécules. Ces lettres de l'alphabet anatomique se combinent pour former *in fine* les organes du corps et des systèmes d'une taille et complexité étonnantes. Dans ce Chapitre, nous considérons comment les atomes se combinent entre eux pour former des molécules, et comment les atomes et les molécules libèrent et stockent de l'énergie au cours des réactions

chimiques. Vous apprendrez également l'importance vitale de l'eau, – qui constitue approximativement deux tiers du poids de votre corps –, pour permettre les réactions chimiques et le maintien de l'homéostasie. Finalement, nous présenterons différents groupes de molécules dont les propriétés uniques contribuent à l'assemblage de la structure de votre corps et alimentent tous les processus qui vous permettent de vivre.

2.1 Organisation de la matière

OBJECTIFS

- **Identifier** les principaux éléments chimiques de l'organisme humain.
- **Décrire** les structures des atomes, ions, molécules, des radicaux libres et des composés.

La **chimie** est la science de la structure et des interactions de la matière. Toutes les choses vivantes et non vivantes sont constituées de **matière**, qui est cette chose qui occupe de l'espace et qui possède une **masse**. La masse est la quantité de matière de tout objet, elle ne varie pas. Le *poids* correspond à la force de gravité qui agit sur une masse, il est variable. Lorsque des objets sont loin de la Terre, l'intensité de la gravité est moindre, c'est pourquoi le poids d'un astronaute est proche de zéro lorsqu'il est dans l'espace

Éléments chimiques

La matière existe en trois états : solide, liquide et gazeux. Les *solides*, comme les os et les dents, sont compacts et ont une forme et un volume définis. Les *liquides*, comme le plasma sanguin, ont un volume définis mais prennent la forme de leur contenant. Les *gaz*,

comme l'oxygène et le dioxyde de carbone, n'ont ni volume ni forme définis.

Toutes les formes de la matière, vivante ou non, sont constituées d'un nombre limité de substances constitutives appelés **éléments chimiques**. Chaque élément de la matière est une substance qui ne peut plus être divisée en des constituants plus simples par des moyens chimiques ordinaires. A l'heure actuelle, les scientifiques ont identifié 118 éléments. Parmi ceux-ci 92 existent spontanément sur Terre. Les autres ont été produits à partir d'éléments naturels, à l'aide d'accélérateurs ou de réacteurs nucléaires. Chaque élément est désigné par son **symbole chimique**, une ou deux lettre de son nom en anglais, latin ou dans un autre langage. Des exemples de symboles chimiques sont : H pour hydrogène, C pour carbone, O pour oxygène, N pour azote, Ca pour calcium, et Na pour sodium (*natrium* = sodium).*

Vingt-six éléments chimiques différents sont normalement présents au sein de votre organisme. Seulement quatre éléments, appelés les **éléments majeurs**, constituent 96% de la masse de votre corps : l'oxygène, le carbone, l'hydrogène et l'azote. Huit autres, appelés les **éléments mineurs**, contribuent à 3,6% de la masse corporelle : calcium, phosphore (P), potassium (K), soufre (S), sodium, chlore (Cl), magnésium (Mg) et le fer (Fe). En plus de ceux-ci, 14 autres éléments sont présents en quantités minimales, les **oligoéléments**. Tous ensemble, ces derniers interviennent pour tout le reste du poids du corps, à savoir 0,4%. Quelques éléments à l'état de traces ont des fonctions importantes pour l'organisme. Par exemple, l'iode est capital pour la

*Le tableau périodique des éléments, qui liste tous les éléments chimiques connus, est disponible dans l'annexe B.

TABLEAU 2.1 Les principaux éléments chimiques du corps

ELÉMENTS CHIMIQUES (SYMBOLE CHIMIQUE)	% DE LA MASSE TOTALE DU CORPS	RÔLE
ELÉMENTS MAJEURS		
Oxygène (O)	+/- 96	
	65	Fait partie de l'eau et de nombreuses molécules organiques (contenant du carbone), est utilisé pour générer de l'ATP, une molécule utilisée par les cellules pour stocker temporairement de l'énergie chimique.
Carbone (C)	18,5	Forme des chaînes poly-carbonées linéaires ou cycliques, les hydrates de carbone, les lipides (graisses), les protéines ainsi que les acides nucléiques (ADN et ARN).
Hydrogène (H)	9,5	Constituant de l'eau et de nombreuses molécules organiques ; ses formes ionisées (H ⁺) rendent les fluides corporels plus acides.
Azote (N)	3,2	Constituant de toutes les protéines et des acides nucléiques.
ELÉMENTS MINEURS		
Calcium (Ca)	+/- 3,6	
	1,5	Contribue à la solidité des os et des dents. Ses formes ionisées (Ca ²⁺) sont indispensables à la coagulation, à la libération de certaines hormones, à la contraction musculaire ainsi qu'à bien d'autres mécanismes.
Phosphore (P)	1,0	Composant des acides nucléiques et de l'ATP ; indispensable à la structure des os et des dents.
Potassium (K)	0,35	Sa forme ionisée (K ⁺) est le cation (particule chargée positivement) le plus important du liquide intracellulaire ; indispensable à la genèse des potentiels d'action.
Soufre (S)	0,25	Constituant de nombreuses protéines et de quelques vitamines.
Sodium (Na)	0,2	Sa forme ionisée (Na ⁺) est le cation le plus important du liquide extracellulaire ; indispensable au maintien de l'équilibre hydrique ; indispensable à la genèse des potentiels d'action.
Chlore (Cl)	0,2	Sa forme ionisée (Cl ⁻) est l'anion (particule chargée négativement) le plus important du liquide extracellulaire ; indispensable au maintien de l'équilibre hydrique.
Magnésium (Mg)	0,1	Sa forme ionisée (Mg ²⁺) est indispensable à l'activité de nombreux enzymes (molécules qui facilitent les réactions chimiques des organismes).
Fer (Fe)	0,005	Ses formes ionisées (Fe ²⁺ et Fe ³⁺) font parties de l'hémoglobine (protéine transporteuse de l'oxygène des globules rouges) et des quelques enzymes.

TABEAU 2.1 Les principaux éléments chimiques du corps (Suite)

ÉLÉMENTS CHIMIQUES (SYMBOLE CHIMIQUE)	% DE LA MASSE TOTALE DU CORPS	RÔLE
OLIGOÉLÉMENTS	+/- 0,4	Aluminium (Al), bore (B), chrome (Cr), cobalt (Co), cuivre (Cu), fluor (F), iode (I), manganèse (Mn), molybdène (Mo), sélénium (Se), silicium (Si), étain (Sn), vanadium (V) et zinc (Zn).

production des hormones thyroïdiennes. La fonction de certains éléments à l'état de traces est inconnue. Le **Tableau 2.1** présente la liste des principaux éléments du corps.

Structure des atomes

Tous les éléments sont constitués d'**atomes**, la plus petite unité de la matière qui conserve les propriétés de l'élément. Les atomes sont extrêmement petits. Deux cent mille des plus grands atomes pourraient se trouver sur le point à la fin de cette phrase. L'atome d'hydrogène, le plus petit des atomes a un diamètre inférieur à 0,1 nanomètre ($0,1 \times 10^{-9} \text{ m} = 0,000000001 \text{ m}$), alors que les plus gros atomes sont seulement 5 fois plus grands.

Des dizaines de **particules subatomiques** composent chaque atome. Cependant seulement trois types de particules subatomiques sont importantes pour comprendre les réactions chimiques du corps humain : les protons, les neutrons et les électrons (**Figure 2.1**). Le **noyau** d'un atome est constitué de son corps central et dense. Au sein de ce noyau se situent des particules positivement chargées, les **protons** (p^+) et des particules non chargées, les **neutrons** (n^0). De très petites particules chargées négativement, les **électrons** (e^-) se déplacent au sein d'un large espace entourant le noyau. Ils ne suivent pas une orbite fixe ou un trajet déterminé mais forment un nuage négativement chargé qui entoure le noyau (**Figure 2.1a**).

Même si leurs positions ne peuvent être prédites, des groupes spécifiques d'électrons sont plus susceptibles de se déplacer dans certaines régions autour du noyau. Ces régions, appelées couches électroniques, peuvent être décrites comme de simples cercles autour du noyau. Et comme chaque couche électronique ne peut héberger qu'un nombre spécifique d'électrons, c'est ce modèle de **couches électroniques** qui traduit le mieux cet aspect de la structure atomique (**Figure 2.1b**). La première couche électronique (la plus proche du noyau) ne peut jamais accueillir plus de deux électrons. La seconde couche peut recevoir au maximum 8 électrons, et la troisième jusqu'à 18 électrons. Les couches électroniques se remplissent selon un certain ordre, commençant toujours par la première couche. Par

exemple, notez dans la **Figure 2.2** que le sodium (Na) qui possède au total 11 électrons, contient 2 électrons sur sa première couche électronique, 8 sur sa seconde couche, et seulement 1 sur sa troisième. L'iode (I) est l'élément le plus massif présent au sein du corps humain ; il possède un total de 53 électrons : 2 sur sa première couche, 8 sur la seconde, 18 sur sa troisième, 18 sur sa quatrième et 7 sur sa cinquième couche électronique.

FIGURE 2.1 Deux représentations de la structure d'un atome.

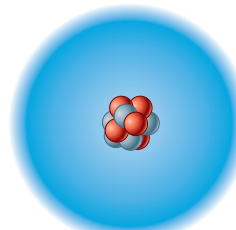
Les électrons se déplacent autour du noyau qui est constitué des neutrons et des protons. (a) Dans le modèle atomique où les électrons sont représentés sous la forme d'un nuage, la zone ombrée correspond à la zone où les électrons peuvent se trouver en dehors du noyau. (b) Dans le modèle atomique où les électrons sont situés sur des couches, les électrons sont représentés comme des points sur des couches concentriques en fonction des positions qu'ils occupent. Ces deux modèles représentent un atome de carbone, avec six protons, six neutrons et six électrons.

Un atome est la plus petite unité de la matière qui a encore les propriétés et caractéristiques de cet élément.

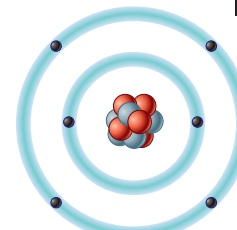
- Protons (p^+)
- Neutrons (n^0)
- Électrons (e^-)

Nucleus

www.lienmini.fr/33444-02



(a) Modèle atomique où les électrons sont représentés sous la forme d'un nuage



(b) Modèle atomique où les électrons sont situés sur des couches électroniques

Q Comment sont distribués les électrons de l'atome de carbone entre la première et la seconde couche électronique ?

Le nombre d'électrons de l'atome d'un élément est toujours égal au nombre de protons. Ceci car chaque électron et chaque proton portent une charge, les charges négatives des électrons et les charges positives des protons se compensent. Et donc, chaque atome est électriquement neutre, sa charge totale est égale à zéro.

Nombre atomique et masse atomique

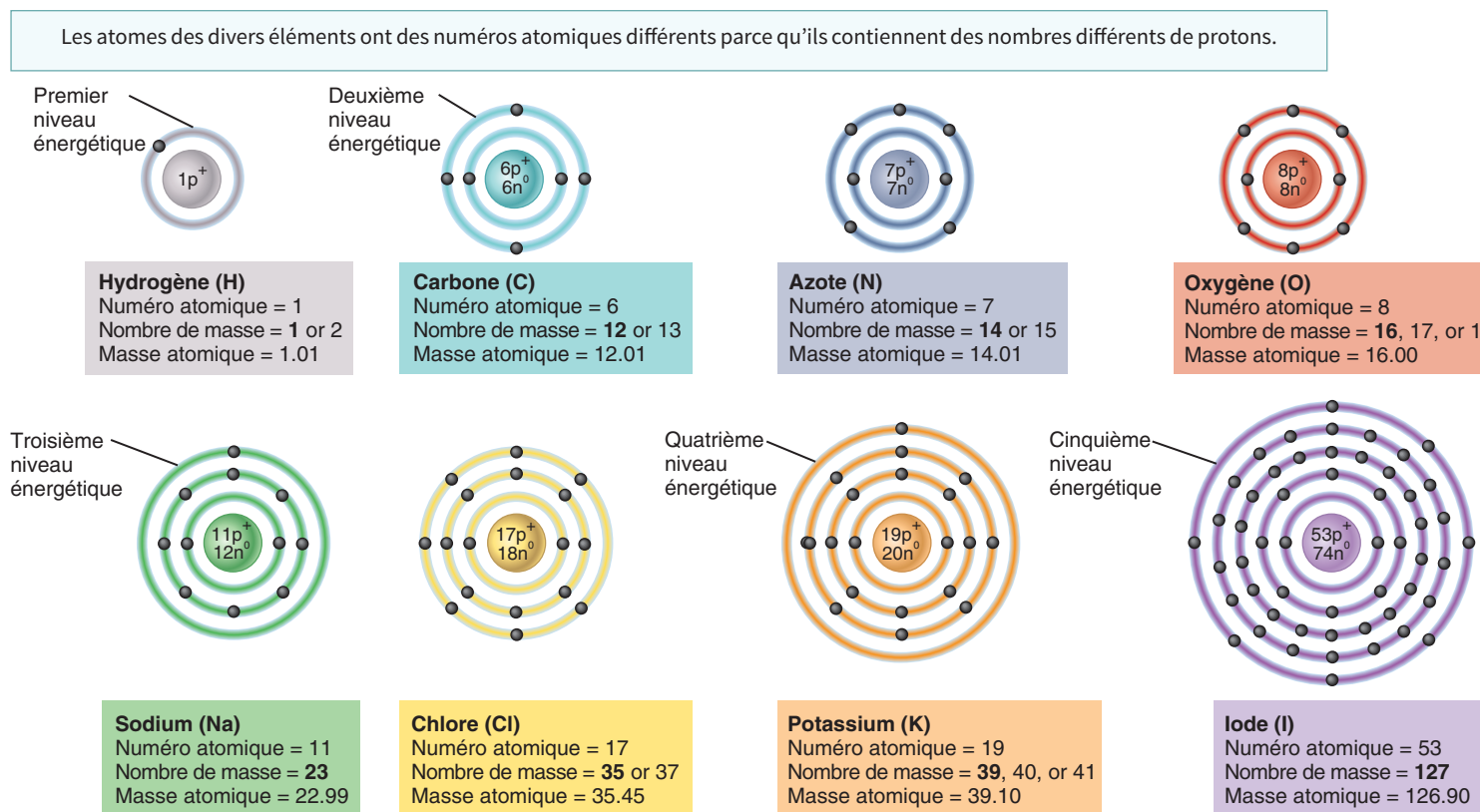
Le *nombre de protons* dans le noyau d'un atome correspond au **nombre atomique**. Les atomes de différents éléments ont différents nombres atomiques puisqu'ils ont différents nombres de protons. Par exemple, l'oxygène (O) possède un nombre atomique de 8 puisque son noyau a 8 protons, et le sodium (Na) a un nombre atomique de 11 puisque son noyau a 11 protons.

La **masse atomique** est la somme de ses protons et neutrons. Puisque le sodium possède 11 protons et 12 neutrons, sa masse atomique est de 23 (Figure 2.2). Alors que tous les atomes d'un élément ont le même nombre de protons, ils peuvent avoir différents nombres de neutrons et donc différentes masses atomiques. Les **isotopes** sont des atomes qui ont différents nombres de neutrons et donc différentes masses atomiques. Dans l'exemple de l'oxygène (O), la plupart des atomes possèdent 8 neutrons, alors que certains en ont 9 ou 10, mais

tous ont 8 protons et 8 électrons. La plupart des isotopes sont stables, ce qui signifie que leur structure atomique ne change pas au cours du temps. Les isotopes stables de l'oxygène sont désignés 16O, 17O et 18O (ou O-16, O-17 et O-18). Comme vous l'avez sans doute compris, ces nombres indiquent la masse atomique de chaque isotope. Et comme vous allez le comprendre très bientôt, le nombre d'électrons d'un atome détermine ses propriétés chimiques. Mais alors que les isotopes ont différents nombres de neutrons, ils ont les mêmes propriétés chimiques puisqu'ils ont le même nombre d'électrons.

Certains isotopes, appelés les **isotopes radioactifs**, sont instables : leur noyau se modifie spontanément vers une configuration plus stable. En voici des exemples : H-3, C-14, O-15 et O-19. Lorsqu'ils se désintègrent, ces atomes émettent des radiations sous la forme de particules subatomiques ou d'énergie, et cette désintégration peut les transformer en un autre élément. Par exemple, l'isotope radioactif du C-14 se désintègre en N-12. Cette désintégration isotopique peut avoir lieu très rapidement, en une fraction de seconde, ou très lentement, en millions d'années. La **demi-vie** d'un isotope est le temps requis pour que la moitié des atomes radioactifs d'un échantillon se désintègre en une forme plus stable. La demi-vie du C-14, qui est utilisée pour connaître l'âge d'un échantillon biologique, est de 5730 ans ; la demi-vie de l'I-131, un isotope important en clinique, est de 8 jours.

FIGURE 2.2 La structure atomique de quelques atomes stables.



Numéro atomique = nombre de protons dans un atome

Nombre de masse = nombre de protons et de neutrons dans un atome (l'isotope le plus abondant est indiqué en caractères gras)

Masse atomique = moyenne des masses de tous les atomes stables d'un élément en daltons

Q Parmi les huit éléments cités ci-dessus, précisez les quatre qui sont les plus abondants dans les organismes vivants ?



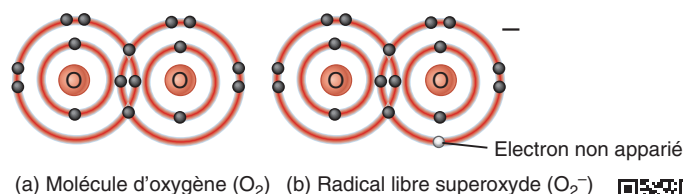
Intérêt clinique

Les dangers et les avantages de l'irradiation

Les radio-isotopes comportent aussi bien des dangers que des avantages. Ils sont dangereux pour le corps humain parce que leurs rayonnements ont la capacité de dégrader des molécules, ce qui peut endommager les tissus et causer diverses formes de cancer. Même si la désintégration de radio-isotopes naturels ne libère habituellement qu'une faible quantité de rayonnements dans le milieu extérieur, des accumulations localisées peuvent survenir. Le radon 222, par exemple, gaz incolore et inodore, est un produit radioactif naturel qui résulte de la désintégration de l'uranium ; les émissions peuvent provenir du sol, et il peut s'accumuler dans les bâtiments. L'exposition au radon accroît notablement les risques de cancer du poumon chez les fumeurs tout en étant souvent la cause de ce même cancer chez les non-fumeurs. Cependant, d'autres radio-isotopes sont utiles en imagerie médicale pour établir le diagnostic et le traitement de diverses maladies. Certains radioisotopes servent de **traceurs** permettant de suivre les mouvements de certaines substances dans l'organisme. Le thallium 201 est utilisé pour étudier le débit sanguin dans le cœur au cours d'un électrocardiogramme d'effort ; l'iode 131 permet de déceler un cancer de la thyroïde et d'évaluer la taille et le fonctionnement de cette dernière ; il peut également servir à détruire une partie de la glande dans un cas d'hyperthyroïdie ; le césium 137 permet de traiter un cancer du col de l'utérus à un stade avancé, et l'iridium est utilisé pour le traitement du cancer de la prostate.

FIGURE 2.3 Structure atomique d'une molécule d'oxygène et du radical libre superoxyde.

Un radical libre possède un électron non apparié sur sa couche la plus externe.



Q Quelles substances de l'organisme sont capables d'inactiver les radicaux libres ?

www.lienmini.fr/33444-02

atomes identiques, comme pour la molécule d'oxygène (**Figure 2.3a**). La formule moléculaire d'une molécule d'oxygène est O_2 . L'indice 2 indique que la molécule contient deux atomes d'oxygène. Deux types d'atomes ou plus peuvent également former une molécule, comme dans la molécule d'eau (H_2O). Dans la molécule d' H_2O un atome d'oxygène partage des électrons avec deux atomes d'hydrogène.

Un **composé** est une substance qui contient des atomes de deux éléments différents voire plus. La plupart des atomes du corps sont associés en composés. L'eau (H_2O) et le chlorure de sodium ($NaCl$), le sel de table commun, sont des composés. La molécule d'oxygène (O_2) n'est pas un composé puisqu'elle n'est constituée que d'atomes d'un seul élément.

Un **radical libre** est un atome ou un groupe d'atomes avec des électrons non appariés sur la dernière couche électronique. Un exemple commun est le superoxyde, qui est formé par l'ajout d'un électron à une molécule d'oxygène (**Figure 2.3b**). Un électron non apparié rend le radical libre instable, très réactif et destructeur pour les molécules avoisinantes. Les radicaux libres redeviennent stables soit en donnant leur électron libre ou en capturant un électron provenant d'une autre molécule. En se comportant de la sorte, les radicaux libres sont capables de détruire des molécules importantes de l'organisme.

Masse atomique

L'unité standard internationale pour mesurer la masse atomique des atomes et de leurs sous-particules est le **dalton**, également connu comme l'unité de masse atomique (*amu*). Un neutron possède une masse de 1008 daltons, et un proton a une masse de 1007 daltons. La masse d'un électron est de 0,0005 dalton, ce qui est 2000 fois moins que la masse d'un neutron ou d'un proton. La **masse atomique**, également appelée *poids atomique*, d'un élément correspond à la masse moyenne de tous les isotopes de cet élément. Typiquement, la masse atomique d'un élément est très proche de la masse atomique de son isotope le plus abondant.

Ions, molécules et composés

Comme nous l'avons vu, les atomes d'un même élément ont le même nombre de protons. Pour gagner en stabilité, les atomes de chaque élément ont une manière caractéristique de perdre, de gagner ou de partager leurs électrons lorsqu'ils interagissent avec d'autres atomes. La manière dont les électrons se comportent permet aux atomes du corps d'exister sous des formes chargées électriquement, les ions ; ou de se joindre entre eux pour former des combinaisons complexes appelées molécules. Si un atome donne ou reçoit un électron, il devient un ion. Un **ion** est un atome qui a une charge positive ou négative puisqu'il possède un nombre inégal de protons et d'électrons. L'*ionisation* est le processus de gain ou de perte d'électrons. L'ion d'un atome est symbolisé en écrivant son symbole chimique suivi du nombre de charges positives ou négatives. Ce qui signifie que Ca^{2+} symbolise l'ion calcium possédant deux charges positives car il a perdu deux électrons.

Lorsque deux atomes ou plus partagent des électrons, la combinaison résultante est appelée une **molécule**. Une formule moléculaire indique quels éléments et le nombre d'atomes de chaque élément constituent cette molécule. Une molécule peut être constituée de deux

Intérêt clinique

Les radicaux libres et les antioxydants

Il y a plusieurs sources de **radicaux libres**, incluant l'exposition aux radiations ultraviolettes du soleil, l'exposition aux rayons X, ozone, fumée de cigarette, pollutions, et certaines réactions au cours de processus métaboliques normaux. Certaines substances nocives comme le tétrachlorure de carbone (un solvant utilisé lors du nettoyage à sec), génère des radicaux libres lorsqu'il participe à certaines réactions métaboliques dans l'organisme. Parmi les nombreux troubles, maladies et conditions liées aux radicaux libres de l'oxygène, il y a le cancer, l'athérosclérose, la maladie d'Alzheimer, l'emphysème, le diabète sucré, la cataracte, la dégénérescence maculaire liée à l'âge, l'arthrite rhumatoïde et les détériorations liées à l'âge. La consommation d'**antioxydants**, - des substances qui inactivent les radicaux libres de l'oxygène-, est supposée ralentir les dommages causés par les radicaux libres. Des antioxydants diététiques comprennent le sélénium, le zinc, le bêta-carotène et les vitamines C et E. Les fruits rouges, bleus ou pourpres, tout comme les légumes contiennent des niveaux élevés d'antioxydants.

Révision

1. Listez les noms et les symboles chimiques des 12 éléments les plus abondants du corps humain.
2. Quels sont les nombres atomiques, numéros atomiques et masses atomiques du carbone ? Comment sont-ils reliés ?
3. Définissez isotopes et radicaux libres.

2.2 Liaisons chimiques

OBJECTIFS

- **Décrire** comment la valence électronique forme des liaisons chimiques.
- **Distinguer** les liaisons ioniques, covalentes et hydrogène.

Les forces qui tiennent ensemble les atomes d'une molécule ou d'un composé sont les **liaisons covalentes**. La manière dont un atome forme un lien chimique avec un autre atome dépend du nombre d'électrons présents sur sa couche électronique externe, encore appelée **couche de liaison**. Un atome avec une couche de liaison contenant 8 électrons sur sa couche externe est *chimiquement stable*, ce qui signifie qu'il n'a pas tendance à former de liaison chimique avec un autre atome. Le néon (Ne), par exemple, a 8 électrons sur sa couche externe, et pour cette raison, il ne se lie pas facilement avec d'autres atomes. La couche de liaison de l'hydrogène et de l'hélium est la première couche électronique qui est remplie avec seulement 2 électrons. Parce que l'hélium possède déjà deux électrons de valence, il est très stable et rarement lié à d'autres atomes. D'autre part, l'hydrogène n'a qu'un électron de valence, et de ce fait à tendance à se lier avec de nombreux autres atomes (voir Figure 2.2).

Les atomes des éléments biologiquement importants n'ont pas 8 électrons sur leur couche de valence. En conditions normales, deux atomes ou plus peuvent interagir de manière à produire un arrangement chimiquement stable où il y a 8 électrons de valence pour chaque atome. Ce principe chimique, appelé la **règle de l'octet** (ensemble de 8), aide à comprendre pourquoi certaines liaisons entre atomes sont prévisibles. Un atome aura tendance à interagir avec un autre si en faisant cela ils auront chacun 8 électrons de valence. Pour y arriver, un atome va soit vider sa couche de valence partiellement remplie, soit la remplir avec des électrons reçus, soit va partager sa couche de valence avec d'autres atomes. La façon dont les électrons de valence sont distribués détermine quel type de liaison est possible. Nous allons considérer maintenant les trois types de liaisons chimiques ; les liaisons ioniques, les liaisons chimiques et les ponts hydrogène.

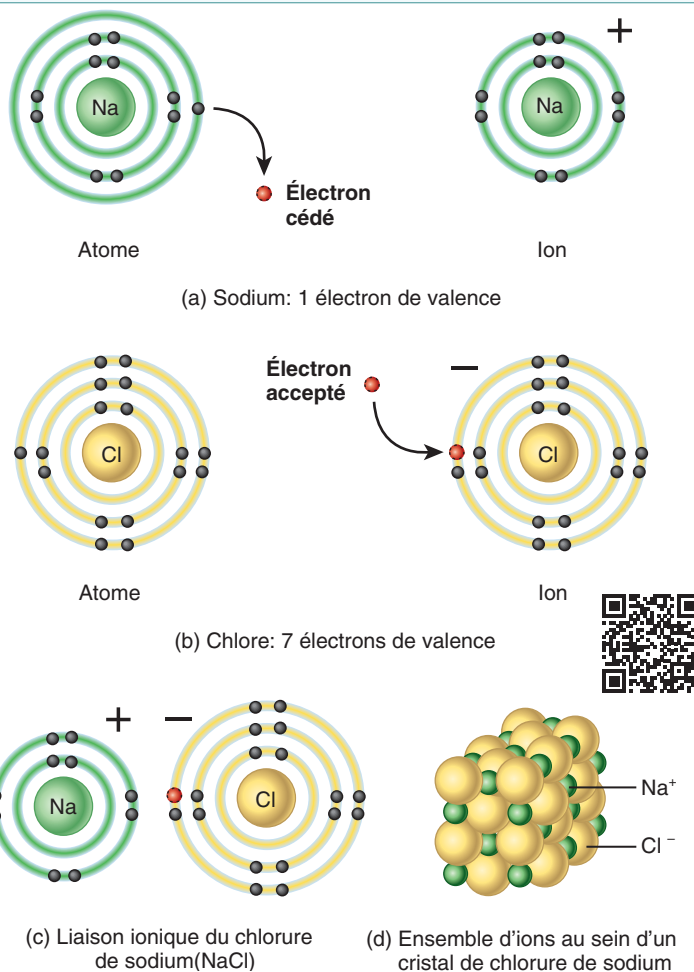
Liaisons ioniques

Comme vous l'avez déjà appris, lorsqu'un atome perd ou gagne un ou plusieurs électrons, des ions se forment. Les ions positivement et négativement chargés s'attirent les uns les autres, les opposés s'attirent. La force qui maintient ensemble des ions de charges opposées est une **liaison ionique**. Considérons des atomes de sodium et de chlore, les com-

posants du sel de cuisine. Le sodium a un électron de valence (Figure 2.4a). Si le sodium perd cet électron, il lui reste les 8 électrons de sa seconde couche électronique, qui deviennent ses électrons de valence. Il en résulte que son nombre total de protons (11) excède son nombre d'électrons (10). L'atome de sodium devient un **cation**, un ion chargé positivement. Comme l'ion de sodium possède une charge de $1+$, il est symbolisé par Na^+ . D'autre part, le chlore possède 7 électrons de valence (Figure 2.4b). Si le chlore gagne un électron à partir des atomes avoisinants, il aura alors un octet complet sur sa couche électronique externe. Après avoir gagné un électron, son nombre total d'électrons (18) excède son nombre de protons (17), et l'atome de chlore est devenu un **anion**, un ion chargé négativement. La forme ionique du chlore est appelée l'ion de chlore. Il possède une charge de $1-$ est symbolisé par Cl^- . Lorsqu'un atome de sodium donne son seul ion de valence à un atome de

FIGURE 2.4 Ions et formation de liaisons ioniques. (a) Un atome de sodium peut obtenir un octet d'électrons complet sur sa couche électronique externe en perdant un électron. (b) Un atome de chlore peut obtenir un octet complet en gagnant un électron. (c) Une liaison ionique peut avoir lieu entre ces deux ions de charge opposée. (d) Au sein d'un cristal de NaCl, chaque Na^+ est entouré de six Cl^- . Dans les images (a), (b) et (c), l'ion accepté ou perdu est coloré en rouge.

Une liaison ionique est la force d'attraction qui maintient ensemble les ions de charges opposées.



Q Décrivez cations et anions ?

TABEAU 2.2 Les ions communs de l'organisme

CATIONS		ANIONS	
NOM	SYMBOLE	NOM	SYMBOLE
Ion hydrogène	H^+	Ion fluor	F^-
Ion sodium	Na^+	Ion chlore	Cl^-
Ion potassium	K^+	Ion iode	I^-
Ion ammonium	NH_4^+	Ion hydroxyde	OH^-
Ion magnésium	Mg^{2+}	Ion bicarbonate	HCO_3^-
Ion calcium	Ca^{2+}	Ion oxyde	O^{2-}
Ion fer (II)	Fe^{2+}	Ion sulfate	SO_4^{2-}
Ion fer (III)	Fe^{3+}	Ion phosphate	PO_4^{3-}

chlore, les charges positives et négatives résultantes retiennent les ions ensemble, en formant une liaison ionique (**Figure 2.4c**). Le composé résultant de cette liaison ionique est le chlorure de sodium, NaCl.

En général, les composés ioniques sont des solides, avec des arrangements répétés et ordonnés d'ions comme dans un cristal de NaCl (**Figure 2.4d**). Un cristal de NaCl peut être petit ou grand, le nombre total d'ions peut varier, mais le ratio de Na^+ et de Cl^- est toujours de 1-1. Au sein du corps, les liaisons ioniques sont présentes principalement dans les dents et les os, où ils donnent leur résistance à ces importants tissus de structure. Un composé ionique qui rompt sa liaison en ions positifs et négatifs dans une solution est appelé un électrolyte. La plupart des ions sont dissous dans les fluides corporels sous la forme d'électrolytes, nommés ainsi parce que leur solution est capable de conduire le courant électrique. (Dans le chapitre 27, nous parlerons de chimie et de l'importance des électrolytes). Le **Tableau 2.2** liste les noms et symboles des ions communs de l'organisme.

Liaisons covalentes

Lorsqu'une **liaison covalente** se forme, deux atomes voire plus partagent leurs électrons plutôt que d'en gagner ou en perdre. Les atomes forment une molécule liée de manière covalente en partageant une, deux ou trois paires d'électrons de valence. Plus le nombre de paires électroniques partagées entre deux atomes est élevé, plus forte sera la liaison covalente. Les liaisons covalentes peuvent exister entre atomes identiques ou des atomes d'éléments différents. Les liaisons covalentes sont les liaisons les plus fréquentes de l'organisme, et les composés créés de cette manière forment la plupart des structures du corps.

Une **liaison covalente simple** est issue du partage d'une paire d'électrons entre deux atomes. Par exemple, une molécule d'hydrogène se forme lorsque deux atomes d'hydrogène partagent leur unique électron de valence (**Figure 2.5a**), ce qui permet aux deux atomes d'obtenir une couche de valence complète pour au moins chacun une partie du temps. Une **liaison covalente double** est issue du partage de deux paires d'électrons, comme dans une molécule d'oxygène (**Figure 2.5b**). Une **liaison covalente triple** est issue du partage de trois paires d'électrons, comme dans une molécule d'azote (**Figure 2.5c**). Remarquez dans les formules structurales des molécules liées par covalence de la **Figure 2.5**, que le nombre de lignes entre les symboles chimiques pour deux atomes indique si la liaison est une simple (—), double (=) ou triple (≡) liaison covalente.

Les mêmes principes de liaisons covalentes qui s'appliquent aux atomes d'éléments identiques s'appliquent également aux liaisons covalentes entre atomes d'éléments différents. Le méthane (CH_4), est le principal élément du gaz naturel et il contient des liaisons covalentes entre des atomes de deux éléments différents, un carbone et quatre hydrogènes (**Figure 2.5d**). La couche de valence de l'atome de carbone est complète avec huit électrons mais il n'en a que quatre à lui. La seule couche électronique de l'hydrogène peut contenir deux électrons, mais chaque atome d'hydrogène n'en contient qu'un à lui. Une molécule de méthane contient quatre liaisons covalentes simples. Chaque atome d'hydrogène partage une paire d'électrons avec l'atome de carbone.

Dans certaines liaisons covalentes, deux atomes partagent les électrons de manière équivalente : un atome n'attire pas plus les électrons partagés de manière plus importante que l'autre atome. Ce type de liaison est une **liaison covalente non polaire**. Les liaisons entre deux atomes identiques ne sont jamais polaires (**Figure 2.5a-c**). Les liaisons entre les atomes de carbone et d'hydrogènes sont également non polaire, comme pour les quatre liaisons C—H de la molécule de méthane (**Figure 2.5d**).

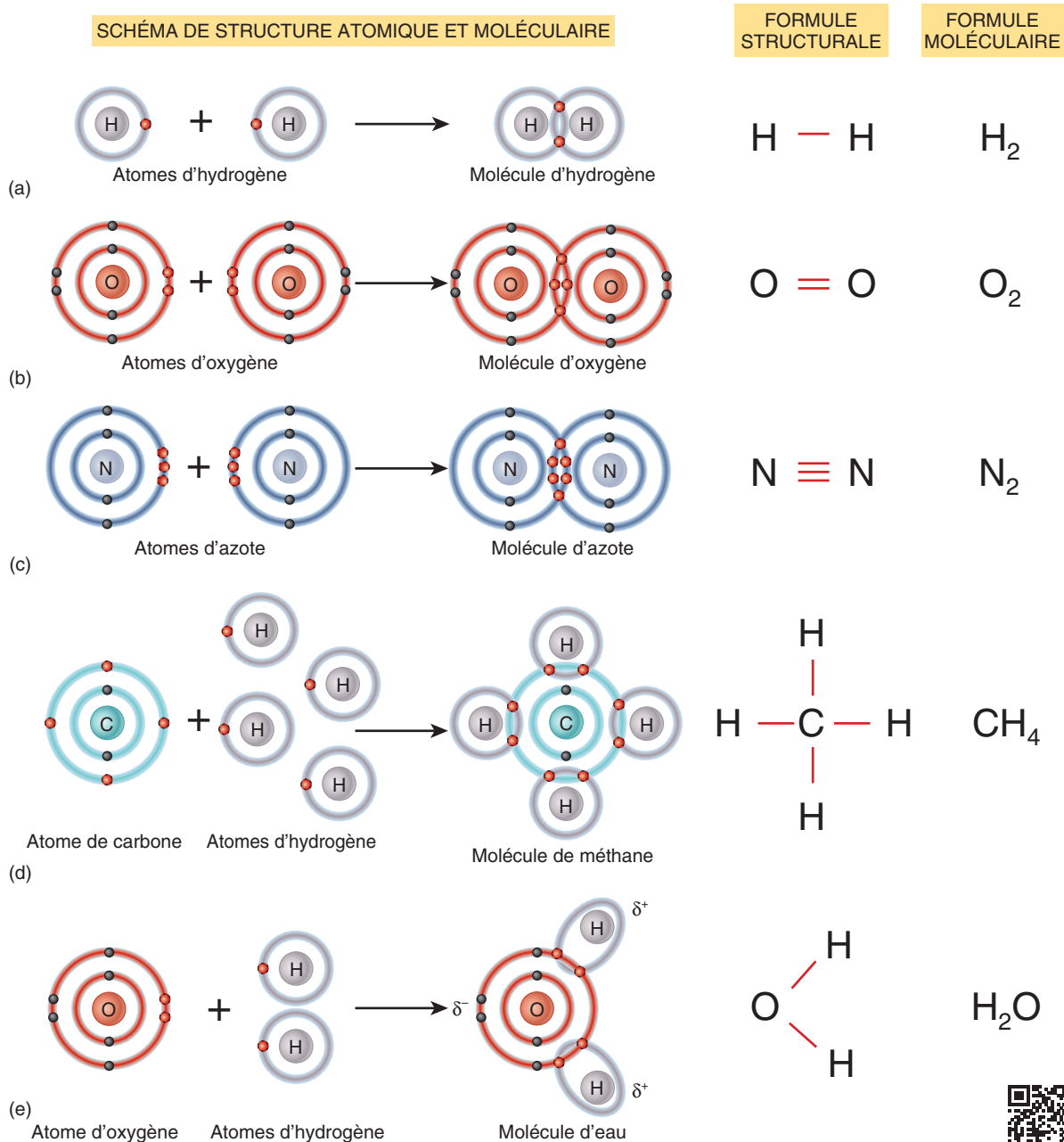
Dans une **liaison covalente polaire**, le partage des électrons entre deux atomes est inégal : le noyau d'un atome attire plus les électrons partagés que l'autre atome. Lorsqu'une liaison polaire se forme, la molécule qui en résulte possède des charges négatives partielles auprès de l'atome qui attire les électrons auprès de lui. Cet atome a une plus grande **électronégativité**, c'est-à-dire une plus grande capacité à attirer les électrons vers lui. En conséquence, au moins un autre atome de cette molécule possède une charge partiellement positive. Les charges partielles sont indiquées par la lettre grecque delta en minuscule associée au signe moins ou plus : δ^- ou δ^+ . La liaison entre l'oxygène et l'hydrogène au sein d'une molécule d'eau est un exemple très important de liaison covalente polaire pour les systèmes vivants (**Figure 2.5e**); au sein de cette molécule, le noyau de l'oxygène attire les électrons de manière plus importante que l'atome d'hydrogène, de ce fait on dit l'atome d'oxygène possède une plus grande électronégativité. Plus loin dans ce chapitre, nous verrons comment les liaisons covalentes polaires, qui permettent à l'eau de dissoudre de nombreuses molécules, sont importantes pour la vie. Les liaisons entre l'azote et l'hydrogène comme celles entre l'oxygène et le carbone sont également des liaisons polaires.

Liaisons hydrogène

Les liaisons covalentes polaires qui se forment entre les atomes d'hydrogène et d'autres atomes peuvent donner lieu à un troisième type de liaisons chimiques : la liaison hydrogène (NdT : encore appelées pont hydrogène) (**Figure 2.6**). Une **liaison hydrogène** se forme lorsqu'un atome d'hydrogène avec une charge positive partielle (δ^+) attire une charge partiellement négative (δ^-) d'un atome électronégatif avoisinant, le plus souvent des atomes d'oxygène et d'azote. Et donc les liaisons hydrogène résultent plus de l'attraction entre des parties de molécules chargées de manière opposée, plutôt que du partage d'électrons comme dans les liaisons covalentes ou de la perte ou du gain d'électrons comme dans les liaisons ioniques. Ce qui implique qu'elles ne relient pas des atomes au sein d'une molécule. Cependant, les ponts hydrogènes établissent des liens importants entre des molécules ou entre différentes parties d'une grande molécule, comme c'est le cas des protéines et des acides nucléiques.

FIGURE 2.5 Formation de liaisons covalentes. Les électrons rouges sont partagés de manière équivalente en (a) à (d) et de manière non équivalente en (e). La représentation la plus simple de ces molécules se trouve sur la droite. Dans les formules structurales, chaque liaison covalente est notée par une ligne droite entre les symboles chimiques de deux atomes. Dans les formules moléculaires, le nombre d'atomes au sein de chaque molécule est noté en indice.

Dans une liaison covalente, deux atomes partagent une, deux ou trois paires d'électrons de leur couche externe.



Q Quelle est la principale différence entre des liaisons ionique et covalente ?

(comme discuté plus loin au sein de ce chapitre).

Les ponts hydrogène qui relient des molécules d'eau voisines entre-elles, donnent une grande *cohésion* à l'eau, la tendance qu'on les particules à rester ensemble. La cohésion entre les molécules d'eau crée une importante tension de surface, une mesure de la difficulté à étirer ou rompre la surface d'un liquide. A l'interface entre l'eau et l'air, la tension de surface de l'eau est très élevée car les molécules d'eau sont bien plus attirées entre-elles que par les

molécules de l'air. Ce qui se remarque quand les araignées d'eau marchent sur l'eau ou lorsqu'une feuille flotte sur l'eau. L'influence de la tension de surface de l'eau au niveau de l'organisme se remarque dans la manière dont il accroit le travail respiratoire. Une fine couche de fluide aqueux recouvre les alvéoles pulmonaires. De ce fait, chaque inhalation doit être suffisamment forte pour s'opposer aux effets de la tension de surface lorsque les alvéoles s'étirent et s'élargissent au passage de l'air.

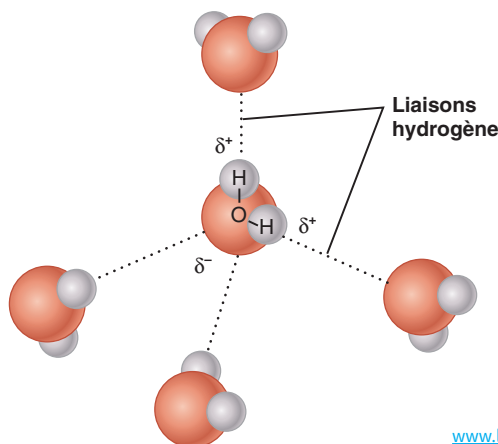
www.lienmini.fr/33444-02



FIGURE 2.6 Les liaisons hydrogène entre des molécules d'eau.

Chaque molécule d'eau forme des liaisons hydrogène, indiquées par des pointillés, avec trois ou quatre molécules d'eau situées à proximité..

Des liaisons hydrogène se forment lorsque les atomes d'hydrogène d'une molécule d'eau sont attirés par la charge partiellement négative d'un atome d'oxygène dans une autre molécule d'eau.



www.lienmini.fr/33444-02

Q Pourquoi va-t-il de soi que l'ammoniac (NH_3) forme des liaisons hydrogène avec des molécules d'eau ?

Même si chaque pont hydrogène est faible, de très larges molécules peuvent contenir des milliers de ces liaisons. Agissant collectivement, les liaisons hydrogène procurent une véritable force et stabilité et participent à la détermination de la forme tridimensionnelle des grandes molécules. Comme on le verra plus tard dans ce chapitre, la forme des larges molécules détermine comment elles fonctionnent.

Révision

4. Quelle couche électronique est la couche de valence d'un atome, et quelle est sa signification ?
5. Comparer les propriétés des liaisons ionique, covalente et hydrogène.
6. Quelle information est transmise lorsque vous écrivez la formule moléculaire ou structurale d'une molécule ?

2.3 Réactions chimiques

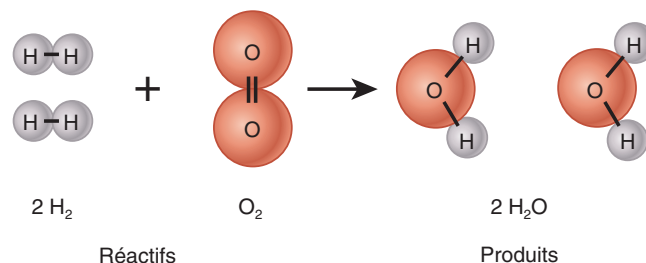
OBJECTIFS

- **Définir** une réaction chimique.
- **Décrire** les formes variées de l'énergie.
- **Comparer** les réactions chimiques exergonique et endergonique.
- **Expliquer** le rôle de l'énergie d'activation et la catalysation des réactions chimiques.
- **Décrire** les réactions de synthèse, de décomposition, d'échange et réversibles.

FIGURE 2.7 Réaction chimique entre deux molécules d'hydrogène (H_2) et une molécule d'oxygène (O_2) pour former deux molécules d'eau (H_2O).

Notez que la réaction induit la rupture des anciennes liaisons pour en créer des nouvelles.

Le nombre d'atomes de chaque élément est le même avant et après la réaction chimique.



Q Pourquoi est-ce que cette réaction requière deux molécules de H_2 ?

Une réaction chimique survient lorsqu'une nouvelle liaison se forme ou lorsqu'une ancienne liaison se rompt entre deux atomes. Les réactions chimiques sont le fondement de la vie, et comme nous l'avons vu, les interactions de valence des électrons sont à la base de toutes les réactions chimiques. Considérons comment les molécules d'hydrogène et d'oxygène réagissent pour former des molécules d'eau (**Figure 2.7**). Les substances de départ, deux H_2 et un O_2 sont appelés les **réactifs**. Les substances obtenues, deux molécules d'eau, sont les **produits** de la réaction. La flèche dans la **Figure 2.7** indique la direction que la réaction prend. Dans une réaction chimique, la masse totale des réactifs est identique à la masse totale des produits de la réaction. Et donc, le nombre d'atome de chaque élément est le même avant et après la réaction. Cependant, puisque les atomes se sont réarrangés, les réactifs et les produits ont des propriétés chimiques différentes. C'est au travers de milliers de réactions chimiques différentes que les structures du corps et les fonctions de l'organisme s'organisent. Le terme **métabolisme** fait référence à toutes les réactions chimiques de l'organisme.

Formes d'énergie et réactions chimiques

Chaque réaction chimique implique des modifications énergétiques. L'**énergie** est la capacité de faire du travail. Il y a deux formes principales d'énergie : l'**énergie potentielle** qui est l'énergie stockée et l'**énergie cinétique** qui est l'énergie en mouvement. Par exemple, l'énergie stockée dans l'eau derrière un barrage ou l'énergie d'une personne prête à sauter quelques marches sont des énergies potentielles. Lorsque les portes du barrage s'ouvrent ou lorsque la personne saute, l'énergie potentielle est convertie en énergie cinétique. L'**énergie chimique** est une forme d'énergie potentielle stockée dans les liaisons chimiques des composés et des molécules. La quantité totale d'énergie présente au début et à la fin d'une réaction chimique est la même. Alors que l'énergie ne peut être ni créée ni détruite, mais peut être convertie d'une forme vers une autre. Ce principe est connu sous la **loi de conservation de l'énergie**. Par exemple, une partie de l'énergie chimique présente dans la nourriture que nous mangeons est éventuellement convertie en différentes formes d'énergie cinétique, telles que les énergies mécaniques utilisées pour marcher et parler. La conversion d'une forme énergétique

vers l'autre libère généralement de la chaleur, dont une partie est récupérée pour maintenir la température normale de l'organisme.

Transfert d'énergie dans les réactions chimiques

Les liaisons chimiques stockent de l'énergie, et les réactions chimiques ont lieu lorsque de nouvelles liaisons entre des atomes sont formées ou des anciennes sont rompues. L'ensemble de la réaction peut soit libérer soit absorber de l'énergie. Les **réactions exergoniques** libèrent plus d'énergie qu'elles n'en consomment. Inversement, les **réactions endergoniques** absorbent plus d'énergie qu'elles n'en libèrent. Un point clé du métabolisme est le couplage de réactions exergoniques avec des réactions endergoniques. L'énergie libérée par une réaction exergonique est souvent utilisée pour favoriser une réaction endergonique. En général, les réactions sont exergoniques lorsque des nutriments tels que le glucose sont catabolisés. Une partie de l'énergie libérée peut être capturée par les liaisons covalentes de l'adénosine triphosphate (ATP), que nous décrirons plus en détails dans ce chapitre. Si une molécule de glucose est totalement métabolisée, l'énergie chimique présente au sein de ses liaisons peut être utilisée pour produire jusqu'à 32 molécules d'ATP. L'énergie transférée aux molécules d'ATP est alors utilisée pour piloter les réactions endothermiques utiles pour construire les structures de l'organisme, telles les muscles et les os. L'énergie de l'ATP est également utilisée pour réaliser du travail mécanique impliqué dans la contraction musculaire ou pour le mouvement de substances vers ou hors des cellules.

Énergie d'activation Les particules de matière telles que les atomes, les ions et les molécules possèdent de l'énergie cinétique et de ce fait, elles sont constamment mobiles et entrent en collision les unes avec les autres. Si les forces de collision sont suffisamment puissantes, elles peuvent perturber les mouvements des électrons de valence et induire la rupture d'une liaison chimique ou au contraire en créer de nouvelles. L'énergie de collision suffisante pour rompre une liaison chimique entre des réactifs est appelée l'**énergie d'activation** de la réaction (Figure 2.8). Cet « investissement » énergétique initial est nécessaire pour démarrer la réaction. Les réactifs doivent absorber assez d'énergie pour déstabiliser leurs liaisons chimiques et permettre à leurs électrons de valence de former de nouvelles combinaisons. À la suite de quoi, de l'énergie est libérée dans l'environnement proche.

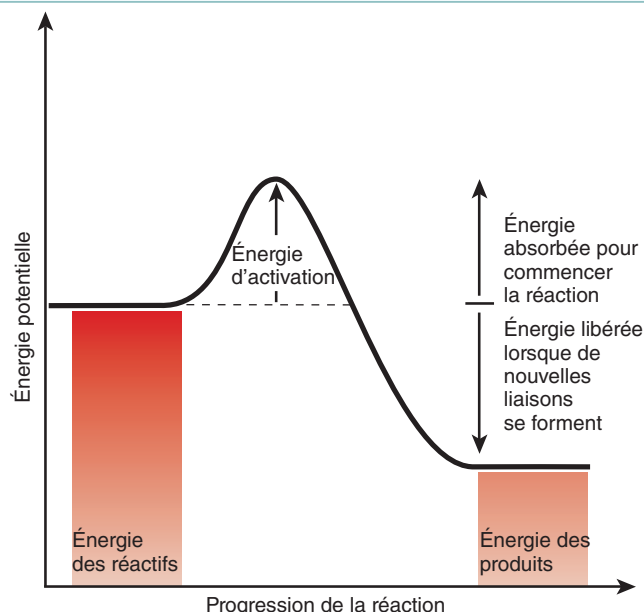
Tant la concentration des particules que la température influencent la possibilité qu'une collision survienne et induise une réaction chimique.

- **Concentration.** Plus il y a de particules de matière présentes en un espace confiné, plus il y a de chances qu'elles entrent en collision (pensez aux gens qui se précipitent dans une rame de métro à l'heure de pointe). La concentration en particules augmente si on en ajoute dans un espace donné ou si la pression dans cet espace augmente, ce qui presse ces particules les unes contre les autres si bien qu'elles entrent en collision plus souvent.
- **Température.** Lorsque la température augmente, les particules de matière se meuvent plus rapidement. Et donc, plus la température de la matière est élevée, plus fortes seront les collisions entre particules, et plus grande sera la chance qu'une collision produise une réaction.

Catalyseurs Comme nous venons de le voir, les réactions chimiques ont lieu lorsque des liaisons chimiques se rompent ou se créent entre des atomes, des ions ou des molécules qui se percutent. La température du corps et les concentrations des molécules au

FIGURE 2.8 Énergie d'activation.

L'énergie d'activation est l'énergie nécessaire pour rompre les liaisons chimiques des réactifs pour la réaction puisse commencer.



Q Pourquoi la réaction illustrée ci-dessus est-elle exergonique ?

www.lienmini.fr/33444-02



sein des fluides corporels sont bien trop faibles pour que la plupart des réactions chimiques surviennent suffisamment rapidement pour le maintien de la vie. Augmenter la température et le nombre de particules réactives de matière au sein de l'organisme pourrait effectivement augmenter la fréquence des collisions et favoriser les réactions chimiques, mais ce faisant, on augmente également les dommages aux cellules ce qui pourrait conduire à leur destruction.

Des substances appelées catalyseurs permettent de résoudre ce problème. Les **catalyseurs** sont des composés chimiques qui accélèrent les réactions chimiques en diminuant l'énergie d'activation nécessaire à cette réaction (Figure 2.9). Les catalyseurs les plus importants de l'organisme sont les enzymes, que nous verrons plus loin dans ce chapitre.

Un catalyseur ne modifie pas la différence d'énergie potentielle entre les réactifs et les produits de la réaction. Ils agissent en réduisant la quantité d'énergie nécessaire pour démarrer la réaction.

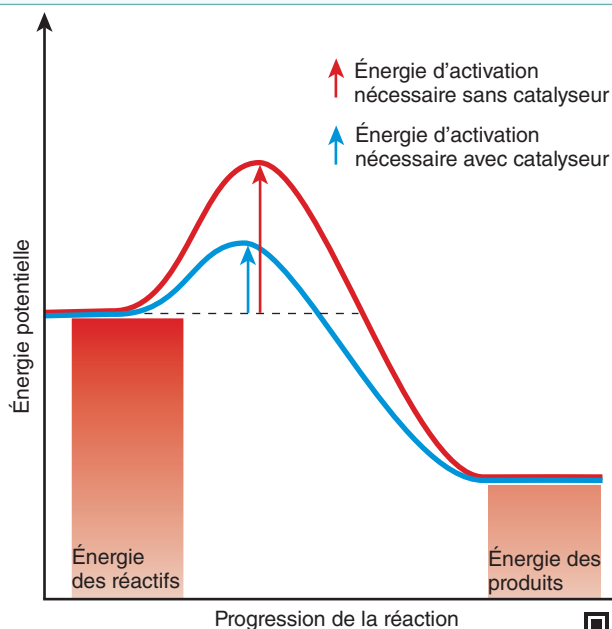
Pour que des réactions chimiques surviennent, certaines particules de matière, et spécialement les grosses molécules, ne doivent pas seulement entrer en collision avec suffisamment d'énergie, mais elles doivent aussi se percuter l'une l'autre en des endroits précis. Un catalyseur aide à orienter correctement les particules qui entrent en collision ; et de ce fait elles interagissent précisément à l'endroit où les réactions peuvent se produire. Alors que l'action du catalyseur est d'accélérer une réaction chimique, ce dernier n'est pas modifié par la réaction, ce qui lui permet de faciliter une réaction puis l'autre et ainsi de suite.

Types de réactions chimiques

Après qu'une réaction chimique ait eu lieu, les atomes des réactifs sont réarrangés pour produire des produits aux propriétés nouvelles. Dans cette section nous allons nous intéresser aux types de réactions

FIGURE 2.9 Comparaison entre les énergies nécessaires pour qu'une réaction chimique survienne en présence d'un catalyseur (courbe bleue) ou sans (courbe rouge).

Les catalyseurs accélèrent les réactions chimiques en diminuant leur énergie d'activation.



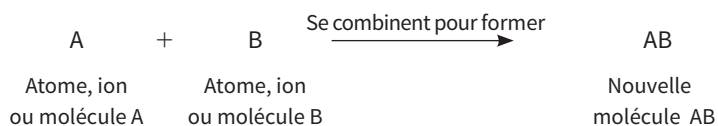
Q Est-ce qu'un catalyseur modifie les énergies potentielles des réactifs et des produits ?

www.lienmini.fr/33444-02

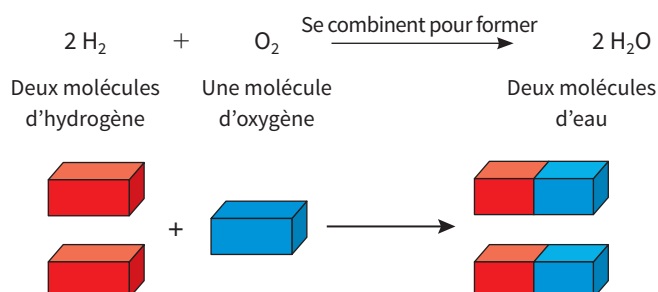


chimiques communes à toutes les cellules vivantes. Lorsque vous les connaîtrez, vous serez à même de comprendre les réactions chimiques indispensables au fonctionnement du corps humain et qui seront discutées tout au long de cet ouvrage.

Réactions de synthèse ou anabolisme Lorsque deux ou plus atomes, ions ou molécules se combinent pour former une molécule nouvelle et plus grosse, ce processus est dénommé **réaction de synthèse**. Le mot *synthèse* signifiant « mettre ensemble ». Une réaction de synthèse peut être exprimée comme suit :

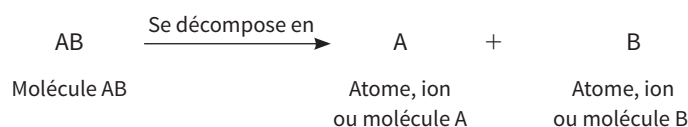


La réaction entre deux molécules d'hydrogène et une molécule d'oxygène pour former deux molécules d'eau est un exemple de réaction de synthèse (voir **Figure 2.7**).

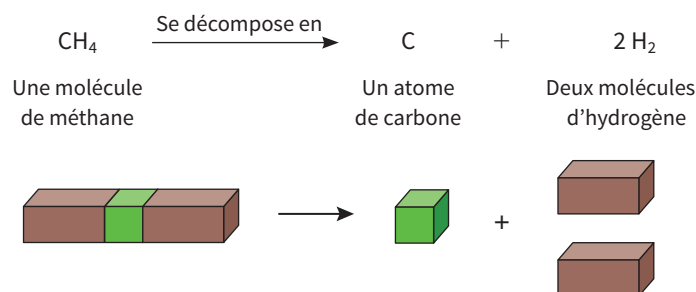


Toutes les réactions de synthèse de l'organisme sont appelées collectivement l'**anabolisme**. Dans l'ensemble, les réactions anaboliques sont le plus souvent endothermiques parce qu'elles absorbent plus d'énergie qu'elles n'en libèrent. La combinaison de molécules simples comme des acides aminés (décrits bientôt) pour former de grandes molécules telles des protéines est un exemple d'anabolisme.

Réactions de dégradation ou catabolisme Les **réactions de dégradation** décomposent de grandes molécules en leurs constituants : atomes, ions ou plus petites molécules. Une réaction de dégradation peut être exprimée comme suit :



Par exemple, dans des conditions adéquates, une molécule de méthane peut se décomposer en une molécule de carbone et deux molécules d'hydrogène :

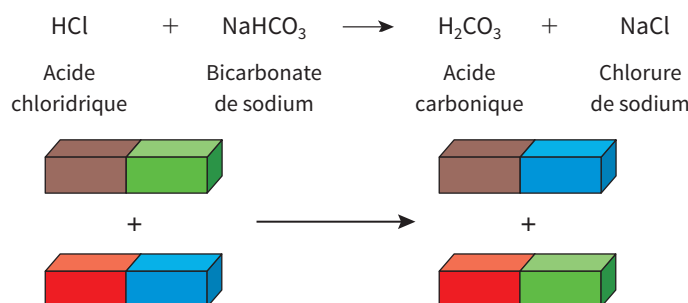


Les réactions de dégradation qui surviennent au sein de l'organisme font partie du **catabolisme**. Dans l'ensemble, les réactions cataboliques sont exothermiques puisqu'elles libèrent plus d'énergie qu'elle n'en absorbent. Par exemple, les séries de réactions qui décomposent le glucose en acide pyruvique en produisant deux molécules d'ATP, sont des réactions cataboliques. Ces réactions seront décrites dans le Chapitre 25.

Réactions d'échange La plupart des réactions corporelles sont des **réactions d'échange** : elles consistent en mélange de réactions de synthèse et de décomposition. Un type de réaction d'échange fonctionne comme suit :

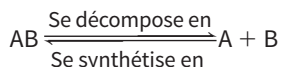


Les liaisons entre A et B et entre C et D se rompent (la décomposition), et de nouvelles liaisons se forment (la synthèse) entre A et D et entre B et C. Voici un exemple de réaction d'échange :

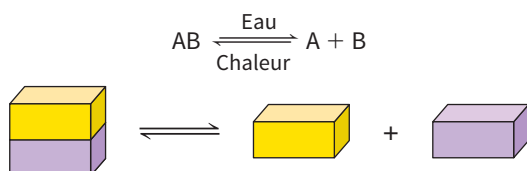


Notez que les ions des deux composés ont changé de « partenaires » : l'ion hydrogène (H^+) de l' HCl s'est associé à l'ion bicarbonate (HCO_3^-) du $NaHCO_3$, et l'ion sodium (Na^+) du $NaHCO_3$ s'est associé à l'ion chlorure (Cl^-) de l' HCl .

Réactions réversibles Certaines réactions chimiques ont toujours lieu dans une même direction, des réactifs vers les produits de la réaction, comme indiqué précédemment par des flèches unidirectionnelles. D'autres réactions sont réversibles. Dans une **réaction réversible**, les produits de la réaction peuvent reformer les réactifs. Une réaction réversible est indiquée par deux demi-flèches pointées orientées dans deux directions opposées :



Certaines réactions ne sont réversibles que dans certaines conditions :



Dans ce cas, ce qui est mentionné au-dessus ou en-dessous des flèches indique la condition nécessaire pour que la réaction ait lieu.

Dans l'exemple ci-dessus, AB se décompose en A et B uniquement lorsque de l'eau est ajoutée à la réaction, et A et B se réassocient pour produire AB seulement si le système est chauffé. La plupart des réactions du corps requièrent des catalyseurs appelés enzymes. Et parfois différents enzymes guident la réaction dans des directions opposées.

Réactions d'oxydoréduction Vous apprendrez dans le Chapitre 25 que les réactions appelées réactions d'oxydoréduction sont essentielles à la vie, car ce sont les réactions qui décomposent les nutriments pour produire de l'énergie. Ces réactions concernent les réactions avec transferts d'électrons entre atomes et molécules. L'**oxydation** fait référence à la perte d'électrons ; dans ce processus la substance oxydée libère de l'énergie. La **réduction** fait référence au gain d'électrons ; dans ce processus la substance réduite gagne de l'énergie. Les **réactions d'oxydoréduction** se déroulent toujours en parallèle : lorsqu'une substance est oxydée, l'autre est réduite dans le même temps. Lorsqu'un nutriment tel le glucose est oxydé, l'énergie produite est utilisée par la cellule à la réalisation de ses nombreuses fonctions.

Révision

7. Dans une réaction chimique, quelle est la relation entre les réactifs et les produits ?
8. Comparez énergie cinétique et potentielle.
9. Comment est-ce qu'un catalyseur modifie l'énergie d'activation ?
10. Quelle est la relation entre anabolisme et catabolisme d'une part, et les réactions de synthèse et de décomposition d'autre part ?
11. Pourquoi est-ce que les réactions d'oxydoréduction sont importantes ?

2.4

Composés inorganiques et solutions

OBJECTIFS

- **Décrire** les propriétés de l'eau, des acides et bases inorganiques et des sels.
- Faire la **distinction** entre des solutions, des colloïdes et des suspensions.
- **Définir** le pH et expliquez le rôle des tampons dans l'homéostasie.

La plupart des produits chimiques de votre organisme existent sous la forme de composés. Les biologistes et les chimistes divisent ces composés en classes principales : les composés inorganiques et les composés organiques. Les **composés inorganiques** ne contiennent généralement pas de carbone et ont une structure simple. Leurs molécules ne sont composées que de quelques atomes et ne peuvent être utilisées par les cellules pour réaliser des fonctions biologiques complexes. C'est une famille composée de l'eau et de nombreux sels, les acides et les bases. Les composés inorganiques peuvent contenir des liaisons ioniques ou covalentes. L'eau constitue 55 à 60% de la masse corporelle totale d'un adulte ; alors que tous les autres composés inorganiques n'en représentent que 1 à 2%. Les composés inorganiques qui contiennent du carbone sont le dioxyde de carbone (CO_2), l'ion bicarbonate (HCO_3^-) et l'acide carbonique (H_2CO_3). Les **composés organiques** contiennent toujours du carbone, contiennent habituellement de l'hydrogène et toujours des liaisons covalentes. La plupart sont des grandes molécules, la plupart constituées de longues chaînes carbonées. Les composés organiques constituent le reste de la masse corporelle, à savoir 38-43% du corps.

L'eau

L'**eau** est le composé inorganique le plus important et abondant de tous les systèmes vivants. Alors que nous sommes capables de survivre des semaines sans manger, nous ne survivons que quelques jours sans boire. La plupart des réactions du corps se déroulent dans un environnement aqueux. De nombreuses propriétés de l'eau rendent ce composé indispensable à la vie. Nous avons déjà mentionné la plus importante de ses propriétés, sa polarité qui est dépendante du partage inégal de ses électrons de valence, et qui confère une charge négative partielle à proximité du seul atome d'oxygène et deux charges positives partielles à proximité de chacun de deux atomes d'hydrogène (voir **Figure 2.5e**). Cette propriété (i) permet à l'eau d'être un excellent solvant pour d'autres substances ioniques et polaires, (ii) donne à l'eau une importante cohésion entre ses molécules (la tendance des molécules à adhérer entre-elles) et (iii) lui permet de résister aux changements de température.

L'eau est un solvant Au moyen-âge, les alchimistes cherchaient en vain un « solvant universel », une substance capable de dissoudre toutes les autres matériaux. Ils n'ont rien trouvé de mieux que l'eau. Bien que l'eau soit le solvant le plus complet connu, l'eau n'est pas un solvant universel comme pouvaient le croire les alchimistes. S'il l'était, il n'y aurait pas de récipient capable de le contenir puisqu'elle les dissoudrait tous. Mais qu'est-ce qu'un solvant ? Dans une **solution**,

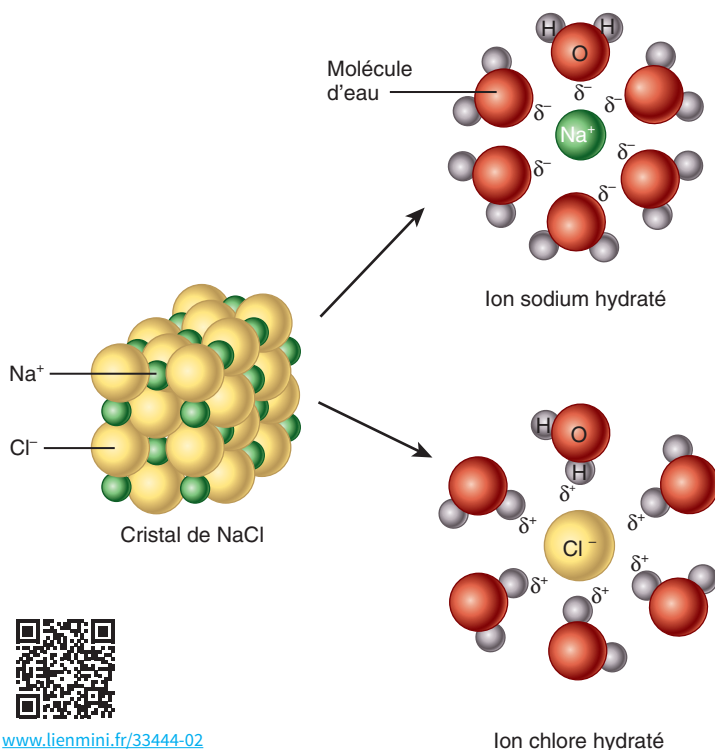
la substance appelée **solvant** dissout une autre substance appelée le **soluté**. Il y a normalement bien plus de solvants que de soluté dans une solution. Par exemple, notre transpiration est une solution diluée d'eau (le solvant) contenant de petites quantités de sels (les solutés).

La polyvalence de l'eau à dissoudre tant les substances ionisées que polaires, est liée à ses liaisons covalentes polaires et à sa forme tétraédrique. Ces caractéristiques permettent à chaque molécule d'eau d'interagir avec plusieurs ions ou molécules avoisinantes. Les solutés qui sont chargés (NdT : électriquement) ou qui contiennent des liaisons covalentes polaires sont **hydrophiles**, ce qui signifie qu'ils se dissolvent facilement dans l'eau. Le sucre et le sel sont des exemples communs de solutés hydrophiles. D'autre part, les molécules qui contiennent principalement des liaisons covalentes non polaires sont **hydrophobes**. Elles ne sont pas hydrosolubles. Les graisses animales et les huiles végétales sont des exemples de composés hydrophobes.

Pour comprendre la puissance de dissolution de l'eau, considérons ce qui arrive à un cristal de sel, tel du chlorure de sodium, lorsqu'il est plongé

FIGURE 2.10 Comment les molécules d'eau dissolvent les sels et les substances polaires. Lorsqu'un cristal de sel est placé dans l'eau, l'extrémité légèrement négative centrée sur l'oxygène (en rouge) de la molécule d'eau est attirée vers les ions (Na^+) positifs, tandis que les parties légèrement positives de la molécule d'eau centrées sur les extrémités hydrogène (en gris) sont attirées vers les ions (Cl^-) négatifs. En plus de dissoudre le chlorure de sodium, l'eau induit également sa dissociation ou séparation en particules chargées.

L'eau est un solvant polyvalent grâce à ses liaisons covalentes polaires où les électrons sont partagés de manière inégale créant des zones chargées positivement et négativement.



dans l'eau (Figure 2.10). L'atome d'oxygène électronégatif des molécules d'eau attire l'ion sodium (Na^+), tandis que les atomes d'hydrogène électropositifs de la molécule d'eau attirent les ions chlore (Cl^-). Il en résulte que très vite, les molécules d'eau entourent et séparent les ions Na^+ et Cl^- les uns des autres et les arrachent de la surface du cristal en brisant les liaisons ioniques qui maintiennent Na et Cl ensemble. Les molécules d'eau ciment les ions Na^+ et Cl^- , ne leur laissant aucune chance de se remettre ensemble pour reformer leur liaison ionique.

La capacité de l'eau à former des solutions est essentielle à la santé et tout simplement à la survie. Parce que l'eau est à même de dissoudre tellement de substances différentes, elle est le milieu idéal pour les réactions métaboliques. L'eau permet aux substances dissoutes d'entrer en collision et par là de former de nouveaux produits de réaction. L'eau est également un solvant pour les déchets, ce qui permet de les transporter hors du corps via l'urine.

L'eau dans les réactions chimiques L'eau sert de milieu pour la plupart des réactions chimiques du corps, mais elle participe également en tant que réactif ou produit à certaines réactions. Durant la digestion par exemple, les réactions de décomposition fragmentent les grosses molécules de nutriments en de plus petites molécules via l'addition de molécules d'eau. Ce type de réaction est appelé **hydrolyse**. Les réactions d'hydrolyse permettent aux nutriments digérés d'être absorbés par l'organisme. À l'inverse, lorsque deux petites molécules s'unissent pour en former une plus grosse via une **réaction de synthèse par déshydratation**, une molécule d'eau constitue un des produits de la réaction. Comme vous le verrez plus loin dans ce chapitre, de telles réactions ont lieu lors de la synthèse protéique ou d'autres molécules (par exemple, voir Figure 2.21).

Propriétés thermiques de l'eau À la différence de nombreuses autres substances, l'eau est capable d'absorber ou de libérer une relativement grande quantité d'énergie calorifique tout en ne modifiant sa température que de manière modeste. C'est pour cette raison qu'on dit que l'eau possède une grande *capacité calorifique*. Cette propriété est liée aux très nombreuses liaisons hydrogène de l'eau. Lorsque l'eau absorbe de l'énergie, une partie de cette énergie est utilisée pour rompre des liaisons hydrogène. Il y a donc moins d'énergie disponible pour augmenter les mouvements des molécules d'eau, ce qui serait responsable de l'augmentation de la température. Cette grande capacité calorifique de l'eau explique pourquoi elle est utilisée dans les radiateurs des voitures ; elle refroidit le moteur en absorbant sa chaleur sans augmenter sa propre température au-delà d'un niveau acceptable. La grande quantité d'eau au sein du corps a le même effet : cela diminue l'impact des modifications de la température environnementale, ce qui aide l'organisme à maintenir l'homéostasie de la température corporelle.

L'eau nécessite également beaucoup d'énergie pour passer de l'état liquide à l'état de gaz. Sa *température de vaporisation* est élevée. Lorsque l'eau s'évapore de la surface de la peau, cela absorbe une grande quantité de chaleur, ce qui en fait un mécanisme important de refroidissement corporel.

L'eau est un lubrifiant L'eau est un composant majeur du mucus et des autres liquides lubrificateurs de l'organisme. La lubrification est spécialement nécessaire au niveau de la poitrine (cavités pleurales et péricardique) et de l'abdomen (cavité péritonéale), où les organes internes se touchent et glissent les uns sur les autres. Elle est également nécessaire aux articulations, ligaments et tendons qui se frottent les uns sur les autres. Au sein du tube digestif, les mucus

Q Le sucre de table (saccharose) se dissout facilement dans l'eau malgré qu'il ne soit pas un électrolyte. Est-il possible que toutes les liaisons covalentes entre les atomes de la molécule de saccharose soient des liaisons non polaires ? Pourquoi ou pourquoi pas ?

et autres sécrétions aqueuses humidifient la nourriture, ce qui facilite son passage en douceur au travers du système digestif.

Solutions, colloïdes et suspensions

Un **mélange** est une combinaison d'éléments ou de composés qui sont physiquement associés sans être liés par des liaisons chimiques. Par exemple, l'air que vous respirez est un mélange de gaz incluant l'azote, l'oxygène, l'argon et dioxyde de carbone. Les solutions, les colloïdes et les suspensions sont trois types fréquents de mélange.

Une fois mélangés ensemble, les solutés d'une solution restent uniformément dispersés parmi les molécules du solvant. Du fait que les particules de solutés d'une solution sont très petites, une solution a un aspect transparent.

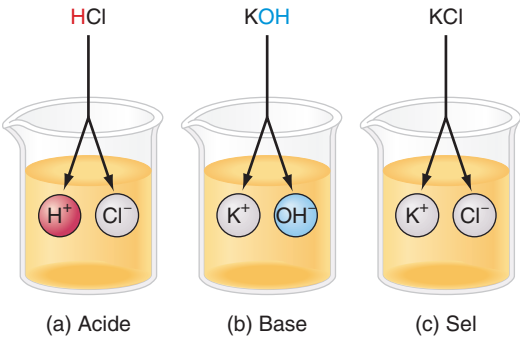
Un **colloïde** diffère d'une solution principalement du fait de la taille de ses particules. Les particules de solutés d'un colloïde sont suffisamment larges pour diffuser la lumière, de la même manière que les gouttelettes d'eau du brouillard diffusent la lumière des phares des autos. C'est pour cette raison que les colloïdes apparaissent translucides ou opaques. Le lait est un exemple de liquide qui est à la fois un colloïde et une solution : les grandes protéines du lait en font un colloïde, là où les sels calciques, le sucre du lait (lactose), les ions et les autres petites particules sont en solution.

Les solutés des solutions et des colloïdes ne décantent pas pour s'accumuler au fond du récipient. À l'inverse dans une **suspension**, le matériel en suspension peut se mélanger au liquide ou se mettre en suspension dans le milieu pour un temps, mais il peut éventuellement décanter avec le temps. Le sang est un exemple de suspension. Lorsqu'il a été fraîchement prélevé du corps, le sang a une couleur rougeâtre uniforme. Après un certain temps dans son tube, les globules rouges décantent de la suspension et s'accumulent au fond du tube (voir **Figure 19.1a**). La couche supérieure, la partie liquide du sang, apparaît jaune pâle et est appelé le plasma. Le plasma sanguin est à la fois une solution d'ions et d'autres petits solutés et un colloïde lié à la présence des grosses protéines plasmatiques.

La **concentration** d'une solution peut être exprimée de plusieurs manières. Une première façon consiste à l'exprimer en **pourcentage** de masse par volume, ce qui donne la masse relative du soluté présent dans un volume donné d'une solution. Par exemple, vous pouvez lire ceci sur une bouteille de vin : 14,1% d'alcool (NdT : ce qui représente 14,1 grammes d'alcool pour 100 ml d'eau). La concentration peut également être exprimée en **mole par litre (mol/L)**, ou molarité, ce qui représente le nombre total de molécules dans un volume donné de solution. Une **mole** est la quantité de toute substance qui a une masse en grammes égale à la

FIGURE 2.11 Dissociation des acides inorganiques, bases et sels.

La dissociation correspond à la séparation en ions des acides inorganiques, bases et sels lorsqu'ils sont en solution.



Q Le carbonate de calcium CaCO_3 se dissocie en un ion calcique (Ca^{2+}) et un ion carbonate (CO_3^{2-}). Est-ce un acide, une base ou un sel ? Qu'en est-il de H_2SO_4 , qui se dissocie en 2H^+ et un SO_4^{2-} ?

www.lienmini.fr/33444-02

somme des masses atomiques de tous ses atomes. Par exemple, une mole de chlore (masse atomique = 35,45) pèse 35,45 grammes et une mole de chlorure de sodium pèse 58,44 (22,99 pour Na et 35,45 pour Cl). Tout comme une douzaine correspond toujours à 12 choses, une mole de quoi que ce soit correspond toujours au même nombre de particules, soit : $6,023 \times 10^{23}$. Ce chiffre énorme est appelé aussi le *nombre d'Avogadro*. Ce qui revient à dire que les substances qui sont exprimées en moles nous renseignent sur le nombre d'atomes, d'ions, ou de molécules présents. Ce qui est important pour réaliser des réactions chimiques puisque celles-ci requièrent un ensemble d'atomes issus d'éléments bien spécifiques. Le **Tableau 2.3** décrit cette façon d'exprimer la concentration.

Acides inorganiques, bases et sels

Lorsque des acides inorganiques, des bases ou des sels se dissolvent dans l'eau, ils se **dissocient**, ce qui revient à dire qu'ils se séparent en ions et sont entourés de molécules d'eau. Un **acide** est une substance qui se dissocie en libérant un ou plusieurs **ions hydrogène (H^+)** et un ou plusieurs anions. Parce que H^+ est un simple proton possédant une charge positive, un acide est également appelé un **donneur de proton**. À l'inverse (**Figure 2.11b**), une **base** capte un proton dans une solution, elle est appelée pour cela un **accepteur de proton**. La plupart des bases se dissocient en un ou plusieurs **ions hydroxydes (OH^-)** et en un ou plusieurs cations.

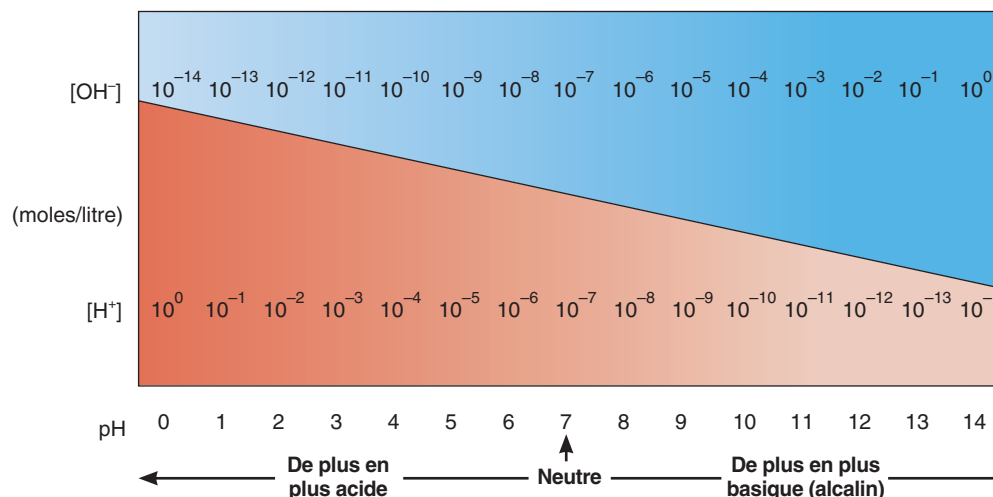
Un sel, lorsqu'il est dissout dans l'eau, se dissocie en cations et anions, et aucuns d'entre eux n'est un H^+ ou un OH^- (**Figure 2.11c**). Dans l'organisme, les sels comme le chlorure de potassium sont des électrolytes importants pour le transport de courants électriques (des ions qui se déplacent d'un endroit à un autre), spécialement au sein des nerfs et des muscles. Les ions des sels sont à l'origine de nombreux éléments chimiques essentiels des liquides intracellulaires et extracellulaires comme le sang, la lymphe et les liquides interstitiels des tissus.

Les acides et les bases réagissent entre eux pour former des sels. Par exemple, la réaction de l'acide chloridrique (HCl) avec l'hydroxyde de potassium (KOH), une base, produit le sel chlorure de potassium (KCl) et de l'eau (H_2O). Cette réaction d'échange peut être écrite comme suit :

TABLEAU 2.3 Pourcentages et molarité	
DÉFINITION	EXEMPLE
Pourcentages (masse par volume) Nombre de grammes d'une substance par 100 millilitres (mL) de solution	Pour faire une solution de NaCl à 10%, peser 10 g de NaCl et ajouter suffisamment d'eau pour obtenir 100 mL de solution.
Molarité ou moles (mol) par litre Une solution 1 molaire (1M) = une mole d'un soluté dans un litre de solution	Pour faire une solution 1 molaire (1M), dissolvez 1 mole de NaCl (58,44 g) dans suffisamment d'eau pour obtenir au total 1 litre de solution.

FIGURE 2.12 L'échelle du pH. Un pH inférieur à 7 indique une solution acide, où il a plus de H^+ que de OH^- . Un pH supérieur à 7 indique une solution basique ou alcaline, où il a plus de OH^- que de H^+ .

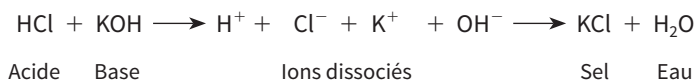
Plus la valeur numérique du pH est faible, plus la solution est acide puisque sa concentration en H^+ devient de plus en plus élevée. Plus le pH est élevé, plus la solution est basique.



Q A pH 7 (neutre), les concentrations en H^+ et OH^- sont égales (10^{-7} mole/litre). Quelles sont les concentrations en H^+ et OH^- à pH 6 ? Quel pH est le plus acide : 6,82 ou 6,91 ? Quel est le pH le plus neutre : 8,41 ou 5,59 ?



www.lienmini.fr/33444-02



l'eau pure, est neutre. Une solution qui possède plus de H^+ que d' OH^- est une **solution acide** et a un pH inférieur à 7. Une solution qui a plus d' OH^- que de H^+ est une **solution basique** (ou *alcaline*) et a un pH supérieur à 7.

Équilibre acide base : concept du pH

Pour maintenir l'homéostasie, les liquides intracellulaires et extracellulaires doivent contenir approximativement les mêmes quantités d'acides et de bases. Plus il y a d'ions hydrogènes (H^+) dissout dans une solution, plus cette solution sera acide ; plus il y a d'ions hydroxydes (OH^-), plus la solution est basique ou alcaline. Les réactions chimiques du corps sont très sensibles aux modifications mêmes minimales de l'acidité ou de l'alcalinité des fluides corporels au sein desquels elles ont lieu. Le moindre écart en dehors des limites étroites des concentrations normales en H^+ et OH^- altère fortement les fonctions de l'organisme.

L'acidité ou l'alcalinité d'une solution est exprimée au moyen de l'**échelle du pH** (*potentiel d'hydrogène*) qui s'étend de 0 à 14 (**Figure 2.12**). Cette échelle est basée sur la concentration des H^+ en moles par litre. Un pH de 7 signifie que la solution contient un dix millionième ($0,0000001$) d'une mole d'ions hydrogènes par litre. Le nombre $0,0000001$ peut être également écrit 1×10^{-7} en notation scientifique, ce qui signifie que la virgule du nombre 1 est déplacée 7 fois vers la gauche. Pour convertir cette valeur en pH, l'exposant négatif (-7) est transformé en nombre positif (7). Une solution avec une concentration en H^+ de $0,0001$ (10^{-4}) mol/L possède un pH de 4 ; une solution avec une concentration en H^+ de $0,000000001$ (10^{-9}) mol/L possède un pH de 9, et ainsi de suite. Il est important de comprendre que chaque incrément du nombre entier sur l'échelle du pH représente une modification de 10 fois la concentration en H^+ . Un pH de 6 implique 10 fois plus d' H^+ qu'un pH de 7, et un pH de 8, dix fois moins d' H^+ qu'un pH de 7 et $100\times$ moins d' H^+ qu'un pH de 6.

Sept est le milieu de l'échelle de pH, point où les concentrations en H^+ et OH^- sont identiques. Une substance avec un pH de 7, telle

Maintien du pH : systèmes tampon

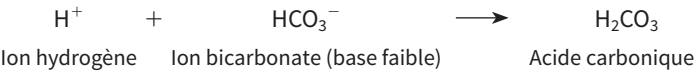
Alors que le pH des fluides corporels peut différer, les limites normales pour chaque fluide sont maintenues dans d'étroites limites. Le **Tableau 2.4** montre les valeurs de pH pour quelques fluides corporels et celles de quelques substances communes. Les mécanismes homéostatiques maintiennent le pH du sang entre 7,35 et 7,45, ce qui est légèrement plus basique que l'eau pure. Vous apprendrez dans le Chapitre 27 que si le pH du sang descend en dessous de 7,35, on est en situation d'*acidose*, et que si le pH monte au-delà de 7,45, on est en *alcalose*, deux conditions qui peuvent sérieusement compromettre l'homéostasie. La salive est légèrement acide et le sperme légèrement basique. Parce que les reins participent à l'élimination de l'excès d'acides corporels, l'urine peut être relativement acide.

Alors que des acides et bases forts sont continuellement captés et produits par l'organisme, le pH des fluides dans et hors des cellules reste généralement constant. La raison est liée à la présence importante des **systèmes tampons**, qui agissent en convertissant les acides et bases forts en acides et bases faibles. Les acides forts (ou les bases) s'ionisent facilement et contribuent à la formation de nombreux H^+ (ou OH^-) au sein d'une solution. De ce fait, ils sont capables de modifier le pH de manière très importante, ce qui peut interrompre le métabolisme de l'organisme. Les acides (ou bases) faibles ne s'ionisent pas autant et contribuent bien moins à la formation de H^+ (ou OH^-). Dès lors, ils ont moins d'effets sur le pH. Les composés chimiques qui peuvent convertir des acides ou bases forts en des acides ou bases faibles sont appelés des **tampons**. Ils agissent en captant ou libérant des protons (H^+).

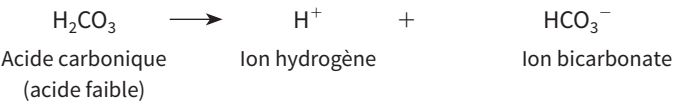
TABLEAU 2.4 Valeurs de pH de quelques substances	
SUBSTANCE*	VALEUR DE pH
• Suc gastrique (présent dans l'estomac)	1,2–3,0
Jus de citron	2,3
Vinaigre	3,0
Boisson gazeuse	3,0–3,5
Jus d'orange	3,5
• Liquide vaginal	3,5–4,5
Jus de tomate	4,2
Café	5,0
• Urine	4,6–8,0
• Salive	6,35–6,85
Lait	6,8
Eau distillée (ou pure)	7,0
• Sang	7,35–7,45
• Sperme (liquide contenant le sperme)	7,20–7,60
• Liquide cérébro-spinal (fluide associé au système nerveux)	7,4
• Liquide pancréatique (fluide digestif issu du pancréas)	7,1–8,2
• Bile (sécrétion hépatique qui aide à la digestion des graisses)	7,6–8,6
Lait de magnésie	10,5
Lessive (Hydroxyde de sodium)	14,0

*substance de l'organisme.

Le **système tampon acide carbonique - bicarbonate** est un des systèmes tampons importants de l'organisme. L'acide carbonique (H_2CO_3) peut agir en tant qu'acide faible, alors que l'ion carbonate (HCO_3^-) peut agir en tant que base faible. De ce fait, ce système tampon est à même de compenser soit un excès, soit un manque en H^+ . Par exemple, s'il y a un excès de H^+ (condition acide), le HCO_3^- fonctionne comme une base faible et capte l'excès de H^+ , comme suit :



Si à l'inverse, il y a un manque de H^+ (condition alcaline), alors à l'inverse H_2CO_3 peut fonctionner comme un acide faible et fournir des H^+ comme suit :



Le Chapitre 27 décrit en détails les tampons et leurs rôles dans le maintien de l'équilibre acide-base.

2.5

Vue d'ensemble des composés organiques

OBJECTIFS

- **Décrire** les groupes fonctionnels des molécules organiques.
- Faire la **distinction** entre les monomères et les polymères.

Beaucoup de molécules organiques sont de relativement grande taille et possèdent des caractéristiques uniques qui leurs permettent des fonctions complexes. Les catégories importantes de composés organiques sont constituées des hydrates de carbone, des lipides, des protéines, des acides nucléiques et de l'adénosine triphosphate (ATP). Le carbone possède plusieurs propriétés qui le rendent particulièrement utile pour les organismes vivants. Premièrement, il est capable de former des liaisons avec un voire des milliers d'autres atomes de carbone pour produire de grandes molécules qui peuvent avoir beaucoup de formes différentes. Du fait de cette propriété du carbone, l'organisme peut produire de nombreux composés organiques différents, chacun ayant une structure et une fonction unique. De plus, la grande taille de la plupart des molécules contenant du carbone, associée au fait que certaines ne se dissolvent pas facilement dans l'eau, rendent ces molécules très pratiques pour la construction des structures du corps.

Les composés organiques sont souvent fixés les uns aux autres par des liaisons covalentes. Le carbone possède quatre électrons sur sa couche externe (sa couche de valence). Il est à même de se lier de manière covalente à toute une variété d'atomes, y compris à d'autres atomes de carbone, pour former des chaînes cycliques, droites ou ramifiées. Les autres éléments qui sont souvent liés au carbone au sein des composés organiques sont l'hydrogène, l'oxygène et l'azote. Les sulfates et les phosphates sont également présents au sein des composés organiques. Les autres éléments listés dans le **Tableau 2.1** sont également présents mais en effectifs moindres.

La chaîne d'atomes de carbone d'une molécule organique est appelé le **squelette carboné**. La plupart des atomes de carbone sont liés à des atomes d'hydrogène, formant une **chaîne hydrocarbonée**. Différents **groupes fonctionnels** constitués d'autres atomes ou molécules sont également attachés au squelette carboné. Chaque type de groupe fonctionnel est constitué d'un arrangement spécifique d'atomes qui confère des propriétés chimiques caractéristiques aux molécules sur lesquelles il est fixé. Le **Tableau 2.5** liste les groupes fonctionnels les plus courants des molécules organiques, et décrit quelques-unes de leurs propriétés. Parce que les molécules organiques sont souvent de grande taille, il existe des méthodes plus succinctes pour représenter leur formule structurale. La **Figure 2.13** vous montre deux manières d'écrire la formule du glucose, une molécule possédant un cycle carboné sur lequel sont fixés plusieurs groupes hydroxyles.

Les petites molécules organiques peuvent se combiner pour en former de grandes, appelées **macromolécules** (macro- = grande). Les macromolécules sont généralement des **polymères** (poly- = nombreux ; -mères : parties). Un polymère est une grande molécule formée par les liaisons covalentes de molécules de base identiques ou similaires et appelées les **monomères** (mono- = unique). Habituellement,

Révision

12. En quoi les composés inorganiques diffèrent des composés organiques ?
13. Décrivez deux manières d'exprimer la concentration d'une solution.
14. Quelles sont les fonctions de l'eau au sein du corps ?
15. Comment les ions bicarbonates empêchent l'excès de H^+ ?

TABLEAU 2.5

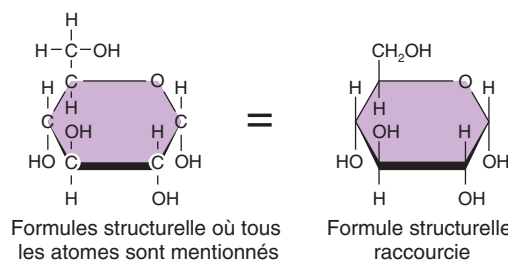
Groupes fonctionnels majeurs au sein des molécules organiques

NOM ET FORMULE STRUCTURELLE *	OCCURRENCE ET IMPORTANCE
Hydroxyle $\text{R}-\text{O}-\text{H}$	Les <i>alcools</i> contiennent un groupe $-\text{OH}$, ce dernier est polaire et hydrophile du fait de la présence de son atome d'O électronégatif. Les molécules contenant de nombreux groupes $-\text{OH}$ se dissolvent facilement dans l'eau.
Sulfhydryle $\text{R}-\text{S}-\text{H}$	Les <i>thiols</i> contiennent un groupe $-\text{SH}$, ce dernier est polaire et hydrophile du fait de la présence de son atome de S électronégatif. Certains acides aminés (comme la cystéine, par exemple) contiennent des groupes $-\text{SH}$, ce qui participe à la stabilisation de la structure des protéines.
Carbonyle $\text{R}-\overset{\text{O}}{\underset{\text{ }}{\text{C}}}-\text{R}$ ou $\text{R}-\overset{\text{O}}{\underset{\text{ }}{\text{C}}}-\text{H}$	Les <i>cétones</i> contiennent un groupe carbonyle au sein du squelette carboné. Le groupe carbonyle est polaire et hydrophile du fait de la présence de son atome d'O électronégatif. Les <i>aldéhydes</i> possèdent un groupe carbonyle à l'extrémité du squelette carboné.
Carboxyle $\text{R}-\overset{\text{O}}{\underset{\text{ }}{\text{C}}}-\text{OH}$ ou $\text{R}-\overset{\text{O}}{\underset{\text{ }}{\text{C}}}-\text{O}^-$	Les <i>acides carboxyliques</i> possèdent un groupe carboxyl à l'extrémité du squelette carboné. Tous les acides aminés possèdent un groupe $-\text{COOH}$ à une extrémité. Les formes négativement chargées (NdT : $-\text{COO}^-$) sont prédominantes au pH des cellules de l'organisme et sont hydrophiles.
Ester $\text{R}-\overset{\text{O}}{\underset{\text{ }}{\text{C}}}-\text{O}-\text{R}$	Les <i>esters</i> sont prédominants parmi les graisses alimentaires et les huiles, et sont présents dans le corps sous la forme de triglycérides. L'aspirine est un ester de l'acide salicylique, un antidouleur provenant de l'écorce du saule.
Phosphate $\text{R}-\text{O}-\overset{\text{O}}{\underset{\text{ }}{\text{P}}}-\text{O}^-$	Les <i>phosphates</i> contiennent un groupe phosphate ($-\text{PO}_4^{2-}$) très hydrophiles du fait de la présence de ses deux charges négatives. L'adénosine triphosphate (ATP) en est un exemple important responsable du transfert d'énergie chimique entre les molécules organiques lors de réactions chimiques.
Amine $\text{R}-\text{N}(\text{H})_2$ ou $\text{R}-\text{N}^+(\text{H})_3$	Les <i>amines</i> possèdent un groupe $-\text{NH}_2$, qui agit comme une base et capte l'ion hydrogène, donnant une charge positive au groupe aminé. Au pH des liquides corporels, la plupart des groupes aminés sont chargés positivement 1^+ . Tous les acides aminés ont un groupe amine à une de leur extrémité.

*R = groupe variable.

FIGURE 2.13 Autre manière d'écrire la formule structurale du glucose.

Dans l'abréviation standard, les atomes de carbone sont positionnés là où deux liens chimiques se croisent, et les atomes d'hydrogène ne sont pas mentionnés.



Q Combien la molécule de glucose possède-t-elle de groupes hydroxyles ? Combien d'atomes de carbone font partie du squelette carboné de la molécule de glucose ?


www.lienmini.fr/33444-02

Les molécules qui possèdent des formules chimiques identiques mais des structures différentes sont appelés des **isomères** (iso- = identique). Par exemple, les formules chimiques des sucres glucose et fructose sont identiques et égales à $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$. Les atomes sont cependant positionnés de manière différente le long de la chaîne carbonée (voir Figure 2.15a), donnant à ces sucres des propriétés différentes.

Révision

16. Quel groupe fonctionnel stabilise la forme des protéines ?
17. Qu'est-ce qu'un isomère ?

2.6 Glucides

OBJECTIFS

- Identifier molécules de base des glucides.
- Décrire les fonctions des glucides.

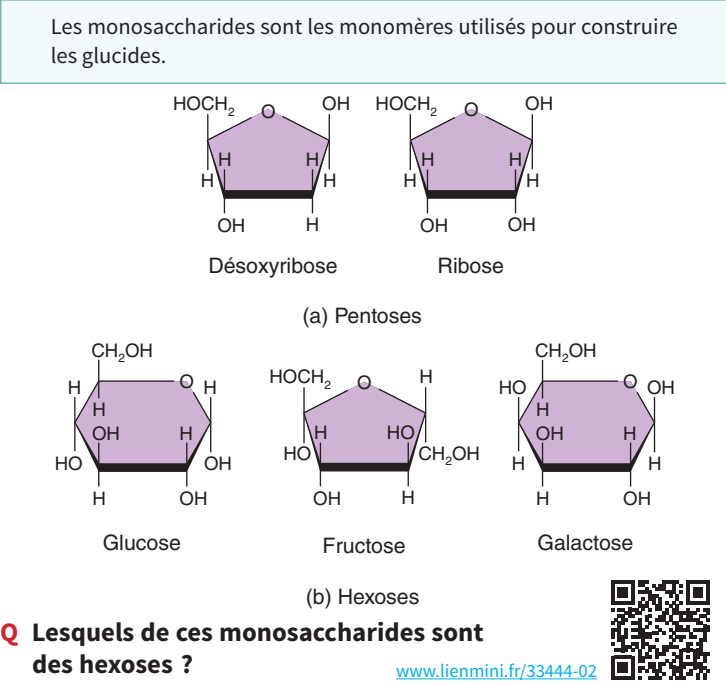
Les sucres, le glycogène, l'amidon et la cellulose sont des **glucides**. Alors même qu'il s'agit d'un grand groupe diversifié de composés organiques aux fonctions diverses, les glucides ne représentent que 2 à 3% de votre masse corporelle. Chez les humains et les animaux, la fonction des glucides est principalement d'être une source d'énergie chimique en générant de l'ATP pour réaliser d'autres réactions métaboliques. Seuls quelques glucides sont utilisés à la construction d'unités de structure. Le désoxyribose en est un exemple, c'est un type de sucre utilisé comme bloc de construction de l'acide désoxyribonucléique (ADN), la molécule qui porte les informations génétiques.

Le carbone, l'hydrogène et l'oxygène sont les éléments constitutifs des glucides. Le ratio de l'hydrogène par rapport à l'oxygène est

la réaction qui unit deux monomères est une réaction de synthèse par déshydratation. Dans ce type de réaction, un atome d'hydrogène est arraché à un monomère tandis qu'un groupe hydroxyle est retiré de l'autre pour former une molécule d'eau (voir Figure 2.15a). Les macromolécules telles que les carbohydrates, les lipides, les protéines et les acides nucléiques sont assemblés au sein des cellules via ces réactions de synthèse par déshydratation.

TABLEAU 2.6 Les principaux groupes de glucides	
TYPES DE GLUCIDES	EXEMPLES
Monosaccharides (Sucres de base constitués de 3 à 7 atomes de carbone)	Glucose (le principal sucre sanguin) Fructose (présent dans les fruits) Galactose (présent dans le lait) Désoxyribose (présent dans l'ADN) Ribose (présent dans l'ARN).
Disaccharides (Sucres de basse formés de la combinaison de deux monosaccharides par une réaction de synthèse par déshydratation)	Sucrose (sucre de table) = glucose + fructose. Lactose (sucre du lait) = glucose + galactose. Maltose = glucose + glucose.
Polysaccharides (Sucres constitués de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de monosaccharides liés entre eux par des réactions de synthèse par déshydratation)	Glycogène (chez les animaux, les hydrates de carbone sont stockés sous la forme de glycogène) Amidon : chez les plantes, les hydrates de carbone sont stockés sous la forme d'amidon. Ce sont les principaux hydrates de carbone de l'alimentation) Cellulose (constituant des parois cellulaires des plantes qui ne peuvent être digérés par les humains mais qui facilitent la progression des aliments dans l'intestin).

FIGURE 2.14 Les monosaccharides. Présentation des formules de structure de quelques monosaccharides.



généralement de 2:1, comme pour la molécule d'eau. Bien qu'il y ait des exceptions, les glucides contiennent généralement une molécule d'eau pour chaque atome de carbone. C'est pour cette raison qu'ils sont aussi appelés des hydrates de carbone. Les trois groupes majeurs de glucides, classés en fonction de leur taille, sont les monosaccharides, disaccharides et les polysaccharides (Tableau 2.6).

Mono et disaccharides : les sucres simples

Les monosaccharides et les disaccharides constituent les **sucres de base**. Les monomères de hydrates de carbone, les **monosaccharides**, sont constitués de trois à sept atomes de carbone. Ils sont désignés par la terminaison « -ose » et un préfixe qui indique le nombre d'atomes de carbone. Par exemple, les monosaccharides avec trois atomes de carbone sont appelés des *trioses* (*tri* = trois). Il y a également des *tétroses* (sucres avec quatre atomes de carbone), les *pentoses* (cinq atomes de carbone), les *hexoses* (six atomes de carbone) et les *heptoses* (sept atomes de carbone). Des exemples de pentoses et d'hexoses sont illustrés dans la Figure 2.14. Toutes les cellules de l'organisme décomposent l'hexose glucose pour produire de l'ATP.

Un **disaccharide** est une molécule formée par la combinaison de deux monosaccharides via une réaction de synthèse par déshydratation (Figure 2.15). Par exemple, les molécules des monosaccharides glucose et fructose se combinent pour former une molécule de disaccharide saccharose (sucre de table), comme démontré au sein de la Figure 2.15a. Le glucose et le fructose sont des isomères. Comme vous l'avez appris plus tôt dans ce chapitre, les isomères ont la même formule de structure, mais les positions relatives des atomes d'hydrogène et de carbone sont différentes, ce qui donne à ces sucres des propriétés chimiques différentes. Notez que la formule du saccharose

est $C_{12}H_{22}O_{11}$, et non pas $C_{12}H_{24}O_{12}$ puisqu'une molécule d'eau est perdue lorsque deux monosaccharides sont reliés entre eux.

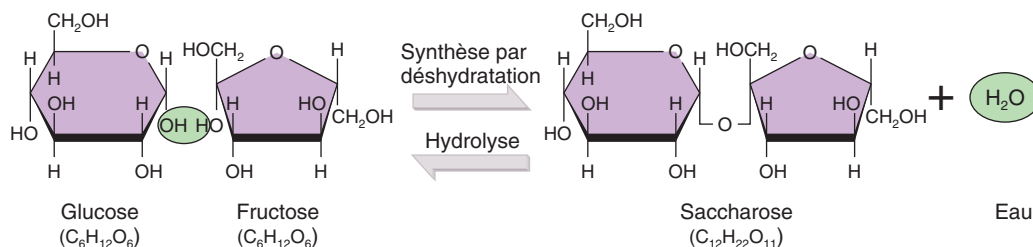
Les disaccharides peuvent également être dissociés en molécules plus simples par hydrolyse. Une molécule de saccharose peut, par exemple, être dissociée en ses composants, glucose et fructose, par l'addition d'une molécule d'eau. La Figure 2.15a illustre également cette réaction.

Polysaccharides

Les **polysaccharides** constituent le troisième groupe de glucides. Chaque molécule de polysaccharides contient des dizaines ou des centaines de monosaccharides liés par des réactions de synthèse par déshydratation. A la différence des sucres de base, les polysaccharides sont habituellement insolubles dans l'eau et n'ont aucun goût sucré. Le **glycogène** est le principal polysaccharide de l'organisme humain, lequel est constitué entièrement de monomères de glucose reliés les uns aux autres par des chaînes ramifiées (Figure 2.16). Une quantité limitée d'hydrates de carbone sont stockés sous la forme de glycogène dans le foie et les muscles striés. L'**amidon** est un polymère de glucose fabriqué par les plantes. Il est présent dans la nourriture au sein des pommes de terre et des pâtes, et est le principal glucide présent dans l'alimentation. Comme les disaccharides, les polysaccharides tels que le glycogène et l'amidon peuvent être dissociés en monosaccharides par des réactions d'hydrolyse. Par exemple, lorsque la glycémie (NdT : le taux de glucose sanguin) diminue, le foie dissocie son glycogène en glucose et le libère dans le sang, le rendant disponible aux cellules de l'organisme, qui l'utilisent pour fabriquer de l'ATP. La **cellulose**, un polysaccharide formé par les plantes à partir du glucose, ne peut être digéré par les humains mais qui constitue le lest qui facilite l'élimination des selles.

FIGURE 2.15 Les disaccharides. (a) Les formules structurales et moléculaires des monosaccharides glucose et fructose et du disaccharide de saccharose. Lors d'une réaction de synthèse par déshydratation (lire de gauche à droite), deux petites molécules, le glucose et le fructose, se combinent pour former une plus grande molécule de saccharose. Notez la perte d'une molécule d'eau. Lors de l'hydrolyse (lire de droite à gauche), l'addition d'une molécule d'eau à la grande molécule de saccharose casse le disaccharide en deux molécules plus petites, le glucose et le fructose. En (b) et (c) sont présentées respectivement les formules structurales des disaccharides lactose et maltose.

Un disaccharide consiste en deux monosaccharides unis par la réaction de synthèse par déshydratation.



(a) Réaction de synthèse par déshydratation et d'hydrolyse du saccharose

Intérêt clinique

Les édulcorants

Certaines personnes utilisent des **édulcorants** de manière à limiter leur consommation de sucres pour des raisons médicales, alors que d'autres font de même pour éviter la prise de calories entraînant la prise de poids. L'aspartame (NutraSweet® et Equal®) la saccharine (Sweet 'N Low®) et le sucralose (Splenda®) sont des exemples d'édulcorants. L'aspartame possède un pouvoir sucrant 200 fois plus important que le saccharose alors qu'il n'apporte pratiquement pas de calories vu les toutes petites quantités nécessaires pour obtenir le même goût sucré. La saccharine présente un pouvoir sucrant pratiquement 400 fois plus important que le saccharose, et le sucralose 600 fois plus que le saccharose. La saccharine et le sucralose n'apportent aucune calorie car ils traversent l'organisme sans y être métabolisés. Les édulcorants sont également utilisés comme substituts au sucre car ils ne sont pas délétères pour la dentition. Dans les faits, des études ont montré que l'usage d'édulcorants dans la nourriture aide à réduire l'incidence des caries dentaires.

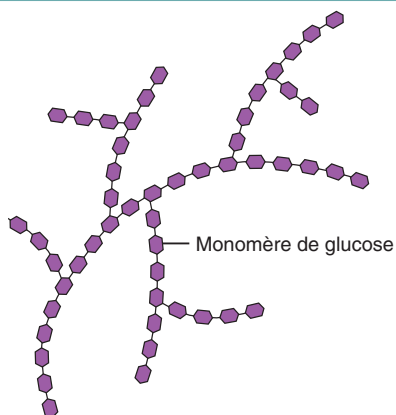
Q Combien y a-t-il d'atomes de carbone dans la molécule de fructose ? Et dans le saccharose ?



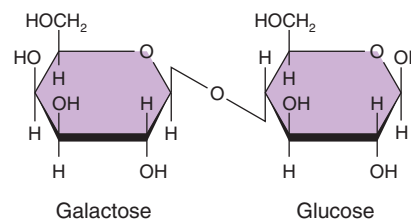
www.lienmini.fr/33444-02

FIGURE 2.16 Fraction d'une molécule de glycogène, le polysaccharide le plus fréquent du corps.

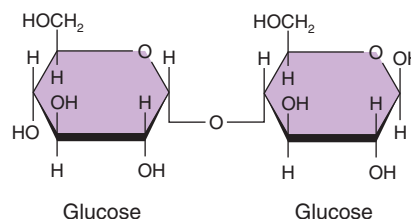
Le glycogène est composé de monomères de glucose et constitue la molécule de stockage des glucides au sein de l'organisme.



Q Quelles cellules du corps stockent du glycogène ?



(b) Lactose



(c) Maltose

Révision

18. Comment sont classés les glucides ?
19. Quelle est la relation entre des réactions d'hydrolyse et de synthèse par déshydratation ?

2.7 Lipides

OBJECTIFS

- **Identifier** les différents types de lipides.
- **Présenter** les fonctions des lipides.

Les **lipides** (lip- = graisse) sont le deuxième groupe important de composés organiques. Les lipides constituent 18 à 25% de la masse corporelle des adultes maigres. Comme les hydrates de carbone, les lipides contiennent du carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène. À l'opposé des hydrates de carbone, ils n'ont pas un ratio de 2:1 d'hydrogène et d'oxygène. Au sein des lipides, la proportion d'atomes d'oxygène électronéga-

TABLEAU 2.7 Les types de lipides du corps	
TYPES DE LIPIDES	FONCTIONS
Acides gras	Utilisés pour synthétiser les triglycérides et phospholipides ou catabolisés pour générer de l'ATP.
Triglycérides (Graisses et huiles)	Protection, isolation et stockage d'énergie.
Phospholipides	Composant lipide majoritaire des membranes cellulaires.
Stéroïdes	
Cholestérol	Composant lipide minoritaire des membranes cellulaires animales ; précurseur des sels biliaires, de la vitamine D et des hormones sexuelles.
Sels biliaires	Nécessaires à la digestion ainsi qu'à l'absorption des lipides alimentaires.
Vitamine D	Participe à la régulation calcique de l'organisme ; indispensable à la croissance et à la réparation osseuse.
Hormones adrénocorticales	Participent à la régulation du métabolisme, la résistance au stress, et à la balance hydro-sodée.
Hormones sexuelles	Stimulent les fonctions reproductives et l'apparition des caractères sexuels.
Eicosanoïdes	Possèdent divers effets en modifiant les réponses hormonales, la coagulation, l'inflammation, l'immunité, la sécrétion acide de l'estomac, le diamètre bronchique, le métabolisme des lipides et la contraction des muscles lisses.
Autres lipides	
Carotènes	Nécessaires à la synthèse de la vitamine A (utilisés pour la synthèse des pigments visuels des yeux) ; sont utilisés comme antioxydants.
Vitamine E	Participe à la cicatrisation des plaies, empêche la cicatrisation des tissus ; contribue à la structure normale et au fonctionnement du système nerveux ; est utilisé comme antioxydant.
Vitamine K	Indispensable à la synthèse des protéines de la coagulation.
Lipoprotéines	Transportent les lipides dans le sang, apportent les triglycérides et le cholestérol aux tissus, retirent du sang l'excès de cholestérol.

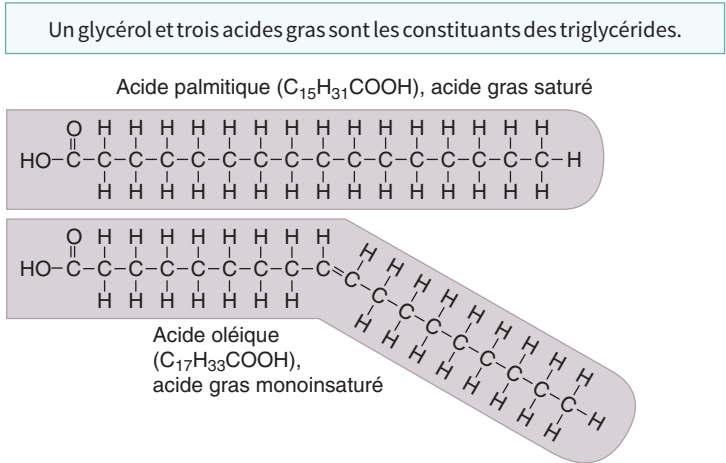
tifs est habituellement moindre qu'au sein des hydrates de carbone, puisqu'ils contiennent moins de liaisons covalentes polaires. Il en résulte que la plupart des lipides sont insolubles dans les solvants polaires tels que l'eau ; ils sont *hydrophobes*. Du fait de cette hydrophobicité, seuls les lipides les plus petits (quelques acides gras) sont à même de se dissoudre dans le plasma sanguin aqueux. Pour être plus solubles dans le plasma sanguin, les autres molécules lipidiques doivent se lier avec des molécules protéiques hydrophiles. Les complexes lipides-protéines résultants sont dénommés **lipoprotéines**. Les lipoprotéines sont solubles car les protéines sont externes tandis que les lipides sont situés à l'intérieur.

La grande famille des lipides inclut les acides gras, les triglycérides (graisses et huiles), les phospholipides (lipides qui contiennent du phosphore), les stéroïdes (lipides qui contiennent des cycles carbonés), les eicosanoïdes (lipides contenant 20 atomes de carbone) ainsi qu'une variété d'autres substances incluant les vitamines liposolubles (vitamines A, D, E et K) et les lipoprotéines. Le **Tableau 2.7** introduit les différents types de lipides et met en évidence leurs rôles au sein du corps humain.

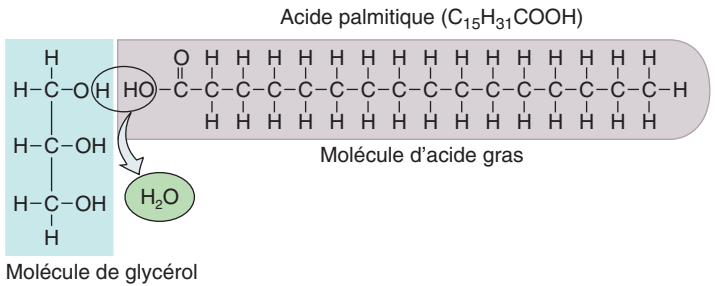
Acides gras

Les **acides gras** sont parmi les lipides les plus simples, ils sont utilisés pour la synthèse des triglycérides et des phospholipides. Les acides gras sont aussi catabolisés pour générer de l'ATP. Un acide gras est constitué d'un groupe hydroxyle et d'une chaîne hydrocarbonée (**Figure 2.17a**).

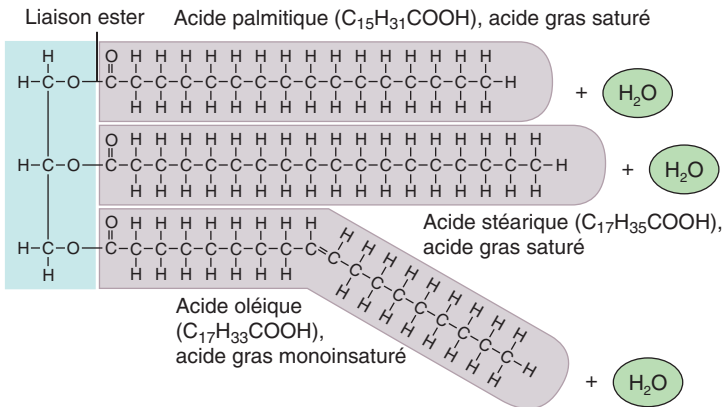
FIGURE 2.17 Structure des acides gras (a) et synthèse des triglycérides. Chaque fois que le glycérol et un acide gras sont reliés lors d'une réaction de synthèse par déshydratation (b), une molécule d'eau est retirée. Comme montré en (c), une molécule de triglycéride qui contient deux acides gras saturés et un acide gras monoinsaturé. La courbure de l'acide oléique est située au niveau de la double liaison.



(a) Structures des acides gras saturés et insaturés



(b) Réaction de synthèse par déshydratation impliquant le glycérol et un acide gras



(c) Molécule de triglycéride (graisse)

Q Est-ce que l'oxygène de la molécule d'eau retirée lors d'une réaction de synthèse par déshydratation provient du glycérol ou de l'acide gras ?

www.lienmini.fr/33444-02



Les acides gras peuvent être soit insaturés ou saturés. Un **acide gras saturé** contient seulement des *liaisons covalentes simples* entre ses atomes de carbone de la chaîne carbonée. Du fait qu'ils ne possèdent pas de double liaison, chaque atome de carbone de la chaîne hydrocarbonée est *saturé en atomes d'hydrogène* (voir, par exemple l'acide palmitique de la **Figure 2.17a**). Un **acide gras insaturé** contient une ou plusieurs *liaisons covalentes doubles* entre les atomes de carbone de la chaîne hydrocarbonée (voir, par exemple l'acide oléique de la **Figure 2.17a**). Un acide gras insaturé est courbé au niveau de sa double liaison. Si un acide gras insaturé n'a qu'une liaison double au niveau de sa chaîne hydrocarbonée, il est monoinsaturé et ne possède qu'une courbure. Si un acide gras insaturé a plus d'une liaison double au niveau de sa chaîne hydrocarbonée, il est polyinsaturé et possède plus d'une courbure.

Triglycérides

Les **triglycérides**, également appelés *triacylglycérols*, (tri- : trois) sont les lipides les plus abondants de votre corps et dans votre alimentation. Un triglycéride est constitué de deux blocs : une molécule de glycérol et

trois molécules d'acides gras. Le **glycérol**, une molécule composée de trois carbones, forme l'ossature du triglycéride (**Figure 2.17b, c**). Les trois acides gras sont fixés par des réactions de synthèse par déshydratation aux trois carbones de la structure du glycérol. La liaison chimique formée via le retrait d'une molécule d'eau est une *liaison ester*. La réaction inverse d'hydrolyse casse une molécule de triglycéride en glycérol et trois acides gras.

Les triglycérides peuvent aussi bien être liquides que solides à température ambiante. Une graisse est un triglycéride qui est solide à température ambiante. Les acides gras de la graisse sont essentiellement saturés. Parce que les acides gras saturés ne possèdent pas de double liaison au sein de leur chaîne hydrocarbonée, ils peuvent facilement se regrouper et se solidifier à température ambiante. Une graisse essentiellement constituée d'acides gras saturés est appelée **graisse saturée**. Alors que la graisse saturée est surtout présente dans la viande (spécialement la viande rouge) et les produits laitiers non écrémés (lait entier, fromage et beurre), on la trouve également dans quelques produits issus de plantes comme le beurre de cacao, l'huile de palme et de noix de coco. Les aliments qui contiennent de

Intérêt clinique

Les graisses et leurs implications dans la santé et les maladies

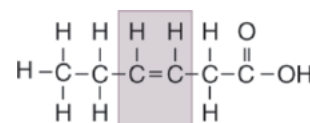
Les graisses saturées entraînent des risques sur la santé si elles sont consommées en grande quantité pendant une longue période. Elles peuvent augmenter la cholestérolémie totale et le LDL cholestérol ou « mauvais cholestérol » et augmenter ainsi le risque de maladie cardiovasculaire et d'attaque cérébrale. Les graisses saturées augmentent également le risque de diabète de type 2 et de cancer. La plupart des graisses saturées proviennent des viandes rouges, des viandes transformées et des produits laitiers à base de lait entier. D'autres proviennent de certains végétaux comme les huiles de palme et noix de coco.

Les graisses insaturées sont présentes dans différentes huiles et aliments et comprennent les graisses mono-insaturées et poly-insaturées. Les graisses mono-insaturées participent à baisser la cholestérolémie totale et à diminuer les niveaux de LDL faisant ainsi baisser le risque de maladies cardiovasculaires et d'attaques cérébrales. Ces graisses permettent également de faire diminuer le risque de diabète de type 2 et de contribuer en vitamine E au régime alimentaire. Parmi les sources de graisses mono-insaturées, on retrouve : l'huile d'olive, l'huile d'arachide, l'huile de canola, les avocats, les noix, les graines de tournesol, le tofu et le soja.

Il existe deux principaux types de graisses poly-insaturées : les oméga 3 et les oméga 6. Il s'agit de deux graisses essentielles car le corps ne peut les fabriquer lui-même et elles doivent être obtenues soit par l'alimentation ou par supplémentation en compléments alimentaires. Les oméga 3 permettent de prévenir les maladies cardiovasculaires et les attaques cérébrales en diminuant la pression artérielle augmentant le taux de HDL et en baissant les triglycérides. Ils participeraient également à réduire le risque d'arythmie. Les principales sources d'oméga 3 sont les poissons gras (saumon, maquereau et sardine), les graines de lin, les noix et les huiles contenant une grande quantité de graisses poly-insaturées. Les oméga 6 protégeraient également contre les maladies cardiovasculaires et le diabète de type 2. Les sources d'oméga 6 sont des aliments plus transformés (céréales, pains et riz blanc), les œufs, les viennoiseries, les abats et les huiles telles que l'huile de carthame, de soja, de noix et de maïs.

L'organisation des atomes d'hydrogène dans les acides gras d'une huile végétale saine est telle que les atomes d'hydrogène de chaque côté

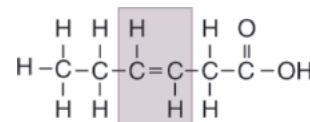
de la double liaison sont du même côté que l'acide gras.



Acide gras-cis

Voir aussi figure 2.17a sur l'acide oléique. Les acides gras de ces huiles sont appelés acide gras-cis. Les aliments contenant ces acides gras font baisser le risque de maladie cardiovasculaires, d'attaque cérébrale et de trouble du rythme cardiaque.

Cependant, lorsque ces acides gras-cis, bons pour la santé, sont chauffés, pressurisés et combinés avec un catalyseur de métal lourd, ils sont transformés en acide gras-trans plus dangereux. Cette réaction est appelée hydrogénation. Les acides gras-trans présentent leurs atomes d'hydrogène de chaque côté de la double liaison du côté opposé à l'acide gras :



Acide gras-trans

Voir aussi la figure 2.17a sur l'acide palmitique. L'hydrogénation est utilisée par les industriels pour rendre les huiles végétales solides à température ambiante et éviter qu'elles ne rancissent. Les acides gras-trans sont retrouvés dans les aliments frits : frites, les beignets, certaines pâtisseries, gâteaux, tartes, margarine, gâteaux secs, fast-food et dans de nombreux autres aliments transformés. Si le label nutritionnel d'un emballage alimentaire précise « huile partiellement hydrogénée », cela signifie que l'aliment contient des acides gras-trans. Parmi les effets néfastes des acides gras-trans, on retrouve : une augmentation de la cholestérolémie totale, une diminution du HDL, une augmentation du LDL et une augmentation des triglycérides. Ces effets qui augmentent le risque de maladie cardiaques et des autres maladies cardiovasculaires sont comparables à ceux causés par les graisses saturées.

grandes quantités de graisse saturée sont associés à des pathologies telles que les maladies cardiaques et le cancer colorectal.

Une **huile** est un triglycéride liquide à température ambiante. Les acides gras de l'huile sont essentiellement insaturés. Souvenez-vous que les acides gras insaturés contiennent une ou plusieurs doubles liaisons au sein de leur chaîne hydrocarbonée. Les courbures présentes au niveau des doubles liaisons empêchent les acides gras insaturés de l'huile de se rassembler et de se solidifier. Les acides gras de l'huile peuvent être monoinsaturés ou polyinsaturés.

Les **graisses monoinsaturées** contiennent des triglycérides qui sont essentiellement des acides gras monoinsaturés. Les huiles d'olive, de cacahuètes, de colza, de la plupart des noix et des avocats sont riches en triglycérides avec des acides gras monoinsaturés.

Les **graisses polyinsaturées** contiennent des triglycérides qui sont essentiellement des acides gras polyinsaturés. Les huiles de maïs, de carthame, de tournesol, de soja et extraite de poissons gras (saumon, thon et maquereau) contiennent de hautes teneurs en acides gras polyinsaturés. Tant les graisses monoinsaturées que les polyinsaturées sont reconnues pour réduire le risque de maladies cardiaques.

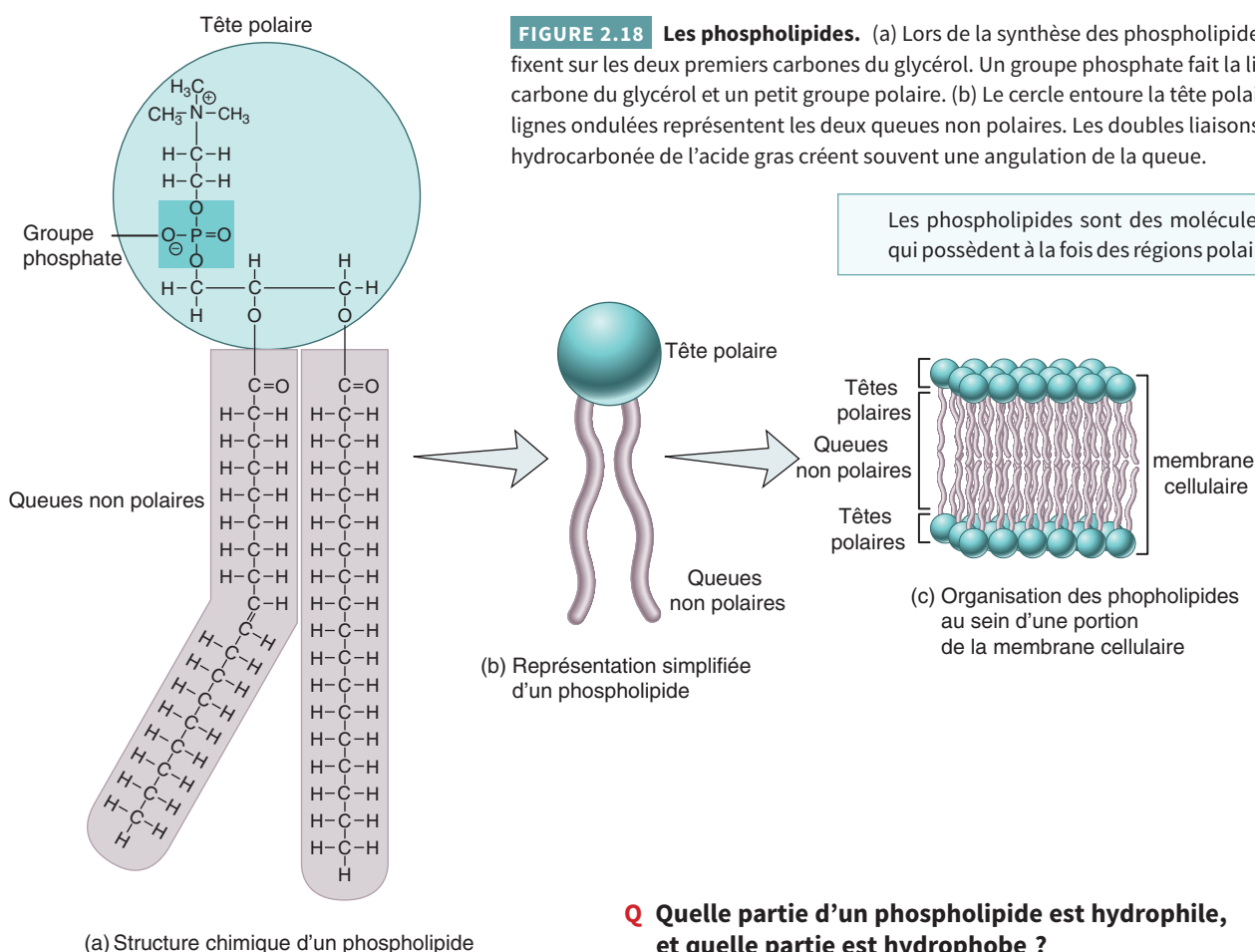
Les triglycérides sont la forme la plus concentrée d'énergie de l'organisme. Ils apportent plus du double d'énergie que les glucides et les protéines. Notre capacité de stocker les triglycérides au sein du tissu adipeux (graisse) est illimitée. Les excès de glucides, de protéines de graisses et d'huiles alimentaires ont tous la même conséquence : ils sont stockés dans les tissus adipeux sous la forme de triglycérides.

Phospholipides

Les **phospholipides** (Figure 2.18) possèdent comme les triglycérides une structure basée sur un glycérol auquel sont fixés deux chaînes d'acides gras sur les deux premiers carbones. Un groupement phosphate (PO_4^{3-}) fixé sur le troisième carbone du glycérol y lie un groupe chargé électriquement et contenant habituellement un atome d'azote (N). Cette partie de la molécule, la tête, est polaire et est capable de former des ponts hydrogène avec des molécules d'eau. À l'opposé, les deux acides gras (les queues) sont non polaires et interagissent avec d'autres lipides. Les molécules qui possèdent à la fois des groupes polaires et non polaires sont des **amphipathiques** (NdT : molécule qui possède à la fois un pôle hydrophile et un pôle hydrophobe). Les phospholipides amphipathiques s'organisent queue à queue en une double rangée qui constitue la plupart de la membrane qui entoure la cellule (Figure 2.18c).

Stéroïdes

La structure des **stéroïdes** est fort différente des glycérides. Les stéroïdes sont constitués de quatre cycles carbonés (couleur orange dans la Figure 2.19). Les cellules de l'organisme synthétisent les stéroïdes à partir du cholestérol (Figure 2.19a), qui a une large région non polaire constituée de quatre cycles carbonés et d'une queue hydrocarbonée. Dans l'organisme, les stéroïdes les plus fréquents tels le cholestérol, les œstrogènes, la testostérone, le cortisol, les sels biliaires et la vitamine D sont des **stérols** parce qu'ils possèdent également au moins un groupe hydroxyle ou alcool

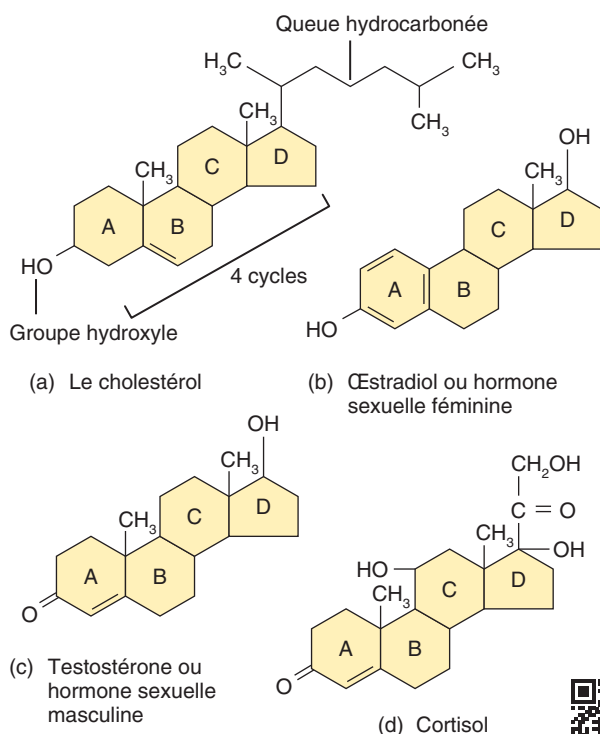


Q Quelle partie d'un phospholipide est hydrophile, et quelle partie est hydrophobe ?



FIGURE 2.19 Les stéroïdes. Tous les stéroïdes possèdent quatre cycles d'atomes de carbone. Les cycles sont désignés par les lettres A, B, C et D.

Le cholestérol, qui est synthétisé dans le foie, constitue le matériel à la base de la synthèse de tous les stéroïdes de l'organisme.



Q En quoi la structure de l'œstradiol est-elle différente de celle de la testostérone ? www.lienmini.fr/33444-02

(—OH). Ce groupe hydroxyle polaire rend les stéroïdes amphipathiques. Le cholestérol est requis pour la structure membranaire ; les œstrogènes et la testostérone sont nécessaires à la régulation des fonctions sexuelles ; le cortisol est indispensable au maintien de la glycémie ; les sels biliaires sont nécessaires à la digestion et à l'absorption des graisses, et la vitamine D est impliquée dans la croissance osseuse. Dans le Chapitre 10, nous verrons que les athlètes utilisent des stéroïdes anabolisants pour augmenter leur masse musculaire, leur force et leur endurance.

Autres lipides

Les **eicosanoïdes** (eicosa : = vingt) sont des lipides qui dérivent d'un acide gras à vingt carbones appelé l'acide arachidonique. Les deux sous-classes principales d'eicosanoïdes sont les **prostaglandines** et les **leucotriènes**. Les prostaglandines possèdent de très nombreuses fonctions. Elles modifient la réponse aux hormones, contribuent aux réponses inflammatoires (Chapitre 22), empêchent les ulcères d'estomac, dilatent les voies respiratoires, régulent la température corporelle, influencent la formation des caillots sanguins pour n'en citer que quelques-unes. Les leucotriènes participent aux réponses allergiques et inflammatoires.

Les autres lipides incluent également les vitamines liposolubles comme les bêta-carotènes (pigments jaune-orange du jaune d'œuf, des carottes et des tomates et qui sont convertis en vitamine A) ; la vitamine D, E et K et les lipoprotéines.

Révision

20. Quelle est l'importance pour l'organisme des triglycérides, phospholipides, stéroïdes, eicosanoïdes et des lipoprotéines ?
21. Faites la distinction entre les graisses saturées, monoinsaturées et polyinsaturées.

2.8 Protéines

OBJECTIFS

- **Identifier** les éléments de base des protéines.
- **Décrire** les rôles fonctionnels des protéines.

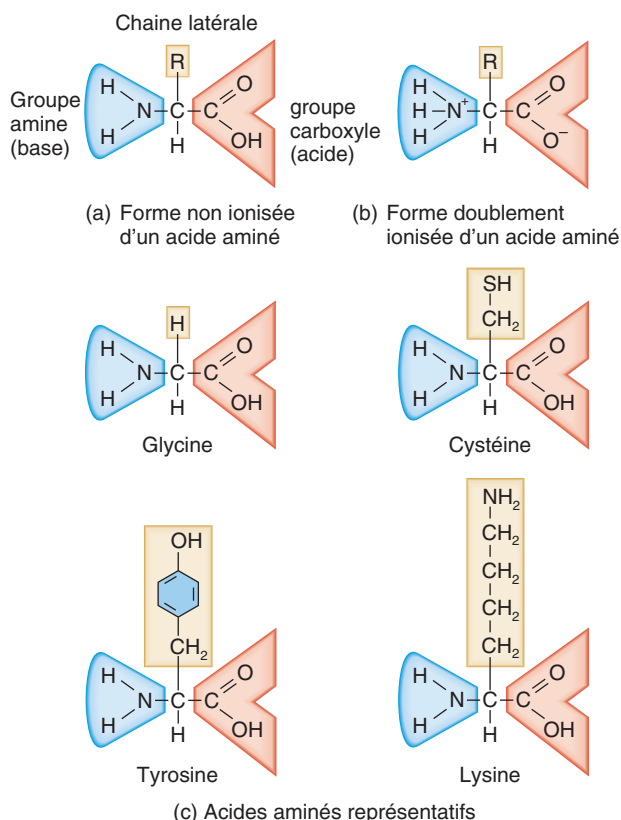
Les **protéines** sont des grandes molécules qui contiennent du carbone, de l'hydrogène, de l'oxygène et de l'azote. Certaines protéines contiennent également du soufre. Le corps d'une personne normale et mince est constitué de 12-18% de protéines. De structures bien plus complexes que les hydrates de carbone et les lipides, les protéines jouent de très nombreux rôles dans l'organisme et sont les principaux responsables de la structure des tissus du corps. Les enzymes sont des protéines qui accélèrent les réactions biochimiques. D'autres protéines sont les « moteurs » de la contraction musculaire.

TABLEAU 2.8 Les types de protéines

TYPES DE PROTÉINES	FONCTIONS
Structure	Forment le réseau structurel de différentes parties du corps. <i>Exemples :</i> le collagène dans les os et les autres tissus conjonctifs, la kératine de la peau des cheveux et des ongles.
Régulatrice	Fonctionnent comme des hormones qui régulent différents processus physiologiques ; contrôlent la croissance et le développement ; comme des neurotransmetteurs qui modifient les réponses du système nerveux. <i>Exemple :</i> L'insuline qui régule le glucose sanguin ; le neurotransmetteur connu comme la substance P (Médie la sensation de douleur dans le système nerveux).
Contractile	Permet le raccourcissement des fibres musculaires, ce qui produit le mouvement. <i>Exemple :</i> Actine, myosine.
Immunologique	Participent à la réponse qui protège le corps des substances étrangères et des pathogènes envahissants. <i>Exemples :</i> interleukines, immunoglobines.
Transport	Transportent les substances vitales dans tout le corps. <i>Exemple :</i> Hémoglobine (transporte la plupart de l'oxygène et une partie du dioxyde de carbone dans le sang).
Catalytique	Agissent comme des enzymes qui régulent les réactions biochimiques. <i>Exemples :</i> Amylase salivaire ; saccharase ; ATPase.

FIGURE 2.20 Les acides aminés. (a) Comme leur nom l'indique, les acides aminés possèdent un groupe amine (surligné en bleu) et un groupe carboxylique (surligné en rouge). La chaîne latérale (groupe R) est différente pour chaque acide aminé. (b) Aux pH proches de 7, tant les groupes amines que carboxyles sont ionisés. (c) La glycine est le plus simple des acides aminés : sa chaîne latérale est un simple atome d'hydrogène. La cystéine est un des deux acides aminés contenant un atome de soufre (S). La chaîne latérale de la tyrosine contient six cycles carbonés. La lysine possède une deuxième groupe amine à l'extrémité de sa chaîne latérale.

Les protéines du corps contiennent 20 acides aminés différents, et chacun d'entre eux est caractérisé par une chaîne latérale différente et unique.

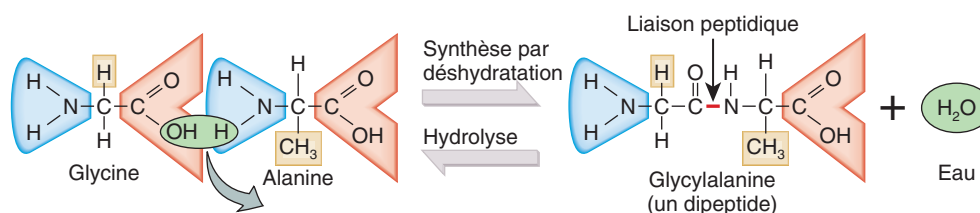


Q Dans un acide aminé, quel est le nombre minimum d'atomes de carbone ? D'atome d'azote ?

FIGURE 2.21 Formation d'une liaison peptidique entre deux acides aminés au cours d'une réaction de synthèse par déshydratation.

Dans cet exemple, la glycine est fixée sur une alanine, formant un dipeptide (lire la réaction de gauche à droite). La rupture de la liaison peptidique se fait par hydrolyse (lire la réaction de droite à gauche).

Les acides aminés sont les monomères utilisés pour la construction des protéines.



Q Quel type de réaction survient lors du catabolisme protéique ?

Les anticorps sont des protéines qui assurent la défense de l'organisme contre son envahissement par les microbes. Certaines hormones qui régulent l'homéostasie sont également des protéines. Le **Tableau 2.8** décrit plusieurs fonctions importantes des protéines.

Acides aminés et polypeptides

Les monomères des protéines sont les **acides aminés**. Chacun des 20 acides aminés différents possède un atome d'hydrogène et trois groupes fonctionnels importants fixés sur l'atome central de carbone (**Figure 2.20a**) : (1) un groupe amine (—NH_2), (2) un groupe acide carboxylique (—COOH) et (3) une chaîne latérale (groupe R). Aux pH normaux des fluides corporels, tant le groupe amine que le groupe carboxyle sont ionisés (**Figure 2.20b**). Les différentes chaînes latérales donnent à chaque acide aminé une identité chimique distinctes (**Figure 2.20c**).

Une protéine est synthétisée par étapes, un deuxième acide aminé est fixé au premier, et ainsi de suite. La **liaison covalente** qui unit chaque paire d'acides aminés est une liaison peptidique. Elle se forme toujours entre le carbone du groupe carboxyle (—COOH) d'un acide aminé et l'azote du groupe amine (—NH_2) de l'autre. Lors de la réalisation cette liaison peptidique, une molécule d'eau libérée (**Figure 2.21**), il s'agit donc bien d'une réaction de synthèse par déshydratation. La rupture de la liaison peptidique, comme cela arrive au cours de la digestion des protéines ingérées, est une réaction d'hydrolyse (**Figure 2.21**).

Lorsque deux acides aminés se combinent, il en résulte un **dipeptide**. L'ajout d'un autre acide aminé à ce dipeptide forme un **tripeptide**. L'addition d'autres acides aminés résulte en la formation d'une **chaîne peptidique** (4-9 acides aminés) ou **polypeptidique** (10 à 2000 acides aminés, voire plus). Les petites protéines peuvent consister en une simple chaîne polypeptidique avec moins de 50 acides aminés. Les protéines plus grandes peuvent être constituées de centaines voire de milliers d'acides aminés et deux voire plus chaînes polypeptidiques repliées ensemble.

Parce que chaque variation dans le nombre ou la séquence d'acides aminés peut produire une protéine différente, il y a une immense variété de protéines possible. Cette situation est similaire à l'utilisation d'un alphabet de 20 lettres pour former des mots. Chaque acide aminé différent est comme une lettre, et leurs différentes combinaisons possibles donnent lieu à une infinité de mots (peptides, polypeptides et protéines).



Niveaux d'organisation structurale des protéines

Les protéines possèdent quatre niveaux d'organisation structurale. La **structure primaire** correspond à la séquence spécifique d'acides aminés liés entre eux par des liaisons peptidiques pour former une chaîne polypeptidique (**Figure 2.22a**). La structure primaire des protéines est génétiquement déterminée, et la moindre variation de cette séquence peut avoir des conséquences dramatiques pour la cellule. Par exemple, la **drépanocytose** (NdT : ou anémie falciforme, une maladie génétique déformant les globules rouges), est une maladie liée à la présence de deux mutations au sein de la protéine transporteuse de l'oxygène et résultant dans le remplacement de la valine, un acide aminé non polaire, par un acide aminé polaire, le glutamate. Cette modification de la séquence en acides aminés réduit la solubilité de l'hémoglobine dans l'eau. Il en résulte que l'hémoglobine altérée a tendance à former des cristaux dans les globules rouges, ce qui les déforme en leur faisant prendre une configuration en faucille. Cette modification de forme les empêche de progresser normalement dans les fins vaisseaux sanguins. Les symptômes et traitements de la drépanocytose seront vu au cours du Chapitre 19.

La **structure secondaire** d'une protéine est bidimensionnelle et représentée par les torsions répétées et les courbures liées au voisinage de certains acides aminés au sein de la chaîne polypeptidique (**Figure 2.22b**). Les deux structures secondaires les plus communes sont les hélices alpha (qui tournent dans le sens des aiguilles d'une montre) et les feuilletts plissés bêta. Les structures secondaires des protéines sont stabilisées par des liaisons hydrogène qui se forment à intervalle réguliers tout au long de la chaîne polypeptidique.

La **structure tertiaire** fait référence à la forme tridimensionnelle des chaînes polypeptidiques. Chaque protéine possède une structure tertiaire unique qui détermine comment elle fonctionne. La structure tertiaire permet parfois aux acides aminés situés aux deux extrémités de la chaîne d'être en voisinage direct (**Figure 2.22c**). Plusieurs types de liaisons contribuent à la structure tertiaire d'une protéine. Les liaisons covalentes, appelées *ponts disulfures* S-S, sont les plus solides mais également les moins communes d'entre-elles, elles sont formées entre les groupes sulfhydryles de deux acides aminés cystéine. Beaucoup de liaisons plus fragiles, telles des liaisons hydrogène, ioniques ainsi que des interactions hydrophobes participent au repliement. Certaines parties de polypeptides sont attirées par l'eau (hydrophiles), alors que d'autres sont repoussées par elle (hydrophobes). Parce que la plupart des protéines de notre corps sont présentes dans un environnement aqueux, le processus de pliage place la plupart des acides aminés possédant une chaîne latérale hydrophobe au centre de la protéine, loin de la surface protéique. Parfois, d'autres molécules appelées *protéines chaperons* assistent le processus de pliage.

Pour les protéines qui contiennent plus d'une chaîne polypeptidique (elles ne sont pas toutes comme cela), la **structure quaternaire** est la manière dont chaque polypeptide se positionne par rapport aux autres (**Figure 2.22d**). Les liaisons qui maintiennent les différentes chaînes polypeptidiques ensemble sont semblables à celles qui sont responsables de la structure tertiaire.

Il y a une très grande variabilité au niveau de la structure des protéines. Des protéines différentes ont des architectures différentes et formes tridimensionnelles différentes. Cette variation de structure et de forme est directement en relation avec leurs diverses fonctions. Dans pratiquement chaque cas, la fonction d'une protéine dépend de son aptitude à reconnaître et à se lier avec une autre molécule. Une hormone

se lie à une protéine spécifique dans le but de modifier sa fonction, et un anticorps se lie à une substance étrangère (un antigène) qui envahit le corps. La forme unique d'une protéine lui permet d'interagir avec d'autres molécules pour réaliser une fonction spécifique.

Sur la base de leurs formes générales, les protéines sont classées en fibreuses et globulaires. Les **protéines fibreuses** sont insolubles dans l'eau et leur chaîne polypeptidique forme de longues bandes parallèles les unes aux autres. Les protéines fibreuses ont de nombreuses fonctions de structure. Il y en a de nombreux exemples tels le collagène (renforce les os, les ligaments, les tendons), l'élastine (responsable de l'élasticité de la peau, des vaisseaux sanguins, et du tissu pulmonaire), la kératine (forme la structure des cheveux et des ongles, et imperméabilise la peau), la dystrophine (renforce la cellule musculaire), la fibrine (forme les caillots sanguins), et l'actine et la myosine (impliquées dans la contraction des cellules musculaires, la division de toutes les cellules et le transport de substances à l'intérieur des cellules). Les **protéines globulaires** sont plus ou moins solubles dans l'eau et leur chaîne polypeptidique est de forme sphérique (globulaire). Les protéines globulaires ont des fonctions métaboliques. Les exemples suivants incluent les *enzymes* qui ont des fonctions catalytiques ; les *anticorps* et les protéines du *complément* qui nous aident à nous protéger contre les maladies ; l'*hémoglobine* qui transporte l'oxygène ; les *lipoprotéines* qui transportent les lipides et le cholestérol ; l'*albumine* qui participe à la régulation du pH sanguin ; les *protéines membranaires* qui transportent des substances dans et hors des cellules ; et certaines *hormones* telle l'*insuline* qui régule la quantité de sucre dans le sang.

Les mécanismes homéostatiques maintiennent la température et la composition chimique des fluides corporels, ce qui permet aux protéines corporelles de maintenir leurs formes tridimensionnelles spécifiques. Lorsqu'une protéine se trouve dans un environnement inadéquat, elle peut être altérée et perdre ses caractéristiques de formes (structures secondaire, tertiaire et quaternaire). Ce processus s'appelle la **dénaturation**. Les protéines dénaturées perdent leurs capacités fonctionnelles. Parfois la dénaturation peut être réversible, les œufs frais est un exemple commun de dénaturation permanente. Dans l'œuf cru, la protéine du blanc de l'œuf (l'albumine) est un fluide clair et visqueux. Lorsque de la chaleur est appliquée à l'œuf, la protéine se dénature, devient insoluble et blanche opaque.

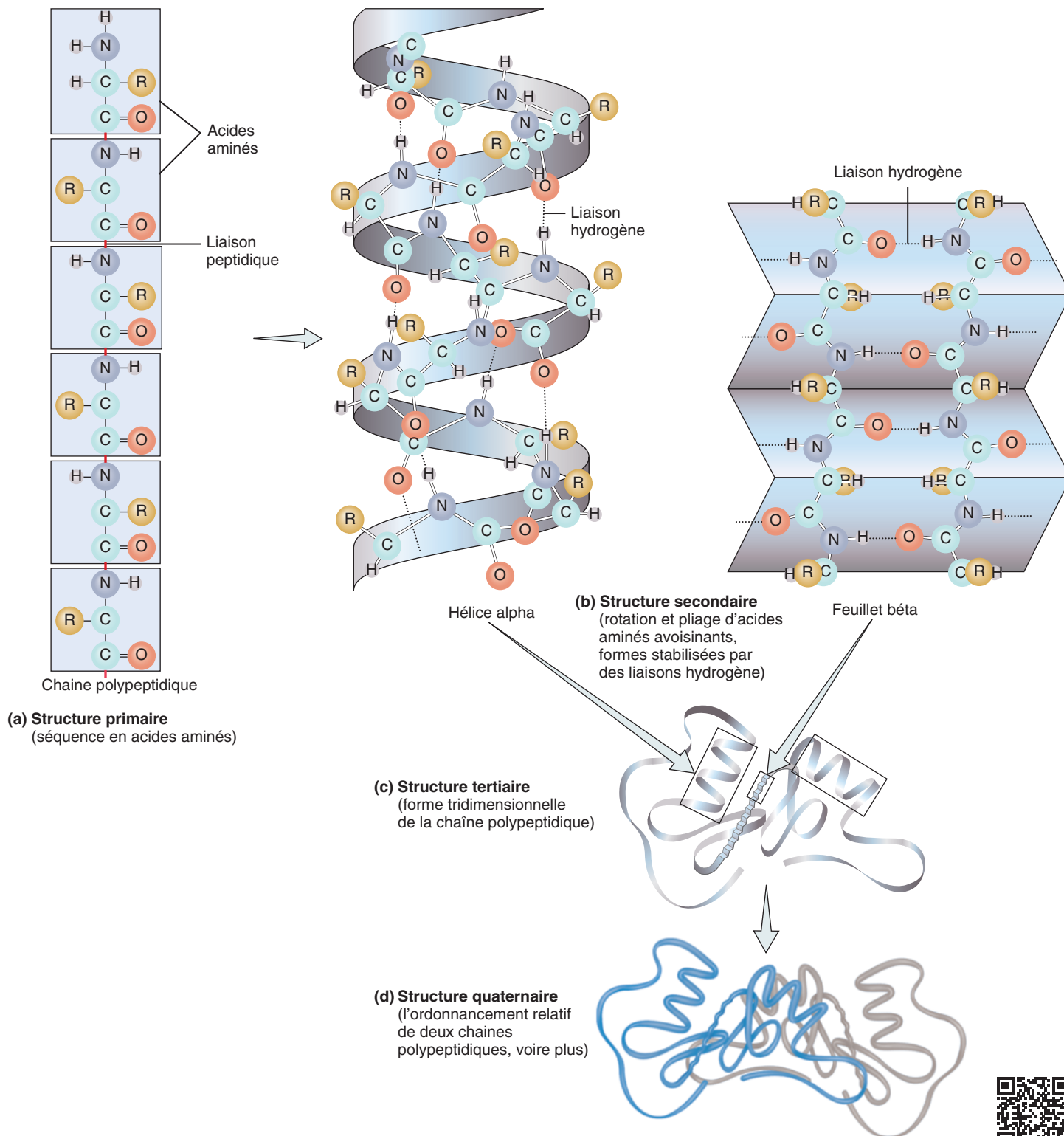
Enzymes

Dans les cellules vivantes, la plus grande majorité des catalyseurs sont des molécules protéiques appelées **enzymes**. Certains enzymes sont constitués de deux parties, une partie protéique appelée l'**apoenzyme**, et une partie non protéique, appelé **cofacteur**. Le cofacteur peut être un ion métallique (tel que du fer, du magnésium, du zinc ou du calcium) ou une molécule organique appelée *coenzyme*. Les coenzymes sont souvent dérivés des vitamines. Les noms des enzymes se terminent généralement par le suffixe *-ase*. Tous les enzymes peuvent être groupés en fonction du type de réactions chimiques qu'ils catalysent. Par exemples, les *oxydases* ajoutent de l'oxygène, les *kinases* des phosphates, les *déshydrogénases* enlèvent un hydrogène, les *ATPases* coupent l'ATP, les *anhydrases* retirent de l'eau, les *protéases* coupent les protéines, et les *lipases* cassent les triglycérides.

Les enzymes catalysent des réactions spécifiques. Ils le font très efficacement et sont très contrôlés. Voici trois propriétés importantes des enzymes :

FIGURE 2.22 Niveaux d'organisation structurale des protéines. (a) La structure primaire correspond à la séquence d'acides aminés du polypeptide. (b) Les structures secondaires communes incluent les hélices alpha et les feuillets bêta. Par simplification, les groupes d'acides aminés ne sont pas représentés ici. (c) La structure tertiaire correspond au motif de pliage global qui produit une forme tridimensionnelle spécifique. (d) La structure quaternaire d'une protéine correspond à l'ordonnancement relatif de deux chaînes polypeptidiques, voire plus.

La forme unique de chaque protéine lui permet de remplir une fonction spécifique.



Q Est-ce que toutes les protéines ont une structure quaternaire ?



2.9 Acides nucléiques

OBJECTIFS

- Faire la **distinction** entre ADN et ARN.
- **Décrire** les composants d'un nucléotide.

Les **acides nucléiques**, nommé ainsi parce qu'ils ont d'abord été découverts dans les noyaux des cellules, sont des molécules organiques importantes qui contiennent du carbone, de l'hydrogène, de l'oxygène, de l'azote et du phosphore. Il y a deux variétés d'acides nucléiques. La première, l'**acide désoxyribonucléique (ADN)**, forme le matériel génétique héritable à l'intérieur de chaque cellule humaine. Chez l'Homme, chaque **gène** est un segment de la molécule d'ADN. Nos gènes définissent les caractéristiques que nous héritons, et par le contrôle de la synthèse protéique, ils régulent la plupart des activités qui ont lieu à l'intérieur de nos cellules tout au long de notre vie. Lorsqu'une cellule se divise, ces informations héréditaires sont transmises à la génération de cellules suivantes. L'**acide ribonucléique (ARN)**, le second type d'acides nucléiques, relaient les informations des gènes pour guider la synthèse des protéines à partir des acides aminés.

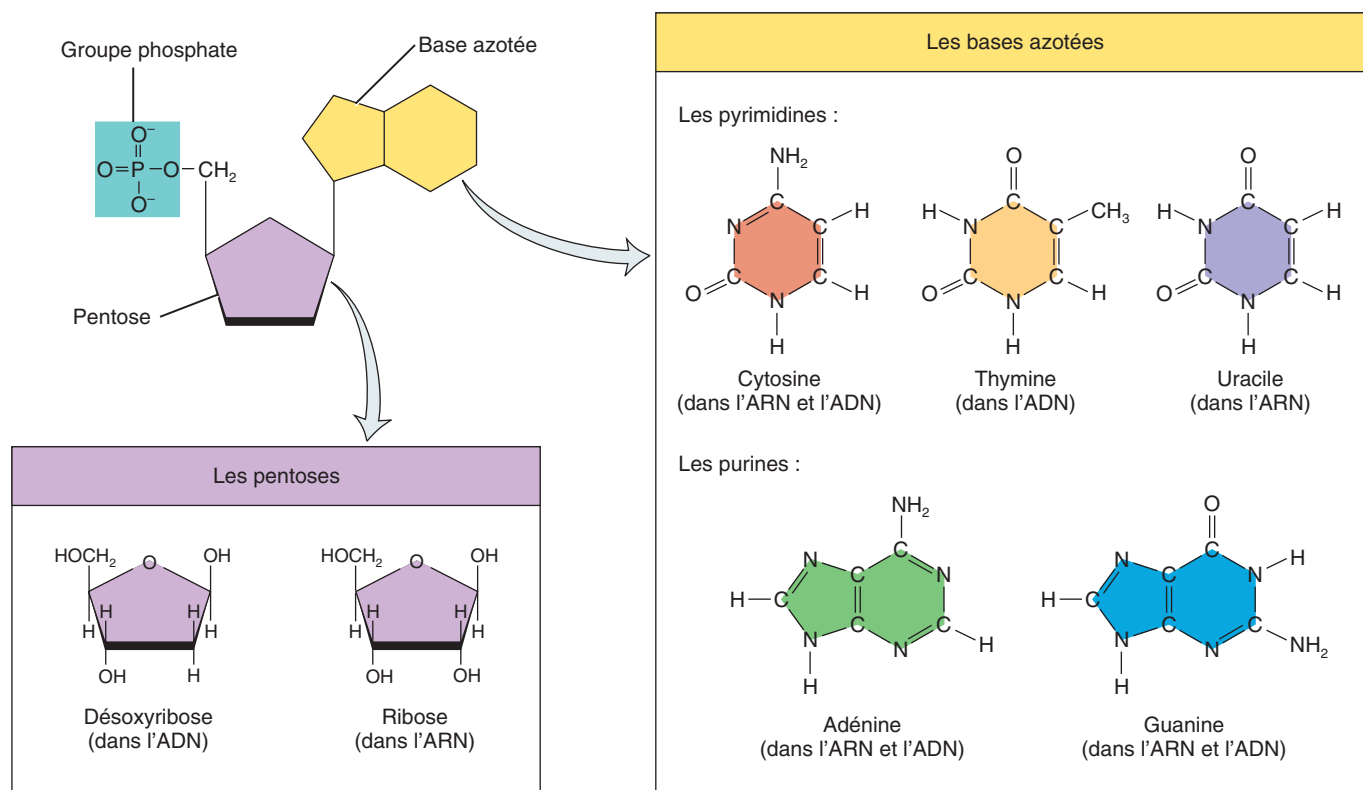
Un acide nucléique est une chaîne de monomères appelés **nucléotides**. Chaque nucléotide de l'ADN est constitué de trois parties (**Figure 2.24**):

1. **Base azotée.** L'ADN contient quatre bases azotées différentes, qui contiennent des atomes de C, d'H, d'O et d'N. Dans l'ADN, les quatre **bases azotées** sont l'adénine (A), la thymine (T), la cytosine (C) et la guanine (G). L'adénine et la guanine sont plus grosses et constituées de deux cycles, et sont appelées des **purines** ; la cytosine et la thymine (G) sont des bases plus petites et constituées d'un cycle, et sont des **pyrimidines**. Les nucléotides sont nommés en fonction de la base présente. Par exemple, un nucléotide contenant de la thymine est appelé un nucléotide thymine ; un nucléotide contenant l'adénine est appelé nucléotide adénine, etc...
2. **Pentose.** Un sucre à cinq carbone appelé **désoxyribose** fixe chaque base dans l'ADN.
3. **Groupe phosphate.** Les groupes phosphates (PO_4^{3-}) alternent avec les pentoses pour former l'ossature de l'échelle d'ADN ; les bases étant projetées à l'intérieur de cette ossature (**Figure 2.25**).

En 1953, l'anglais F.H.C. Crick et le jeune scientifique américain J.D. Watson publient un petit papier décrivant comment ces trois composants pourraient être associés au niveau de l'ADN. Leurs compréhensions des données recueillies par d'autres les ont conduits à construire un modèle si élégant et si simple que le monde scientifique

FIGURE 2.24 Composants d'un nucléotide. Présentation d'un nucléotide de l'ADN.

Les nucléotides sont les unités répétitives de l'ADN. Chaque nucléotide est constitué d'une base azotée, d'un pentose et d'un groupe phosphate.



Q Quelles bases azotées sont présentes dans l'ADN ? Et dans l'ARN ?

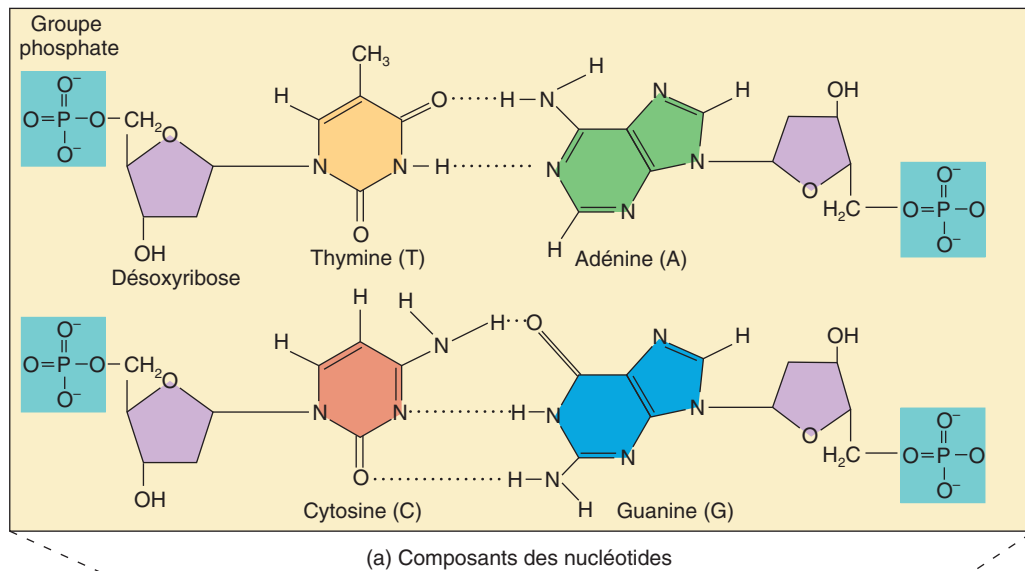


a reconnu immédiatement qu'il était correct. Dans le modèle de **double hélice** de Crick et Watson, l'ADN est assemblé en une double échelle spiralée (**Figure 2.25**). Deux rangées alternant les groupes phosphate et les désoxyriboses forment les montants de l'échelle. Les paires de bases maintenues ensemble par des liaisons hydrogène en

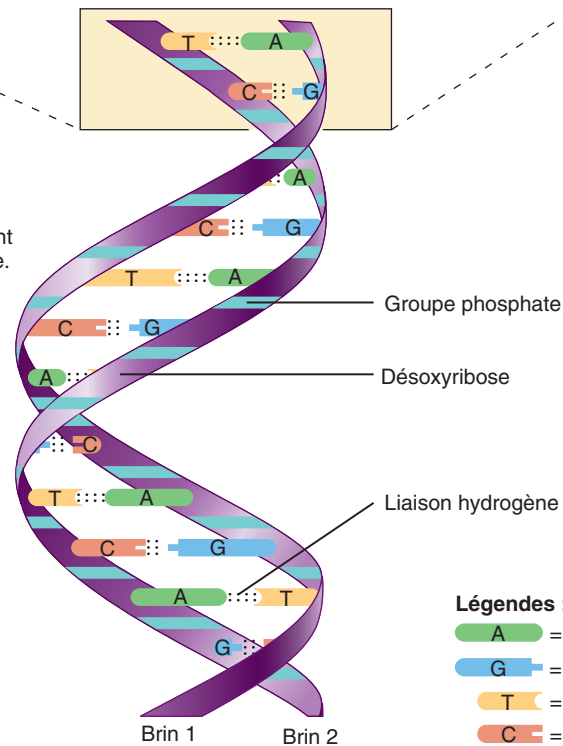
forme les échelons. Et parce que l'adénine s'apparie toujours avec une thymine et la cytosine avec une guanine, si vous connaissez la séquence de bases d'un des brins de l'ADN, vous pouvez prédire la séquence du brin complémentaire. Chaque fois que l'ADN est copié, notamment lorsque les cellules vivantes se divisent pour augmenter

FIGURE 2.25 Molécule d'ADN. L'ADN est construite sous la forme d'une double hélice. Les bases appariées sont projetées vers l'intérieur de la double hélice. La structure de la double hélice est stabilisée par des liaisons hydrogène (lignes pointillées) entre chaque paire de bases.

L'ADN constitue le matériel génétique héritable de chaque cellule humaine.



- L'ADN est constitué de deux brins s'enroulant l'un sur l'autre pour former une double hélice.
- Chaque échelon est constitué de deux nucléotides liés l'un à l'autre.
- Chaque nucléotide est constitué d'un désoxyribose lié à un groupe phosphate et à une des 4 bases azotées :
A = Adénine, G = Guanine,
T = Thymine, C = Cytosine.
- Les bases azotées sont appariées par deux par l'intermédiaire de ponts hydrogène, ce qui forme les échelons de la double hélice.
- L'adénine s'apparie avec la thymine et la guanine avec la cytosine.



Légendes :

A = Adénine
G = Guanine
T = Thymine
C = Cytosine



TABLE 2.9 Comparaison de l'ADN et de l'ARN

CARACTÉRISTIQUES	ADN	ARN
Bases azotées	A = Adénine, G = Guanine, C = Cytosine, T = Thymine.*	A = Adénine, G = Guanine, C = Cytosine, U = Uracile.
Sucre des nucléotides	Désoxyribose.	Ribose.
Nombre de brins	Deux (double-hélice, telle une échelle enroulée sur elle-même).	Un.
Appariement des bases azotées (nombre de liaisons hydrogène)	A avec T (2), G avec C (3).	A avec U (2), G avec C (3).
Comment est-il copié ?	Auto-réplcatif	Produit par copiage de l'ADN
Fonction	Encode l'information pour produire les protéines.	Transporte le code génétique et participe à la fabrication des protéines.
Types	Nucléaire et mitochondrial.†	ARN messenger (ARNm), ARN ribosomal (ARNr) et ARN de transfert (ARNt).‡

* Les lettres et mots en bleu mettent en évidence les différences entre l'ADN et l'ARN.
† Le noyau et les mitochondries sont des organites cellulaires, qui seront présentés au cours du Chapitre 3.
‡ Ces ARNs participent au processus de synthèse protéique, qui sera également présenté au cours du Chapitre 3.

leur nombre, les deux brins se désunissent. Chaque brin sert de modèle ou de moule pour construire un nouveau brin complémentaire. Toute modification qui surviendrait dans la séquence de bases d'un brin d'ADN est appelée une *mutation*. Certaines mutations peuvent induire la mort cellulaire, un cancer ou produire un défaut génétique pour les générations futures.

L'ARN, la deuxième variété d'acides nucléiques, diffère de l'ADN par différents aspects. Chez l'Homme, l'ARN est simple brin. Le sucre présent dans les nucléotides de l'ARN est le **ribose**, et l'ARN contient la base pyrimidique uracile (U) plutôt que la thymine. Les cellules contiennent trois différents types d'ARN : l'ARN messenger, l'ARN ribosomal et l'ARN de transfert. Chacun a un rôle spécifique à remplir pour exporter les instructions codées dans l'ADN (Figure 3.29). Un résumé des différences majeures entre l'ADN et l'ARN est présenté au sein du **Tableau 2.9**.

Intérêt clinique

L'empreinte génétique

Une technique appelée l'**empreinte génétique** est utilisée en recherche et en justice pour certifier si l'ADN d'une personne correspond à l'ADN obtenu à partir d'échantillons ou de pièces à conviction telles que des tâches de sang ou des cheveux. Pour chaque personne, certains fragments d'ADN contiennent des séquences répétées plusieurs fois. Tant le nombre de copies répétées dans une région que le nombre de régions sujettes à des répétitions sont différents d'une personne à l'autre. L'empreinte génétique peut être réalisée à partir de quantités infimes d'ADN, par exemple à partir brin de cheveux, une goutte de sperme ou une tâche de sang. Cela peut également être utilisé pour identifier la victime d'un crime ou les parents biologiques d'un enfant, et même pour déterminer si deux personnes possèdent un ancêtre commun.

Révision

- 25. Comment diffèrent l'ADN et l'ARN ?
- 26. Qu'est-ce qu'une base azotée ?

2.10 Adénosine triphosphate

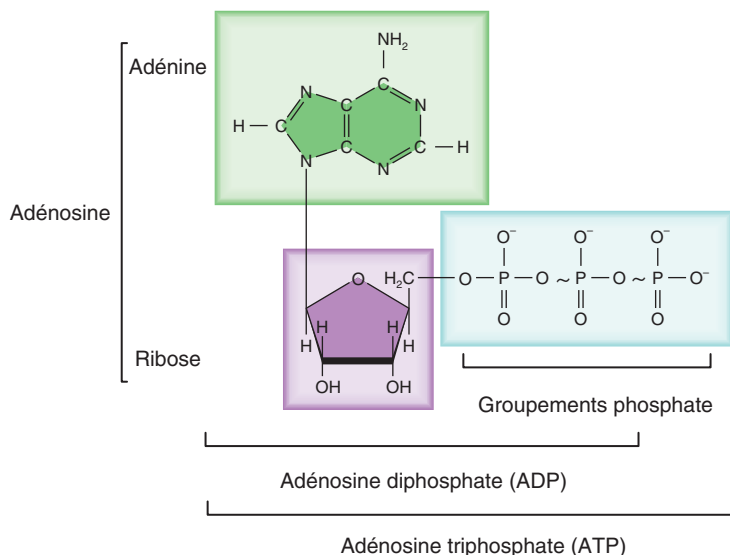
OBJECTIF

- **Décrire** la fonction de l'adénosine triphosphate.

L'**adénosine triphosphate (ATP)** est la monnaie d'échange énergétique des systèmes vivants (**Figure 2.26**). L'ATP transfère l'énergie libérée au cours de réactions cataboliques exothermiques pour permettre des activités cellulaires qui nécessitent de l'énergie (réactions endothermiques). Nous retrouvons parmi ces activités cellulaires, les contractions musculaires, les mouvements des chromosomes durant la division cellulaire, le mouvement de structures au sein de la cellule, le transport de substances au travers de la membrane cellulaire et la synthèse de grosses molécules à partir de plus petites. Comme son nom l'indique, l'ATP est constituée de trois groupes phosphates attachés à l'adénosine, une unité composée de l'adénine et du ribose. Lorsqu'une molécule d'eau est ajoutée à l'ATP, le troisième groupement phosphate (PO_4^{3-}), symbolisé par **P** au cours de la discussion qui suit, est retiré et l'ensemble de la réaction libère de l'énergie. L'enzyme qui catalyse l'hydrolyse de l'ATP est une ATPase. Le retrait

FIGURE 2.26 Structures de l'ATP et de l'ADP. Les ondes (~) indiquent les deux liaisons phosphate qui sont utilisées pour transférer de l'énergie. Le transfert d'énergie implique normalement l'hydrolyse de la dernière liaison de l'ATP.

L'ATP transfère l'énergie chimique pour permettre les activités cellulaires.

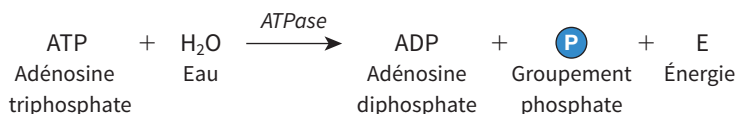


Q Citez quelques activités cellulaires dépendantes de l'énergie apportée par l'ATP ?

www.lienmini.fr/33444-02

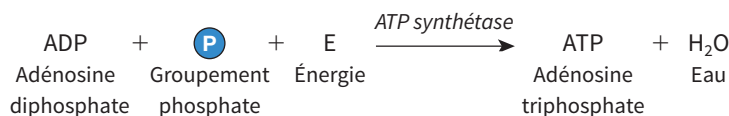


du troisième groupe phosphate produit une molécule appelée **adénosine diphosphate (ADP)** au cours de la réaction suivante :



Comme décrit précédemment, l'énergie apportée par le catabolisme de l'ATP en ADP est continuellement utilisée par la cellule. Comme

l'apport d'ATP à un moment donné est limité, il existe un mécanisme pour le renouveler : l'enzyme *ATP synthétase* catalyse l'addition d'un groupement phosphate sur l'ADP via la réaction suivante :



Où est-ce que la cellule trouve l'énergie pour produire l'ATP ? L'énergie nécessaire pour attacher un groupement phosphate à l'ADP est fournie principalement par le catabolisme du glucose au cours d'un processus appelé la respiration cellulaire. La respiration cellulaire a deux phases : anaérobie et aérobie :

- 1. Phase anaérobie.** Lors d'une série de réactions qui ne requièrent pas d'oxygène, le glucose est partiellement décomposé par une série de réactions cataboliques jusqu'à obtenir de l'acide pyruvique. Chaque molécule de glucose qui est convertie en une molécule d'acide pyruvique produit deux molécules d'ATP.
- 2. Phase aérobie.** En présence d'oxygène, le glucose est complètement décomposé en dioxyde de carbone et en eau. Ces réactions produisent de la chaleur et 30 ou 32 molécules d'ATP.

Les Chapitres 10 et 25 couvrent les détails de la respiration cellulaire.

Au cours du Chapitre 1, vous avez appris que le corps humain comprend plusieurs niveaux d'organisations ; ce chapitre vous a simplement montré que l'alphabet des atomes et des molécules est la base du langage du corps. Maintenant que vous avez compris la chimie du corps humain, vous êtes prêt à former des mots ; au sein du Chapitre 3, vous verrez comment les atomes et molécules sont organisés pour former les structures cellulaires et réaliser les activités nécessaires au maintien de l'homéostasie.

Révision

- 27.** Au cours de la réaction catalysée par l'ATP synthétase, quels sont les substrats et réactifs produits ? Est-ce une réaction exothermique ou endothermique ?

Résumé du chapitre

2.1 Organisation de la matière

1. La chimie est la science qui étudie la structure et les interactions de la matière.
2. Toutes les formes de matière sont composées d'éléments chimiques.
3. L'oxygène, le carbone, l'hydrogène et l'azote constituent 96% de la masse corporelle.
4. Chaque élément est composé de petites unités appelées atomes. Les atomes sont constitués d'un noyau qui contient les protons et les neutrons, et d'électrons qui circulent autour du noyau au sein de zones définies et appelées les couches électroniques.
5. Le nombre de protons (= le nombre atomique) est spécifique des atomes d'un élément et le distingue des atomes d'un autre élément.
6. Le nombre de masse d'un atome correspond à la somme de ses protons et de ses neutrons.

7. Les différents atomes d'un seul élément qui ont le même nombre de protons mais des nombres de neutrons différents sont des isotopes. Les isotopes radioactifs sont instables et se désintègrent.
8. La masse atomique d'un élément est la masse moyenne de tous les isotopes naturels de cet élément.
9. Un atome qui donne ou qui gagne des électrons devient un ion, c'est-à-dire un atome caractérisé par une charge positive ou négative du fait d'un nombre inégal de protons et d'électrons. Les ions chargés positivement sont des cations, les ions chargés négativement sont des anions.
10. Lorsque deux atomes partagent des électrons, une molécule se forme. Les composés contiennent des atomes de deux éléments ou plus.
11. Un radical libre est un atome ou un groupe d'atomes avec un électron non apparié sur sa couche externe. Le superoxyde en est un exemple commun, c'est un anion formé par l'addition d'un électron à une molécule d'oxygène.

2.2 Liaisons chimiques

1. Les liaisons chimiques sont des forces d'attraction liant les atomes ensemble.
2. La plupart des atomes deviennent stables lorsqu'ils possèdent huit électrons sur leur couche électronique la plus externe.
3. Lorsqu'une force d'attraction entre des ions de charges opposées les maintient ensemble, une liaison ionique se forme.
4. Dans une liaison covalente, les atomes partagent des paires d'électrons de valence. Les liaisons covalentes peuvent être simples, double ou triple, et être polaires ou apolaires.
5. Un atome d'hydrogène qui forme une liaison covalente polaire avec un atome d'oxygène ou d'azote, peut également réaliser une liaison plus fragile, appelée pont hydrogène, avec un atome électronégatif. La liaison polaire covalent induit sur l'atome d'hydrogène une charge positive partielle (δ^+) qui attire la charge négative partielle (δ^-) des atomes électronégatifs voisins, souvent l'oxygène ou l'azote.

2.3 Réactions chimiques

1. Lorsque des atomes se combinent ou se dissocient d'autres atomes, une réaction chimique survient. Les substances de départ sont les réactifs, et les substances finales les produits de la réaction.
2. L'énergie, ou capacité à réaliser un travail, a deux formes principales : l'énergie potentielle (stockée) et l'énergie cinétique (énergie du mouvement).
3. Les réactions endergoniques requièrent de l'énergie, les exergoniques en libèrent. L'ATP couple les réactions endergoniques et exergoniques.
4. L'énergie d'activation correspond à l'investissement énergétique initial nécessaire pour démarrer une réaction chimique. Les réactions se produisent bien plus facilement lorsque les concentrations et la température des réactifs sont plus élevées.
5. Les catalyseurs accélèrent les réactions chimiques en réduisant l'énergie d'activation nécessaire. La plupart des catalyseurs des organismes vivants sont des protéines appelées enzymes.
6. Les réactions de synthèse impliquent la combinaison de réactifs pour produire des molécules plus grandes. Ces réactions sont anaboliques et communément endergoniques.
7. Au cours des réactions de décomposition, une substance est dissociée en des molécules plus petites. Ces réactions sont cataboliques et généralement exergoniques.
8. Les réactions d'échange impliquent le remplacement d'un ou plusieurs atomes par un autre ou plusieurs autres atomes.
9. Dans les réactions réversibles, les produits de la réaction peuvent revenir vers les réactifs originaux de la réaction.

2.4 Composés inorganiques et solutions

1. Les composés inorganiques sont petits et ne contiennent généralement pas de carbone. Les composés organiques contiennent toujours du carbone, contiennent généralement de l'hydrogène et possèdent toujours des liaisons covalentes.
2. L'eau est la substance la plus abondante du corps. C'est un excellent solvant et milieu de suspension, elle participe aux réactions d'hydrolyse et de synthèse par déshydratation, et sert de lubrifiant. A cause de ces nombreux ponts hydrogène, les molécules d'eau ont une grande cohésion, ce qui induit une importante tension de surface. L'eau a également une grande capacité d'absorption de chaleur ainsi qu'une température de vaporisation élevée.
3. Les acides inorganiques, les bases et les sels se dissocient en ions dans l'eau. Un acide s'ionise en ions hydrogène (H^+) et en un anion, et est un donneur de protons ; de nombreuses bases s'ionisent en cations et en ions hy-

droxyde (OH^-), et toutes sont des accepteurs de protons. Un sel ne s'ionise jamais en H^+ ni en OH^- .

4. Les mélanges sont des combinaisons d'éléments ou de composés qui sont physiquement mélangés ensemble mais ne sont pas attachés par des liaisons chimiques. Les solutions, colloïdes et suspensions sont des mélanges aux propriétés différentes.
5. Les deux manières d'exprimer la concentration d'une solution sont le *pourcentage* (masse par volume), exprimée en grammes par 100 ml d'une solution, et la *molarité*, exprimée en moles par litre. Une mole (abréviée mol) correspond à la quantité en grammes de toute substance qui a une masse égale à la masse atomique combinée de tous ces atomes.
6. Le pH des fluides corporels doit rester pratiquement constant pour permettre au corps de maintenir son homéostasie. Sur l'échelle du pH, la valeur 7 représente la neutralité. Les solutions acides ont des valeurs de pH inférieures à 7, tandis que les solutions alcalines ont des valeurs de pH supérieures à 7. Le pH normal du sang est situé entre 7,35 et 7,45.
7. Les systèmes tampon captent ou libèrent des protons (H^+) pour aider à maintenir l'homéostasie du pH.
8. Le système tampon acide carbonique - bicarbonate est important. L'ion bicarbonate (HCO_3^-) agit comme une base faible et extrait l'excès de H^+ , tandis que l'acide carbonique (H_2CO_3) agit comme un acide faible et libère du H^+ .

2.5 Vue d'ensemble des composés organiques

1. Le carbone avec ses quatre électrons de valence, se lie de manière covalente avec d'autres atomes de carbone pour former des grandes molécules de nombreuses formes différentes. Les groupes fonctionnels fixés sur le squelette carboné des molécules organiques leur confèrent des propriétés chimiques différentes.
2. Les petites molécules organiques se fixent ensemble pour former de grandes molécules via des réactions de synthèse par déshydratation au cours desquelles une molécule d'eau est retirée. Lors du processus inverse, appelé hydrolyse, les grandes molécules sont scindées en des molécules plus petites via l'addition d'eau.

2.6 Glucides

1. Les glucides incluent les monosaccharides, les disaccharides et les polysaccharides.
2. Les glucides fournissent la plupart de l'énergie chimique nécessaire à la production d'ATP.

2.7 Lipides

1. Les lipides sont un groupe de composés divers qui inclut les acides gras, les triglycérides (graisses et huiles), les phospholipides, les stéroïdes et les eicosanoïdes.
2. Les acides gras sont les lipides les plus simples ; ils sont utilisés pour synthétiser les triglycérides et les phospholipides.
3. Les triglycérides protègent, isolent et fournissent de l'énergie.
4. Les phospholipides sont des composants importants des membranes cellulaires.
5. Les stéroïdes sont importants pour la structure de la membrane cellulaire, ils régulent les fonctions sexuelles, maintiennent une glycémie normale, participent à la digestion et à l'absorption des lipides, et aident à la croissance osseuse.
6. Les eicosanoïdes (prostaglandines et leucotriènes) modifient les réponses hormonales, contribuent à l'inflammation, dilatent les voies aériennes, et régulent la température corporelle.

2.8 Protéines

1. Les protéines sont construites à partir d'acides aminés.
2. Les protéines donnent la structure du corps, régulent les processus, procurent la protection, participent à la contraction des muscles, transportent des substances et servent d'enzymes.
3. Les niveaux d'organisation structurelle des protéines sont primaires, secondaires, tertiaires et (parfois) quaternaires. Les variations de la structure et de la forme des protéines sont en relation avec leurs fonctions diverses.

2.9 Acides nucléiques

1. L'acide désoxyribonucléique (ADN) et l'acide ribonucléique (ARN) sont des acides nucléiques composés de bases azotées, de sucres à cinq carbone

(pentose) et de groupements phosphate.

2. L'ADN est une double hélice et est le principal produit chimique des gènes. L'ARN prend part à la synthèse des protéines.

2.10 Adénosine triphosphate

1. L'adénosine triphosphate (ATP) est la principale molécule responsable du transfert d'énergie dans les systèmes vivants.
2. Lorsque l'ATP transfère de l'énergie à une réaction endothermique, il est décomposé en adénosine diphosphate (ADP) et un phosphate inorganique.
3. L'ATP est synthétisée à partir de l'ADP et d'un phosphate inorganique en utilisant de l'énergie fournie par différentes réactions de décomposition, particulièrement celles du glucose.

Questions de réflexion

1. Votre meilleur ami a décidé de faire frire ses œufs du déjeuner dans de la margarine plutôt que dans du beurre parce qu'il a entendu que manger du beurre est mauvais pour son cœur. A-t-il fait un choix intelligent ? Quels sont les autres alternatives ?
2. Un bébé de 4 mois est admis à l'hôpital avec une température de 38,9°C. Pour-

quoi est-il important de faire tomber cette fièvre le plus rapidement possible ?

3. Au cours d'un labo de chimie, Marie place du saccharose dans un Becher en verre, y ajoute de l'eau et elle mélange. Alors que le sucre de table disparaît, elle prétend qu'elle a dissocié le saccharose en fructose et glucose. Est-ce que l'analyse chimique de Marie est correcte ?

Réponses aux questions des figures

2.1 La première couche électronique du carbone contient 2 électrons et la seconde couche 4 électrons.

2.2 Les 4 éléments les plus importants des organismes vivants sont l'oxygène, le carbone, l'hydrogène et l'azote.

2.3 Les antioxydants comme le sélénium, le zinc, le bêta-carotène, la vitamine C et la vitamine E peuvent inactiver les radicaux libres qui dérivent de l'oxygène.

2.4 Un cation est un ion chargé positivement ; un anion est un ion chargé négativement.

2.5 Une liaison ionique implique le gain ou la perte d'électrons ; une liaison covalente implique le partage de paires d'électrons.

2.6 L'atome d'azote de l'ammoniaque est électronégatif. Parce qu'elle attire les électrons plus fortement que les atomes d'hydrogène, la terminaison azotée de l'ammoniaque acquiert une légère charge négative, permettant aux atomes d'hydrogène de la molécule d'eau de former des ponts hydrogène avec lui. De la même manière, les atomes d'oxygène de la molécule d'eau peuvent former des liaisons hydrogène avec les atomes d'hydrogène des molécules d'ammoniaque.

2.7 Le nombre d'atomes d'hydrogène des réactifs doit être identique au nombre d'atomes d'hydrogène dans les produits. Dans ce cas, il y a un total de 4 atomes d'hydrogène. En d'autres termes, deux molécules de H₂ sont nécessaires pour réagir avec une molécule de O₂ pour qu'il y ait les mêmes nombres d'atomes de H et de O dans les réactifs que dans les produits de la réaction.

2.8 Cette réaction est exothermique car les réactifs possèdent plus d'énergie potentielle que les produits.

2.9 Non. Un catalyseur ne change pas le niveau d'énergie potentielle des réactifs et des produits de la réaction ; il ne fait que diminuer l'énergie d'activation nécessaire pour permettre à la réaction d'avoir lieu.

2.10 Non. Parce que le sucre se dissout facilement dans un solvant polaire (ici l'eau), vous pouvez correctement prédire qu'il possède plusieurs liaisons covalentes polaires.

2.11 CaCO₃ est un sel, et H₂SO₄ est un acide.

2.12 Au pH = 6, [H⁺] = 10⁻⁶ mol/L et la [OH⁻] = 10⁻⁸ mol/L. Un pH de 6,82 est plus acide qu'un pH de 6,91. Tant le pH = 8,41 que le pH = 5,59 sont à 1,41 unités pH du neutre (pH = 7).

2.13 Le glucose possède cinq groupes —OH et six atomes de carbone.

2.14 Les hexoses sont des sucres à six carbones ; le glucose, le fructose et le galactose en sont des exemples.

2.15 Il a six carbones dans le fructose et 12 dans le saccharose.

2.16 Les cellules du foie et des muscles squelettiques stockent du glycogène.

2.17 L'oxygène de la molécule d'eau provient d'un acide gras.

2.18 La tête polaire est hydrophile, et la queue non polaire est hydrophobe.

2.19 Les seules différences entre l'oestradiol et la testostérone sont les nombres de doubles liaisons et les types de groupes fonctionnels fixés sur le cycle A.

2.20 Un acide aminé possède un minimum de deux atomes de carbone et d'un atome d'azote.

2.21 L'hydrolyse survient au cours du catabolisme des protéines.

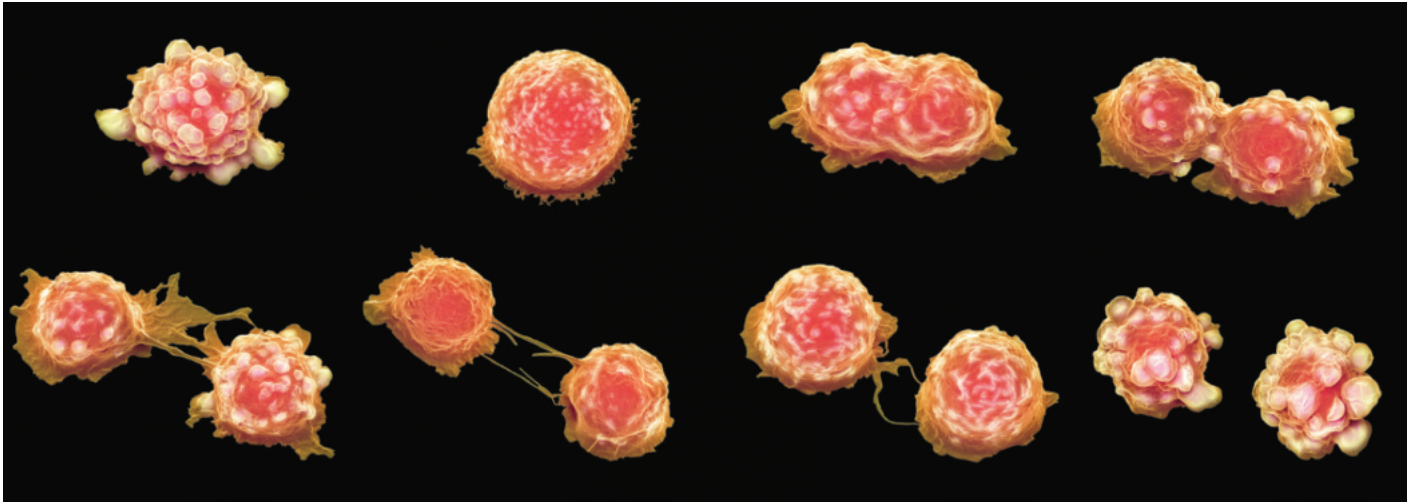
2.22 Non. Les protéines constituées d'une seule chaîne polypeptidique n'ont pas de structure quaternaire.

2.23 La saccharase est spécifique de la molécule de saccharose et ne reconnaît ni le glucose ni le fructose.

2.24 La cytosine, la thymine, l'adénine et la guanine sont les bases azotées présentes dans l'ADN ; la cytosine, l'uracile, l'adénine et la guanine sont les bases azotées présentes dans l'ARN.

2.25 Dans l'ADN, la thymine s'apparie toujours avec l'adénine et la cytosine avec la guanine.

2.26 Les activités cellulaires qui dépendent de l'apport énergétique fourni par l'ATP incluent les contractions musculaires, le mouvement des chromosomes, le transport de substances au travers de la membrane cellulaire, ainsi que les réactions de synthèse (anabolisme).



Steve Gschmeissner/Science Source

Divisions de cellules cancéreuses

SEM 1,000x

Voir la partie déséquilibres homéostatiques sur le cancer pour comprendre pourquoi
LE POLYMORPHISME DU CANCER REND SON TRAITEMENT DIFFICILE

Le niveau cellulaire d'organisation

Cellules et homéostasie

Les cellules remplissent une multitude de fonctions qui contribuent à chaque système de l'organisme. Cependant, toutes les cellules partagent d'importantes structures et fonctions qui les aident à réaliser leurs intenses activités.

Dans le chapitre précédant, vous avez appris que les atomes et les molécules forment l'alphabet du langage corporel. Ces atomes et molécules se sont combinés au sein de plus ou moins 200 types de mots appelés cellules. Toutes les cellules dérivent de cellules existantes et chaque cellule se divise en deux cellules identiques. Différents types de cellules remplissent des rôles uniques qui contribuent à l'homéostasie et qui contribuent aux nombreuses capacités fonctionnelles de l'organisme humain. Lorsque vous étudiez les différentes parties d'une cellule et de leurs relations entre-

elles, vous apprendrez que structure et fonction cellulaires sont intimement liées. Dans ce chapitre, vous apprendrez que les cellules remplissent une série impressionnante de réactions chimiques pour créer et maintenir les processus de la vie, en partie grâce à l'isolation de réactions chimiques spécifiques au sein de structures cellulaires spécialisées. Malgré qu'elles soient isolées, les réactions chimiques sont coordonnées pour maintenir la vie au sein de la cellule, du tissu, de l'organe, du système et de l'organisme entier.

3.1 Parties de la cellule

OBJECTIFS

- **Identifier** et **décrire** les trois principales parties d'une cellule.

Le corps d'un adulte moyen est constitué de plus de 100 milliard de cellules. Les **cellules** sont les unités vivantes de base de la structure et de la fonction de l'organisme. La science qui étudie les cellules est appelée la **biologie cellulaire** ou *cytologie*.

La **Figure 3.1** donne un aperçu général des structures typiques des cellules du corps. La plupart des cellules possèdent beaucoup des structures décrites dans ce schéma. Pour faciliter l'étude, nous avons divisé la cellule en trois parties principales : la membrane plasmique, le cytoplasme et le noyau.

1. La **membrane plasmique** (*plasmalemm*) forme la surface externe et flexible de la cellule, séparant l'*environnement interne* de la cellule

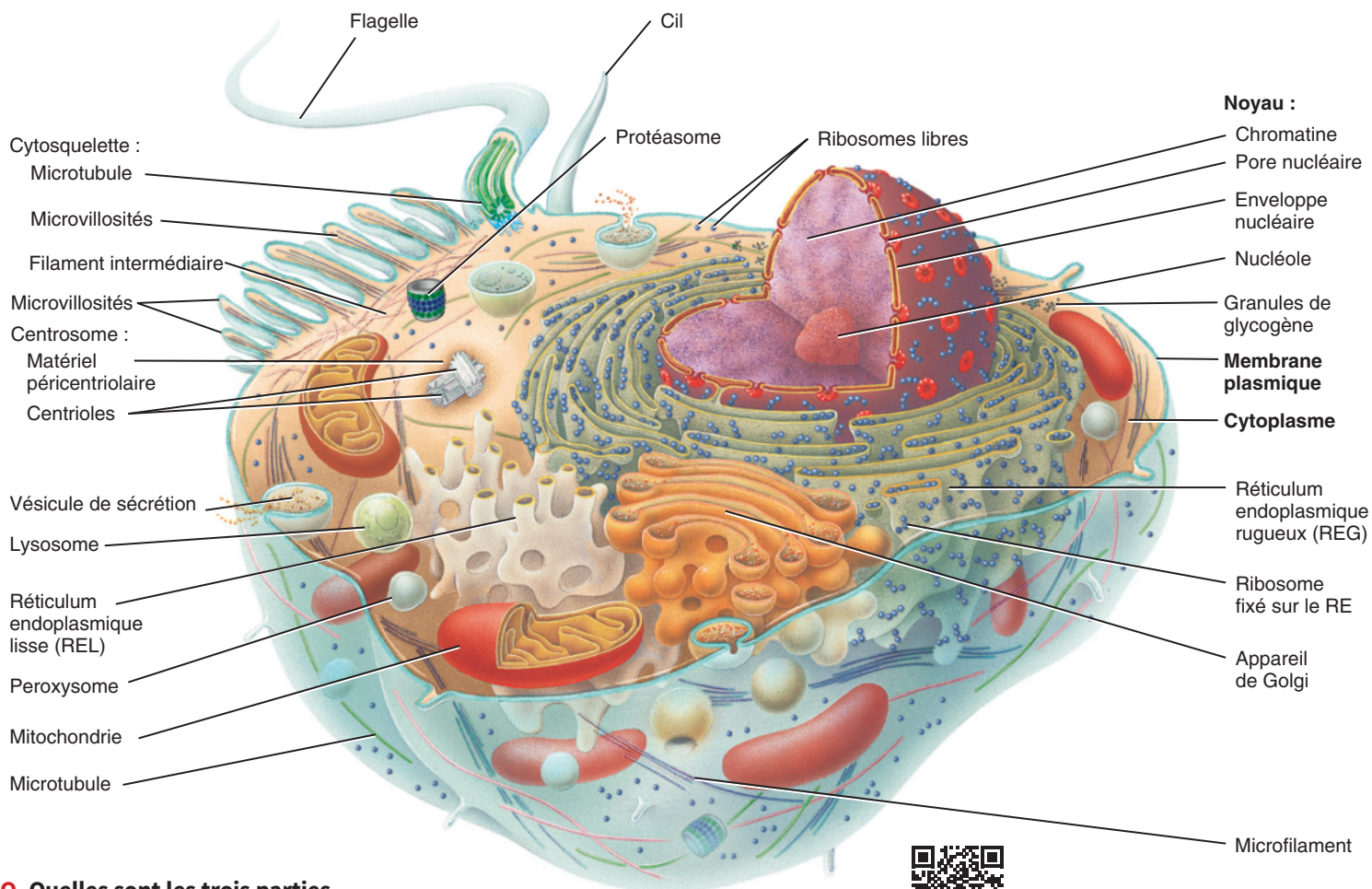
(tout ce qui est dans la cellule) de son *environnement externe* (tout ce qui hors de la cellule). C'est une barrière sélective qui régule le flux de matériel vers et hors de la cellule. Cette sélectivité permet d'établir et de maintenir l'environnement approprié pour les activités normales de la cellule. La membrane plasmique joue également un rôle clé lors de communications entre les cellules et entre les cellules et leur environnement externe.

2. Le **cytoplasme** contient tout le contenu cellulaire situé entre la membrane plasmique et le noyau. Ce compartiment possède deux composants : le cytosol et les organites. Le **cytosol**, la portion liquide du cytoplasme, également appelé le fluide intracellulaire, est composé d'eau, de solutés dissouts ainsi que de particules en suspension. Différents types d'**organites** sont présents dans le cytosol. Chaque type d'organite possède une forme caractéristique et une fonction spécifique. On peut citer en exemple le cytosquelette, les ribosomes, le réticulum endoplasmique, l'appareil de Golgi, les lysosomes, les peroxysomes et les mitochondries.

3. Le **noyau** est un grand organite qui héberge la plupart de l'ADN cellulaire. Au sein du noyau, chaque **chromosome**, une seule molécule d'ADN associée à plusieurs protéines, contient des dizaines d'unités héréditaires, appelés **gènes** et qui contrôlent la plupart des aspects de la structure et de la fonction de la cellule.

FIGURE 3.1 Structures typiques d'une cellule de l'organisme.

La cellule est l'unité structurelle et fonctionnelle vivante de base de l'organisme.



Q Quelles sont les trois parties principales d'une cellule ?

Vue en coupe



www.lienmini.fr/33444-03

Révision

1. Citez les trois parties d'une cellule et expliquez-en les fonctions.

3.2 Membrane plasmique

OBJECTIFS

- **Distinguer** le cytosol et le cytoplasme.
- **Expliquer** le concept de perméabilité sélective.
- **Définir** le gradient électrochimique et **décrire** ses composants.

La **membrane plasmique**, une barrière flexible mais néanmoins solide qui entoure et contient le cytoplasme d'une cellule, est mieux décrite en utilisant un modèle structural appelé le **modèle mosaïque**

fluide. En accord avec ce modèle, l'arrangement moléculaire de la membrane plasmique ressemble plus à une couche mouvante de lipides fluides contenant une mosaïque de nombreuses protéines différentes (**Figure 3.2**). Certaines protéines flottent librement comme des icebergs sur cette mer de lipides, alors que d'autres sont ancrées en des endroits spécifiques et y forment des îles. La membrane lipidique permet le passage de différents types de molécules liposolubles, mais elle agit d'autre part comme une barrière pour l'entrée et la sortie de substances chargées ou polaires. Certaines des protéines situées dans la membrane plasmique autorisent le passage dans et hors de la cellule de molécules polaires et d'ions. D'autres protéines peuvent agir comme des récepteurs signal ou comme des molécules qui lient la membrane plasmique à des protéines intra- ou extracellulaires.

Structure de la membrane plasmique

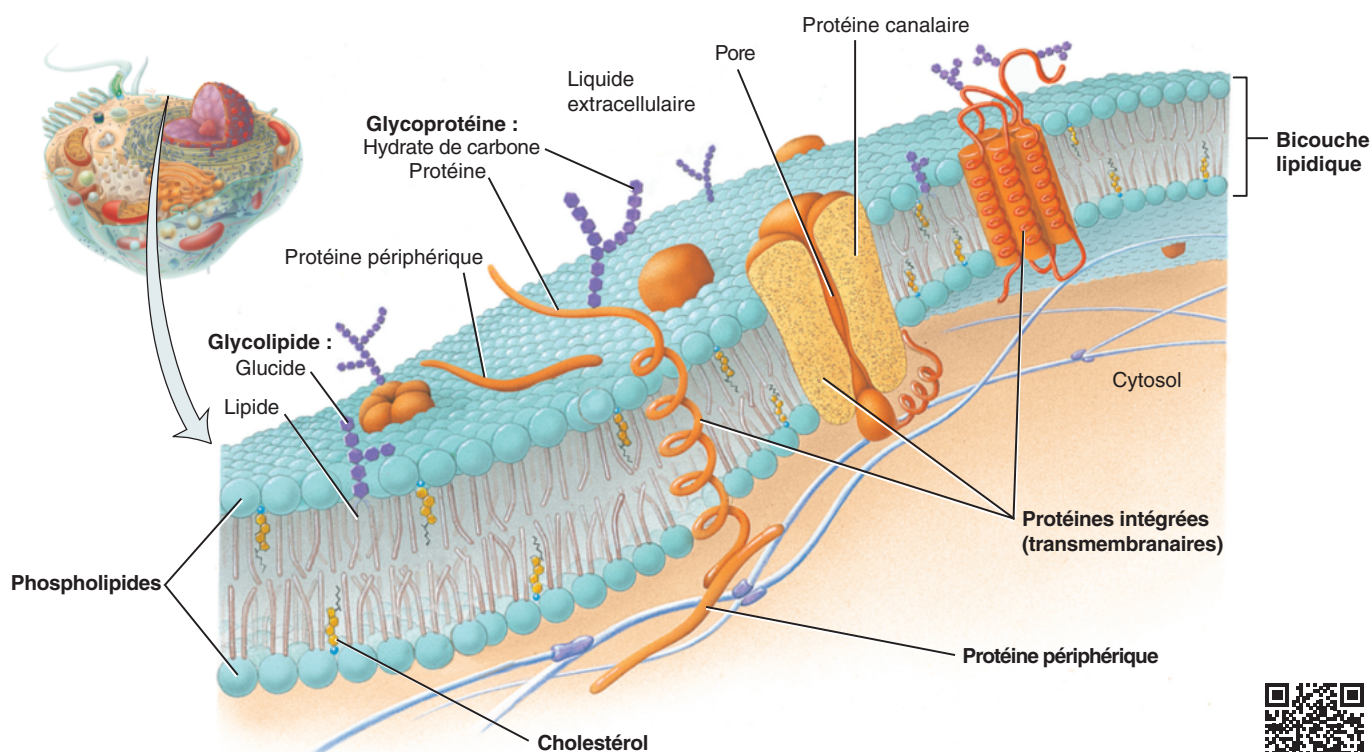
La bicouche lipidique Le schéma structural de base de la membrane plasmique est une **double couche lipidique**, deux couches organisées dos-à-dos et constituées de trois types de molécules

FIGURE 3.2 L'agencement en mosaïque fluide des lipides et des protéines au sein de la membrane plasmique.

Les membranes sont des structures fluides parce que les lipides et la plupart des protéines sont libres de tourner et se déplacer au sein de leur moitié de bicouche.

Fonctions de la membrane plasmique

1. Être une barrière séparant l'intérieur de l'extérieur de la cellule.
2. Contrôler le flux de substances vers et hors de la cellule.
3. Participer à l'identification de la cellule envers les autres cellules (entre autre : cellules immunitaires).
4. Participer à la communication intercellulaire.



lipidiques : les phospholipides, le cholestérol et les glycolipides (**Figure 3.2**). Approximativement 75% des lipides membranaires sont des **phospholipides**, des lipides qui contiennent du phosphore. Sont présents en moindres quantités, le **cholestérol** ($\pm 20\%$), un stéroïde sur lequel est fixé un groupe hydroxyle ($-OH$), et divers **glycolipides** ($\pm 5\%$), des lipides sur lesquels sont fixés des hydrates de carbone.

L'arrangement en double couche survient parce que les lipides sont **amphipathiques**, ce qui signifie qu'ils possèdent à la fois des parties polaires et non polaires. Chez les phospholipides (voir **Figure 2.18**), la partie polaire est constituée d'une tête *hydrophile* contenant un phosphate. Les parties non polaires sont des deux longues queues d'acides gras que sont les chaînes hydrocarbonées *hydrophobes*. Parce qu'elles se ressemblent et s'assemblent, les molécules de phospholipides s'orientent elles-mêmes en une bicouche avec leur tête hydrophile orientée vers l'extérieur. De cette manière, les têtes sont orientées vers les fluides aqueux de chaque côté : le cytosol d'un côté interne et le fluide extracellulaire du côté externe. Les queues d'acides gras hydrophobes de chaque moitié de la bicouche se font face l'une l'autre, créant une région non polaire et hydrophobe à l'intérieur de la membrane plasmique.

Les molécules de cholestérol sont moins fortement amphipathiques (voir **Figure 2.19a**), et sont dispersées parmi les autres lipides des deux couches de la membrane. Le faible groupe $-OH$ est la seule région polaire du cholestérol, et il forme des ponts hydrogène avec les têtes polaires des phospholipides et des glycolipides. Les cycles rigides comme la queue hydrocarbonée des stéroïdes ne sont pas polaires, ils s'adaptent bien parmi les queues d'acides gras des phospholipides et des glycolipides. Les groupes hydrocarbonés des glycolipides forment une tête polaire alors que leurs queues d'acides gras sont non polaires. Les glycolipides apparaissent seulement dans la couche membranaire qui fait face au fluide extracellulaire, c'est pour cela que les deux faces de la bicouche membranaire sont différentes et asymétriques.

Organisation des protéines membranaires Les protéines membranaires sont classées comme intégrées ou périphériques en fonction de la manière dont elles sont incorporées à la membrane (**Figure 3.2**). Les **protéines intégrées** sont situées totalement dans la membrane ou la traversent et y sont fermement fixées. La plupart des protéines intégrées sont des **protéines transmembranaires**, ce qui signifie qu'elles traversent toute la bicouche lipidique et font saillie à la fois dans le cytosol et le fluide extracellulaire. Quelques protéines intégrées sont fixées par des liaisons covalentes aux acides gras d'une des faces de la bicouche. Comme les lipides membranaires, les protéines intégrées sont amphipathiques. Leurs régions hydrophiles font saillie dans les fluides aqueux du cytosol ou du liquide extracellulaire, alors que leur zone hydrophobe se situe au sein des queues des acides gras.

Comme leur nom l'indique, les **protéines périphériques** ne sont pas si fermement fixées à la membrane. Elles sont attachées aux têtes polaires des lipides membranaires ou aux protéines intégrées sur les surfaces interne ou externe de la membrane.

La plupart des protéines intégrées sont des **glycoprotéines**, protéines qui possèdent des glucides fixés sur leurs extrémités faisant saillie dans le liquide extracellulaire. Les glucides sont des oligosaccharides, chaînes de 2 à 60 monosaccharides qui peuvent être linéaires ou ramifiés. Les parties carbohydatées des glycolipides et des glycoprotéines forment une couche extensive de sucres appelée le **glycocalyx**. Le modèle glucidique du glycocalyx varie d'une cellule à

l'autre. De ce fait, le glycocalyx agit comme une signature moléculaire qui permet à chaque cellule de se reconnaître parmi les autres. Par exemple, l'aptitude d'un globule blanc à détecter un glycocalyx étranger est une des bases de la réponse immunitaire nous permettant de détruire les organismes envahisseurs. De plus, le glycocalyx permet aux cellules d'adhérer les unes aux autres au sein de certains tissus et de protéger les cellules d'une digestion par des enzymes du liquide extracellulaire. Les propriétés hydrophiles du glycocalyx permettent de maintenir un film liquidien sur la surface de nombreuses cellules. Cette action rend les globules rouges glissants lorsqu'ils circulent au travers de vaisseaux sanguins étroits et protège de la sécheresse les cellules qui recouvrent les voies respiratoires et le tube digestif.

Fonctions des protéines membranaires

Généralement, les types de lipides des membranes cellulaires varient très peu. À l'opposé, les membranes de différentes cellules et de différents organites intracellulaires possèdent des assortiments protéiques très différents qui déterminent la plupart des fonctions membranaires (**Figure 3.3**).

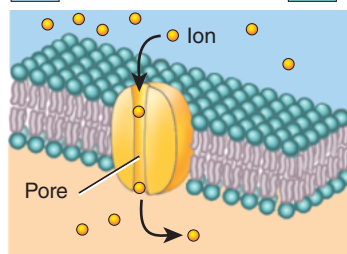
- Certaines protéines intégrées sont des **canaux ioniques**, pores ou trous que des ions spécifiques, tel que l'ion potassium (K^+), peuvent traverser vers ou hors de la cellule. La plupart des canaux ioniques sont sélectifs ; ils ne permettent le passage que d'un seul type d'ions.
- D'autres protéines intégrées sont des **transporteurs**, qui déplacent sélectivement une substance polaire ou un ion d'un côté à l'autre de la membrane.
- Les protéines intégrées appelées **récepteurs** servent de sites de reconnaissance cellulaire. Chaque type de récepteur reconnaît et se lie avec un type spécifique de molécules. Par exemple, le récepteur de l'insuline se lie à l'hormone insuline. Une molécule spécifique qui se lie à un récepteur est appelée le **ligand** de ce récepteur.
- Certaines protéines intégrées sont des **enzymes** qui catalysent des réactions chimiques spécifiques à la surface interne ou externe de la cellule.
- Des protéines intégrées servent également de lien pour fixer ensemble des cellules voisines via des protéines d'**ancrage** présentes sur leurs membranes plasmiques, ou pour y fixer des filaments protéiques dans et hors de la cellule. Des protéines périphériques peuvent également servir d'enzymes et de liens.
- Les glycoprotéines et glycolipides membranaires peuvent également servir de **marqueurs d'identité cellulaire**. Ils permettent à la cellule de : (1) reconnaître d'autres cellules de même type durant la formation des tissus, ou (2) reconnaître et répondre aux cellules étrangères potentiellement dangereuses. Les marqueurs sanguins de type ABO sont un exemple de marqueurs identitaires et cellulaires. Lorsque vous recevez une transfusion sanguine, le type de sang que vous recevez doit être compatible avec le vôtre, sinon les globules rouges pourraient s'agglutiner ensemble.

De plus, les protéines participent à l'architecture de la membrane plasmique, servent d'ancrage aux protéines intégrées, et participent aux activités mécaniques telles que le déplacement de matériel ou d'organites au sein des cellules, ou changement de forme de la cellule au cours de la division cellulaire, à la contraction des cellules musculaires et à la fixation des cellules les unes aux autres.

FIGURE 3.3 Fonctions des protéines membranaires.

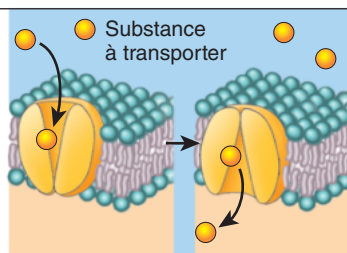
Les protéines membranaires reflètent largement les fonctions d'une cellule.

Liquide extracellulaire Membrane plasmique Cytosol



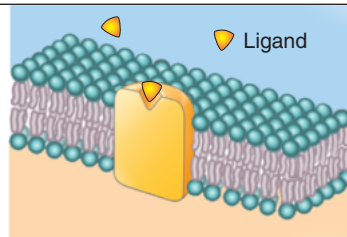
Canal ionique (intégré)

Le canal ionique forme un pore au travers duquel un ion spécifique peut traverser la membrane. La plupart des membranes plasmiques contiennent des canaux spécifiques pour plusieurs ions communs.



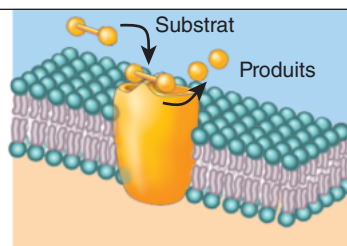
Transporteur (intégré)

Reconnait un ligand spécifique et modifie la fonction cellulaire d'une manière ou d'une autre. Par exemple, l'hormone antidiurétique se lie à ses récepteurs rénaux et modifie la perméabilité de certaines membranes plasmiques.



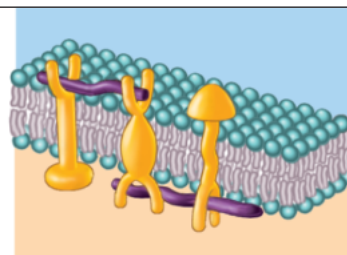
Récepteur (intégré)

Le récepteur reconnaît un ligand spécifique, ce qui altère la fonction cellulaire d'une façon ou d'une autre. Par exemple, l'hormone antidiurétique se lie à des récepteurs du rein, ce qui change la perméabilité membranaire de certaines membranes plasmiques.



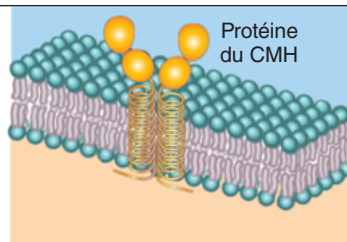
Enzyme (intégrée ou périphérique)

Catalyse une réaction dans ou hors de la cellule (dépendant dans quelle direction se trouve le site actif). Par exemple, la lactase faisant saillie sur les cellules épithéliales qui tapissent votre intestin grêle, hydrolyse le lactose, un disaccharide présent dans le lait que vous buvez.



Ancrage (intégrée ou périphérique)

Filaments d'ancrage dans ou hors de la membrane plasmique, apportant la stabilité de la structure cellulaire et la forme de la cellule. Ils peuvent également participer aux mouvements cellulaires ou à l'ancrage de deux cellules ensemble.



Marqueur identitaire de la cellule (glycoprotéine)

Identifie vos cellules par rapport aux cellules de quelqu'un d'autre (sauf si vous êtes des jumeaux monozygotiques). Une classe importante de ces marqueurs forme les protéines du complexe majeur d'histocompatibilité (CMH).

Fluidité membranaire

Les membranes sont des structures fluides, ce qui permet aux lipides membranaires ainsi qu'à la plupart des protéines membranaires de se tourner facilement et de se déplacer latéralement au sein de leur demi-membrane. Les molécules lipidiques voisines échangent leurs places approximativement 10 millions de fois par seconde et peuvent se déplacer tout autour de la cellule en seulement quelques minutes ! La fluidité membranaire dépend à la fois du nombre de double liaisons au sein des queues des acides gras des lipides de la double couche, et de la quantité de cholestérol présente. Chaque double liaison crée un coude dans la queue des acides gras (voir **Figure 2.18**), ce qui augmente la fluidité membranaire en empêchant une compaction trop importante des molécules lipidiques au sein de la membrane. La fluidité membranaire est un excellent compromis pour la cellule ; une membrane trop rigide serait gênante pour la mobilité, alors qu'une membrane trop fluide ne permettrait pas l'organisation de la structure cellulaire ni le support structural de la cellule. La fluidité membranaire autorise les interactions au sein de la membrane, tel que l'assemblage des protéines membranaires. Elle permet également le mouvement de composants membranaires responsables de processus cellulaires tels que le mouvement cellulaire, la croissance, la division, la sécrétion et la formation de jonctions cellulaires. La fluidité membranaire permet également à la bicouche lipidique de se refermer si elle est tordue ou piquée. Lorsqu'une aiguille est poussée au travers de la membrane plasmique puis retirée, le site d'injection se referme spontanément et la cellule n'éclate pas. C'est cette propriété de la bicouche lipidique qui autorise l'injection intra-cytoplasmique d'un spermatozoïde, qui permet aux couples infertiles de concevoir un enfant, les scientifiques pouvant féconder un ovocyte en y injectant un spermatozoïde à l'aide d'une toute petite seringue. Il permet également le retrait et le remplacement du noyau de la cellule lors des expériences de clonage par transfert de noyaux, ce qui a permis de créer Dolly, la fameuse brebis clonée.

Malgré la grande mobilité des lipides et protéines membranaires au sein de leur moitié de la bicouche lipidique, il y a rarement des échanges entre les deux moitiés de la bicouche lipidique parce qu'il est difficile pour les parties hydrophiles de la membrane de traverser le centre hydrophobe de cette même membrane. Cette difficulté contribue à l'asymétrie de la bicouche lipidique.

Du fait de la manière dont il forme des ponts hydrogène avec les têtes des phospholipides et des glycolipides avoisinants, et parce qu'il remplit les espaces entre les queues coudées des acides gras, le cholestérol renforce la bicouche lipidique mais la rend moins fluide aux températures corporelles normales. Aux températures basses, le cholestérol a l'effet inverse : il augmente la fluidité membranaire.

Perméabilité membranaire

Le terme *perméable* signifie qu'une structure permet le passage de substances au travers d'elle-même, alors que le terme *impermeable* signifie qu'une structure ne permet pas le passage de substances au travers d'elle-même. La perméabilité de la membrane plasmique varie en fonction des différentes substances. Les membranes plasmiques permettent à certaines substances de les traverser plus facilement que d'autres. Cette propriété des membranes est appelée la **perméabilité sélective**.

La double couche lipidique de la membrane plasmique est très perméable aux molécules non polaires telles que l'oxygène (O_2), le

Q Lorsqu'elle stimule une cellule, l'hormone insuline se lie d'abord à une protéine de la membrane plasmique. Quelle fonction des protéines membranaires représente le mieux cette action ?



www.lienmini.fr/33444-03

dioxyde de carbone (CO_2) et les stéroïdes ; modérément perméable aux petites molécules polaires et non chargées comme l'eau et l'urée (un déchet catabolique des acides aminés) ; et imperméable aux ions et aux grandes molécules polaires non chargées telles le glucose. Les caractéristiques de perméabilité de la membrane plasmique sont liées au fait que la bicouche lipidique contient une zone interne non polaire et hydrophobe (voir **Figure 2.18c**). De ce fait, plus une substance est liposoluble ou hydrophobe, plus la membrane est perméable à cette substance. Donc, la zone interne hydrophobe de la membrane plasmique permet aux substances apolaires de la traverser rapidement, alors qu'elle empêche le passage des ions, et des grandes molécules polaires et non chargées. La perméabilité de la bicouche lipidique envers l'eau et l'urée est une propriété inattendue puisque ces molécules sont polaires. Ces deux molécules peuvent passer au travers la bicouche lipidique lorsque les queues des acides gras des phospholipides et glycolipides membranaires se meuvent de manière aléatoire et que de petits trous apparaissent brièvement au sein de l'environnement hydrophobe de la zone interne de la membrane. Parce que l'eau et l'urée sont de petites molécules polaires non chargées, elles peuvent se déplacer d'un trou à l'autre jusqu'à traverser la membrane.

Les protéines transmembranaires qui agissent comme des canaux et des transporteurs augmentent la perméabilité de la membrane plasmique pour toute une variété d'ions et de molécules polaires non chargées qui, à l'inverse des molécules d'eau et d'urée, ne peuvent traverser la bicouche lipidique sans assistance. Les canaux et les transporteurs sont très sélectifs. Chacun d'entre eux aide spécifiquement une molécule ou un ion à traverser la membrane. Les macromolécules comme les protéines sont si grosses qu'elles sont incapables de passer au travers de la membrane plasmique, excepté par endocytose ou exocytose (discuté plus loin dans ce chapitre).

Gradients de part et d'autre de la membrane

La perméabilité sélective de la membrane plasmique permet à une cellule vivante de maintenir différentes concentrations de certaines substances de chaque côté de sa membrane plasmique. Un **gradient de concentration** est une différence de concentrations d'un réactif entre deux régions comme entre l'intérieur et l'extérieur de la membrane plasmique. Beaucoup d'ions et de molécules sont plus concentrés soit dans le cytosol ou dans le liquide extracellulaire. Par exemple, la molécule d'oxygène et les ions sodium (Na^+) sont plus concentrés dans le fluide extracellulaire que dans le cytosol ; l'opposé est vrai pour les molécules de dioxyde de carbone et les ions potassium (K^+).

La membrane plasmique crée également une différence de distribution des ions chargés positivement et négativement entre les deux côtés de la membrane plasmique. Typiquement, la surface interne de la membrane plasmique est plus chargée négativement et sa surface externe est plus positivement chargée. La différence de charges électriques entre les deux régions crée un **gradient électrique**. Parce qu'il survient au travers de la membrane plasmique, cette différence de charges est appelée le **potentiel membranaire**.

Comme vous le verrez brièvement, le gradient de concentration et le gradient électrique sont importants car ils aident au mouvement de substances au travers de la membrane plasmique. Dans la plupart des cas, une substance traversera la membrane plasmique en *descendant son gradient de concentration*. En d'autres termes, une substance va se déplacer vers le bas, c'est-à-dire d'où elle est la plus concentrée

vers l'endroit où elle l'est le moins, pour tendre vers l'équilibre de ses concentrations. De la même manière, une substance chargée positivement tendra à se déplacer vers une zone négativement chargée, et une substance chargée négativement tendra à se déplacer vers une zone positivement chargée. L'influence combinée du gradient de concentrations et du gradient électrique sur le déplacement d'un ion particulier est appelée **gradient électrochimique**.

Révision

2. Comment les régions hydrophobes et hydrophiles gouvernent l'arrangement des lipides membranaires en bicouches ?
3. Quelles substances peuvent et ne peuvent pas diffuser au travers la bicouche lipidique ?
4. « Les protéines présentes au sein de la membrane plasmique déterminent les fonctions qu'une membrane peut réaliser ». Est-ce que cette affirmation est vraie ou fausse ? Expliquez votre réponse.
5. Comment le cholestérol affecte-t-il la fluidité membranaire ?
6. Pourquoi est-ce qu'on dit que les membranes ont une perméabilité sélective ?
7. Quels facteurs contribuent au gradient électrochimique ?

3.3

Transport transmembranaire

OBJECTIF

- **Décrire** les processus qui transportent les substances au travers de la membrane plasmique.

Le transport de matériel au travers de la membrane plasmique est essentiel à la vie d'une cellule. Certaines substances doivent être déplacées dans la cellule pour permettre les réactions métaboliques. D'autres substances ont été produites au sein de la cellule pour être exportées ou des déchets de production cellulaire doivent être sortis de la cellule.

Les substances sont généralement déplacées à travers la membrane plasmique par le biais de transporteurs. Ces derniers peuvent être classés en transporteurs actifs ou passifs, dépendant du fait que cela nécessite ou non de l'énergie cellulaire. Dans les **processus passifs**, une substance se déplace en suivant son gradient de concentration ou son gradient électrique et traverse la membrane en utilisant simplement sa propre énergie cinétique (énergie du mouvement). L'énergie cinétique est intrinsèque aux particules en mouvement. Cela ne nécessite pas d'apport d'énergie de la part de la cellule. La diffusion simple en est un bon exemple. Lors de **processus actifs**, de l'énergie cellulaire est utilisée pour mouvoir la substance vers le haut, c'est-à-dire contre son gradient de concentration ou son gradient électrique. L'énergie cellulaire utilisée est généralement de l'adénosine triphosphate (ATP). Le transport actif en est un exemple. Certaines substances peuvent entrer ou sortir de la cellule d'une autre manière, il s'agit d'un processus actif par lequel de petits sacs membranaires sphériques sont utilisés et appelés **vésicules**. L'endocytose en est un

exemple, dans ce processus des vésicules se détachent de la membrane plasmique pour amener du matériel de l'extérieur vers la cellule ; et l'exocytose, c'est la fusion de vésicules avec la membrane plasmique pour libérer du matériel depuis la cellule.

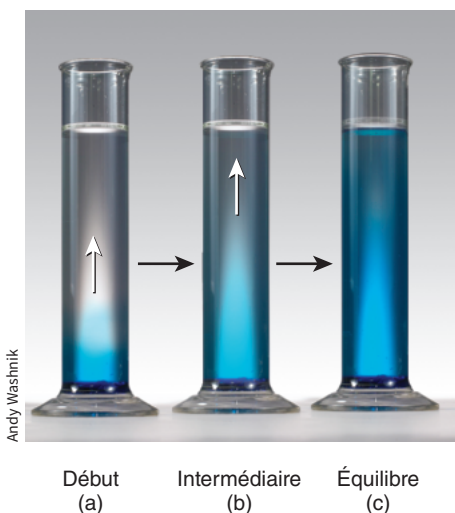
Processus passifs

Le principe de diffusion Apprendre comment les matériaux diffusent au travers les membranes requiert de comprendre comment fonctionne la diffusion dans une solution. La **diffusion** est un processus passif au cours duquel les particules se distribuent aléatoirement dans une solution du fait de leur énergie cinétique. Tant les *solutés*, les substances dissoutes, que le *solvant*, le liquide dans lequel la substance se dissout, participent à cette diffusion. Si un soluté particulier est présent à haute concentration dans une zone de la solution, et à basse concentration dans une autre partie, les molécules de solutés vont diffuser vers la zone où ils sont les moins concentrés, ils se déplacent *en descendant leur gradient de concentration*. Après un certain temps, les particules sont distribuées de manière égale dans toute la solution, et la solution est dite à l'équilibre. Les particules continuent de se déplacer en fonction de leur énergie cinétique, mais leurs concentrations ne changent plus.

Par exemple, lorsque vous placez un cristal de colorant dans un flacon rempli d'eau (**Figure 3.4**), la couleur est plus intense dans la zone proche du colorant du fait de sa concentration plus élevée à cet endroit. Plus on s'en éloigne, la couleur est de plus en plus faible du fait de l'éloignement. Plus tard, la solution d'eau et de colorant aura une couleur uniforme, car les molécules de colorant et les molécules

FIGURE 3.4 Principe de la diffusion. Au début de l'expérience, un cristal de colorant est placé dans une colonne d'eau et s'y dissout (a) et puis il diffuse depuis la région où la concentration du colorant est élevée vers les régions où sa concentration est faible (b). À l'équilibre (c), la concentration en colorant est uniforme partout, alors que le mouvement aléatoire se poursuit.

Lors de la diffusion, une substance se déplace en descendant son gradient de concentration.



Q Comment la fièvre affecte-t-elle les processus corporels qui impliquent la diffusion ? www.lienmini.fr/33444-03

d'eau auront diffusé en descendant leurs gradients de concentrations jusqu'au moment où elles se seront réparties de manière égale dans toute la solution : elles sont à l'équilibre.

Dans cet exemple simple, il n'y a aucune membrane impliquée. Les substances peuvent également diffuser au travers d'une membrane, si cette membrane est perméable à elles. Plusieurs facteurs influencent le taux de diffusion des substances au travers d'une membrane :

- **Différence du gradient de concentration.** Plus grande est la différence de concentrations entre les deux côtés de la membrane, plus grande est la vitesse de diffusion. Lorsque des particules chargées diffusent, la différence du gradient électrochimique détermine la vitesse de diffusion au travers de la membrane.
- **Température.** Plus grande est la température, plus rapide est la diffusion. Tous les processus de diffusion de l'organisme se déroulent plus rapidement chez la personne fiévreuse.
- **Masse de la substance qui diffuse.** Plus grande est la masse de la substance à diffuser, plus lente est sa diffusion. Les petites molécules diffusent plus vite que les grosses.
- **Surface.** Plus grande est la surface disponible pour la diffusion, plus rapide est la diffusion. Par exemple, les alvéoles pulmonaires possèdent une très grande surface de diffusion disponible pour la diffusion de l'oxygène depuis l'air vers le sang. Certaines maladies pulmonaires, telles que l'emphysème, réduisent cette surface, ce qui ralentit la diffusion de l'oxygène et rend la respiration plus difficile.
- **Distance de diffusion.** Plus grande est la distance sur laquelle la diffusion doit se faire, plus lentement cette diffusion a lieu. La diffusion au travers de la membrane plasmique prend seulement une fraction de seconde du fait de la minceur de cette membrane. Lors d'une pneumonie, des liquides s'accumulent au sein des poumons ; ces liquides additionnels augmentent la distance de diffusion, ce qui fait que l'oxygène doit traverser à la fois ces liquides additionnels et la membrane pour atteindre le flux sanguin.
- **(NdT : Perméabilité de la membrane.** La perméabilité membranaire est sélective. Par exemple, certaines cellules ont une membrane perméable à l'eau et d'autres pas en fonction de la présence ou non d'aquaporines ; voir plus loin).

Diffusion simple La **diffusion simple** diffusion simple est un processus passif par lequel les substances se déplacent librement au travers de la bicouche lipidique de la membrane plasmique des cellules sans la participation de protéines de transport membranaire (**Figure 3.5**). Les molécules non polaires et hydrophobes traversent la bicouche lipidique par le processus de diffusion simple. Ces molécules comprennent l'oxygène, le dioxyde de carbone, les gaz azotés, les acides gras, les stéroïdes et les vitamines liposolubles (A, D, E et K). Les petites moléculaires polaires mais non chargées telles que l'urée et les petits alcools passent également au travers de la membrane plasmique par diffusion simple. La diffusion simple au travers de la bicouche lipidique est importante pour les mouvements de l'oxygène et du dioxyde de carbone entre le sang et le corps des cellules, et entre le sang et l'air des poumons lors de la respiration. C'est également la voie pour l'absorption de certains nutriments et l'excrétion de certains déchets par les cellules.

Diffusion facilitée Les solutés trop polaires ou hautement chargés pour traverser la bicouche lipidique par diffusion simple,

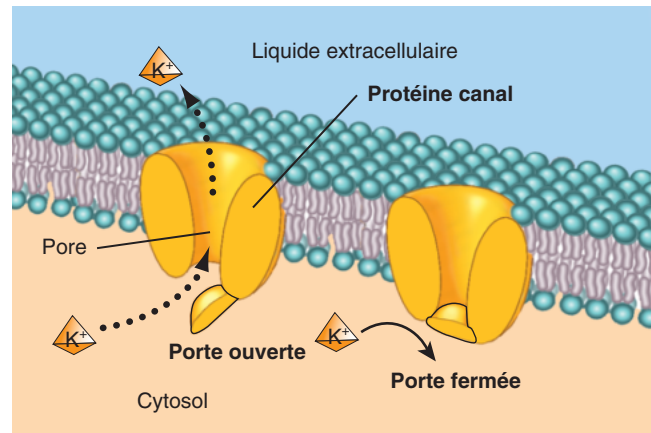
peuvent traverser la membrane plasmique par un processus passif appelé la **diffusion facilitée**. Au cours de ce processus, une protéine membranaire intégrée aide une substance spécifique à traverser la membrane. La protéine membranaire intégrée peut être soit un canal soit un transporteur.

DIFFUSION FACILITÉE MÉDIÉE PAR UN CANAL Lors de la **diffusion facilitée médiée par un canal**, un soluté descend son gradient de concentration au travers de la bicouche lipidique via un canal membranaire (Figure 3.5). La plupart des canaux membranaires sont des canaux ioniques, des protéines transmembranaires intégrées qui permettent le passage de petits ions inorganiques qui sont trop hydrophiles que pour traverser la zone interne de la bicouche lipidique. Chaque ion ne peut diffuser au travers de la membrane qu'au niveau de certains sites. Concernant les membranes plasmiques typiques, les canaux ioniques les plus fréquents sont sélectifs pour les ions potassiques (K^+) ou chlore (Cl^-) ; des canaux moins nombreux sont disponibles pour les ions sodiques (Na^+) ou calciques (Ca^{2+}). La diffusion des ions au travers les canaux est généralement plus lente que la diffusion libre au travers la bicouche lipidique parce que les canaux n'occupent qu'une petite fraction de la surface totale membranaire par rapport aux lipides. Cependant, la diffusion facilitée au travers des canaux est tout de même un processus très rapide : plus d'un million d'ions potassiques peuvent traverser les canaux potassiques en une seconde !

Un canal est à ouverture commandée lorsqu'une partie de la protéine canal agit comme un bouchon ou une porte, modifiant sa forme d'une façon pour ouvrir le passage et d'une autre manière pour le fermer (Figure 3.6). Certains canaux à ouverture commandée alternent entre leurs positions ouverte ou fermée ; d'autres sont commandés par des modifications chimique ou électrique dans et hors de la cellule. Lorsque la porte d'un canal est ouverte, les ions diffusent vers ou

FIGURE 3.6 Diffusion facilitée et médiée par canal des ions potassiques (K^+) au travers de canaux K^+ à ouverture commandée. Un canal à ouverture commandée est un canal au sein duquel une partie de la protéine canal agit comme une porte pour ouvrir ou fermer le passage aux ions.

Les canaux sont des protéines membranaires intégrées qui permettent le passage spécifique de petits ions inorganiques au travers de la membrane par le biais de la diffusion facilitée.



Détails d'un canal potassique

Q Est-ce que la concentration en K^+ dans les cellules de l'organisme est plus élevée dans le cytosol ou dans le liquide extracellulaire ?

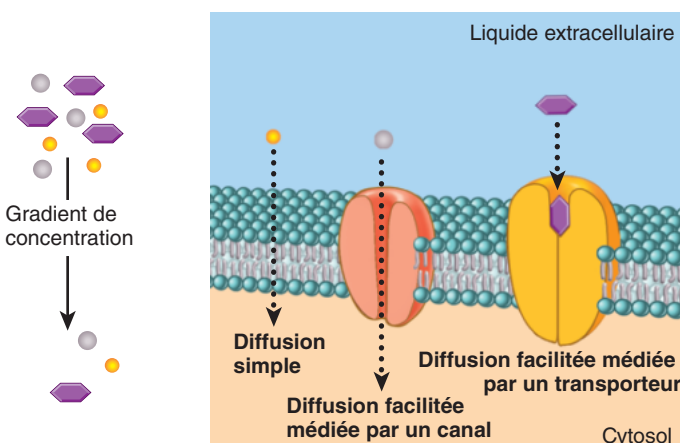


www.lienmini.fr/33444-03

hors de la cellule, en suivant leurs gradients électrochimiques. Les membranes plasmiques de différents types de cellules peuvent avoir des nombres de canaux variables et présentent donc différentes perméabilités à des ions variés.

FIGURE 3.5 Diffusion simple, diffusion facilitée par canaux et diffusion facilitée médiée par transporteur.

Lors de la diffusion simple, une substance se déplace au travers la bicouche lipidique de la membrane sans l'aide d'une protéine membranaire de transport. Lors de la diffusion facilitée, une substance traverse la bicouche lipidique avec l'aide d'une protéine canal ou de transport.



Q Quels types de molécules traversent la bicouche lipidique de la membrane plasmique par diffusion simple ?

DIFFUSION FACILITÉE MÉDIÉE PAR UN TRANSPORTEUR Concernant la **diffusion facilitée médiée par un transporteur**, a transporteur déplace un soluté au travers de la membrane en descendant son gradient de concentration (Figure 3.5). Comme il s'agit d'un processus passif, il n'y a pas de dépense d'énergie cellulaire. Le soluté se lie à un transporteur spécifique d'un côté de la membrane et est libéré de l'autre côté de la membrane après que le transporteur ait changé de conformation. Le plus souvent, le soluté se lie au transporteur du côté de la membrane où le soluté est le plus concentré. Une fois que les concentrations sont devenues les mêmes des deux côtés de la membrane, les molécules de soluté se lient au transporteur du côté cytoplasmique et sont déplacées vers le liquide extracellulaire aussi rapidement que qu'ils ne se lient au transporteur du côté extracellulaire et sont déplacés vers le cytosol. La vitesse de diffusion facilitée par des transporteurs est déterminée par l'importance du gradient de concentration de part et d'autre de la membrane.

Le nombre de transporteurs disponibles d'une membrane plasmique définit la limite haute de la capacité de diffusion facilitée par ces transporteurs et est appelée *transport maximal*. Une fois que tous les transporteurs sont occupés, la capacité maximale de transport est atteinte, et une augmentation du gradient de concentration n'augmentera plus le taux de diffusion facilitée. Et donc, tout comme une éponge saturée en eau ne peut absorber plus d'eau, le processus de diffusion facilitée par transporteur atteint sa *saturation*.

Parmi les substances qui traversent la membrane plasmique par le biais d'une diffusion facilitée par transporteur, il y a le glucose, fructose, galactose et certaines vitamines. Le glucose, la source d'énergie préférée du corps pour fabriquer de l'ATP, entre dans la plupart des cellules par diffusion facilitée par transporteur selon la séquence suivante (**Figure 3.7**) :

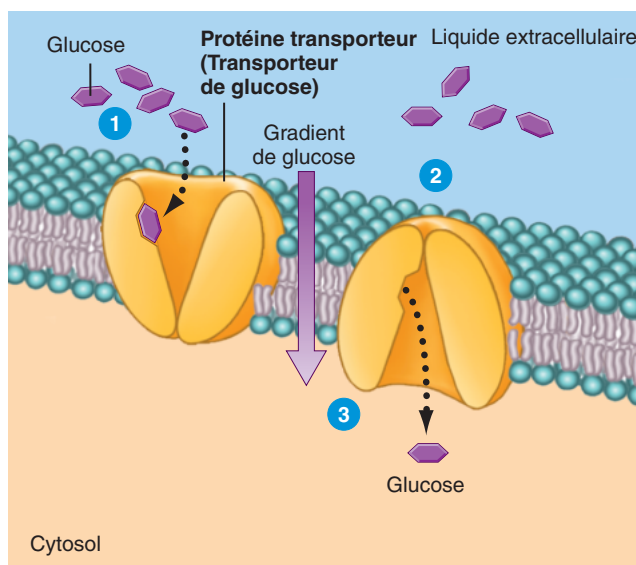
- 1 Le glucose se lie à un type de protéine transporteuse spécifique appelé *Transporteur de Glucose* (GluT) et situé sur la face externe de la membrane.
- 2 Alors que le transporteur change de conformation, le glucose traverse la membrane.
- 3 Le transporteur libère le glucose de l'autre côté de la membrane.

La perméabilité sélective de la membrane plasmique est souvent régulée pour respecter l'homéostasie. Par exemple, l'hormone insuline, via l'action du récepteur à insuline, induit l'insertion de nombreuses copies de transporteurs de glucose au sein de la membrane plasmique de certaines cellules. Et donc l'effet de l'insuline est d'augmenter la capacité de transport maximal du glucose vers l'intérieur des cellules par diffusion facilitée. Avec plus de transporteurs de glucose disponibles, les cellules peuvent capter le glucose sanguin plus rapidement. L'incapacité de produire ou d'utiliser l'insuline correspond au diabète (Chapitre 18).

Osmose L'**osmose** est un type de diffusion pour lequel il y a un mouvement net d'un solvant à travers d'une membrane sélectivement

FIGURE 3.7 Diffusion facilitée et médiée par transporteur du glucose au travers de la membrane plasmique. La protéine transporteur fixe le glucose du liquide extracellulaire et le libère dans le cytosol.

Les transporteurs sont des protéines membranaires intégrées qui changent de conformation pour déplacer des substances au travers de la membrane par le biais de la diffusion facilitée.



Q Est-ce que l'insuline agit sur le transport de glucose par le biais de la diffusion facilitée ?

www.lienmini.fr/33444-03



perméable. Comme les autres types de diffusion, l'osmose est un processus passif. Dans les systèmes vivants, le solvant est l'eau, laquelle se déplace au travers de la membrane plasmique depuis une zone où elle est *fort concentrée* vers une zone où il y a une *faible concentration en eau*. Une autre manière de comprendre ce principe est de considérer la concentration en soluté : lors de l'osmose, l'eau se déplace au travers d'une membrane à perméabilité sélective depuis une zone de *faible concentration en soluté* vers une zone de *haute concentration en soluté*. Durant l'osmose, les molécules d'eau passent au travers la membrane plasmique de deux manières : (1) en se déplaçant entre les molécules adjacentes de phospholipides de la double couche par diffusion simple, comme précédemment décrit ; et (2) en se déplaçant via les **aquaporines (AQPs)**, des protéines intégrées à la membrane et qui fonctionnent comme des canaux pour l'eau. Les AQPs jouent un rôle crucial dans le contrôle du contenu en eau des cellules. Différents types d'AQPs sont présents dans l'organisme en fonction des types de cellules ou de tissus. Les AQPs sont responsables de la production du liquide céphalo-rachidien, de l'humeur aqueuse, des larmes, de la transpiration, de la salive et de la concentration des urines. Des mutations des AQPs sont liées à la cataracte, au diabète de type 2, au dysfonctionnement des glandes salivaires et de maladies neurodégénératives.

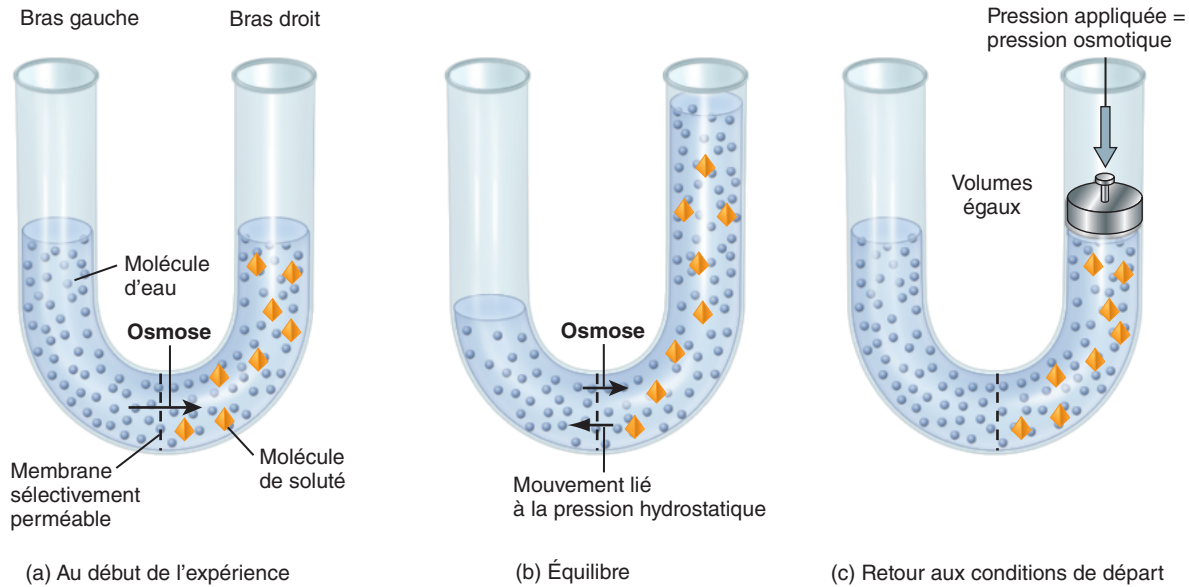
L'osmose ne survient que si une membrane est perméable à l'eau mais n'est pas perméable à certains solutés. Une expérience simple permet de démontrer l'osmose. Prenons un tube en forme de U comprenant une membrane sélectivement perméable qui sépare les branches gauche et droite du tube. Un volume d'eau pure est versé dans la branche gauche, tandis qu'un volume identique d'une solution contenant un soluté qui ne peut traverser la membrane est placé dans la branche droite (**Figure 3.8a**). Parce que la concentration en eau est supérieure à gauche et inférieure à droite, un déplacement net de molécules d'eau a lieu de gauche à droite, en suivant son gradient de concentration. Au même moment, la membrane empêche la diffusion du soluté depuis la branche droite vers celle de gauche. Il en résulte que le volume d'eau dans la branche gauche diminue alors que le volume d'eau de la branche droite augmente (**Figure 3.8b**).

Vous pourriez penser que l'osmose va continuer jusqu'au moment où il n'y a plus d'eau dans la branche gauche du U, mais ce n'est pas ce qui est observé. Dans cette expérience, plus le niveau de la colonne de solution monte dans la branche droite, plus il y a de pression qui s'applique sur la face droite de la membrane. Cette pression exercée par un liquide de cette manière, appelée **pression hydrostatique**, force les molécules d'eau à retourner vers la branche gauche du U. Et l'équilibre est atteint lorsqu'il y a juste assez de molécules d'eau déplacées de droite à gauche par la pression hydrostatique pour équilibrer le nombre de molécules d'eau déplacées de gauche à droite par osmose (**Figure 3.8b**).

Pour encore compliquer les choses, la solution contenant le soluté qui ne peut traverser la membrane exerce également une force, appelée **pression osmotique**. La pression osmotique d'une solution est proportionnelle à la concentration en particules du soluté qui ne peuvent traverser la membrane : plus forte est la concentration en ces solutés, plus haute est la pression osmotique de la solution. En reprenant notre exemple précédant, qu'arriverait-il si nous exerçons une pression sur le liquide présent dans la branche droite du tube en U (**Figure 3.8**) ? En exerçant une pression suffisante, le volume de chaque branche du tube reviendrait à son niveau initial, et la concentration en

FIGURE 3.8 Principe de l'osmose. Les molécules d'eau se déplacent au travers de la membrane sélectivement perméable alors que les solutés ne le peuvent pas. (a) Les molécules d'eau se déplacent depuis la branche gauche vers la branche droite, en descendant leur gradient de concentration. (b) Le volume d'eau dans le bras gauche a diminué alors que le volume d'eau dans le bras droit a augmenté. (c) La pression exercée sur la solution présente dans le bras droit entraîne le retour aux conditions de départ.

L'osmose correspond au mouvement des molécules d'eau au travers d'une membrane sélectivement perméable.



Q Est-ce que le volume de liquide va augmenter dans le bras droit jusqu'au moment où les concentrations en eau seront identiques dans les deux branches du tube en U ?



www.lienmini.fr/33444-03

solutés de la branche droite reviendrait à ce qu'elle était au début de l'expérience (**Figure 3.8c**). L'importance de la pression nécessaire pour revenir aux conditions de départ est égale à la pression osmotique. Ce qui revient à dire que dans notre expérience, la pression osmotique correspond à la pression nécessaire pour arrêter le déplacement de l'eau de la branche gauche vers la branche droite du tube en U. Notez que la pression osmotique d'une solution n'est pas responsable du déplacement de l'eau lors de l'osmose. La pression osmotique est plutôt la pression nécessaire pour empêcher ce déplacement.

Normalement, la pression osmotique du cytosol est identique à la pression osmotique du liquide interstitiel situé entre les cellules. Du fait que la pression osmotique est identique de chaque côté de la membrane (qui est sélectivement perméable), le volume cellulaire reste relativement constant. Lorsque des cellules de l'organisme sont placées dans une solution ayant une pression osmotique différente de celle du cytosol, alors la forme et le volume des cellules changent. Comme l'eau se déplace par osmose dans et hors des cellules, leur volume augmente ou diminue. La **tonicité** d'une solution est la mesure de la capacité d'une solution à modifier le volume cellulaire en modifiant leur contenu en eau.

Toute solution au sein de laquelle une cellule, comme un globule rouge (GR) maintient sa forme et son volume normaux, est une **solution isotonique** (**Figure 3.9**). Les concentrations en solutés qui ne peuvent traverser la membrane plasmique sont identiques des deux côtés de la membrane dans cette solution. Par exemple, une solution

à 0,9% de NaCl (0,9 gramme de chlorure de sodium par 100ml de solution), appelée *solution saline normale ou physiologique*, est isotonique pour les GRs. La membrane plasmique des GRs permet à l'eau de se déplacer de part et d'autre, mais elle se comporte comme si elle est imperméable aux ions Na^+ et Cl^- , le soluté. (Chaque ion Na^+ et Cl^- qui entre dans la cellule par canal ou un transporteur est immédiatement rejeté à l'extérieur par un transport actif ou un autre moyen.) Lorsque des GRs sont en solution dans une solution à 0,9% de NaCl, les molécules d'eau entrent et sortent au même rythme, permettant aux GRs de maintenir leur forme et volume normaux.

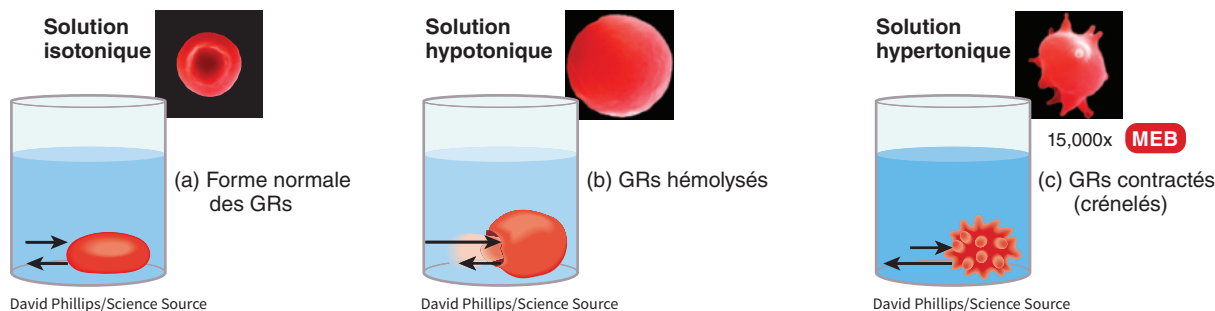
Une situation différente survient si les GRs sont mis en solution dans une **solution hypotonique**, une solution qui possède une concentration en solutés *moindre* que celle présente dans le cytosol des GRs (**Figure 3.9**). Dans ce cas, les molécules d'eau entrent dans la cellule plus vite qu'elles ne sortent, induisant un gonflement, voire un éclatement des GRs. La rupture des GRs obtenue de cette manière est appelée l'**hémolyse** ; la rupture d'autres types cellulaires liée à leur exposition à une solution hypotonique est appelée simplement la **lyse**. L'eau pure est très hypotonique et induit une hémolyse rapide.

Une **solution hypertonique** est caractérisée par une concentration en soluté *supérieure* à celle présente dans les GRs (**Figure 3.9**). Une solution à 2% de NaCl est un exemple de solution hypertonique. Dans une telle solution, les molécules d'eau sortent plus vite qu'elles ne rentrent, induisant la contraction des cellules. Cette contraction des cellules est appelée **crénation**.

FIGURE 3.9 Tonicité et ses effets sur les globules rouges (GRs). Les flèches indiquent la direction et l'importance des mouvements d'eau vers et hors des cellules.

Les globules rouges placés dans une solution isotonique maintiennent leur forme car il n'y a pas de mouvement net d'eau vers ou hors des cellules.

MEB : Microscope électronique à balayage



QUESTION	ISOTONIQUE	HYPOTONIQUE	HYPERTONIQUE
La membrane est-elle perméable à l'eau?	Oui	Oui	Oui
Où la concentration du soluté est-elle la plus élevée?	Identique des deux côtés de la paroi cellulaire	À l'intérieur de la cellule	À l'extérieur de la cellule
Où la concentration du soluté est-elle la plus basse?	Identique des deux côtés de la paroi cellulaire	À l'extérieur de la cellule	À l'intérieur de la cellule
Où la concentration en eau est-elle la plus élevée ?	Identique des deux côtés de la paroi cellulaire	À l'extérieur de la cellule	À l'intérieur de la cellule
Où la concentration en eau est-elle la plus basse?	Identique des deux côtés de la paroi cellulaire	À l'intérieur de la cellule	À l'extérieur de la cellule
Dans quel sens y-a-t-il un mouvement net de l'eau?	Aucun	De l'extérieur vers l'intérieur	De l'intérieur vers l'extérieur
Qu'advient-il de la taille de la cellule?	Reste identique	Gonfle (la cellule peut éclater)	Rétrécit

Q Est-ce qu'une solution de NaCl à 2% va induire une hémolyse ou une contraction des GRs ? Pourquoi ?

www.lienmini.fr/33444-03



Intérêt clinique

Utilisation clinique des solutions isotonique, hypertonique et hypotonique

Les GRs et les autres cellules de l'organisme peuvent être endommagées ou détruites lors de leur exposition à des solutions hypertoniques ou hypotoniques. Pour cette raison, la plupart des **solutions intraveineuses**, liquides perfusés dans le sang via une veine, sont isotoniques. Les solutions salines (0,9% de NaCl) et le glucose 5% dans de l'eau sont des exemples de solutions isotoniques. Une solution hypertonique de mannitol (NdT : polyalcool aliphatique à 6 atomes de carbone) est parfois utilisée pour traiter des patients atteints d'œdème cérébral. Du fait de son action osmotique, l'infusion d'une telle solution réduit la surcharge liquidienne en attirant l'eau de liquide interstitiel vers le compartiment sanguin. Les reins excrètent ensuite l'excès d'eau du sang vers les urines. Les solutions hypotoniques, administrées soit par voie orale ou par voie sanguine, sont utilisées pour soigner les personnes déshydratées. L'eau de la solution hypotonique se déplace du sang vers le liquide interstitiel puis vers les cellules qui se réhydratent. L'eau tout comme la plupart des boissons sportives que vous consommez pour vous réhydrater après l'effort sont hypotoniques par rapport aux cellules de votre organisme.

Révision

- Quels sont les facteurs qui augmentent le taux de diffusion ?
- Quels sont les points communs entre diffusion et diffusion facilitée ?
- Qu'est-ce que la pression osmotique ?
- Faites la distinction entre des solutions isotonique, hypotonique et hypertonique.

Processus actifs

Transport actif Certains solutés polaires ou chargés qui doivent entrer ou sortir des cellules de l'organisme ne peuvent passer au travers de la membrane plasmique par un moyen passif quelconque parce qu'ils doivent remonter leur gradient de concentration. Ces solutés ne peuvent traverser la membrane que par un processus appelé **transport actif**. Le transport actif est considéré comme un processus actif parce que de l'énergie est requise pour que des protéines de transport déplacent les solutés au travers de la membrane et contre leur gradient de concentration. Deux sources d'énergie cellulaire

peuvent être utilisées pour alimenter le transport actif : (1) l'énergie obtenue via l'hydrolyse de l'adénosine triphosphate (ATP) alimente le *transport actif primaire* ; (2) l'énergie stockée sous la forme d'un gradient de concentration ionique est à l'origine de l'alimentation du *transport actif secondaire*. Comme la diffusion facilitée par un transporteur, les processus de transports actifs sont caractérisés par une capacité maximale de transport et une saturation. Les solutés transportés activement au travers de la membrane plasmique comprennent plusieurs ions tels que Na^+ , K^+ , H^+ , Ca^{2+} , I^- et Cl^- ; les acides aminés et les monosaccharides. (Notez que certaines de ces substances peuvent également traverser la membrane par diffusion facilitée lorsque leurs protéines canal spécifiques sont présentes.)

TRANSPORT ACTIF PRIMAIRE Dans le **transport actif primaire**, c'est l'énergie dérivée de l'hydrolyse de l'ATP qui modifie la forme de la protéine de transport, qui pompe une substance au travers de la membrane et contre son gradient de concentration. Et effectivement, les protéines de transport qui réalisent le transport actif primaire sont parfois appelées des **pompes**. Une cellule typique de l'organisme dépense approximativement 40% de l'ATP qu'elle génère pour les transports actifs primaires. Les produits chimiques qui stoppent la production d'ATP, comme par exemple le poison cyanure, sont létaux parce qu'ils bloquent le transport actif des cellules de l'organisme.

Le plus important mécanisme de transport actif expulse les ions sodiques (Na^+) hors de la cellule et y font entrer les ions potassiques (K^+). Du fait des ions très spécifiques qu'il transporte, ce transporteur est appelé **pompe à sodium-potassium**. Du fait qu'une partie de ce transporteur agit comme une *ATPase*, un enzyme qui hydrolyse l'ATP, l'autre nom de cette pompe est la **$\text{Na}^+ - \text{K}^+$ ATPase**. Toutes les cellules possèdent des milliers de pompes $\text{Na}^+ - \text{K}^+$ dans leur membrane. Cette

pompe $\text{Na}^+ - \text{K}^+$ maintient une faible concentration de Na^+ dans le cytosol en pompant ces ions vers le liquide extracellulaire et contre le gradient de concentration du Na^+ . Au même moment, les pompes concentrent le K^+ dans les cellules à l'encontre de son gradient de concentration. Et parce que les ions Na^+ et K^+ retournent lentement au travers de la membrane plasmique en descendant leurs gradients de concentration électrochimique, par le biais de transports passifs ou de transports actifs secondaires, les pompes à $\text{Na}^+ - \text{K}^+$ doivent travailler non-stop pour maintenir une basse concentration de Na^+ et une haute concentration en K^+ dans le cytosol.

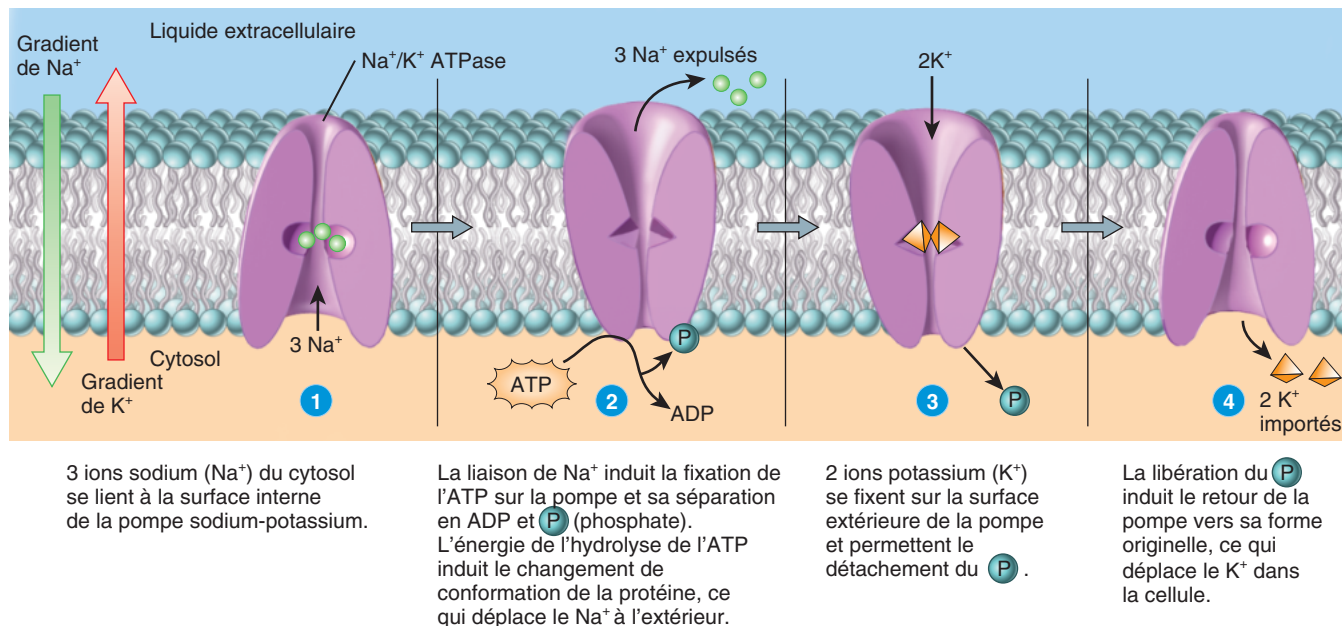
La **Figure 3.10** décrit le fonctionnement de la pompe sodium-potassium :

- 1 Trois Na^+ du cytosol se lient à la protéine de transport.
- 2 La liaison du Na^+ déclenche l'hydrolyse de l'ATP en ADP, une réaction qui attache également un groupement phosphate à la protéine de transport. Cette réaction chimique modifie la forme de la protéine de transport, expulsant les trois Na^+ dans le liquide extracellulaire. A ce moment, la forme de la pompe favorise la liaison de deux K^+ du liquide extracellulaire à la protéine de transport.
- 3 La liaison des K^+ déclenche la libération du groupement phosphate de la pompe. Cette réaction induit le changement de forme de protéine de transport.
- 4 Comme la pompe revient à sa forme originale, elle libère les K^+ dans le cytoplasme. À ce moment, la pompe est de nouveau prête à se lier à trois ions Na^+ , et le cycle recommence.

Les différentes concentrations de Na^+ et K^+ du cytosol et du liquide extracellulaire sont cruciaux pour le maintien du volume cellulaire

FIGURE 3.10 La pompe sodium-potassium ($\text{Na}^+ - \text{K}^+$ ATPase) expulse les ions sodium (Na^+) et concentre les ions potassium (K^+) dans la cellule.

Les pompes sodium-potassium maintiennent une concentration intracellulaire basse en ions sodiques.



Q Quel est le rôle de l'ATP dans le fonctionnement de cette pompe ?



normal et pour permettre à certaines cellules de générer des signaux électriques tels des potentiels d'action. Rappelez-vous que la tonicité d'une solution est proportionnelle à la concentration en particules de solutés qui ne peuvent pénétrer la membrane. Puisque les ions sodiques qui diffusent dans la cellule ou qui y pénètrent par le biais de transports actifs secondaires sont immédiatement pomper vers l'extérieur, c'est comme s'ils n'y étaient jamais entrés. En effet, les ions sodiques se comportent comme s'ils ne pouvaient traverser la membrane. Ce qui fait que les ions sodiques sont des contributeurs importants de la tonicité du liquide extracellulaire. Les mêmes conditions prévalent à l'accumulation de K^+ dans le cytosol. En participant au maintien d'une tonicité normale de chaque côté de la membrane plasmique, les pompes sodium-potassium assurent que les cellules ne gonflent ou ne se contractent pas du fait du mouvement osmotique d'eau hors ou vers la cellule.

TRANSPORT ACTIF SECONDAIRE Dans le **transport actif secondaire**, c'est l'énergie stockée sous la forme de gradients de concentration en Na^+ ou H^+ qui est utilisée pour amener d'autres substances au travers de la membrane contre leurs propres gradients de concentration. Parce que le gradient en Na^+ ou H^+ est obtenu du fait d'un transport actif primaire, le transport actif secondaire utilise indirectement l'énergie obtenue par l'hydrolyse de l'ATP.

La pompe sodium-potassium maintient un fort gradient de concentration en Na^+ de part et d'autre de la membrane. Il en résulte que les ions sodiques stockent de l'énergie potentielle tout comme de l'eau derrière un barrage. De la même manière, s'il y a un passage pour laisser rentrer le Na^+ , alors une partie de l'énergie stockée est convertie en énergie cinétique (énergie du mouvement) et peut être utilisée pour le transport d'autres substances contre leur gradient de concentration. Essentiellement, les protéines de transport actif secondaire exploitent l'énergie du gradient de concentration du Na^+ en lui fournissant des voies de passage pour qu'il rentre dans les cellules. Dans le transport actif secondaire, une protéine de transport se lie simultanément au Na^+ et à une autre substance pour ensuite changer de conformation, si bien que les deux substances traversent la membrane au même moment. Si ces transporteurs déplacent deux substances dans la même direction, on les appelle des **symports**, par opposition les **antiports** transportent des substances au travers de la membrane dans des directions opposées.

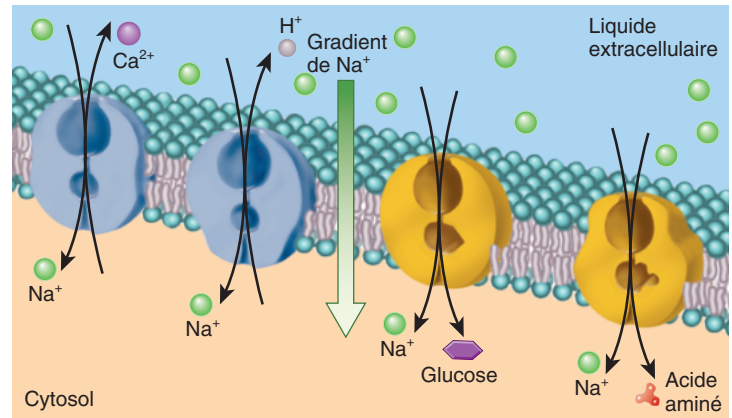
Les membranes plasmiques contiennent de nombreux symports et antiports qui sont alimentés énergiquement par le gradient de Na^+ (Figure 3.11). Par exemple, la concentration en ions calciques (Ca^{2+}) est faible dans le cytosol du fait de l'activité des antiporteurs Na^+-Ca^{2+} qui éjectent les ions calciques. De la même manière, les antiports Na^+-H^+ participent à la régulation du pH (concentration en H^+) cytosolique en expulsant l'excès de H^+ . À l'inverse le glucose alimentaire et les acides aminés sont absorbés dans les cellules qui tapissent l'intestin grêle par des symports $Na^+-glucose$ et $Na^+-acides aminés$ (Figure 3.11b). Dans chaque cas, les ions sodiques descendent leur gradient de concentration, alors que l'autre substance remonte contre leur gradient de concentration. Gardez en tête que ces symports et antiports ne peuvent fonctionner que les pompes sodium-potassium maintiennent une faible concentration en Na^+ dans le cytosol.

Transport vésiculaire Une **vésicule**, comme déjà mentionné précédemment, est un petit sac sphérique. Comme vous le verrez

FIGURE 3.11 Mécanismes des transports actifs secondaires.

(a) Les antiports transportent deux substances au travers de la membrane dans des directions opposées. (b) Les symports transportent deux substances à travers de la membrane dans la même direction.

Les mécanismes de transport actifs secondaires utilisent l'énergie stockée par un gradient de concentration ionique, dans ce cas-ci le Na^+ . Parce que les transporteurs actifs primaires hydrolysent l'ATP pour maintenir ce gradient, les mécanismes de transport actifs secondaires consomment indirectement de l'ATP.



(a) Échangeurs

(b) Symporteurs

Q Quelle est la principale différence entre les mécanismes de transports actifs primaire et secondaire ?

www.lienmini.fr/33444-03



Intérêt clinique

Les digitaliques augmentent la concentration en Ca^{2+} dans les cellules musculaires cardiaques

La **digitale** est parfois administrée aux patients présentant une décompensation cardiaque, un état d'affaiblissement de la pompe cardiaque. La digitale exerce son effet en ralentissant l'action des pompes sodium-potassium, ce qui laisse s'accumuler plus de Na^+ dans les cellules musculaires cardiaques. Il en résulte un affaiblissement du gradient transmembranaire de Na^+ , ce qui, à son tour, ralentit les antiports Na^+-Ca^{2+} . Il y a de ce fait plus de Ca^{2+} à l'intérieur des cellules cardiaques. La faible augmentation de la concentration en Ca^{2+} dans le cytosol des cellules musculaires cardiaques augmente la puissance de leurs contractions et par là augmente la force d'éjection du cœur.

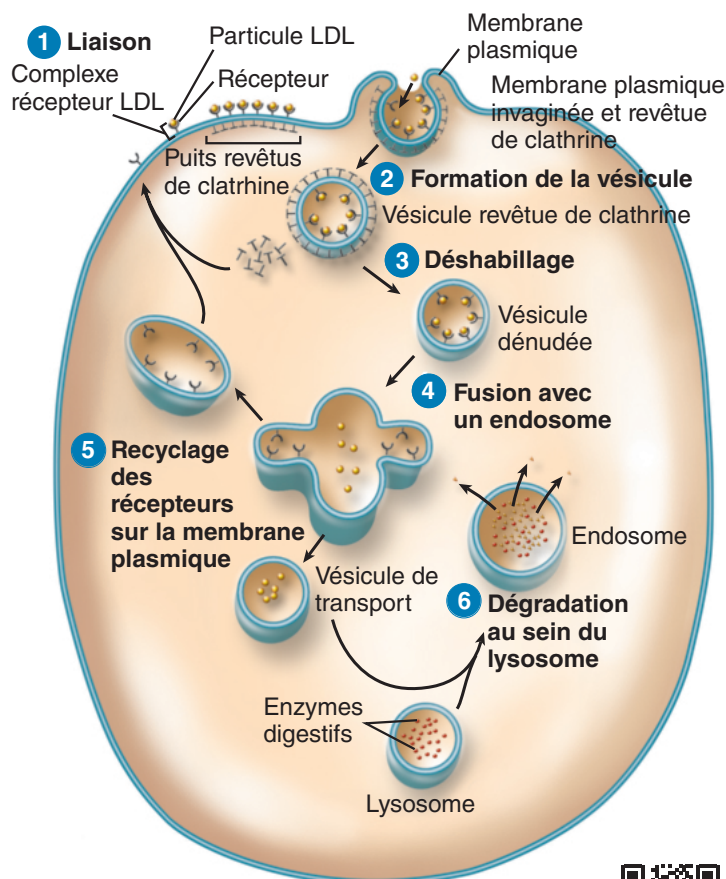
plus tard dans ce chapitre, toute une variété de substances sont transportées par des vésicules d'une structure à une autre au sein de la cellule. Les vésicules importent également du matériel vers la cellule et en exportent hors de la cellule vers le liquide extracellulaire. Lors de l'**endocytose**, des matières sont transportées vers la cellule au sein d'une vésicule formée à partir de la membrane plasmique. Lors de l'**exocytose**, des matières sont transportées hors de la cellule par le biais de la fusion des vésicules formées dans la cellule avec la membrane plasmique. Tant l'endocytose que l'exocytose requièrent de l'énergie apportée par l'ATP. Et donc le transport vésiculaire est un processus de transport actif.

ENDOCYTOSE Nous allons considérer ici trois types d'endocytose : l'endocytose médiée par récepteur, la phagocytose, et l'endocytose en vrac. L'**endocytose médiée par récepteur** est un type d'endocytose très sélectif par laquelle les cellules capturent des ligands spécifiques. (Rappelez-vous que les ligands sont des molécules qui se lient à des récepteurs spécifiques). Une vésicule se forme après qu'une protéine réceptrice de la membrane ait reconnu et se soit liée à une particule particulière du liquide extracellulaire. Par exemple, les cellules captent les lipoprotéines de faible densité contenant du cholestérol (LDLs), la transferrine (une protéine plasmatique transporteur de fer), certaines vitamines, des anticorps ainsi que certaines hormones via l'endocytose médiée par récepteur. L'endocytose médiée par récepteur de LDLs (et d'autres ligands) se réalise comme suit (**Figure 3.12**):

- 1 Liaison.** Sur la face extracellulaire de la membrane plasmique, une particule LDL qui contient du cholestérol se lie à un récepteur spécifique de la membrane plasmique pour former un complexe récepteur-LDL. Les récepteurs sont des protéines intégrées à la membrane et qui sont concentrés dans des régions de la membrane plasmique appelées des *puits revêtus*

FIGURE 3.12 Endocytose médiée par récepteur de particule de LDL (lipoprotéine de faible densité).

L'endocytose médiée par récepteur importe des matériaux utiles à la cellule.



Q Quelles sont les autres exemples de ligands qui peuvent induire une endocytose médiée par récepteur ?

www.lienmini.fr/33444-03



de *clathrine*. Là, une protéine appelée clathrine est fixée sur la face cytoplasmique de la membrane. De nombreuses molécules de clathrine se regroupent formant une structure en forme de panier de basket autour des complexes récepteurs-LDL, ce qui cause l'invagination de la membrane (repli interne).

- 2 Formation de la vésicule.** Les bords invaginés de la membrane autour du puits revêtu de clathrine fusionnent, et une petite partie de la membrane se détache. La vésicule qui en résulte, appelée vésicule revêtue de clathrine, contient les complexes récepteurs-LDL.
- 3 Déshabillage.** Presque immédiatement après sa formation, la vésicule revêtue de clathrine perd son revêtement de clathrine et les molécules de clathrine retournent vers la surface interne de la membrane plasmique pour participer à la formation d'autres vésicules dans la cellule.
- 4 Fusion avec un endosome.** La vésicule sans revêtement fusionne rapidement avec une autre vésicule appelée *endosome*. Au sein de l'endosome, les particules de LDL se séparent de leurs récepteurs.
- 5 Retours des récepteurs à la membrane plasmique.** La plupart des récepteurs s'accumulent dans des protrusions allongées de l'endosome (les bras de la vésicule en croix au centre de la figure). Celles-ci se séparent, formant des vésicules de transport qui ramènent les récepteurs à la membrane plasmique approximativement 10 minutes après qu'ils y soient rentrés.
- 6 Dégradation au sein des lysosomes.** D'autres vésicules de transport, qui contiennent les particules LDL, quittent l'endosome et fusionnent rapidement avec un *lysosome*. Les lysosomes contiennent de nombreux enzymes digestifs. Certains de ces enzymes cassent les protéines et les molécules de lipides des particules de LDL en acides aminés, acides gras et cholestérol. Ces plus petites molécules peuvent alors quitter les lysosomes. Les cellules utilisent le cholestérol pour reconstruire ses membranes et pour la synthèse des stéroïdes, tels que l'œstrogène. Les acides gras et les acides aminés peuvent être utilisés pour produire de l'ATP ou pour construire d'autres molécules utiles à la cellule.

Intérêt clinique

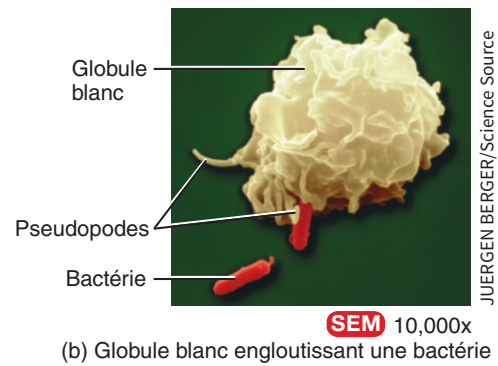
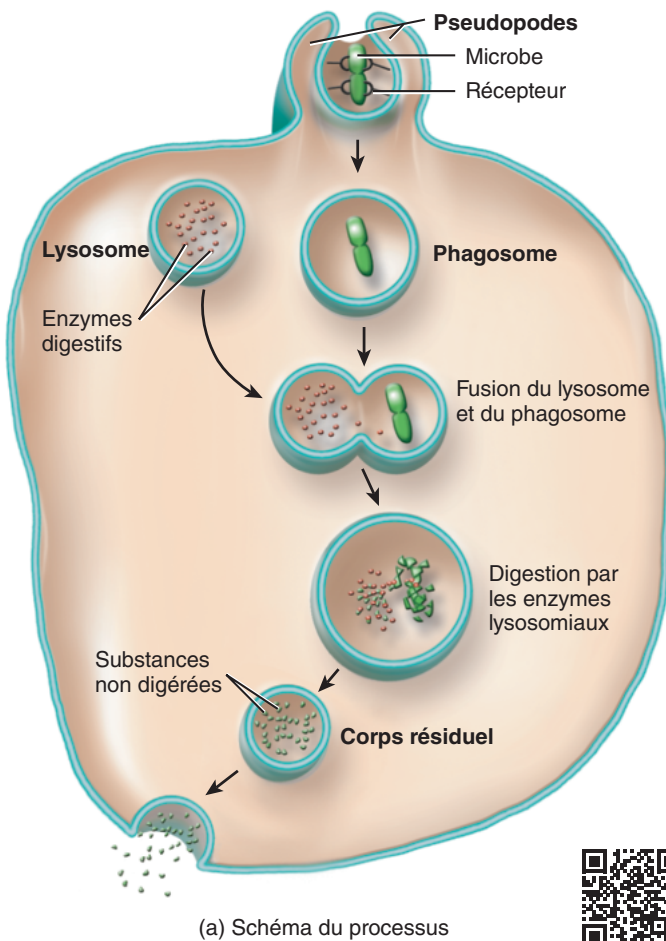
Virus et endocytose médiée par récepteur

Alors que l'endocytose médiée par récepteur importe normalement que du matériel nécessaire à la cellule, certains virus sont capables d'utiliser ce mécanisme pour entrer et infecter les cellules de l'organisme. Par exemple, le virus de l'immunodéficience humaine (HIV), responsable de syndrome immunodéficience acquise (SIDA), peut se fixer sur un récepteur appelé CD4. Ce récepteur est présent sur la membrane plasmique de globules blancs appelés lymphocytes T auxiliaires. Après s'être fixés sur CD4, le virus HIV entre dans le lymphocyte T auxiliaire par le biais de l'endocytose médiée par récepteur.

PHAGOCYTOSE La phagocytose est une forme d'endocytose où la cellule est capable d'avaler de grosses particules solides, telles que des vieilles cellules, des bactéries entières ou des virus (**Figure 3.13**). Seulement certaines cellules de l'organisme, appelées **phagocytes**, sont capables de phagocytose. Il n'y a que deux types de phagocytes, les *macrophages* localisés dans la plupart des tissus, et les *neutrophiles*, un type de globules blancs. La phagocytose commence lorsque la particule se lie au récepteur de la membrane plasmique du phagocyte, ce qui le conduit à produire des pseudopodes, qui sont des projections

FIGURE 3.13 Phagocytose. Des pseudopodes encerclent une particule, et les membranes fusionnent ensuite pour former un phagosome.

La phagocytose est un mécanisme de défense vital qui participe à la protection de l'organisme contre les maladies.



Intérêt clinique

Phagocytose et microbes

La phagocytose est un mécanisme de défense vital qui participe à la protection de l'organisme contre les maladies. Les macrophages éliminent les microbes envahissants et des milliards de globules rouges âgés et usés chaque jour, les neutrophiles aident également à débarrasser l'organisme des microbes envahissants. Le pus présent dans une plaie infectée est une mixture de neutrophiles, de macrophages et cellules issues des tissus morts.

Q Qu'est-ce qui déclenche la formation des pseudopodes ?

www.lienmini.fr/33444-03

de sa membrane plasmique et de son cytoplasme. Les **pseudopodes** encerclent la particule en restant hors de la cellule, puis les membranes fusionnent pour former une vésicule appelée *phagosome*, qui entre dans le cytoplasme. Le phagosome fusionne avec un ou plusieurs lysosomes, et les enzymes lysosomiaux digèrent le matériel ingéré. Dans la plupart des cas, certains matériaux non digérés dans le phagosome persistent indéfiniment dans une vésicule appelée alors un *corps résiduel*. Les granules résiduels sont alors soit sécrétés par la cellule via exocytose, ou restent stockés au sein de la cellule en granules de lipofuscine.

La plupart des cellules de l'organisme réalisent de l'endocytose non-spécifique ou **pinocytose**, une forme d'endocytose par laquelle la cellule « boit » une petite gouttelette de liquide extracellulaire (**Figure 3.14**). Il n'y a pas de récepteur protéique impliqué dans ce mécanisme ; tous les solutés dissouts dans le liquide extracellulaire sont amenés dans la cellule. Lors de la pinocytose, la membrane plasmique forme un repli interne et puis une vésicule contenant une gouttelette de liquide extracellulaire. La vésicule se détache de la membrane plasmique et entre dans le cytosol. Au sein de la cellule, la vésicule fusionne avec un lysosome, où les enzymes dégradent ce que la cellule a avalé. Les petites molécules qui en résultent, tels des acides aminés et des acides gras, quittent le lysosome pour être utilisés ailleurs par la cellule. La plupart des cellules sont capables de réaliser ce type de pinocytose, et spécialement les cellules absorbantes des intestins et des reins.

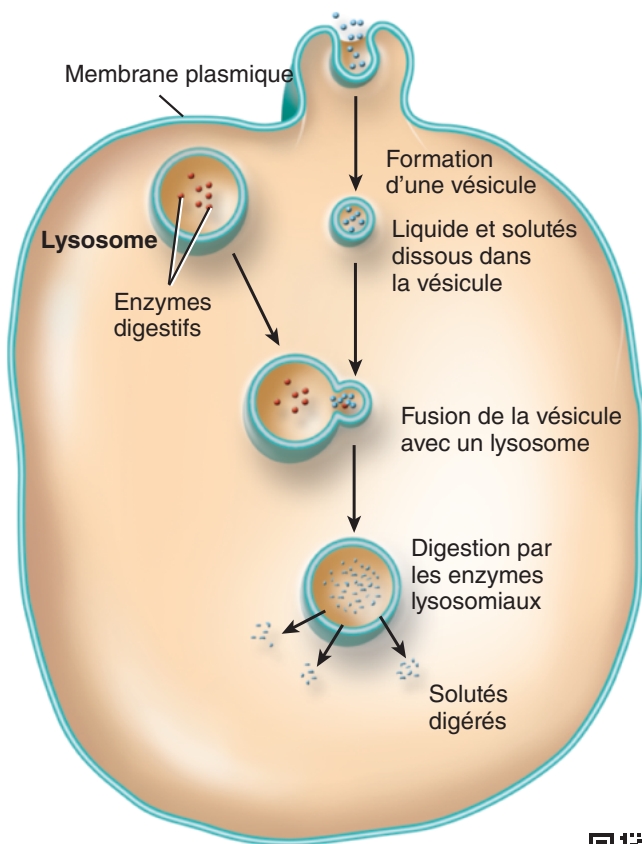
EXOCYTOSE À l'opposé de l'endocytose qui transporte des matériaux dans la cellule, l'exocytose libère des matériaux depuis la cellule. Toutes les cellules réalisent de l'exocytose, mais elle est particulièrement importante dans deux types de cellules : (1) les cellules sécrétrices qui libèrent des enzymes digestifs, du mucus, des hormones ou d'autres sécrétions ; et (2) les cellules nerveuses qui libèrent des substances appelées *neurotransmetteurs* (voir **Figure 12.23**). Dans certains cas, des déchets sont également libérés par exocytose. Lors de l'exocytose, des vésicules entourées d'une membrane et appelées *vésicules de sécrétion*, se forment à l'intérieur de la cellule, fusionnent avec la membrane plasmique, et libèrent leur contenu dans le liquide extracellulaire.

Les segments de membrane plasmique perdus lors de l'endocytose sont récupérés ou recyclés lors de l'exocytose. L'équilibre entre l'endocytose et l'exocytose maintient relativement constante la surface de la membrane plasmique de la cellule. Cet échange membranaire peut être relativement important dans certaines cellules. Dans votre pancréas, par exemple, les cellules qui sécrètent les enzymes digestifs peuvent recycler une quantité de membrane plasmique égale à l'entièreté de la surface cellulaire en 90 minutes.

TRANSCYTOSE Le transport vésiculaire peut également être successivement utilisé pour déplacer une substance dans, à travers et hors de la cellule. Dans ce processus actif, appelé transcytose, les vésicules

FIGURE 3.14 Pinocytose. La membrane plasmique s'invagine pour former une vésicule.

La plupart des cellules de l'organisme sont capables de réaliser ce type de pinocytose, la capture non sélective de fines gouttelettes de liquide extracellulaire.



Q Qu'est-ce qui différencie la phagocytose et l'endocytose médiée par des récepteurs de pinocytose ?

www.lienmini.fr/33444-03



réalisent de l'endocytose d'un côté de la cellule, circulent au travers de la cellule, et réalisent de l'exocytose du côté opposé. Lorsque les vésicules fusionnent avec la membrane plasmique, le contenu vésiculaire est libéré dans le liquide extracellulaire. La transcytose est utilisée le plus souvent par les cellules épithéliales qui bordent les vaisseaux sanguins, et c'est un moyen utilisé pour déplacer du matériel entre le plasma sanguin et le liquide interstitiel. Par exemple, lorsqu'une femme est enceinte, certains de ses anticorps traversent le placenta vers la circulation fœtale via la transcytose.

Le **Tableau 3.1** résume les processus par lesquels des matériaux sont déplacés vers et hors des cellules.

Révision

12. Quelles sont les différences principales entre des processus actifs et passifs ?
13. Comment les symports et antiports remplissent-ils leurs fonctions ?
14. Quelles sont les sources d'énergie cellulaire du transport actif ?
15. De quelle manière l'endocytose et l'exocytose sont-elles similaires et différentes ?

3.4

Cytoplasme

OBJECTIFS

- **Décrire** la structure et la fonction du cytoplasme, du cytosol et des organites.

Le **cytoplasme** est constitué de tout le contenu cellulaire situé entre la membrane plasmique et le noyau, et possède deux composants (1) le cytosol et (2) les organites, de très petites structures qui réalisent différentes fonctions dans la cellule.

Cytosol

Le **cytosol** (liquide intracellulaire) est la partie liquide du cytoplasme qui entoure les organites (voir **Figure 3.1**) et qui constitue approximativement 55% du volume cellulaire total. Alors qu'il peut varier en composition et consistance d'un côté à l'autre de la cellule, le cytosol est à 75-90% constitué d'eau et de nombreux constituants dissous et en suspension. Parmi ceux-ci, il y a différents types d'ions, du glucose, des acides aminés, des acides gras, des protéines, des lipides, de l'ATP, et des déchets, nous avons déjà discuté de certains d'entre eux. Dans certaines cellules, il y a aussi quelques molécules organiques qui sont rassemblées et stockées. Ces agrégats peuvent apparaître et disparaître à différents moments de la vie d'une cellule. Les gouttelettes lipidiques qui contiennent des triglycérides en sont un exemple, comme des amas de glycogène (voir **Figure 3.1**).

Le cytosol est le site de nombreuses réactions chimiques indispensables à la vie cellulaire. Par exemple, les enzymes cytosoliques qui catalysent la glycolyse, une série de 10 réactions chimiques qui produisent 2 molécules d'ATP à partir d'une molécule de glucose (voir **Figure 25.4**). D'autres types de réactions cytosoliques produisent les blocs de construction pour la maintenance des structures cellulaires et pour sa croissance.

Le **cytosquelette** est un réseau de filaments protéiques qui s'étend au travers de tout le cytosol (voir **Figure 3.1**). Trois types de filaments contribuent à la structure du cytosquelette, et à la structure d'autres organites. Du plus petit au plus grand diamètre, il y a les microfilaments, les filaments intermédiaires, et les microtubules.

MICROFILAMENTS Les **microfilaments** sont les plus petites structures du cytosquelette. Ils sont composés des protéines actine et myosine, et sont surtout présents le long de la membrane (**Figure 3.15a**). Les microfilaments ont deux fonctions générales : ils participent aux mouvements et procurent un support mécanique. Concernant les mouvements, ils sont impliqués dans les contractions musculaires, la division cellulaire, et la locomotion cellulaire, comme la locomotion des cellules embryonnaires qui survient au cours du développement, comme lors de l'invasion des tissus par les globules blancs lors de la lutte contre une infection, ou lors de la migration des cellules de la peau qui survient lors de la cicatrisation des plaies.

Les microfilaments procurent la plupart du support mécanique responsable de la forme de base des cellules. Ils sont responsables de l'ancrage du cytosquelette aux protéines intégrées à la membrane

TABEAU 3.1 Transport de matériel dans et hors de la cellule

TYPE DE TRANSPORT	DESCRIPTION	SUBSTANCES TRANSPORTÉES
PROCESSUS PASSIFS	Mouvement de substances qui descendent leur gradient de concentration jusqu'à ce que l'équilibre est atteint ; ne requiert pas d'énergie cellulaire sous la forme d'ATP.	
Diffusion	Mouvement de substances ou d'ions qui descendent leur gradient de concentration du fait de leur énergie cinétique jusqu'à ce que l'équilibre est atteint.	
Diffusion simple	Mouvement passif d'une substance qui descend son gradient de concentration au travers de bicouche lipidique de la membrane plasmique et sans l'aide de protéine de transport membranaire.	Solutés non polaires et hydrophobes : O ₂ , CO ₂ , gaz azotés, acides gras stéroïdes et vitamines liposolubles. Molécules polaires telles que l'eau, l'urée et les petits alcools.
Diffusion facilitée	Mouvement passif d'une substance qui descend son gradient de concentration au travers de la bicouche lipidique à l'aide de protéines transmembranaires qui agissent comme des canaux ou des transporteurs.	Solutés polaires ou chargés : glucose, fructose, galactose, certaines vitamines, et les ions tels que K ⁺ , Cl ⁻ , Na ⁺ et Ca ²⁺ .
Osmose	Mouvement passif de molécules d'eau au travers d'une membrane sélectivement perméable à partir d'une zone de concentration en eau élevée vers une zone de basse concentration en eau, et ce jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint.	Solvant : l'eau dans les systèmes vivants.
PROCESSUS ACTIFS	Mouvement de substances à l'encontre de leur gradient de concentration ; requiert de l'énergie cellulaire sous la forme d'ATP.	
Transport actif	Processus actif par lequel une cellule dépense de l'énergie pour déplacer une substance au travers de la membrane contre son gradient de concentration et en utilisant des protéines transmembranaires comme transporteurs.	Solutés polaires ou chargés.
Transport actif primaire	Processus actif par lequel une substance est déplacée au travers de la membrane contre son gradient de concentration par le biais de pompes (transporteurs) qui utilisent de l'énergie apportée par l'hydrolyse de l'ATP.	Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , H ⁺ , I ⁻ , Cl ⁻ , et d'autres ions.
Transport actif secondaire	Transport actif couplé de deux substances au travers de la membrane en utilisant l'énergie apportée par le gradient de concentration du Na ⁺ ou K ⁺ , lui-même entretenu par les pompes de transports actifs primaires. Les antiports déplacent Na ⁺ (ou H ⁺) et une autre substance dans des directions opposées au travers de la membrane ; les symports déplacent Na ⁺ (ou H ⁺) et une autre substance dans la même direction au travers de la membrane.	Antiports : Ca ²⁺ , H ⁺ hors de la cellule. Symports : Glucose et acides aminés vers la cellule
Transport vésiculaire	Processus actif par lequel une substance est déplacée dans ou hors des cellules au sein de vésicules qui bourgeonnent à partir de la membrane plasmique, requiert de l'énergie apportée par l'ATP.	
Endocytose	Mouvement vers la cellule de substances au sein de vésicules.	
Endocytose médiée par récepteur	Complexe récepteur-ligand qui déclenche l'invagination d'un puits tapissé de clathrine et qui va former une vésicule contenant les ligands.	Ligands : transferrine, lipoprotéines de faible densité (LDLs), certaines vitamines, certaines hormones et anticorps.
Phagocytose	Mouvement d'une particule solide vers la cellule après avoir été avalée par des pseudopodes qui forment un phagosome.	Bactéries, virus, et des cellules âgées ou mortes.
Pinocytose	Mouvement de fluide extracellulaire vers la cellule via l'invagination de la membrane plasmique pour former une vésicule.	Solutés du liquide extracellulaire.
Exocytose	Mouvement de substances vers l'extérieur de la cellule dans des vésicules de sécrétion qui fusionnent avec la membrane plasmique et libèrent leur contenu dans le fluide extracellulaire.	Neurotransmetteurs, hormones, et enzymes digestifs.
Transcytose	Mouvement d'une substance au travers d'une cellule et lié à l'association d'endocytose d'un côté et à d'exocytose de l'autre côté de la cellule.	Substances telles que des anticorps au travers des cellules endothéliales. Ceci est une voie normale pour passer du plasma sanguin vers le liquide interstitiel.

plasmique. Les microfilaments procurent également le support mécanique des extensions cellulaires appelées **microvillosités**, qui sont des projections digitées et non mobiles de la membrane. Au sein de chaque microvillosité se trouve un axe de microfilaments parallèles qui lui donne son support. Parce qu'elles augmentent grandement la surface de la cellule, les microvillosités sont abondantes sur les cellules impliquées dans l'absorption comme les cellules épithéliales qui recouvrent l'intestin grêle.

FILAMENTS INTERMÉDIAIRES Comme leur nom le suggère, les **filaments intermédiaires** sont plus épais que les microfilaments mais plus fins que les microtubules (Figure 3.15b). Plusieurs protéines différentes composent les filaments intermédiaires, qui sont exceptionnellement résistants. On les retrouve dans les parties des cellules soumises au stress

mécanique ; ils aident à stabiliser la position des organites comme le noyau et participent à la fixation des cellules les unes aux autres.

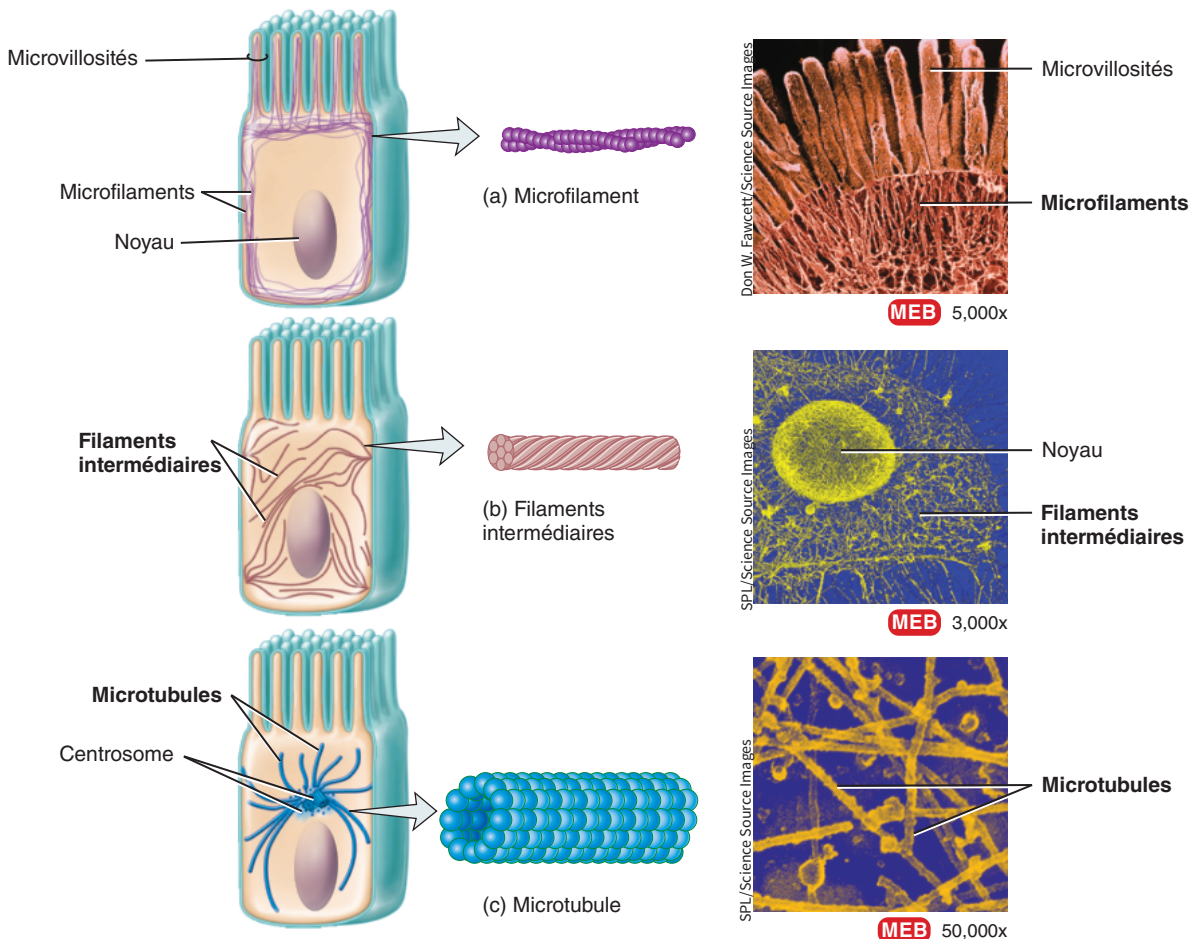
MICROTUBULES Les **microtubules**, les plus gros des composants du cytosquelette, sont de longs tubes creux non ramifiés composés principalement de la protéine tubuline. L'assemblage des microtubules débute au niveau d'un organite appelé le centrosome. Les microtubules grandissent à partir du centrosome vers la périphérie de la cellule (Figure 3.15c). Les microtubules participent à la détermination de la forme cellulaire. Ils participent également au mouvement des organites comme les vésicules de sécrétion, des chromosomes lors de la division cellulaire, et des projections cellulaires spécialisées comme les cils et les flagelles.

FIGURE 3.15 Le cytosquelette.

Le cytosquelette est un réseau de trois types de protéines filaments : les microfilaments, les filaments intermédiaires, et les microtubules, et qui s'étend au travers de tout le cytoplasme.

Les fonctions du cytosquelette

1. Sert d'échafaudage qui aide à maintenir la forme cellulaire et organise le contenu cellulaire.
2. Participe aux mouvements des organites au sein de la cellule, des chromosomes au cours de la division cellulaire, et de toutes les cellules telles que les phagocytes.



Q Quel composant du cytosquelette participe à la formation de la structure des centrioles, des cils, et des flagelles ?

www.lienmini.fr/33444-03



Organites

Comme déjà mentionné précédemment, les **organites** sont des structures spécialisées, situées dans la cellule et qui possèdent des formes caractéristiques et remplissent des fonctions spécifiques dans la croissance cellulaire, la maintenance et la reproduction cellulaire. En dépit des très nombreuses réactions chimiques réalisées au sein de la cellule à chaque instant, il y a peu d'interférences entre ces réactions du fait qu'elles sont confinées dans des organites différents. Chaque type d'organite possède son propre set enzymatique qui remplit des fonctions spécifiques, et sert de compartiment fonctionnel pour des processus biochimiques spécifiques. Le nombre et le type d'organites varie pour différentes cellules, dépendant de la fonction cellulaire. Alors qu'ils ont des fonctions différentes, des organites collaborent parfois au maintien de l'homéostasie. Alors que le noyau est un grand organite, il est présenté dans une section différente du fait de son grande importance dans le contrôle de la vie cellulaire.

Centrosome Le **centrosome**, ou centre organisationnel des microtubules, est situé près du noyau et est constitué de deux composants : une paire de centrioles et la matrice péricentriolaire (Figure 3.16a). Les deux **centrioles**, chacun composé de neuf groupes de trois microtubules (triplets) sont organisés en une forme circulaire (Figure 3.16b). Le long axe d'un centriole est à angle droit du long axe de l'autre (Figure 3.16c). Autour des centrioles se trouve la **matrice**

péricentriolaire, qui contient des centaines de complexes en forme d'anneau et composée de la protéine *tubuline*. Ces complexes de tubuline sont les centres organisateurs de la croissance du fuseau mitotique qui joue un rôle crucial dans la division cellulaire, et pour la formation des microtubules dans les cellules qui ne se divisent pas. Au cours de la division cellulaire, les centrosomes se répliquent si bien que les générations cellulaires suivantes conservent leur capacité de division.

Cils et flagelles Les microtubules sont les composants principaux des cils et flagelles, qui sont des projections mobiles de la surface cellulaire. Les **cils** sont nombreux et courts ; ce sont des projections en forme de cheveux à partir de la surface cellulaire (voir Figures 3.1 et 3.17b). Chaque cil contient un axe de 20 microtubules entourés de membrane plasmique (Figure 3.17a). Les microtubules sont organisés de cette manière : une paire centrale de microtubules est entourée de neuf groupes de deux microtubules fusionnés (doublets). Chaque cil est ancré à un corps basal situé juste sous la surface de la membrane plasmique. Un corps basal possède une structure similaire au centriole et son rôle est d'organiser l'assemblage du cil ou du flagelle.

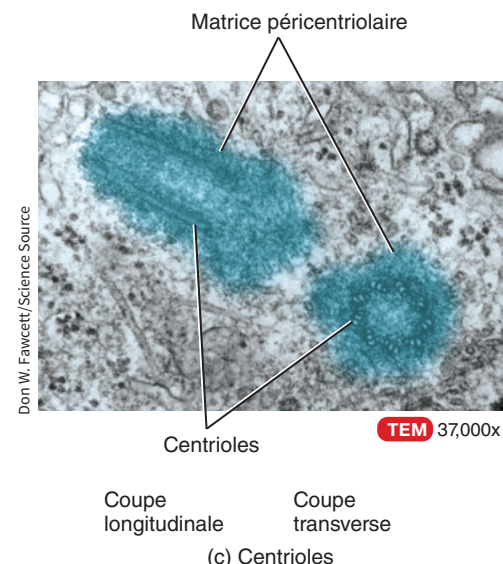
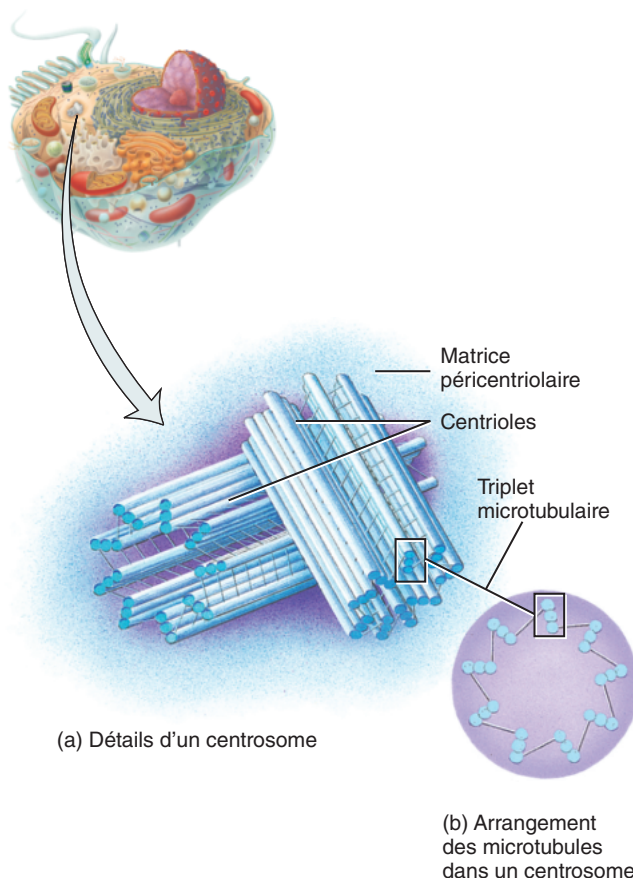
Un cil présente un modèle de battements de type « rameur » : il est relativement rigide lors du battement aller (l'aviron qui plonge et s'appuie dans l'eau), mais plus souple lors du battement en retour (aviron qui revient à sa position de départ en glissant à plat sur l'eau)

FIGURE 3.16 Le centrosome.

Localisé près du noyau, le centrosome est constitué d'une paire de centrioles et de la matrice péricentriolaire.

Fonctions des centrosomes

1. La matrice péricentriolaire du centrosome contient la tubuline à la base de la construction des microtubules dans les cellules qui ne se divisent pas.
2. La matrice péricentriolaire du centrosome forme le fuseau mitotique durant la division cellulaire.



Q Si vous observez une cellule qui ne possède pas de centrosome, que pouvez-vous prédire de sa capacité à se diviser ?

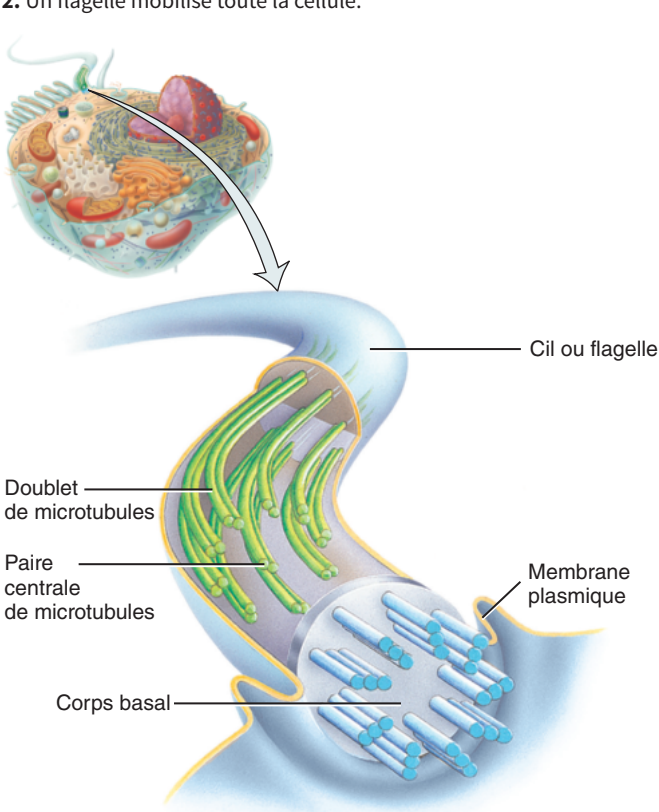


FIGURE 3.17 Cils et flagelles.

Un cil contient un cœur constitué de microtubules avec une paire centrale entourée de neuf doublets de microtubules.

Fonctions des cils et flagelles

- 1. Les cils mobilisent les fluides le long de la surface cellulaire.
- 2. Un flagelle mobilise toute la cellule.



(a) Arrangements des microtubules dans un cil ou un flagelle

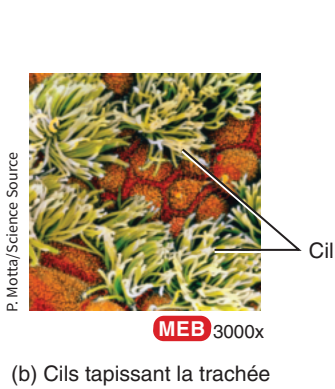
Intérêt clinique

Cil et tabagisme

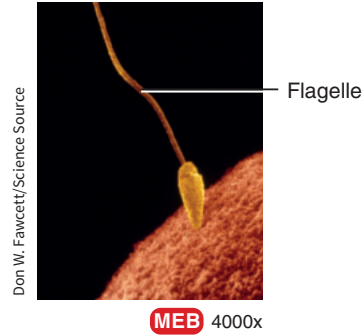
Le mouvement des cils est paralysé par la nicotine présente dans la fumée de cigarette. C'est pour cette raison que les fumeurs toussent souvent pour expulser de petites particules hors de leurs voies aériennes. Les cellules qui tapissent les trompes de Fallope possèdent également des cils qui font progresser l'ovocyte vers l'utérus, et les femmes qui fument ont plus de risques de présenter une grossesse ectopique

(Figure 3.17d). Les mouvements coordonnés de nombreux cils de la surface d'une cellule induit le déplacement continu du fluide présent à la surface cellulaire. Les nombreuses cellules du tractus respiratoire, par exemple, possèdent des centaines de cils qui facilitent le balayage de particules étrangères capturées par le mucus qui tapisse les bronches. La mucoviscidose induit la sécrétion d'un mucus extrêmement épais qui gêne l'action des cils et leur fonctionnement normal au niveau du tractus respiratoire.

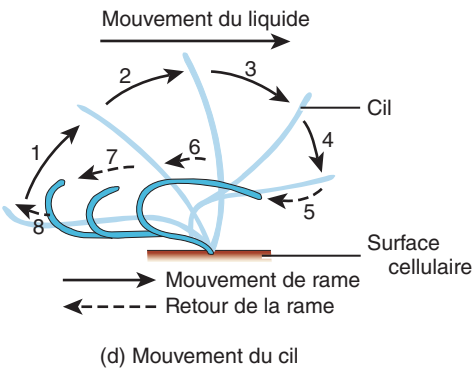
Les flagelles possèdent une structure similaire aux cils mais sont



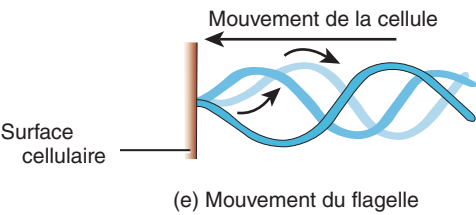
(b) Cils tapissant la trachée



(c) Flagelle d'un spermatozoïde



(d) Mouvement du cil



(e) Mouvement du flagelle

Q Quelle est la différence fonctionnelle entre un cil et un flagelle ?

www.lienmini.fr/33444-03



typiquement bien plus longs. Un flagelle mobilise normalement toute une cellule. Un flagelle induit un mouvement vers l'avant le long de son axe en battant rapidement à la manière d'une vague (Figure 3.17e). La queue du spermatozoïde est le seul exemple de flagelle du corps humain, le flagelle propulse le spermatozoïde vers l'ovocyte dans la cavité utérine (Figure 3.17c).

Ribosomes Les ribosomes sont les sites de la synthèse protéique. Le nom de ces petites structures reflète leur contenu élevé d'un type

d'acides ribonucléiques (ARN ribosomal, ARNr), mais chacun d'entre eux contient plus de 50 protéines. Structuellement, un ribosome est constitué de deux sous-unités, l'une correspondant à la moitié de la taille de l'autre (**Figure 3.18**). La grande et la petite sous-unités sont construites séparément dans le nucléole, une structure sphérique au sein du noyau. Une fois produites, les petite et grande sous-unités sortent séparément du noyau pour s'assembler dans le cytoplasme.

Certains ribosomes sont fixés à la surface externe de la membrane nucléaire de même que sur une membrane extrêmement plissée et appelée le réticulum endoplasmique. Ces ribosomes synthétisent des protéines pour des organites spécifiques, pour être insérées au sein de la membrane plasmique, ou pour l'exportation hors de la cellule. D'autres ribosomes sont libres ou non fixés à d'autres structures cytoplasmiques. Les ribosomes libres synthétisent des protéines destinées au cytosol. Des ribosomes sont également localisés au sein des mitochondries, où ils synthétisent les protéines mitochondriales.

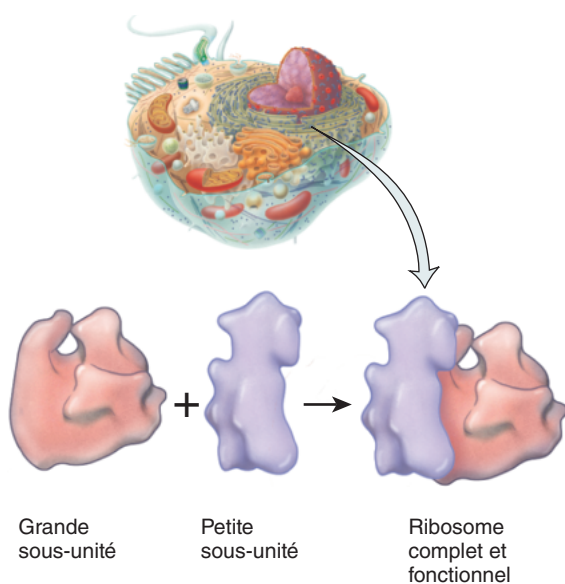
Réticulum endoplasmique Le **réticulum endoplasmique (RE)** est un réseau de membrane sous la forme de sacs aplatis ou de tubules (**Figure 3.19**). Le RE s'étend depuis l'enveloppe nucléaire (membrane autour du noyau) avec laquelle il est connecté et se déploie dans tout le cytoplasme. Le RE est si important qu'il constitue plus de la moitié des surfaces membranaires dans le cytoplasme de la plupart des cellules.

FIGURE 3.18 Les ribosomes.

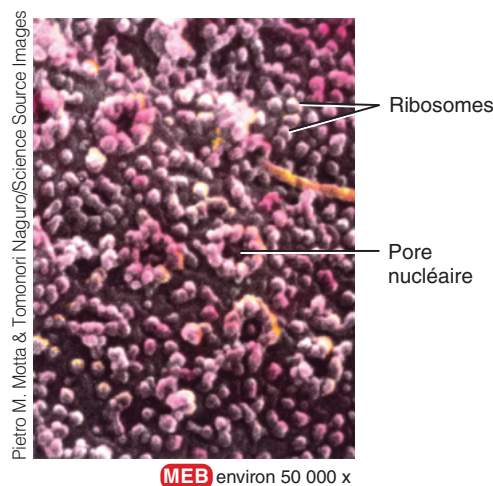
Les ribosomes sont le site de la synthèse protéique.

Fonctions des ribosomes

1. Les ribosomes associés au réticulum endoplasmique synthétisent les protéines destinées à être insérées dans la membrane plasmique ou sécrétées hors de la cellule.
2. Les ribosomes libres synthétisent les protéines du cytosol.



(a) Détails des sous-unités du ribosome



(b) Microscopie électronique à balayages de ribosomes et de pores nucléaires

Q Où sont synthétisées et assemblées les sous-unités des ribosomes ?

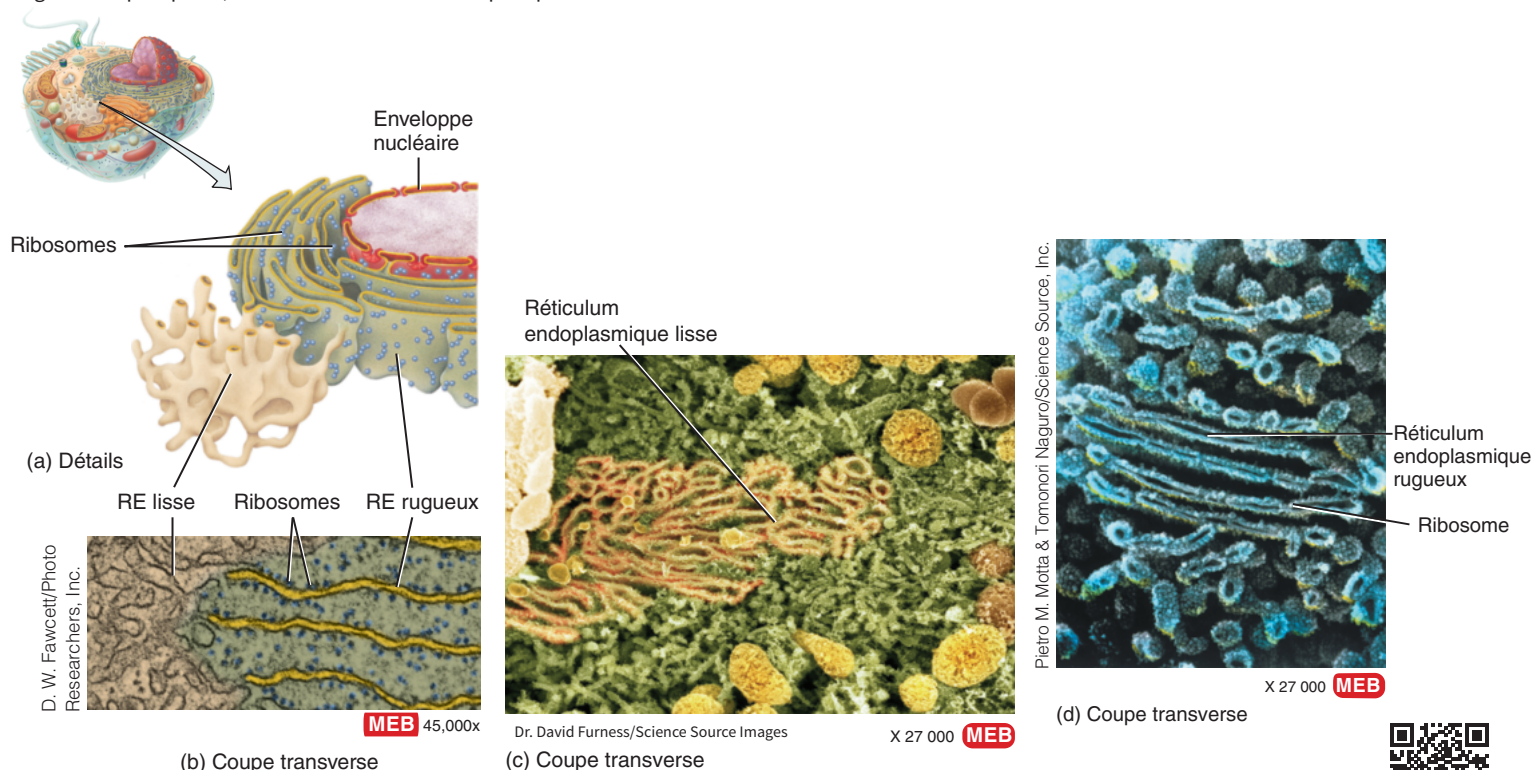


FIGURE 3.19 Le réticulum endoplasmique.

Le réticulum endoplasmique est un réseau de sacs ou de tubules membranaires qui s'étend au travers de tout le cytoplasme et qui est connecté à l'enveloppe nucléaire.

Fonctions du réticulum endoplasmique

1. Le RE rugueux synthétise les glycoprotéines et phospholipides qui sont transférées dans les organites cytoplasmiques, insérées dans la membrane plasmique, ou sécrétées par exocytose.
2. Le RE lisse synthétise des acides gras et des stéroïdes, tels que les œstrogènes et la testostérone, inactive ou détoxifie des drogues et d'autres substances potentiellement délétères, retire le groupement phosphate du glucose-6-phosphate, stocke et libère les ions calciques qui déclenchent la contraction des cellules musculaires.

**Q Quelles sont les différences structurelles et fonctionnelles entre les RE rugueux et lisse ?**

www.lienmini.fr/33444-03

Intérêt clinique**RE lisse et tolérance aux médicaments**

Une des fonctions du RE lisse, comme noté précédemment, est de détoxifier les médicaments. Les individus qui prennent régulièrement de tels médicaments, comme le phénobarbital, un sédatif, développent des modifications de leur RE lisse au sein de leurs cellules hépatiques. L'administration prolongée de phénobarbital induit une augmentation de la tolérance à ce médicament : la même dose ne produit pas le même effet sédatif très longtemps. Avec des expositions répétées à ce médicament, la quantité de RE lisse et de ses enzymes augmentent pour protéger les cellules contre les effets toxiques. Au fur et à mesure que la quantité de RE lisse augmente, il faut des dosages de plus importants du médicament pour obtenir l'effet observé au départ. Ce qui résulte en une possibilité de surdosage de plus en plus grande associée à une dépendance à la drogue de plus en plus forte.

Appareil de Golgi La plupart des protéines synthétisées par les ribosomes attachés aux ribosomes du RE rugueux sont finalement transportées vers d'autres régions de la cellule. La première étape de

ce cheminement passe par un organe appelé l'**appareil de Golgi**. Cet organe consiste en 3 à 20 saccules, de petits sacs membraneux aplatis avec des bordures bombées qui ressemblent à une pile de pains à pita (Figure 3.20). Les **saccules** sont parfois incurvés, donnant à l'appareil de Golgi une forme de tasse. La plupart des cellules possèdent plusieurs appareils de Golgi, et les appareils de Golgi sont plus développés au niveau des cellules qui sécrètent des protéines, un indice du rôle de ces organites dans la cellule.

Les saccules situées à l'autre extrémité de l'appareil de Golgi diffèrent les unes des autres en tailles, formes et activités enzymatiques. La **face d'entrée (cis)** est une saccule convexe qui fait face au RE rugueux. La **face de sortie (trans)** est une sortie concave qui fait face à la membrane plasmique. Les citernes situées entre les faces d'entrée et de sortie sont appelées les **saccules intermédiaires**. Des vésicules de transport issues du RE se regroupent pour former la saccule d'entrée. À partir de cette face d'entrée, les citernes évoluent pour devenir à leur tour des saccules intermédiaires puis de sorties.

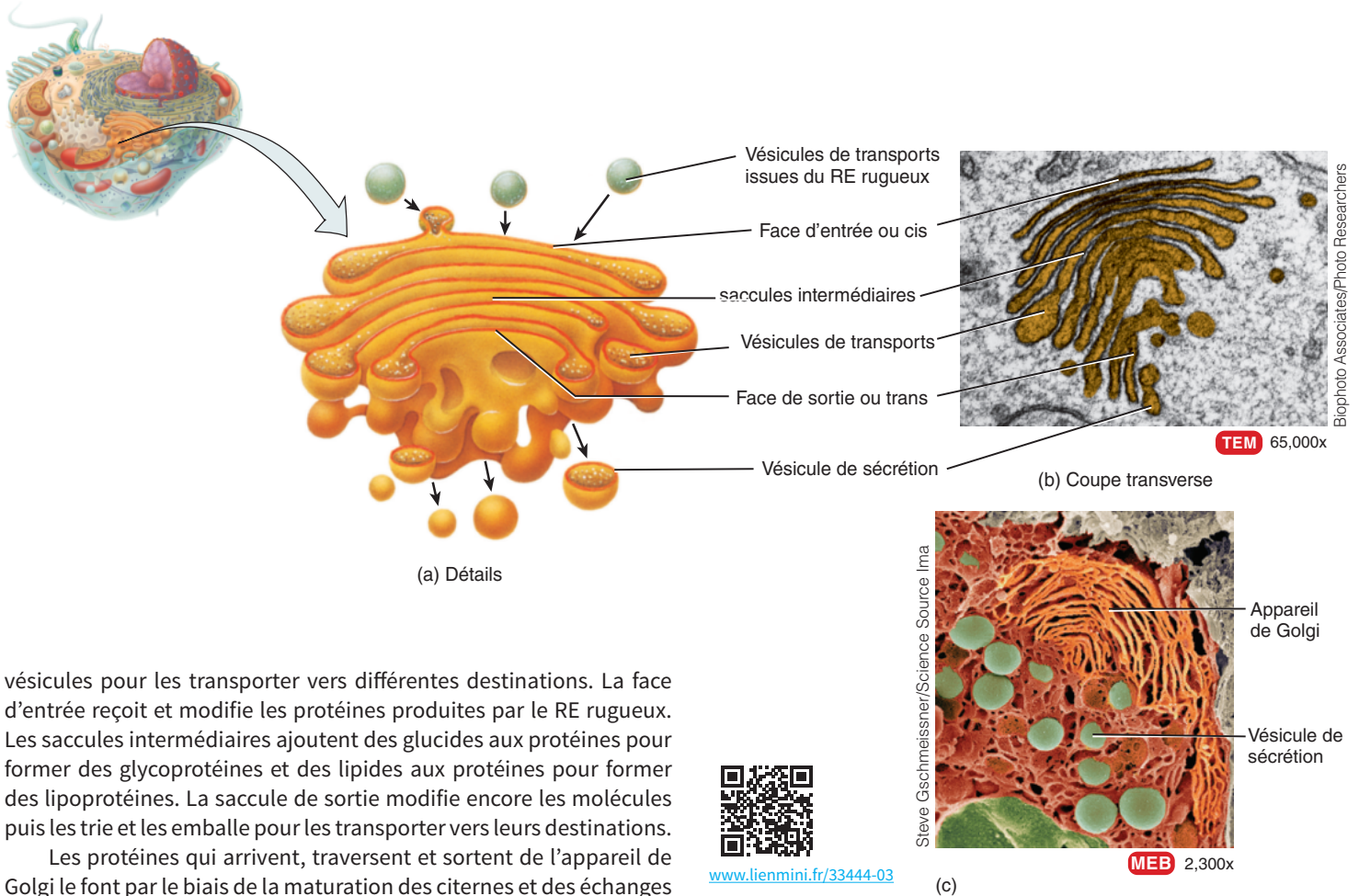
Différents enzymes situés au niveau des saccules d'entrée, médianes, et de sortie de l'appareil de Golgi permettent à chacune de ces zones de modifier, trier, et d'emballer les protéines dans des

FIGURE 3.20 L'appareil de Golgi.

Les faces opposées de l'appareil de Golgi diffèrent dans leurs tailles, formes, contenus et leurs activités enzymatiques.

Fonctions de l'appareil de Golgi

1. Modifie, trie, emballe et transporte les protéines reçues du RE rugueux.
2. Forme les vésicules de sécrétion qui déversent les protéines modifiées via exocytose dans le liquide extracellulaire ; forme des vésicules membranaires qui charrient les nouvelles molécules vers la membrane plasmique ; forme des vésicules de transport qui apportent les molécules vers d'autres organites, tels les lysosomes.



vésicules pour les transporter vers différentes destinations. La face d'entrée reçoit et modifie les protéines produites par le RE rugueux. Les saccules intermédiaires ajoutent des glucides aux protéines pour former des glycoprotéines et des lipides aux protéines pour former des lipoprotéines. La sacculle de sortie modifie encore les molécules puis les trie et les emballe pour les transporter vers leurs destinations.

Les protéines qui arrivent, traversent et sortent de l'appareil de Golgi le font par le biais de la maturation des citernes et des échanges qui se produisent entre elles via des vésicules de transport (**Figure 3.21**):

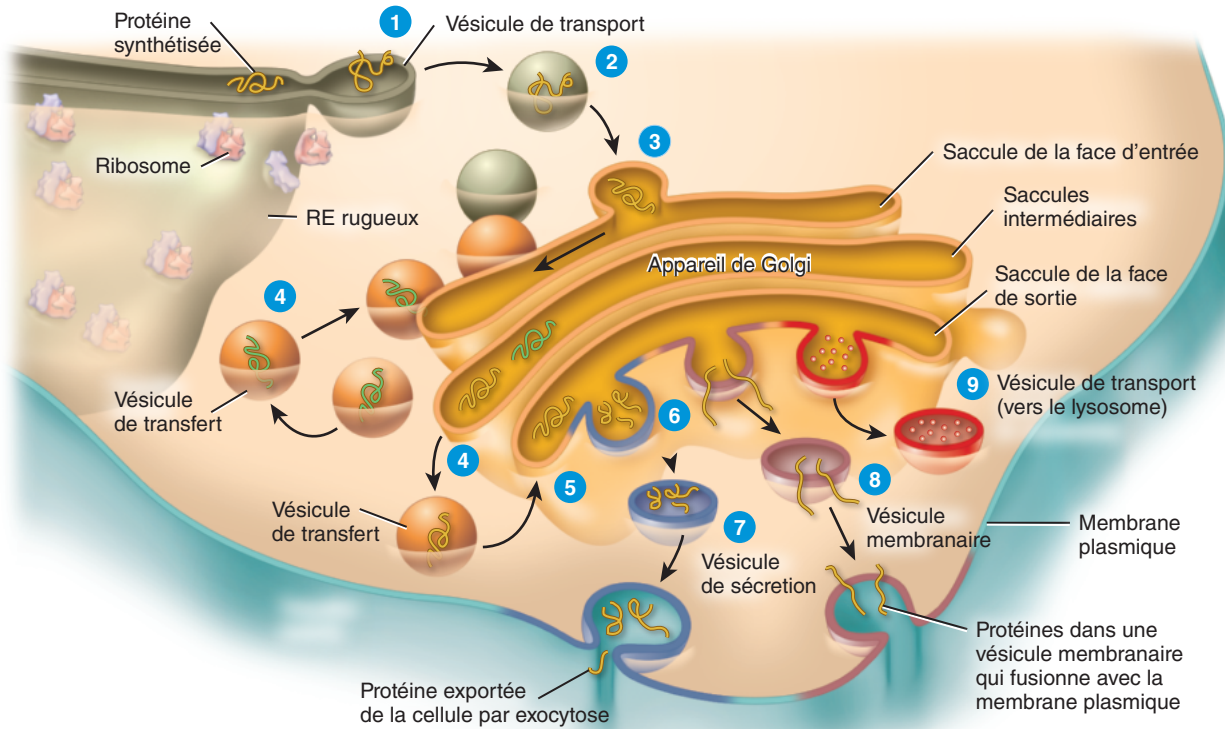
- 1 Les protéines synthétisées par les ribosomes du RE rugueux sont entourées par un morceau de la membrane du RE, qui bourgeonne éventuellement à la surface membranaire pour former des vésicules de transport.
- 2 Les vésicules de transport se déplacent vers la face d'entrée de l'appareil de Golgi.
- 3 La fusion de plusieurs vésicules de transport crée la face d'entrée de l'appareil de Golgi et libère leurs protéines dans sa lumière.
- 4 Les protéines sont déplacées depuis la sacculle d'entrée vers des saccules plus médianes. Les enzymes des saccules intermédiaires modifient les protéines pour former des glycoprotéines, des glycolipides et des lipoprotéines. Les **vésicules de transfert** qui bourgeonnent aux extrémités des citernes ramènent les enzymes spécifiques vers la sacculle d'entrée tandis que les protéines

Q Comment diffèrent les fonctions des faces d'entrée et de sortie de l'appareil de Golgi ?

- partiellement modifiées sont acheminées vers la sacculle de sortie.
- 5 Les produits des saccules intermédiaires sont déplacés vers la lumière de la sacculle de sortie.
 - 6 Au sein de la sacculle de sortie, les produits sont encore modifiés, triés puis empaquetés.
 - 7 Certaines des protéines modifiées quittent la sacculle de sortie et sont stockées au sein de **vésicules de sécrétion**. Ces vésicules amènent les protéines à la membrane plasmique, où elles sont sécrétées par exocytose dans le liquide interstitiel. La production et la libération de l'hormone insuline par certaines cellules pancréatiques en est un bon exemple de ce processus.

FIGURE 3.21 Modifications et empaquetage des protéines par l'appareil de Golgi.

Toutes les protéines exportées par la cellule sont modifiées dans l'appareil de Golgi.



Q Quelles sont les trois destinations générales des protéines qui quittent l'appareil de Golgi ?

www.lienmini.fr/33444-03

- 8 D'autres protéines modifiées quittent cette face externe dans des vésicules membranaires qui délivrent leur contenu à la membrane plasmique pour y être directement incorporées. En faisant cela, l'appareil de Golgi ajoute de nouveaux segments de membrane plasmique au moment même où d'autres segments existants sont perdus, ce qui modifie le nombre et la distribution des molécules membranaires.
- 9 Finalement, d'autres protéines modifiées quittent la saccule de sortie dans des vésicules de transport qui vont amener les protéines vers une autre destination cellulaire. Par exemple, les vésicules de transport amènent les enzymes digestifs aux lysosomes, la structure et les fonctions de ces organites importants seront discutés ci-après.

Lysosomes Les **lysosomes** sont des vésicules entourées d'une membrane et qui se forment à partir de l'appareil de Golgi (Figure 3.22). Ils peuvent contenir jusqu'à 60 sortes de puissants enzymes digestifs ou hydrolytiques qui peuvent décomposer une grande variété de molécules lorsque les lysosomes fusionnent avec des vésicules formées durant l'endocytose. Parce que les enzymes lysosomiaux fonctionnent mieux à un pH acide, la membrane du lysosome contient des transporteurs actifs qui importent des ions hydrogène (H^+). L'intérieur du lysosome a donc un pH de 5, ce qui 100

fois plus acide que le cytosol (pH 7). La membrane lysosomiale inclut également des transporteurs qui déplacent les produits finaux de la digestion, tels que du glucose, des acides gras et des acides aminés vers le cytosol.

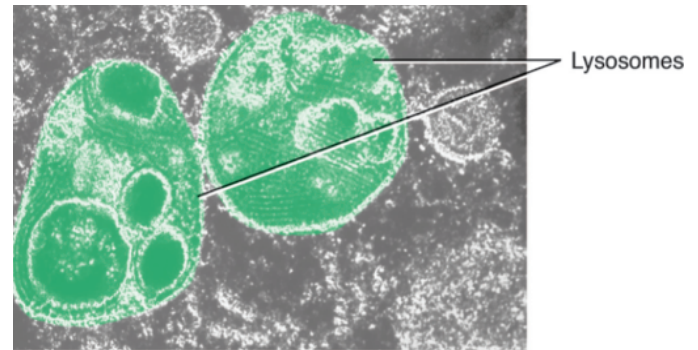
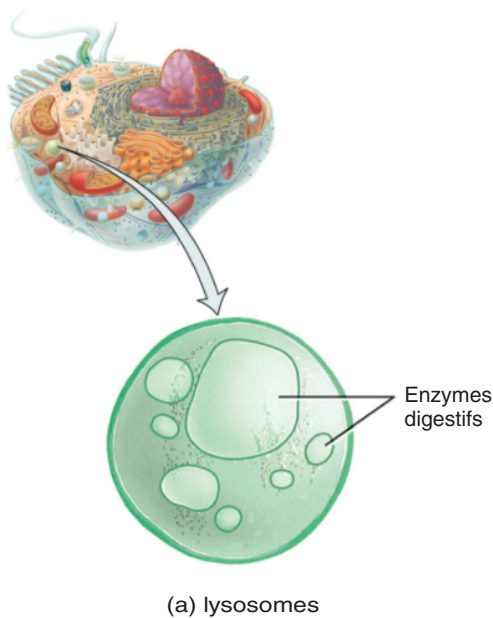
Les enzymes lysosomiaux participent au recyclage des structures cellulaires usagées. Un lysosome peut avaler un autre organe, le digérer et rendre les composants digérés au cytosol pour que la cellule puisse les réutiliser. De cette manière, les organites usagés sont continuellement remplacés. Le processus par lequel des organites usagés sont remplacés s'appelle l'**autophagie**. Lors de l'autophagie, l'organe qui doit être digéré est entouré par une membrane issue du RE pour créer une vésicule appelée un **autophagosome** ; la vésicule fusionne ensuite avec un lysosome. De cette manière, une cellule hépatique par exemple, recycle approximativement une moitié de son contenu cytoplasmique chaque semaine. L'autophagie est également impliquée dans la différenciation cellulaire, le contrôle de la croissance, le remodelage des tissus, l'adaptation à des environnements défavorables, et la défense cellulaire. Les enzymes lysosomiaux sont également à même de détruire la cellule entière qui les contient, un processus appelé l'**autolyse**. L'autolyse survient lors de certaines conditions pathologiques et est également responsable des détériorations tissulaires qui surviennent immédiatement après la mort.

FIGURE 3.22 Les lysosomes.

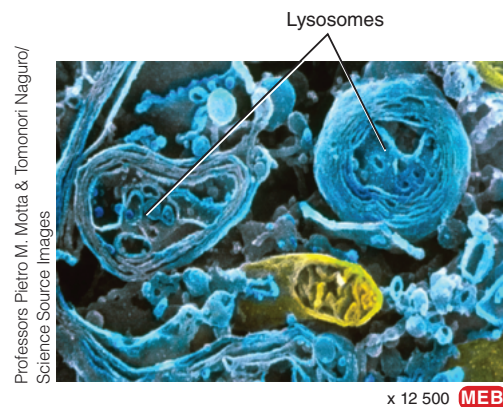
Les lysosomes contiennent différents types d'enzymes digestifs puissants.

Fonctions des lysosomes

1. Digèrent les substances qui entrent dans la cellule via l'endocytose et transportent les produits finaux de la digestion vers le cytosol.
2. Sont responsables d'autophagie, la digestion des organites usagés.
3. Sont capables d'autolyse, la digestion d'une cellule entière.
4. Accomplissent la digestion extracellulaire.



(b) Plusieurs lysosomes



(c)

Intérêt clinique**La maladie de Tay-Sachs**

Certaines maladies sont causées par des enzymes lysosomiales défectueuses ou absentes. Par exemple, la **maladie de Tay-Sachs** ou *gangliosidose*, qui affecte essentiellement les enfants Ashkénazes (population juive de l'Europe de l'est), est une maladie génétique caractérisée par l'absence d'un seul enzyme lysosomal appelé Hex A. Cet enzyme décompose un glycolipide membranaire appelé ganglioside GM2 qui est essentiellement

présent dans les cellules nerveuses. Lorsqu'un excès de ganglioside GM2 s'accumule, les cellules nerveuses fonctionnent moins efficacement. Les enfants atteints de la maladie de Tay-Sachs souffrent généralement de convulsions et de rigidités musculaires. Ils deviennent progressivement aveugles, déments, avec des mouvements de moins en moins coordonnés et ils meurent en général avant l'âge de 5 ans. Des tests génétiques peuvent maintenant révéler si un adulte est porteur hétérozygote du gène défectif.

Q Quel est le nom du mécanisme par lequel les organites usagés sont digérés par les lysosomes ?



www.lienmini.fr/33444-03

Comme nous venons de le voir, la plupart des enzymes lysosomiales agissent au sein de la cellule. Cependant, certains enzymes agissent lors de digestions extracellulaires. Un exemple survient lors de la fécondation. La tête du spermatozoïde libère des enzymes lysosomiales qui participent à sa pénétration dans l'ovocyte en digérant sa couche protectrice au cours d'un processus appelé la réaction acrosomiale (voir Section 29.1).

Peroxisomes Les **peroxysomes** sont un autre groupe d'organites à la structure similaire aux lysosomes, mais plus petits (voir Figure 3.1).

Les peroxysomes contiennent plusieurs *oxydases*, des enzymes capables d'oxyder (retirer les atomes d'hydrogène) différentes substances organiques. Par exemple, lors du métabolisme normal, les acides aminés et les acides gras sont oxydés dans les peroxysomes. De plus, les enzymes des peroxysomes oxydent des substances toxiques comme l'alcool. Ce qui fait que les peroxysomes sont très abondants au sein du foie, organe où a lieu la détoxification de l'alcool et d'autres substances nocives. Le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) est un sous-produit des réactions d'oxydation, il est potentiellement toxique comme les radicaux libres qui y sont associés comme le superoxyde

(NdT : O_2^-). Heureusement, les peroxysomes contiennent également l'enzyme catalase, qui décompose l' H_2O_2 . Du fait que la production comme la dégradation de l' H_2O_2 survient au sein du même organite, les peroxysomes protègent les autres parties de la cellule des effets toxiques de l' H_2O_2 . Les peroxysomes contiennent également des enzymes qui détruisent le superoxyde. Sans les peroxysomes, les sous-produits du métabolisme pourraient s'accumuler dans la cellule et y induire la mort cellulaire. Les peroxysomes sont capables d'autoréplication : les nouveaux peroxysomes se forment à partir de peroxysomes préexistants qui s'élargissent et se divisent. Ils peuvent également se former par un processus par lequel des composants s'accumulent à un endroit de la cellule pour ensuite s'assembler en un peroxysome.

Protéasomes Comme nous venons de le voir, les lysosomes dégradent les protéines qui leur sont amenées par des vésicules. Les protéines cytosoliques doivent également être remplacées à certains moments de la vie d'une cellule. La destruction continue des protéines obsolètes, abîmées ou mal repliées est la fonction de petites structures en forme de barriques et constituées de 4 anneaux empilés de protéines autour d'un corps central, et appelées **protéasomes**. Par exemple, les protéines qui font partie d'une voie métabolique et qui doivent être dégradées après qu'elles aient rempli leur rôle. De telles destructions de protéines font partie du rétrocontrôle négatif en arrêtant une voie métabolique lorsque la réponse appropriée a été obtenue. Typiquement, le corps d'une cellule contient des milliers de protéasomes, tant au sein du cytosol que dans le noyau. Ils n'ont été découverts que récemment car ils sont bien trop petits que pour être observés au microscope optique, et ne se discernent pas bien non plus au microscope électronique, ils sont appelés ainsi car ils contiennent des milliers de *protéases*, des enzymes capables de couper les protéines en de petits peptides. Une fois que les enzymes d'un protéasome ont découpés une protéine en petits tronçons, d'autres enzymes cassent alors les peptides en acides aminés, qui sont ensuite recyclés dans de nouvelles protéines.

Intérêt clinique

Protéasomes et maladies

Certaines maladies peuvent résulter d'une incapacité des protéasomes à digérer des protéines anormales. Par exemple, des amas de protéines mal pliées s'accumulent dans les cellules nerveuses de personnes atteintes de la maladie de Parkinson ou de la maladie d'Alzheimer. La découverte de la raison de ce dysfonctionnement des protéasomes est un des objectifs des recherches actuelles.

Mitochondries Parce qu'elles produisent la plupart de l'ATP par le biais de la respiration aérobie, les **mitochondries** sont également considérées comme les usines énergétiques de la cellule. Une cellule peut avoir de quelques centaines à plusieurs milliers de mitochondries, en fonction de son activité. Les cellules actives qui utilisent de l'ATP en grandes quantités, comme celles qu'on trouve au sein des muscles, du foie, et des reins possèdent un grand nombre de mitochondries.

L'exercice régulier, par exemple, peut conduire à une augmentation du nombre de mitochondries au sein des cellules musculaires, ce qui permet aux muscles de fonctionner plus efficacement. Les mitochondries sont habituellement localisées dans la cellule là où l'oxygène entre dans la cellule ou là où l'ATP est utilisé, par exemple, le long des protéines contractiles dans les cellules musculaires.

Une mitochondrie est constituée d'une **membrane mitochondriale externe** et d'une **membrane mitochondriale interne** avec un petit espace entre elles rempli de liquide (**Figure 3.23**). Ces deux membranes sont similaires à la structure de la membrane plasmique. La membrane mitochondriale interne contient une série de replis appelés **crêtes mitochondriales**. La cavité centrale de la mitochondrie remplie de fluide et entourée de la membrane mitochondriale interne est la **matrice mitochondriale**. Les replis très élaborés des crêtes procurent une surface énorme pour les réactions chimiques qui font partie de la phase aérobie de la *respiration cellulaire*, les réactions qui produisent la plupart de l'ATP cellulaire (voir Chapitre 25). Les enzymes qui catalysent ces réactions sont localisés sur les crêtes et dans la matrice mitochondriale.

Les mitochondries jouent également un rôle important et précoce dans l'**apoptose**, la mort cellulaire induite et génétiquement programmée. En réponse à des stimuli comme un grand nombre de radicaux libres destructifs, des détériorations de l'ADN, des carences en facteurs de croissance, de l'absence d'oxygène ou de nutriments, certains signaux sont libérés par la mitochondrie à la suite de la formation de trous dans la membrane mitochondriale externe. Le cytochrome C est un de ces signaux libérés dans le cytosol cellulaire ; lequel lorsqu'il est dans la mitochondrie est impliqué dans la respiration cellulaire aérobie. Cependant, une fois dans le cytosol, le cytochrome C et d'autres substances initient une cascade d'activation d'enzymes digestifs des protéines qui aboutissent à l'apoptose.

Comme les peroxysomes, les mitochondries sont capables d'autoréplication, un processus qui survient pendant les périodes de demande énergétique de la cellule ou avant la division cellulaire. La synthèse de certaines protéines nécessaires aux fonctions mitochondriales est effectuée par les ribosomes présents dans la matrice mitochondriale. Les mitochondries ont même leur propre ADN, sous la forme de copies multiples de molécules d'ADN circulaire qui contiennent 37 gènes. Ces gènes mitochondriaux contrôlent la synthèse de 2 ARN ribosomiaux, de 22 ARN de transfert, et de 13 protéines à la base des composants mitochondriaux.

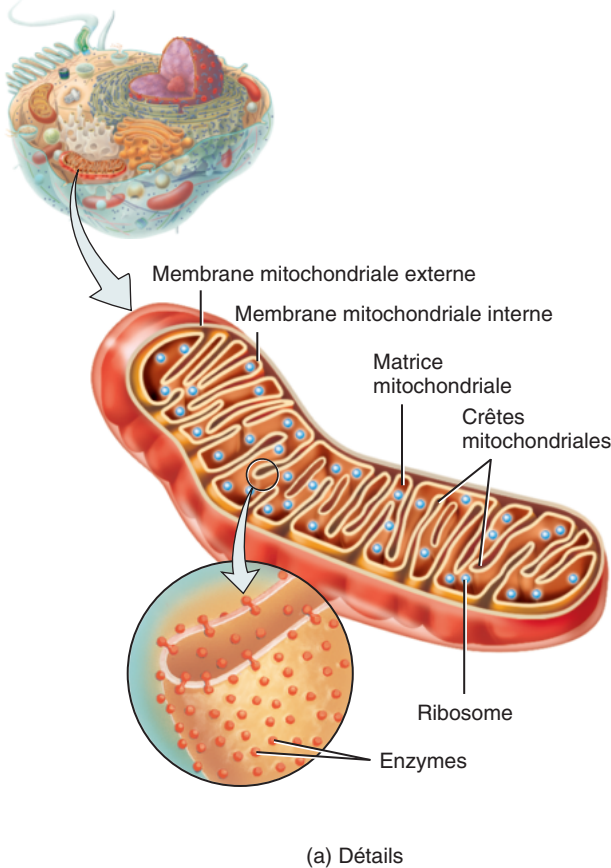
Alors que le noyau de chaque cellule somatique contient les gènes issus de votre mère et de votre père, les gènes mitochondriaux ne sont hérités que de votre mère. Ceci est dû au fait que toutes les mitochondries de la cellule sont des descendantes de celles qui étaient présentes dans l'ovocyte au moment de la fécondation. Le spermatozoïde perd normalement la plupart de ses organites tels que les mitochondries, ribosomes, réticulum endoplasmique, et l'appareil de Golgi, et que les quelques mitochondries qui entrent dans l'ovocyte sont aussitôt détruites. Puisque pratiquement tous les gènes mitochondriaux sont hérités de la mère, l'ADN mitochondrial peut être utilisé pour tracer la lignée maternelle (en d'autres mots, pour déterminer si deux individus ou plus sont reliés par le côté maternel de la famille).

FIGURE 3.23 Les mitochondries.

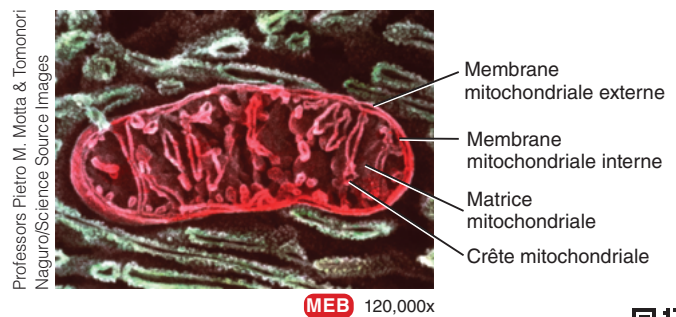
Les réactions chimiques de la respiration cellulaire aérobie génère l'ATP au sein des mitochondries.

Fonctions des mitochondries

1. Génèrent l'ATP par les réactions chimiques de la respiration cellulaire aérobie.
2. Jouent un rôle important dans l'apoptose.



(b) Coupe transverse



(c)

www.lienmini.fr/33444-03

Q Comment les crêtes mitochondriales contribuent à la fonction de production d'ATP ?

Révision

16. Quels sont les produits chimiques présents dans le cytosol ?
17. Quelle est la fonction du cytosol ?
18. Définissez un organe.
19. Quels sont les organites entourés par une membrane et lesquels ne le sont pas ?
20. Quels organites contribuent à la synthèse des hormones protéiques et leur emballage dans des vésicules de sécrétion ?
21. Que se passe-t-il sur les crêtes et dans la matrice des mitochondries ?

3.5 Noyau

OBJECTIFS

- **Décrire** la structure et la fonction du noyau.

Le **noyau** est une structure sphérique ou ovale qui est souvent l'élément le plus caractéristique d'une cellule (**Figure 3.24**). La plupart des cellules n'ont qu'un seul noyau, alors que certaines, comme les globules rouges matures, n'en n'ont pas. À l'inverse, les cellules musculaires squelettiques et quelques autres types de cellules possèdent de multiples noyaux. Une double membrane appelée **enveloppe nucléaire** sépare le noyau du cytoplasme. Les deux couches de l'enveloppe nucléaire sont des bicouches lipidiques similaires à la membrane plasmique. La membrane externe de l'enveloppe nucléaire est en continuité avec le RE et ressemble à sa structure. De nombreuses ouvertures appelées **pores nucléaires** se trouvent répartis partout sur l'enveloppe du noyau. Chaque pore nucléaire consiste en un arrangement circulaire de protéines entourant une grande ouverture centrale qui approximativement 10 fois plus large que le canal d'une protéine de la membrane plasmique.

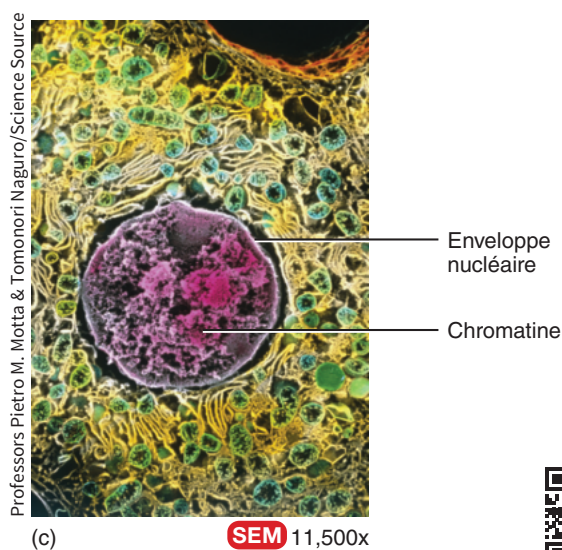
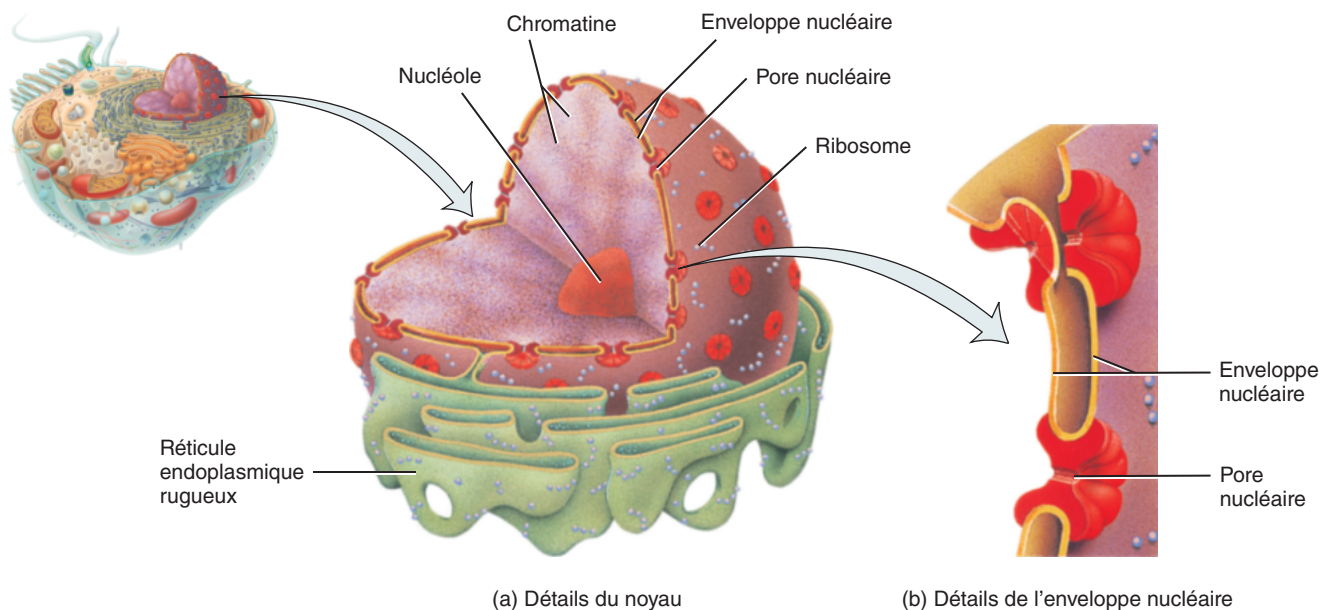
Les pores nucléaires contrôlent le mouvement de substances entre le noyau et le cytoplasme. Les petites molécules et les ions se déplacent entre le noyau et le cytoplasme en traversant les pores nucléaires passivement et par diffusion. La plupart des grandes molécules, comme les ARNs et les protéines, ne peuvent traverser les pores nucléaires par diffusion. Au lieu de cela, leur passage implique

FIGURE 3.24 Le noyau.

Le noyau contient la plupart des gènes de la cellule, qui sont localisés sur les chromosomes.

Fonctions du noyau

1. Contrôle la structure cellulaire.
2. Dirige les activités cellulaires.
3. Produit les ribosomes dans les nucléoles.



Q Qu'est-ce que la chromatine ?

www.lienmini.fr/33444-03

un processus de transport actif par lequel les molécules sont identifiées et sélectivement transportées par le pore nucléaire vers et en-dehors du noyau. Par exemple, les protéines nécessaires aux fonctions nucléaires sont déplacées depuis le cytosol vers le noyau ; les ARNs nouvellement formés sont déplacés depuis le noyau vers le cytosol de la même manière.

À l'intérieur du noyau se trouvent une ou plusieurs formes sphériques appelées **nucléoles** qui servent à la production des ribosomes. Chaque nucléole est en fait une grappe de protéines, d'ADN et d'ARN ; il n'est pas entouré d'une membrane. Les nucléoles sont le site de syn-

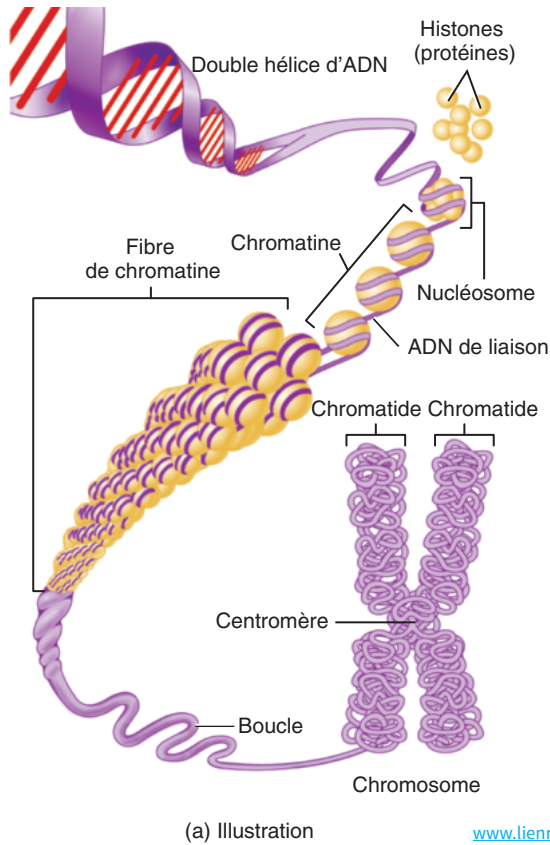
Intérêt clinique

La génomique

Au cours de la dernière décennie du vingtième siècle, les génomes humains, de souris, de la drosophile et de plus de 50 microbes ont été séquencés. Il en résulte que les recherches en **génomique**, l'étude des relations entre le génome et les fonctions biologiques d'un organisme, se sont multipliées. Le Projet Génome Humain, qui a débuté au cours des années '90, et qui avait pour but de séquencer les près de 3,2 milliards de nucléotides de notre génome, s'est achevé en Avril 2003. Les scientifiques savent maintenant que le nombre total de gènes au sein du génome humain est de près de 30.000. Les informations sur le génome humain et sur la manière dont il est affecté par l'environnement permettent de chercher, d'identifier, et de découvrir la fonction de gènes spécifiques qui jouent un rôle dans les maladies génétiques. La médecine génomique a également pour but de créer de nouveaux médicaments et de fournir des tests de dépistage pour permettre aux médecins de donner de meilleurs conseils et de meilleurs traitements pour des maladies ayant une composante génétique comme l'hypertension, l'obésité, le diabète et le cancer.

thèse des ARNs ribosomiaux (ARNr) et d'assemblage des ARNr et de protéines pour former les sous-unités des ribosomes. Les nucléoles sont importants au sein des cellules qui synthétisent de grandes quantités de protéines, comme les cellules musculaires et hépatiques. Les nucléoles se dispersent et disparaissent pendant la division cellulaire et se réorganisent dès que les nouvelles cellules se sont reformées.

C'est au sein du noyau que se trouvent la plupart des unités héréditaires de la cellule, unités appelées *gènes*, qui contrôlent la structure cellulaire et dirigent les activités de la cellule. Les gènes sont arrangés le long des chromosomes. Les cellules humaines somatiques

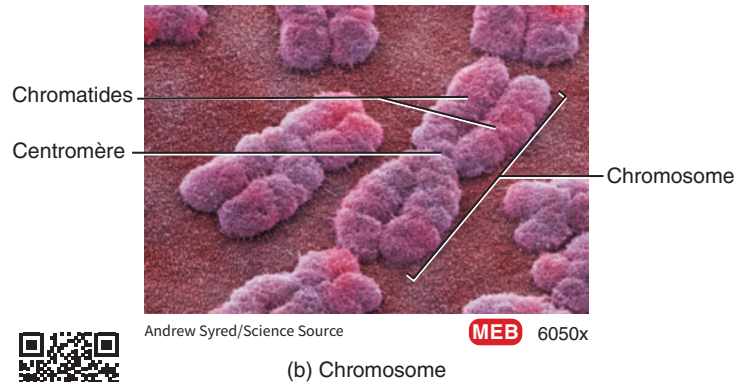


(a) Illustration

www.lienmini.fr/33444-03

FIGURE 3.25 Empaquetage de l'ADN en un chromosome lors de la division cellulaire. Lorsque l'empaquetage est complet, deux molécules d'ADN identiques et leurs histones forment une paire de chromatides qui sont maintenues ensemble par un centromère.

Un chromosome est une molécule d'ADN enroulée et repliée et qui est associée à des molécules protéiques.



Andrew Syred/Science Source

MEB 6050x

(b) Chromosome



Q Quels sont les composants d'un nucléosome ?

(du corps) possèdent 46 chromosomes, 23 hérités de chaque parent. Chaque chromosome est une longue molécule d'ADN enroulée autour de différentes protéines (**Figure 3.25**). Ce complexe d'ADN, de protéines et de quelques ARNs est appelé la **chromatine**. L'entièreté de l'information génétique portée par une cellule ou un organisme est son **génome**.

Dans les cellules qui ne se divisent pas, la chromatine apparaît diffuse, une masse granulaire. La microscopie électronique révèle que la chromatine a une structure semblable à un collier. Chaque perle est un **nucléosome** qui consiste en de l'ADN double brin enroulé deux fois autour d'un cœur formé de huit protéines appelées **histones**, qui aident à organiser l'enroulement et le plissage de l'ADN. Le lien entre les perles est appelé **ADN de liaison**, qui maintient ensemble les nucléosomes adjacents. Au sein des cellules qui ne se divisent pas, une autre histone induit l'enroulement des nucléosomes

en une **fibre de chromatine** de large diamètre, qui forme ensuite de larges boucles. Juste avant que la division cellulaire n'ait lieu, l'ADN se réplique (se duplique) et les boucles se condensent encore plus, formant une paire de **chromatides**. Comme vous le verrez bientôt, une paire de chromatides forme un chromosome durant la division cellulaire.

Les principaux constituants de la cellule, leurs structure et fonctions sont résumées dans le **Tableau 3.2**.

Révision

22. Comment les grandes particules entrent et sortent du noyau ?
23. Où sont produits les ribosomes ?
24. Comment l'ADN est-il empaqueté dans le noyau ?

TABEAU 3.2 Constituants de la cellule et leurs fonctions

CONSTITUANTS	DESCRIPTION	FONCTIONS
MEMBRANE PLASMIQUE	Bicouche lipidique : mosaïque fluide de phospholipides, cholestérol et glycolipides, et parsemée de protéines ; entoure le cytoplasme.	Protège les contenus de la cellule ; est responsable des contacts avec les autres cellules ; contient des canaux, transporteurs, enzymes, marqueurs de l'identité cellulaire et des protéines de liaison ; contrôle l'entrée et la sortie des substances.
CYTOPLASME	Contenu cellulaire entre la membrane plasmique et le noyau : cytosol et les organites.	Site de toutes les activités intracellulaires exceptées celles ayant lieu dans le noyau.
Cytosol	Composé d'eau, de solutés, de particules en suspension, de gouttelettes de lipides et de granules de glycogène.	Fluide au sein duquel ont lieu beaucoup de réactions métaboliques cellulaires.

TABLE 3.2 Constituants de la cellule et leurs fonctions (Suite)		
CONSTITUANTS	DESCRIPTION	FONCTIONS
	Le cytosquelette est un réseau cytoplasmique composé de trois filaments protéiques : microfilaments, filaments intermédiaires, et microtubules.	Le cytosquelette maintient la forme et l'organisation générale du contenu cellulaire ; il est responsable des mouvements cellulaires.
Organites	Structures spécialisées aux formes caractéristiques.	Chaque organite a des fonctions spécifiques.
Centrosome	Paire de centrioles plus la matrice péricentriolaire.	La matrice péricentriolaire contient des tubulines utilisées pour la croissance du fuseau mitotique et la formation des microtubules.
Cils et flagelle	Projections mobiles de la surface cellulaire qui contiennent 20 microtubules et un corps basal.	Cils : meuvent le liquide à la surface cellulaire ; flagelle : meut la cellule entière.
Ribosomes	Composés de deux sous-unités contenant l'ARN ribosomal et des protéines ; peut être libre dans le cytosol ou fixé sur le RE rugueux.	Synthèse protéique.
Réticulum endoplasmique (RE)	Réseau membranaire de sacs aplatis et de tubules. Le RE rugueux est recouvert de ribosomes et est attaché à l'enveloppe nucléaire ; le RE lisse ne porte pas de ribosome.	RE rugueux : synthétise glycoprotéines et phospholipides qui sont transférés aux organites cellulaires, insérées dans la membrane plasmique ou sécrétées lors de l'exocytose ; RE lisse : synthétise les acides gras et les stéroïdes, inactive et détoxifie les drogues, enlève le groupement phosphate du glucose-6-phosphate, stocke et libère les ions calciques dans les cellules musculaires.
Appareil de Golgi	Constitué de 3 à 20 sacs membranaires aplatis appelés saccules ; structurellement et fonctionnellement divisé en face d'entrée (<i>cis</i>), saccules intermédiaires, et face de sortie (<i>trans</i>).	La face d'entrée (<i>cis</i>) reçoit les protéines venant du RE rugueux ; les citernes médianes forment les glycoprotéines, glycolipides et les lipoprotéines ; la face de sortie (<i>trans</i>) modifie encore les molécules, les trie ensuite pour les emballer en vue de leur transport vers leurs destinations.
Lysosome	Vésicule formée à partir du appareil de Golgi ; contient des enzymes digestifs.	Fusionne avec les endosomes, phagosomes et vésicules pinocytaires et en digère le contenu ; recycle les produits finaux de cette digestion dans le cytosol ; digère les organites usagés (autophagie), des cellules entières (autolyse), et du matériel extracellulaire.
Peroxisome	Vésicule contenant les oxydases (enzymes oxydatifs) et la catalase (décompose le peroxyde d'hydrogène) ; les nouveaux peroxysomes bourgeonnent à partir de peroxysomes préexistants.	Oxyde les acides aminés et les acides gras ; détoxifie les substances nocives comme le peroxyde d'hydrogène et les radicaux libres associés.
Protéasome	Petite structure en forme de barrique qui contient des protéases (enzymes protéolytiques).	Dégrade les protéines inutiles, endommagées ou défectueuses et les découpant en petits peptides.
Mitochondrie	Est constituée de membranes mitochondriales interne et externe, de crêtes, et de la matrice ; les nouvelles mitochondries se constituent à partir de mitochondries préexistantes.	Site des réactions de la respiration cellulaire aérobie qui produisent la plupart de l'ATP cellulaire. Joue un rôle important dans l'apoptose.
NOYAU	Est constitué d'une enveloppe nucléaire percée de pores, de nucléoles et de chromosomes, lesquels n'apparaissent que comme une masse enchevêtrée de chromatine pendant l'interphase.	Les pores nucléaires contrôlent le mouvement des substances entre le noyau et le cytoplasme, les nucléoles produisent les ribosomes, et les chromosomes sont constitués des gènes qui contrôlent la structure cellulaire et dirigent les fonctions cellulaires.

Flagelle

Protéasome

Filament intermédiaire

Centrosome

Lysosome

RE lisse

Peroxisome

Microtubule

Cil

NOYAU

CYTOPLASME

MEMBRANE PLASMIQUE

Ribosome sur le RE rugueux

Appareil de Golgi

Mitochondrie

Microfilament

3.6 Synthèse protéique

OBJECTIFS

- **Décrire** la séquence d'événements de la synthèse protéique.

Alors que la cellule synthétise de nombreuses substances chimiques pour maintenir l'homéostasie, l'essentiel de la machinerie cellulaire est destinée à la synthèse d'un grand nombre de protéines diverses. Les protéines, à leur tour, déterminent les caractéristiques physiques et chimiques des cellules, et de ce fait, des organismes qui les contiennent. Certaines protéines participent à l'assemblage des structures cellulaires comme la membrane plasmique, le cytosquelette, et d'autres organites. D'autres servent d'hormones, d'anticorps ou d'éléments contractiles dans les tissus musculaires. D'autres encore agissent en temps qu'enzymes et régulent le rythme de nombreuses réactions chimiques cellulaires, ou en tant que transporteurs et charrient différents matériaux dans le sang. De la même manière que le génome comprend tous les gènes d'un organisme, le **protéome** fait référence à toutes les protéines d'un organisme.

Lors du processus appelé **expression génique**, l'ADN d'un gène est utilisé comme modèle pour la synthèse d'une protéine spécifique. Dans un premier temps, lors d'un processus bien justement dénommé *transcription*, l'information encodée au niveau d'une région spécifique

de l'ADN est *transcrite* (copiée) pour produire une molécule spécifique d'ARN (acide ribonucléique). Dans un deuxième temps, lors d'un processus appelé *traduction*, l'ARN se fixe sur un ribosome où l'information contenue dans l'ARN est *traduite* en une séquence correspondante d'acides aminés pour former une nouvelle molécule protéique (**Figure 3.26**).

L'ADN et l'ARN stockent l'information génétique sous la forme d'une série de trois nucléotides. Une séquence de trois de ces nucléotides de l'ADN est appelée un **triplet de bases**. Chaque triplet de bases de l'ADN est transcrit comme une séquence complémentaire de trois nucléotides, appelée **codon**. Un codon donné est spécifique à un acide aminé particulier. Le **code génétique** est un ensemble de règles qui relient la séquence de triplets de bases de l'ADN aux codons correspondants de l'ARN et aux acides aminés correspondants.

Transcription

Durant la **transcription** qui a lieu dans le noyau, l'information génétique représentée par la séquence de triplets de bases de l'ADN sert de modèle pour copier l'information en une séquence complémentaire de codons. Trois types d'ARN sont produits à partir du modèle d'ADN :

1. L'**ARN messager (ARNm)** dirige la synthèse d'une protéine.
2. L'**ARN ribosomal (ARNr)** se lie avec les protéines ribosomales pour former les ribosomes.
3. L'**ARN de transfert (ARNt)** se lie à un acide aminé et le maintient en place sur un ribosome jusqu'à ce qu'il soit incorporé dans une protéine au cours de la traduction. Une extrémité de l'ARNt porte un acide aminé spécifique, tandis que le côté opposé est constitué d'un triplet de nucléotides, appelé **anticodon**. Par l'appariement entre bases complémentaires, l'anticodon de l'ARNt se fixe sur le codon de l'ARNm. Chacun des plus de 20 différents types d'ARNt se lie à seulement un des 20 différents acides aminés.

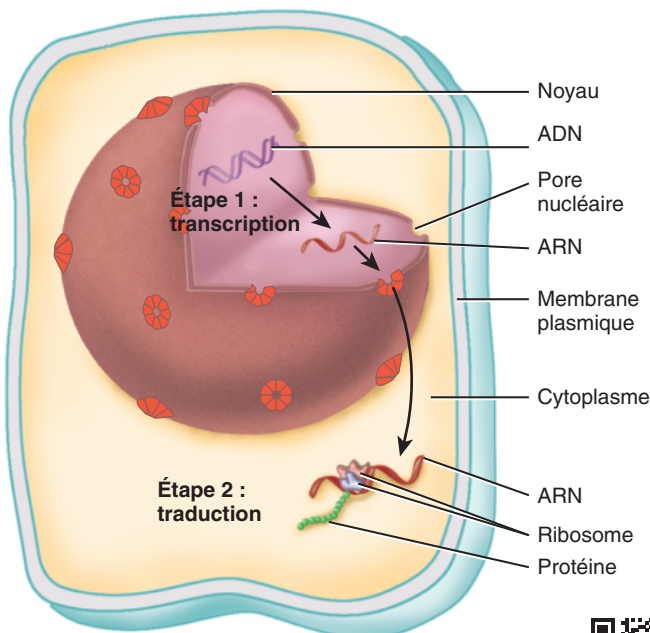
L'enzyme **ARN polymérase** catalyse la transcription de l'ADN. Cependant, l'enzyme doit savoir où commencer le processus de transcription et où le terminer. Seulement un des deux brins de l'ADN sert de modèle pour la synthèse de l'ARN. Le segment où la transcription commence, une séquence spéciale de nucléotides appelée le **promoteur**, est situé à proximité du début du gène (**Figure 3.27a**). C'est l'endroit où l'ARN polymérase se fixe à l'ADN. Durant la transcription, les bases s'apparient de manière complémentaire : les bases cytosine (C), guanine (G) et thymine (T) de l'ADN s'apparient respectivement avec la guanine, la cytosine et l'adénine (A) au niveau du brin d'ARN (**Figure 3.27b**). Cependant, l'adénine du modèle dans l'ADN s'apparie avec l'uracile (U) et non la thymine dans l'ARN :

A	→	U
T	→	A
G	→	C
C	→	G
A	→	U
T	→	A
Séquence de bases modèles de l'ADN		Séquence de bases complémentaires de l'ARN

La transcription du brin d'ADN se termine à une autre séquence spéciale de nucléotides, appelée **séquence de terminaison**, et qui

FIGURE 3.26 Survol de l'expression des gènes. La synthèse d'une protéine spécifique requiert la transcription d'un gène de l'ADN en ARN et la traduction de cet ARN en une séquence correspondante d'acides aminés.

La transcription a lieu dans le noyau tandis que la traduction survient dans le cytoplasme.



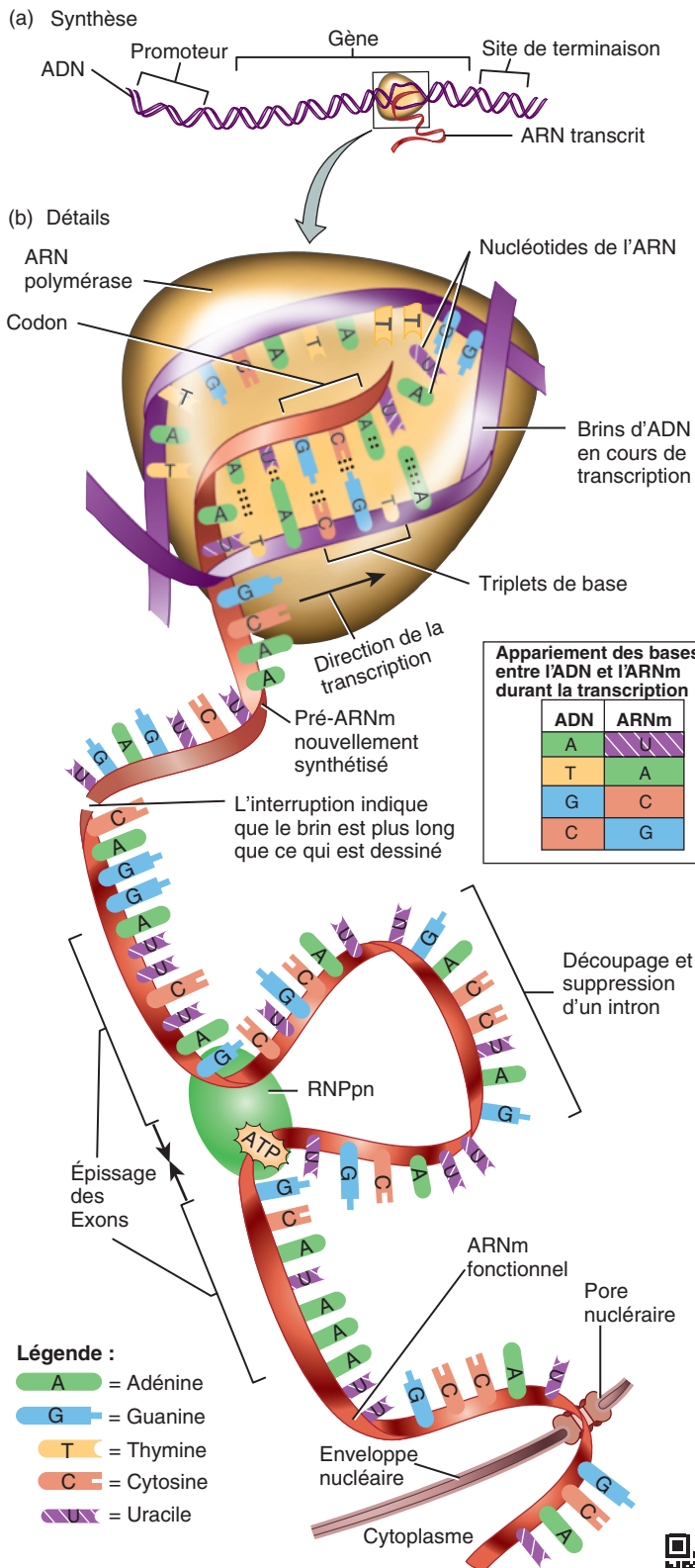
Q Pourquoi les protéines sont importantes dans la vie de la cellule ?

www.lienmini.fr/33444-03



FIGURE 3.27 Transcription. La transcription de l'ADN débute au promoteur et s'achève à un site de terminaison (NdT : codon STOP)

Lors de la transcription, l'information génétique de l'ADN est copiée vers l'ARN.



spécifie la fin du gène (**Figure 3.27a**). Lorsque l'ARN polymérase atteint la séquence de terminaison, l'enzyme se détache de la molécule d'ARN transcrit et du brin d'ADN.

Toutes les parties d'un gène ne code pas pour une protéine. Des régions au sein du gène appelées **introns** ne codent pas pour des parties de protéines. Elles sont situées entre des régions appelées **exons** qui codent pour des segments protéiques. Immédiatement après la transcription, le transcrit qui inclut à la fois les informations pour des exons et des introns, s'appelle le **pré-ARNm**. Les introns sont éliminés du pré-ARNm par de **petites ribonucléoprotéines nucléaires** (RNPpn ; **Figure 3.27b**). Les RNPpn sont des enzymes qui font l'épissage des introns. Le produit qui en résulte est une molécule d'ARNm fonctionnelle qui sort du noyau par un pore nucléaire pour aller dans le cytoplasme où la traduction a lieu.

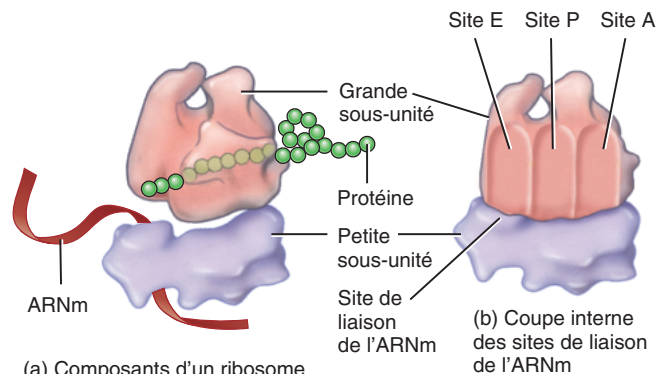
Alors que le génome humain contient approximativement 30.000 gènes, il y a probablement 500.000 à un million de protéines humaines. Comment autant de protéines pourraient être codées par si peu de gènes ? Une partie de la réponse tient dans l'**épissage alternatif** de l'ARNm, un processus par lequel le pré-ARNm transcrit à partir d'un gène peut être épissé de différentes manières pour produire plusieurs ARNm différents. Les différents ARNm sont ensuite traduits en différentes protéines. De cette manière, un même gène peut encoder pour 10 et plus protéines différentes. De plus, des modifications chimiques peuvent être appliquées aux protéines après leur traduction, par exemple, lorsque les protéines traversent l'appareil de Golgi. De telles modifications chimiques peuvent amener à la production de deux protéines différentes voire plus, à partir de la même traduction.

Traduction

Au cours du processus de **traduction**, la séquence nucléotidique de la molécule d'ARNm définit la séquence en acides aminés d'une protéine. Ce sont les ribosomes cytoplasmiques qui sont responsables de cette traduction. La petite sous-unité du ribosome possède un site de liaison pour l'ARNm, tandis que la grande sous-unité possède trois sites

FIGURE 3.28 Traduction. Au cours de la traduction, une molécule de ARNm se lie à un ribosome. Ensuite, la séquence nucléotidique de l'ARNm définit la séquence en acides aminés d'une protéine.

Les ribosomes possèdent un site de liaison pour l'ARNm ainsi que des sites P, A et E pour la fixation des ARNt.



(a) Composants d'un ribosome et leur relation avec le mRNA et les protéines pendant la traduction génétique

Q Si le modèle ADN possède la séquence de bases AGCT, quelle sera la séquence de bases de l'ARNm, et quel enzyme catalyse la transcription de l'ADN ?

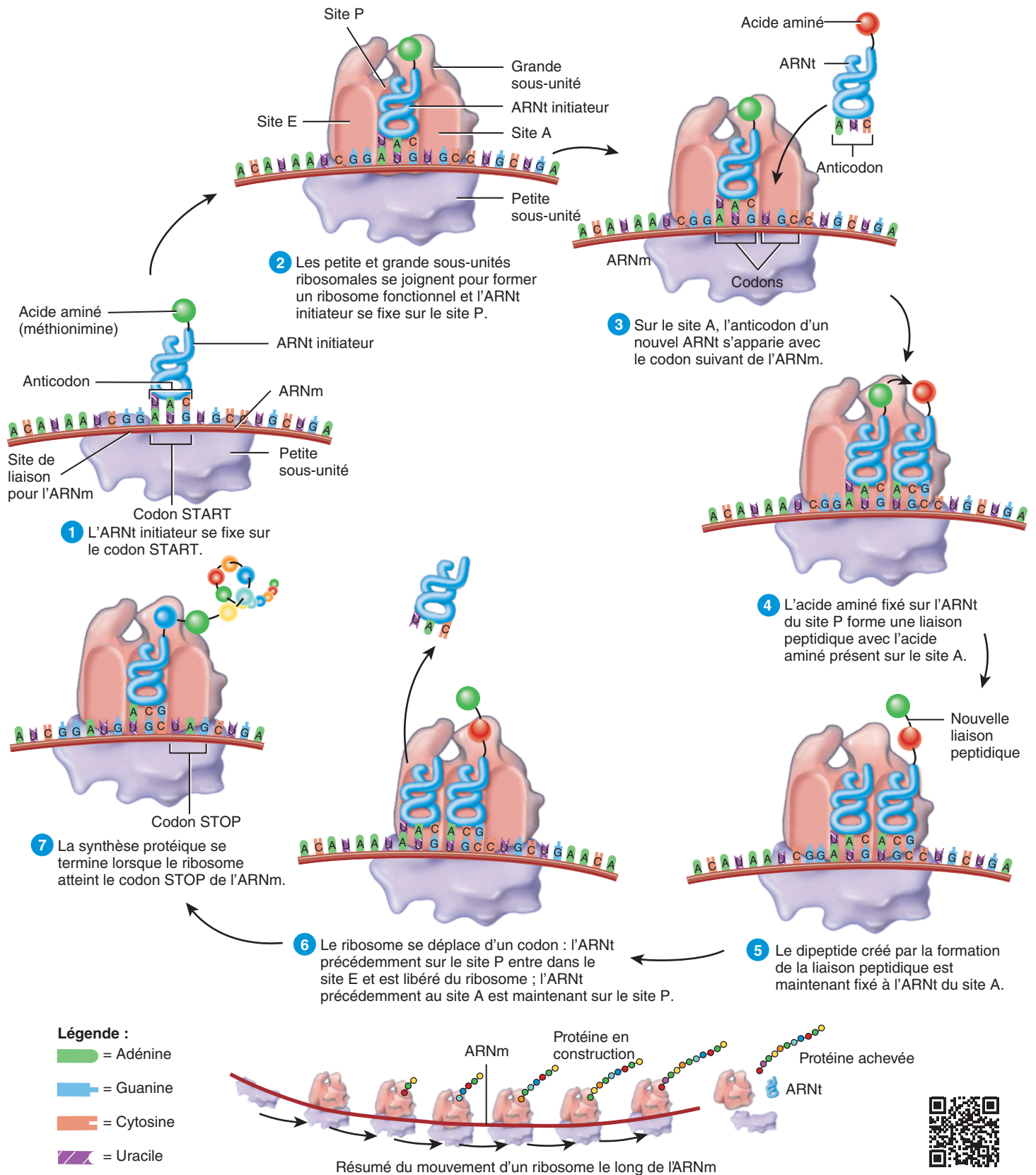


www.lienmini.fr/33444-03

Q Quels sont les rôles joués par les sites P et A ?

FIGURE 3.29 Elongation protéique et finalisation de la synthèse protéique au cours de la traduction.

Au cours de la synthèse protéique, les petite et grande sous-unités ribosomales se groupent pour former un ribosome fonctionnel. Une fois le processus de traduction terminé, elles se séparent.



Q Quelle est la fonction du codon STOP ?



www.lienmini.fr/33444-03

de liaisons pour des molécules d'ARNt : un site P, un site A et un site E (Figure 3.28). Le **site P** (pour **peptidyl-ARNt**) qui est occupé par un ARNt portant un acide aminé lié à la chaîne polypeptidique en croissance. Le **site A** (pour **aminoacyl-ARNt**) qui se lie au prochain ARNt porteur de l'acide aminé qui sera ajouté à la chaîne polypeptidique en croissance. Le **site E** (pour sortie -NdT : **Exit** en anglais) sur lequel se fixe l'ARNt déacétylé juste avant qu'il ne soit libéré par le ribosome.

La traduction est constituée des étapes suivantes (Figure 3.29):

- 1 Une molécule d'ARNm se fixe au site de liaison de l'ARNm de la petite sous-unité du ribosome. Un ARNt spécial, appelé l'*ARNt d'initiation*, se fixe sur le codon d'initiation (AUG, ou codon START) de l'ARNm où la traduction commence. L'ARNt équipé de l'anticodon (UAC) se fixe sur le codon (AUG) de l'ARNm par l'appariement des bases complémentaires. En plus d'être le codon de départ, AUG est également le codon de l'acide aminé méthionine. Et donc, la méthionine est toujours le premier acide aminé du polypeptide en croissance.
- 2 Ensuite, la grande sous-unité ribosomale se fixe sur le complexe petite sous-unité ribosomale - ARNm, ce qui crée un ribosome fonctionnel. L'ARNt initiateur, avec son acide aminé (méthionine), se déplace sur le site P du ribosome.
- 3 L'anticodon d'un autre ARNt porteur de son acide aminé s'apparie avec le second codon de l'ARNm sur le site A du ribosome.
- 4 Un composant de la grande sous-unité ribosomale catalyse la formation d'une liaison peptidique entre la méthionine et l'acide aminé porté par l'ARNt présent sur le site A du ribosome.
- 5 À la suite de la formation de la liaison peptidique, le dipeptide résultant est fixé sur le site ribosomal A via l'ARNt.
- 6 Après la formation de la liaison peptidique, le ribosome glisse d'un codon sur le brin d'ARNm. L'ARNt du site P est déplacé au site E et est de ce fait libéré du ribosome. L'ARNt du site A porteur du dipeptide glisse vers le site P, ce qui permet à un autre ARNt muni de son acide aminé de se fixer sur le codon au niveau du site A nouvellement libéré. Les étapes 3 à 6 se renouvellent, et la protéine s'allonge progressivement.

Intérêt clinique

ADN recombinant

Les scientifiques ont développé des techniques pour insérer des gènes issus d'autres organismes dans toute une variété de cellules. De cette manière, la manipulation de ces cellules permet à l'organisme modifié de produire des protéines qu'il ne produit normalement pas. Les organismes ainsi modifiés sont appelés des organismes **recombinants**, et dont leur ADN issu de la combinaison d'ADN issus de différentes origines, est appelé **ADN recombinant**. Lorsque l'ADN recombinant fonctionne correctement, l'hôte synthétise la protéine spécifiée par le gène nouvellement acquis. Cette technologie qui est apparue à la suite de la manipulation de matériel génétique est appelée l'**ingénierie génétique**.

Les applications pratiques de cette technologie sont énormes. Des souches de bactéries recombinantes produisent de grandes quantités de nombreuses substances thérapeutiques indispensables, comme l'*hormone de croissance humaine (hGH)*, indispensable à une croissance et un métabolisme normaux ; l'*insuline*, une hormone qui participe à la régulation du taux de glucose sanguin et qui est utilisée chez les diabétiques ; l'*interféron*, une substance antivirale (et potentiellement anticancéreuse) ; et l'*érythropoïétine (EPO)*, une hormone qui stimule la production des globules rouges.

- 7 La synthèse protéique se termine lorsque le site A du ribosome atteint le codon STOP, ce qui induit la libération de la protéine réalisée de l'ARNt final. De plus, l'ARNt libère le site P et les petite et grande sous-unités du ribosome se séparent.

La synthèse protéique progresse au rythme de 15 liaisons peptidiques par seconde. Au fur et à mesure que le ribosome se déplace le long de l'ARNm et bien avant qu'il ne termine la synthèse de la protéine complète, un autre ribosome peut se fixer derrière lui et commence la traduction du même brin d'ARNm. Plusieurs ribosomes fixés sur le même brin d'ARNm constituent un **polyribosome**. Le mouvement simultané de plusieurs ribosomes le long de la même molécule d'ARNm permet la traduction simultanée d'un seul ARNm en plusieurs protéines identiques.

Révision

25. Qu'entend-on par le terme « expression génique » ?
26. Quelle est la différence entre transcription et traduction ?

3.7 Division cellulaire

OBJECTIFS

- **Présenter** les stades, événements et signification des divisions cellulaires somatique et reproductive.
- **Décrire** les signaux qui induisent la division cellulaire somatique.

La plupart des cellules de l'organisme humain réalisent la **division cellulaire**, le processus par lequel les cellules se reproduisent. Deux types de divisions cellulaires, la division cellulaire somatique et la division cellulaire reproductive, accomplissent des fonctions différentes.

Les cellules somatiques sont toutes les cellules du corps autres que les **cellules germinales**. Une cellule germinale est un gamète (spermatozoïde ou ovocyte) ou tout précurseur cellulaire destiné à devenir un gamète. Au cours de la **division cellulaire somatique**, une cellule réalise la division nucléaire appelée **mitose**, et une division cytoplasmique appelée **cytotécèse**, pour aboutir à la formation de deux cellules identiques, chacune ayant les mêmes nombre et type de chromosomes que la cellule d'origine. La division cellulaire somatique remplace les cellules mortes ou abîmées et adjoint de nouvelles cellules durant la croissance.

La **reproduction cellulaire reproductive** est le mécanisme qui produit les gamètes ou cellules nécessaires à la production d'une nouvelle génération d'individus aptes à leur tour à se reproduire sexuellement. Ce processus consiste en une division spécialisée et en deux étapes, appelée **méiose**, et par lequel le nombre de chromosomes du noyau est réduit de moitié.

Division cellulaire somatique

Le **cycle cellulaire** est une séquence bien ordonnée d'événements au cours desquels une cellule somatique duplique son contenu et se divise en deux. Certaines cellules se divisent plus que d'autres. Les

cellules humaines, telles que celles du cerveau, de l'estomac et des reins contiennent 23 paires de chromosomes, pour un total de 46 chromosomes. Un membre de chaque paire est hérité d'un des parents. Les deux chromosomes qui forment une paire sont appelés **chromosomes homologues** ou plus familièrement des *homologues* ; ils contiennent des gènes similaires organisés dans le même ordre (ou pratiquement dans le même ordre). Lorsqu'ils sont observés au microscope optique, les chromosomes homologues se ressemblent très fort. Une paire de chromosomes fait exception à cette règle, les **chromosomes sexuels**, appelés X et Y. Chez les femmes, la paire homologue de chromosomes sexuels est constituée de deux grands chromosomes X ; chez les hommes cette paire est constituée d'un X et d'un petit chromosome Y. Parce que les cellules somatiques contiennent deux séries de chromosomes, elles sont appelées **cellules diploïdes (2n)**.

Lorsqu'une cellule se reproduit, elle doit répliquer (dupliquer) tous ces chromosomes pour les passer à la génération suivante de cellules. Le cycle cellulaire est constitué de deux périodes majeures : l'interphase lorsque la cellule ne se divise pas, et la phase mitotique (M) lorsque la cellule se divise (**Figure 3.30**).

Interphase Lors de l'**interphase**, la cellule réplique son ADN selon un processus qui sera décrit brièvement. Elle produit également des organites supplémentaires ainsi que des éléments cytosoliques en prévision de la division cellulaire. L'interphase est un état de haute activité métabolique : c'est pendant cette phase que la cellule réalise la majorité de sa croissance. L'interphase est subdivisée en trois étapes : G_1 , S et G_2 (**Figure 3.30**). La phase S correspond à

la synthèse de l'ADN. Parce que les phases G sont des phases où il n'y a pas d'activité en rapport avec la duplication de l'ADN, elles sont considérées comme des pauses (*NdT gap* en anglais) ou des interruptions de la duplication de l'ADN.

La **phase G_1** correspond à l'intervalle entre la phase mitotique et la phase S. Pendant G_1 , la cellule est métaboliquement active, elle réplique la plupart de ses organites et de ses composants cytosoliques mais pas son ADN. La réplication des centrosomes débute également pendant la phase G_1 . Pour une cellule ayant un cycle cellulaire de 24 heures, la phase G_1 dure 8 à 10 heures. Cependant, la durée de cette phase est hautement variable. Elle est très courte chez beaucoup de cellules embryonnaires et cancéreuses. Les cellules qui restent en phase G_1 pour très longtemps, parfois destinées à ne plus jamais se diviser, sont dites en **phase G_0** . La plupart des cellules nerveuses sont en phase G_0 . Une fois qu'une cellule entre en phase S, elle est obligée de poursuivre tout son cycle cellulaire.

La **phase S**, l'intervalle entre G_1 et G_2 , dure approximativement 8 heures. La réplication de l'ADN a lieu lors de la phase S. Du fait de la réplication de l'ADN, les deux cellules identiques formées plus tard lors de la division cellulaire auront le même matériel génétique. La **phase G_2** est l'intervalle entre la phase S et la phase mitotique. Elle dure 4 à 6 heures. Durant G_2 , la croissance cellulaire se poursuit, des enzymes et d'autres protéines sont synthétisées en préparation de la division cellulaire, et la réplication des centrosomes est achevée. Lorsque l'ADN est répliqué pendant la phase S, sa structure hélicoïdale est partiellement déroulée, et les deux brins sont séparés aux endroits où les ponts hydrogène connectent les paires de bases (**Figure 3.31**). Chaque base exposée de l'ancien brin s'apparie alors avec une base complémentaire d'un nucléotide nouvellement synthétisé. Un nouveau brin d'ADN apparaît lorsque les liaisons chimiques se forment entre les nucléotides voisins. Le déploiement et l'appariement des bases complémentaires se poursuit jusqu'à ce que les deux brins d'ADN originaux soient liés chacun avec un brin d'ADN complémentaire nouvellement formé. La molécule d'ADN originale est devenue deux molécules d'ADN identiques.

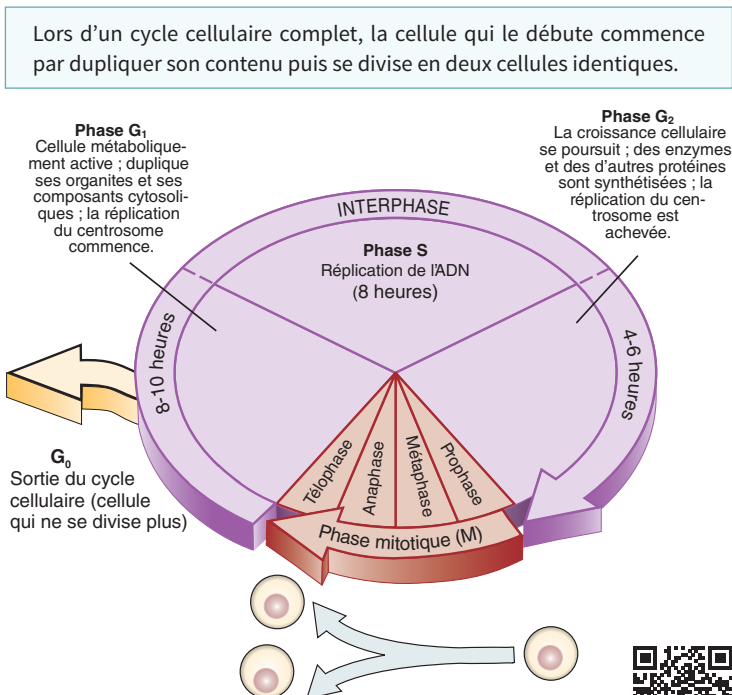
Une vue microscopique d'une cellule en interphase montre une enveloppe nucléaire clairement visible, un nucléole, ainsi qu'un amas de chromatine (**Figure 3.32a**). Une fois qu'une cellule a totalement réalisé les activités prévues au cours des phases G_1 , S et G_2 , la phase mitotique débute.

Phase mitotique La **phase mitotique (M)** du cycle cellulaire, qui aboutit à la formation de deux cellules identiques, consiste en une division nucléaire (mitose) et une division cytoplasmique (cytocinèse) pour aboutir à la formation de deux cellules identiques. Les événements qui surviennent durant la mitose et la cytocinèse sont totalement observables au microscope car la chromatine se condense en chromosomes distincts.

DIVISION NUCLÉAIRE OU MITOSE La mitose, comme vu précédemment, correspond à la distribution de deux sets de chromosomes en deux noyaux séparés. Un partage égal de l'information génétique résulte de ce processus. Par facilité, les biologistes ont divisé ce processus en quatre étapes : prophase, métaphase, anaphase et télophase. Cependant, la mitose est un processus continu : une étape se poursuit immédiatement et sans discontinuité dans l'étape suivante.

1. Prophase. Au début de la prophase, les fibres de chromatine se condensent et se raccourcissent jusqu'à devenir des chromosomes

FIGURE 3.30 Le cycle cellulaire. La cytokinèse (division du cytoplasme) n'est pas illustrée, elle survient normalement à la fin de l'anaphase de la phase mitotique.



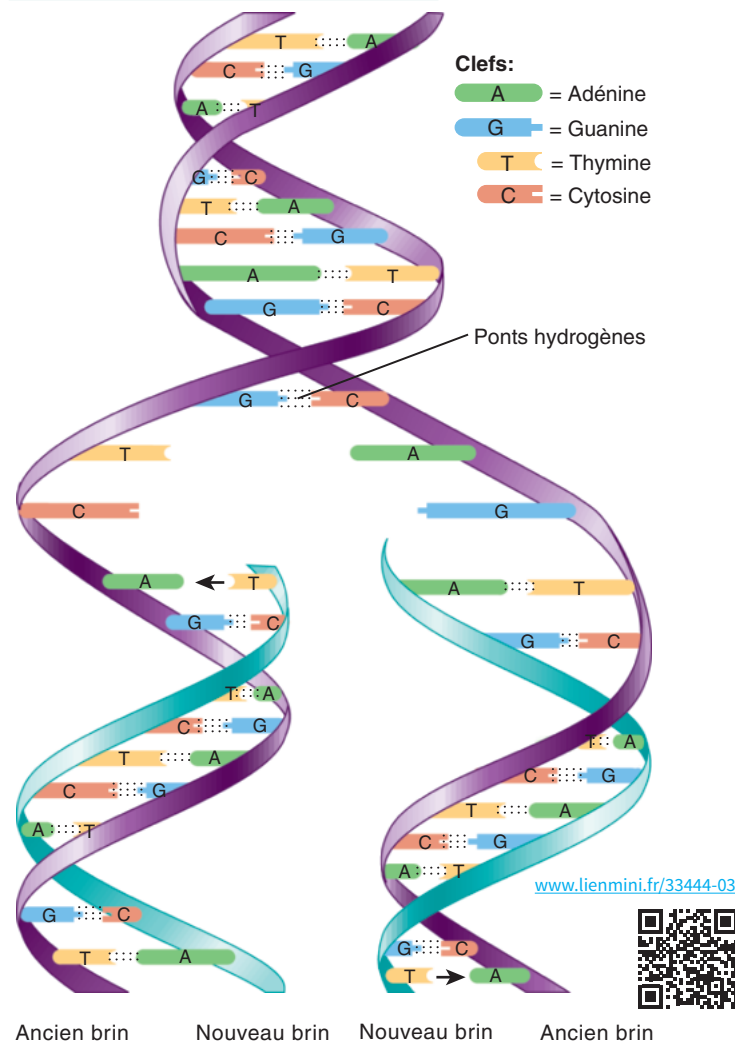
Q Durant quelle phase du cycle cellulaire se produit la réplication de l'ADN ?

www.lienmini.fr/33444-03



FIGURE 3.31 Réplication de l'ADN. Les deux brins de la double hélice se séparent par la rupture des ponts hydrogène situés entre les nucléotides (présentés en lignes pointillées). De nouveaux nucléotides complémentaires se fixent aux endroits appropriés, et un nouveau brin d'ADN est synthétisé le long de chaque brin original. Les flèches indiquent les ponts hydrogène se reformant entre les paires de bases.

La réplication double la quantité d'ADN.



Q Lors de la division cellulaire somatique, pourquoi la réplication de l'ADN doit-elle avoir lieu avant la cytokinèse ?

visibles au microscope optique (Figure 3.32b). Ce processus de condensation empêche l'enchevêtrement des chromosomes durant leur migration mitotique. Du fait que la réplication longitudinale de l'ADN a lieu durant la phase S de l'interphase, chaque chromosome est constitué d'une paire de brins identiques appelés **chromatides**. Une région plus étroite est appelée **centromère**, elle sert à maintenir la paire de chromatides ensemble. À l'extérieur de chaque centromère se trouve un complexe protéique appelé le **kinétochore**. Plus tard au cours de la prophase, les tubulines du matériel péricentriolaire des centrosomes commencent à former le **fuseau mitotique**, un assemblage de microtubules en forme de ballon de football qui se fixe sur les kinétochores (Figure 3.32b).

Lorsque les microtubules s'allongent, ils poussent les centrosomes vers les pôles de la cellule de telle manière que le fuseau s'étire d'un pôle à l'autre. Le fuseau mitotique est responsable de la séparation des chromatides vers les pôles opposés de la cellule. A ce moment, le nucléole disparaît et l'enveloppe nucléaire disparaît.

2. Métaphase Lors de la métaphase, les microtubules du fuseau mitotique alignent les centromères des paires de chromatides à l'équateur du fuseau mitotique (Figure 3.32c). Ce plan d'alignement des centromères est appelé la **plaque métaphasique**.

3. Anaphase Au cours de l'anaphase, les centromères se divisent, séparant les deux membres de chaque paire de chromatides, qui sont alors déplacés vers les pôles opposés de la cellule (Figure 3.32d). Une fois séparées, les chromatides sont appelés des *chromosomes*. Comme les chromosomes sont tirés par les microtubules du fuseau mitotique vers les pôles du fuseau, ils apparaissent sous la forme de V puisque les centromères sont les premiers et que les bras des chromosomes traînent derrière.

4. Télophase Le dernier stade de la mitose, la télophase, commence à la fin de la migration des chromosomes (Figure 3.32e). Les ensembles identiques de chromosomes sont maintenant aux pôles opposés de la cellule, les chromosomes se décondensent et la chromatine décondensée réapparaît. Une enveloppe nucléaire se reforme autour de chaque masse chromatique, le nucléole réapparaît dans chaque noyau et le fuseau mitotique disparaît.

CYTOCINÈSE OU DIVISION CYTOPLASMIQUE Comme nous l'avons déjà vu, la division du cytoplasme cellulaire et des organites en deux cellules identiques est appelée **cytokinèse**. Ce processus commence normalement à la fin de l'anaphase par la formation du **sillon de clivage**, une légère échancrure de la membrane plasmique, et se termine à la fin de la télophase. Le sillon de clivage apparaît généralement à mi-chemin entre les centrosomes et s'étend tout autour de la cellule (Figure 3.32d, e). Des microfilaments d'actine fixés juste à l'intérieur de la membrane plasmique forment un *anneau contractile* qui attire progressivement la membrane vers l'intérieur. L'anneau enserré progressivement le centre de la cellule, comme on serre une ceinture autour de sa taille, et finalement divise la cellule en deux. Comme le plan du sillon de clivage est toujours perpendiculaire au fuseau mitotique, les deux ensembles de chromosomes finissent par se retrouver dans des cellules différentes. Une fois que la cytokinèse est terminée, l'interphase commence (Figure 3.32f).

La séquence de ces événements peut être résumée comme ceci

Phase G₁ → Phase S → Phase G₂ → Mitose → Cytokinèse

Le Tableau 3.3 résume les événements du cycle cellulaire des cellules somatiques.

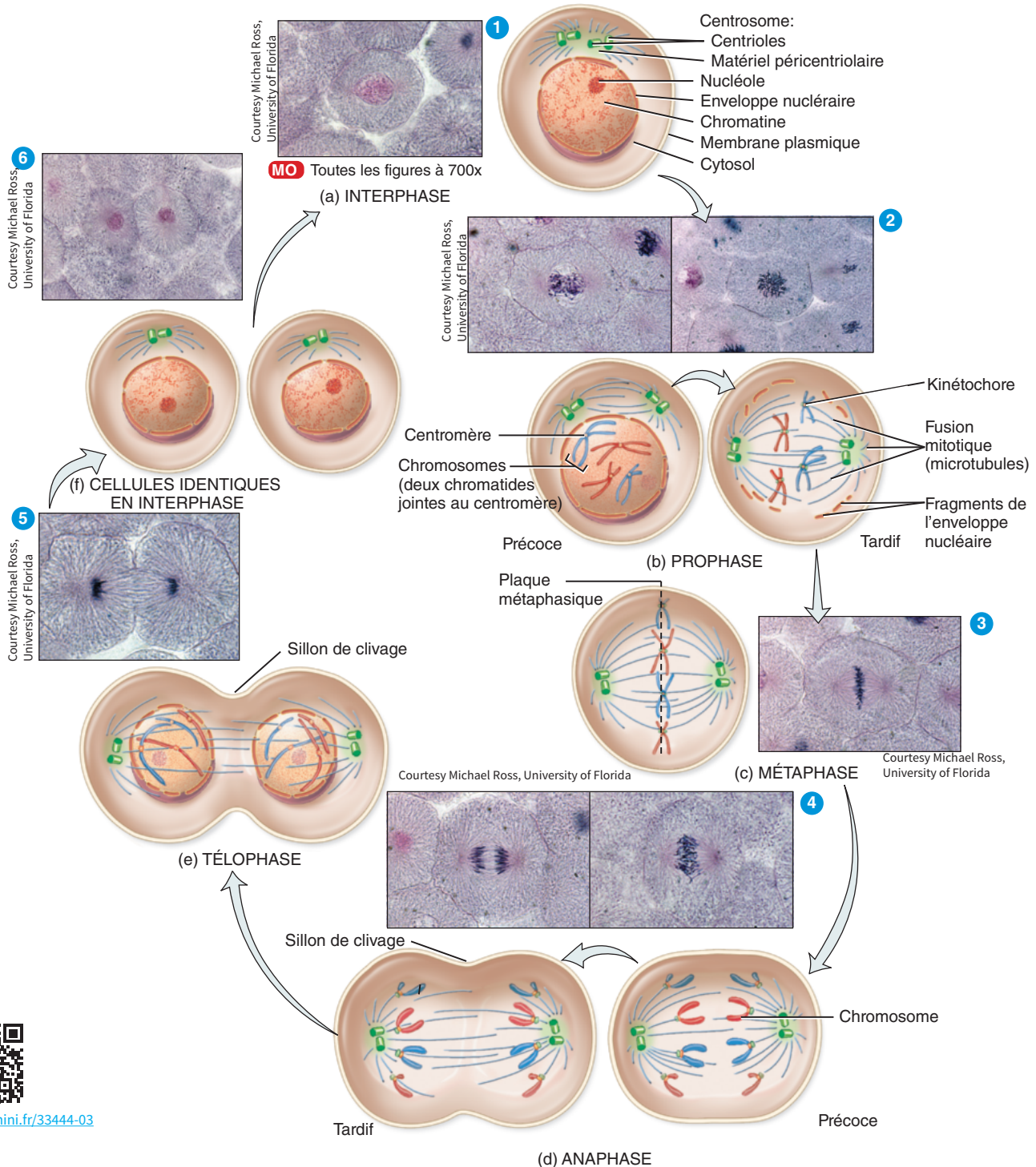
Régulation de la destinée de la cellule

Une cellule a trois vocations possibles : (1) accomplir ses fonctions sans se diviser, (2) croître et se diviser, ou (3) mourir. Le maintien de l'homéostasie dépend d'un équilibre entre la prolifération et la mort cellulaire. Différents signaux indiquent à la cellule quant rester en G₀, se diviser ou mourir.

Dans une cellule, il y a des enzymes appelés **kinases cycline-dépendantes (Cdk)** capables de transférer un groupement phosphate

FIGURE 3.32 La division cellulaire : mitose et cytokinèse. Commencez la séquence au numéro 1 au sommet de la figure, et lisez le processus complet dans le sens des aiguilles d'une montre.

Lors de la division cellulaire somatique, une seule cellule se divise pour former deux cellules diploïdes identiques.



www.lienmini.fr/33444-03

Intérêt clinique

Fuseau mitotique et cancer

Les divisions incontrôlées sont une des caractéristiques spécifiques des cellules cancéreuses, il en résulte la formation d'une masse de cellules appelée *néoplasme* ou *tumeur*. La *chimiothérapie* est une des méthodes de traitement du cancer par le biais de médicaments anticancéreux. Certains

de ces médicaments sont des drogues qui arrêtent la division cellulaire en inhibant la formation du fuseau mitotique. Malheureusement, ces types de médicaments anticancéreux tuent également tous les types de cellules de l'organisme qui se divisent rapidement, ce qui est à l'origine d'effets secondaires tels que nausées, diarrhées, perte des cheveux, fatigue et diminution de la résistance aux maladies.

Q Quand est-ce que la cytokinèse commence ?

TABLEAU 3.3 Résumé des évènements du cycle cellulaire des cellules somatiques	
PHASE	ACTIVITÉS
Interphase	Périodes entre les divisions cellulaires, les chromosomes ne sont pas visibles au microscope optique.
Phase G ₁	Cellule métaboliquement active qui duplique la plupart de ses organites et composants cytosoliques ; la réplication des chromosomes commence. (Les cellules qui stationnent en phase G ₁ pour de longues périodes et qui ne se diviseront peut-être plus jamais, sont dites en phase G ₀ .)
Phase S	Réplication de l'ADN et des centrosomes.
Phase G ₂	La croissance cellulaire, la synthèse enzymatique et protéique se poursuit, la réplication des centrosomes est terminée.
Phase mitotique	Les cellules parentales produisent des cellules identiques avec des chromosomes identiques ; les chromosomes sont visibles au microscope optique.
Mitose	Division nucléaire ; distribution de deux sets de chromosomes dans des noyaux différents.
Prophase	Les fibres de chromatine se condensent en des chromatides appariées ; le nucléole et la membrane nucléaire disparaissent ; chaque centrosome migre vers un pôle opposé de la cellule.
Métaphase	Les centromères des paires de chromatides s'alignent sur la plaque métaphasique.
Anaphase	Les centromères se divisent ; des sets identiques de chromosomes se déplacent vers les pôles opposés de la cellule.
Télophase	L'enveloppe nucléaire et le centriole réapparaissent ; les chromosomes se décondensent sous leur forme chromatique ; le fuseau mitotique disparaît.
Cytocinèse	Division cytoplasmique ; un anneau contractile forme un sillon de clivage autour du centre de la cellule, divisant le cytoplasme en deux portions séparées et égales.

à partir de l'ATP pour activer une protéine ; tandis que d'autres enzymes peuvent le retirer pour désactiver cette protéine. L'activation tout comme la désactivation des Cdks aux moments appropriés sont cruciaux pour le démarrage et la régulation de la réplication de l'ADN, de la mitose et de la cytokinèse.

Activer et arrêter les Cdks est sous la responsabilité de protéines cellulaires appelées **cyclines**, dénommées ainsi parce que leurs concentrations augmentent et diminuent durant le cycle cellulaire. L'assemblage d'une cycline spécifique avec la molécule de Cdk est à l'origine de plusieurs évènements qui contrôlent la division cellulaire.

L'activation des complexes cycline-Cdk est responsable de la progression de la cellule de G₁ à S à G₂ à la phase mitotique dans un ordre spécifique. Si une des séquences est retardée, toutes les étapes suivantes sont retardées pour maintenir la séquence normale d'évènements. Les concentrations cellulaires de cyclines sont très importantes pour définir le planning et la séquence de la division cellulaire. Par exemple, le taux de cycline qui pilote la cellule au travers de son cycle cellulaire depuis G₂ vers la mitose augmente tout au long des phases G₁, S et G₂ et lors de la mitose. Un taux élevé en cycline déclenche la mitose, mais vers la fin de la phase mitotique, sa concentration diminue rapidement et la mitose s'achève. La destruction de cette cycline, tout comme les autres cyclines de la cellule, est dépendante de l'action de protéasomes.

La mort cellulaire est également contrôlée. Tout au long de la vie d'un organisme, certaines cellules entrent en apoptose, une mort cellulaire ordonnée et programmée génétiquement (voir la Section 3.4 concernant les mitochondries). Lors de l'apoptose, un agent déclenchant provenant de l'extérieur ou de l'intérieur de la cellule induit l'expression de gènes suicides qui induisent l'expression d'enzymes qui endommagent la cellule de différentes manières, en ce compris la destruction du cytosquelette et le noyau. Il en résulte que la cellule se contracte sur elle-même et se sépare des cellules voisines. Alors que la membrane plasmique reste intacte, l'ADN du noyau se fragmente et le cytoplasme se contracte. Les phagocytes avoisinants digèrent alors la cellule moribonde via un processus complexe qui implique une protéine réceptrice de la membrane du phagocyte qui est capable de

se lier aux lipides de la cellule mourante. L'apoptose permet de se débarrasser des cellules superflues durant le développement fœtal, comme par exemple, lors de la découpe de la membrane entre les doigts. L'apoptose continue d'être utilisée après la naissance pour réguler le nombre de cellules d'un organe et pour éliminer des cellules potentiellement dangereuses comme les cellules cancéreuses.

L'apoptose est le processus normal de mort cellulaire, à l'inverse la **nécrose** est un type de mort cellulaire pathologique qui résulte d'une lésion tissulaire. Lors de la nécrose, beaucoup de cellules adjacentes gonflent, éclatent et répandent leur cytoplasme dans le liquide interstitiel. Les débris cellulaires stimulent habituellement une réponse inflammatoire par le système immunitaire, un processus qui n'est pas enclenché par l'apoptose.

Division cellulaire reproductive

Dans le mécanisme de reproduction sexuelle, chaque nouvel organisme est le résultat de l'union de deux gamètes différents (fécondation), chacun produit par chaque parent. Si les gamètes avaient le nombre de chromosomes, le nombre de chromosomes doublerait à la fécondation. La **méiose**, la division cellulaire reproductrice qui a lieu dans les gonades (ovaires et testicules), produit des gamètes au sein desquels le nombre de chromosomes est réduit de moitié. Il en résulte que les gamètes ne contiennent qu'un simple set de 23 chromosomes et sont donc des **cellules haploïdes (n)**. La fécondation restaure le nombre diploïde de chromosomes.

Méiose À l'inverse de la mitose qui est achevée après un cycle de division, la méiose est réalisée en deux étapes successives : la **méiose I** et la **méiose II**. Lors de l'interphase qui précède la méiose I, les chromosomes de la cellule diploïde commencent à se répliquer. Il en résulte que chaque chromosome est constitué de deux chromatides sœurs (génétiquement identique) qui restent attachées par leur centromère. Cette réplication des chromosomes est similaire à celle qui précède la mitose qui précède la division cellulaire somatique.

MÉIOSE I La méiose I, qui débute lorsque la réplication des chromosomes est complète, est constituée de quatre phases : prophase I, métaphase I, anaphase I et télophase I (**Figure 3.33a**). La prophase I est une phase de longue durée au cours de laquelle les chromosomes se raccourcissent et s'épaississent, l'enveloppe nucléaire et le nucléole disparaissent et le fuseau méiotique se forme. Deux événements qui ne sont pas présents au cours de la prophase mitotique apparaissent durant la prophase I de la méiose (**Figure 3.33b**). Tout d'abord, les deux chromatides sœurs de chaque paire de chromosomes homologues s'apparient, un événement appelé **synopsis**. Les quatre chromatides résultants forment une structure appelée **tétrade**. Dans un deuxième temps, des portions des chromatides des deux chromosomes homologues sont échangées entre-elles. Cet échange entre des parties de chromatides non homologues est appelé **enjambement** (*crossing-over*). Ce procédé parmi d'autres permet des échanges de gènes entre chromatides de chromosomes homologues. Du fait des enjambements, les cellules résultantes ne sont plus identiques entre-elles et ne sont plus identiques aux cellules qui les ont produites. Les enjambements induisent des **recombinaisons génétiques**, c'est-à-dire une nouvelle combinaison de gènes, et sont responsables d'une plus grande variation génétique parmi les humains et les autres organismes qui forment des gamètes via la méiose.

Au cours de la métaphase I, les tétrades formées par les paires de chromosomes homologues s'alignent sur la plaque métaphasique de la cellule de sorte qu'elles soient côte à côte (**Figure 3.33a**). Au cours de l'anaphase I, les membres de chaque paire homologue de chromosomes se séparent lorsqu'ils sont tirés vers les pôles opposés de la cellule par les microtubules fixés sur leurs centromères. Les paires de chromatides, maintenues par leur centromère, restent ensemble. (Rappelez-vous qu'au cours de l'anaphase mitotique, les centromères se divisent et les chromatides sœurs se séparent.) La télophase I et la cytokinèse de la méiose sont similaires à la télophase et la cytokinèse

de la mitose. L'apport de la méiose I que chaque cellule résultante ne contient qu'un nombre haploïde de chromosomes puisqu'elle ne contient qu'un membre de chaque paire de chromosomes homologues présents dans la cellule de départ.

MÉIOSE II La deuxième partie de la méiose, la méiose II, est constituée également de quatre phases : la prophase II, la métaphase II, l'anaphase II et la télophase II (**Figure 3.33a**). Ces phases sont fort similaires à ce qui se produit au cours de la mitose : les centromères se divisent, et les chromatides sœurs se séparent pour se déplacer vers les pôles opposés de la cellule.

En résumé, la méiose I commence à partir d'une cellule diploïde et se termine avec deux cellules, chacune possédant un nombre haploïde de chromosomes. Lors de la méiose II, chacune des deux cellules haploïdes formées au cours de la méiose I se divise, le résultat final étant quatre gamètes haploïdes qui sont toutes génétiquement différentes de la cellule originale diploïde du départ.

La **Figure 3.34** et le **Tableau 3.4** comparent les événements de la mitose et de la méiose.

Révision

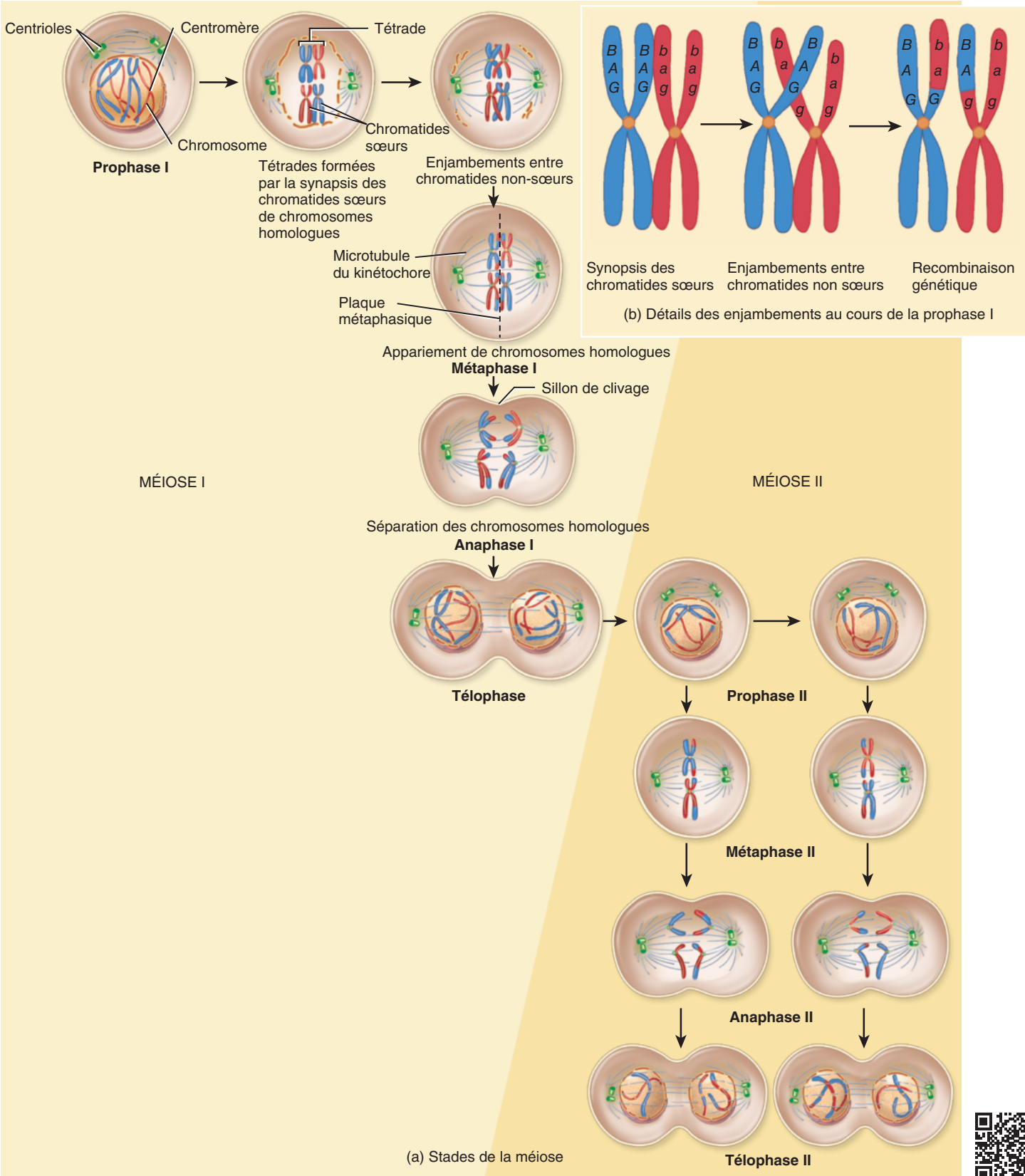
27. Comparez les divisions cellulaires somatique et reproductive et expliquez l'importance de chacune d'entre-elles ?
28. Quel est le rôle de l'interphase ?
29. Décrivez les événements majeurs de chaque étape de la phase mitotique du cycle cellulaire.
30. En quoi l'apoptose et la nécrose sont-elles similaires et différentes ?
31. En quoi les cellules haploïdes et diploïdes sont différentes ?
32. Que sont des chromosomes homologues ?

TABEAU 3.4 Comparaison entre la Mitose et la Méiose

POINT DE COMPARAISON	MITOSE	MÉIOSE
Type cellulaire	Somatique.	Gamète.
Nombre de divisions	1	2
Stades	Interphase. Prophase. Métaphase. Anaphase. Télophase.	Interphase I uniquement. Prophases I et II. Métaphases I et II. Anaphases I et II. Télophases I et II.
Duplication de l'ADN ?	Oui, pendant l'interphase.	Oui, pendant l'interphase I; Non, pendant l'interphase II.
Tétrades ?	Non.	Oui.
Nombre de cellules	2.	4.
Nombre de chromosomes par cellule.	46 ou deux sets de 23 ; cette composition diploïde (2n) est identique à la cellule de départ.	Un set de 23 ; cette composition haploïde (n) représente la moitié des chromosomes de la cellule de départ.

FIGURE 3.33 La méiose, division cellulaire reproductive. Les détails de chaque étape sont présentés dans le texte.

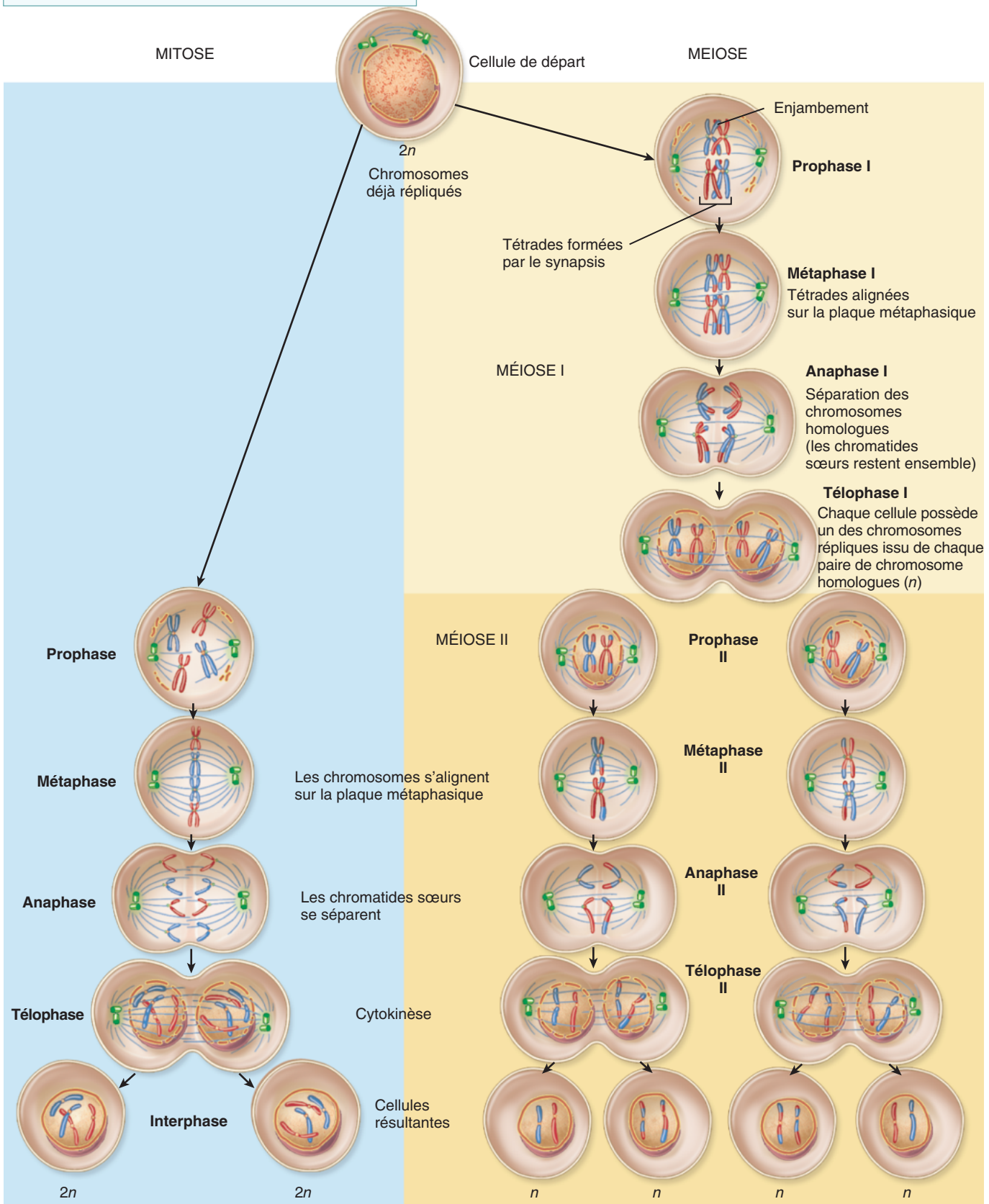
Lors de la division cellulaire reproductive, la seule cellule diploïde du départ réalise la méiose I et la méiose II pour produire quatre gamètes haploïdes qui sont génétiquement différents de la cellule d'origine qui les a produits.



Q Comment le contenu génétique des gamètes haploïdes est affecté par les enjambements ?

FIGURE 3.34 Comparaison entre la mitose (à gauche) et la méiose (à droite) d'une cellule de départ contenant deux paires de chromosomes homologues.

Les phases de la méiose II et de la mitose sont similaires.



Cellules somatiques avec un nombre diploïde de chromosomes (non répliqués)

Gamètes avec un nombre haploïde de chromosomes (non répliqués)

Q Comment l'anaphase I de la méiose diffère de l'anaphase de la mitose ?



3.8 Diversité cellulaire

OBJECTIFS

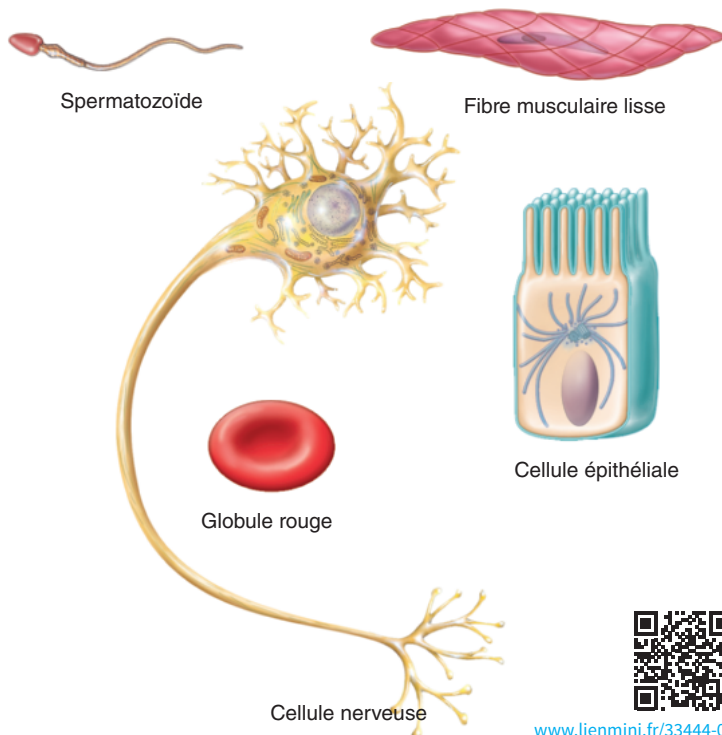
- **Décrire** comment des cellules diffèrent en taille et en forme.

Les cellules varient considérablement en taille. Les dimensions des cellules sont mesurées en unités appelées *micromètres*. Un micromètre (μm) est égal à un millionième de mètre, ou 10^{-6} m. Des microscopes puissants sont nécessaires pour observer les plus petites cellules de l'organisme. La plus grande cellule, l'ovocyte, a un diamètre d'approximativement $140 \mu\text{m}$ et est pratiquement visible à l'œil nu. Un globule rouge a un diamètre de $8 \mu\text{m}$. Pour mieux visualiser ce que cela représente, sachez qu'un de vos cheveux à un diamètre approximatif de $100 \mu\text{m}$.

La forme des cellules varie aussi considérablement (Figure 3.35). Elles peuvent être rondes, ovales, aplaties, cubiques, cylindriques, allongées, étoilées ou en forme de disque. La forme de la cellule est fonction de son rôle dans l'organisme. Par exemple, un spermatozoïde possède une longue queue en fouet (flagelle) pour sa locomotion. Les spermatozoïdes sont les seules cellules masculines qui doivent se dé-

FIGURE 3.35 Différentes formes et tailles de cellules humaines. La différence relative de taille entre les plus petites et les plus grandes cellules est en réalité bien plus importante que ce qui est montré ici.

Les près de 100 billions de cellules d'un humain adulte normal peuvent être classées en pratiquement 200 types cellulaires.



www.lienmini.fr/33444-03

Q Pourquoi les spermatozoïdes sont les seules cellules de l'organisme qui ont besoin d'être équipées d'un flagelle ?

placer sur de longues distances. La forme discoïde des globules rouges lui confère une grande surface pour favoriser le transfert de l'oxygène aux autres cellules. Les longues fibres (cellules) fusiformes d'un muscle lisse se raccourcissent lorsque le muscle se contracte. Ce changement de forme permet à des groupes de fibres musculaires lisses de rétrécir ou d'élargir le passage du flux sanguin au travers des vaisseaux. De cette manière, elles régulent le débit sanguin dans de nombreux tissus. Rappelez-vous que certaines cellules sont équipées de microvillosités qui augmentent grandement leur surface de contact. Les microvillosités sont abondantes au niveau des cellules épithéliales qui bordent l'intestin grêle, où la grande surface accélère l'absorption des aliments digérés. Les cellules nerveuses possèdent de longues extensions qui leur permettent de conduire l'influx nerveux sur des grandes distances. Comme vous le verrez dans les prochains chapitres, la diversité cellulaire autorise également l'organisation des cellules en des tissus complexes et des organes.

Révision

- 33.** Quelle est la relation entre la forme de la cellule et sa fonction ?
Donnez quelques exemples de votre cru.

3.9 Vieillesse et cellules

OBJECTIFS

- **Décrire** les changements cellulaires associées au vieillissement.

Le **vieillesse** est un processus normal qui s'accompagne d'une altération progressive des réactions adaptatives liées à l'homéostasie. Il induit des modifications observables de la structure et des fonctions, et augmente la vulnérabilité aux maladies ainsi qu'au stress environnemental. La **gériatrie** est la spécialité médicale qui s'occupe des problèmes et maladies spécifiques des personnes âgées. La **gérontologie** est la science qui étudie les processus et divers problèmes liés au vieillissement.

Alors que des millions de nouvelles cellules sont produites chaque minute, plusieurs types cellulaires de l'organisme, en ce compris les cellules musculaires et nerveuses, ne se divisent pas car elles sont bloquées de manière permanente en phase G0. Des expériences ont montré que de nombreuses autres cellules n'ont qu'une capacité limitée à se diviser. Les cellules normales cultivées in vitro ne se divisent que quelques fois avant de s'arrêter. Ces observations démontrent que l'arrêt des mitoses est un processus normal, génétiquement programmé. Selon cette hypothèse, les « gènes du vieillissement » font partie du patrimoine génétique à la naissance. Ces gènes ont d'importantes fonctions dans les cellules normales, mais leurs activités s'estompent avec le temps. Ils provoquent le vieillissement en ralentissant les processus normaux ou en y mettant fin.

Un autre aspect du vieillissement concerne les **télomères**, qui sont des séquences d'ADN spécifiques situées exclusivement aux extrémités de chaque chromosome. Ces portions d'ADN protègent les extrémités des chromosomes de l'érosion et les empêchent de se coller les uns aux autres. Cependant, la plupart des cellules de l'organisme voient leurs télomères se raccourcir à chaque cycle de division cellulaire. Au bout de nombreux cycles de division cellulaire, les télomères peuvent disparaître

complètement et parfois même une partie du matériel chromosomique fonctionnel peut être emporté. Ces observations suggèrent que l'érosion de l'ADN aux extrémités des chromosomes participe de manière importante au vieillissement et à la mort des cellules. Les personnes qui souffrent fortement du stress possèdent des télomères plus courts.

Le glucose, le sucre le plus abondant de l'organisme, joue également un rôle dans le processus de vieillissement. Il se fixe de manière aléatoire aux protéines intra- et extracellulaires, formant des liens irréversibles entre des protéines adjacentes. L'âge avançant, il y a de plus en plus de ces liens qui se forment, ce qui contribue à la rigidité et à la perte d'élasticité liée à l'âge.

Selon certaines théories, les causes du vieillissement sont à rechercher au niveau cellulaire, alors que d'autres se focalisent sur les mécanismes régulateurs au niveau de l'organisme entier. Par exemple, le système immunitaire peut se retourner contre soi et attaquer ses propres cellules. Cette *réponse auto-immune* peut être induite par des modifications des marqueurs de l'identité cellulaire situés sur la surface des cellules ; ces cellules deviennent alors la cibles d'anticorps et sont appelées à être détruites. Au fur et à mesure que ces modifications des protéines membranaires s'amplifient, la réponse auto-immune augmente également, produisant les signes bien connus du vieillissement. Dans les chapitres qui vont suivre, nous examinerons les effets du vieillissement sur chaque système de l'organisme au sein de sections similaires à celle-ci.

Déséquilibres homéostatiques

À la fin de la plupart des chapitres, nous examinerons brièvement des maladies et troubles graves qui constituent un écart par rapport à l'homéostasie. Ces exemples fournissent des réponses aux questions qu'on se pose souvent au sujet de problèmes médicaux.

Cancer

Le **cancer** est un nom donné à tout un groupe de maladies caractérisées par des divisions cellulaires anormales ou non contrôlées. Lorsque des cellules quelque part dans l'organisme se divisent sans contrôle, la masse de tissus excédentaires qui se développe est appelée une **tumeur** ou une *néoplasie*. L'**oncologie** est la science qui étudie les tumeurs. Les tumeurs peuvent être cancéreuses et souvent fatales, ou peuvent être bénignes. Une néoplasie est également appelée une **tumeur maligne**. La capacité de produire des **métastases**, c'est-à-dire la possibilité de se disséminer dans d'autres parties du corps, est une propriété de la plupart des tumeurs malignes. Une **tumeur bénigne** est une néoplasie qui n'a pas la capacité de métastaser. Une verrue en est un exemple. La plupart des tumeurs bénignes peuvent être ôtées chirurgicalement si elles interfèrent avec la fonction normale de l'organisme ou si elles induisent une défiguration. Certaines tumeurs bénignes sont inopérables et parfois fatales.

Types de cancers

Le nom d'un cancer fait référence au type de tissu à partir duquel il s'est développé. La plupart des cancers humains sont des **carcinomes**, c'est-à-dire des tumeurs malignes qui se développent à partir des

Intérêt clinique

Les radicaux libres et les antioxydants

Les **radicaux libres** induisent des dommages oxydatifs aux lipides et aux acides nucléiques en leur arrachant un électron pour l'apparier avec leur propre électron libre et isolé. Ils seraient responsables de l'apparition des rides sur la peau, de raideurs articulaires et de rigidités artérielles. Le métabolisme normal, comme par exemple la respiration cellulaire aérobie mitochondriale, produit des radicaux libres. D'autres radicaux libres sont issus de la pollution atmosphérique, des rayonnements et de la nourriture que nous consommons. Certains enzymes naturels présents dans les peroxysomes ou dans le cytoplasme éliminent les radicaux libres. Certaines substances alimentaires comme les vitamines E et C le bêta-carotène, le zinc et le sélénium sont appelés des **antioxydants** car ils inhibent la formation des radicaux libres.

Révision

34. Pour quelle raison certains tissus se rigidifient avec l'âge ?

épithéliums. Les **mélanomes** sont, par exemple, des cancers développés à partir des mélanocytes, les cellules épithéliales de la peau qui produisent la mélanine, un pigment cutané. Le **sarcome** est un terme général pour tous les cancers issus des cellules musculaires ou des tissus conjonctifs. Par exemple, l'**ostéosarcome**, le cancer infantile le plus fréquent, se développe à partir du tissu osseux. Les **leucémies** sont des cancers des tissus responsables de la formation du sang et sont caractérisés par la formation rapide de leucocytes anormaux. Les **lymphomes** sont des cancers des tissus lymphatiques développés à partir des ganglions lymphatiques.

Croissance et propagation du cancer

Les cellules des tumeurs malignes se multiplient rapidement et continuellement. Lorsque les cellules malignes envahissent les tissus environnants, elles déclenchent souvent une **néoangiogenèse**, ou le développement d'un nouveau réseau sanguin. Les protéines qui déclenchent cette néoangiogenèse sont appelées des *facteurs angiogéniques tumoraux* (TAFs, *tumor angiogenesis factors*). La formation de nouveaux vaisseaux sanguins peut être liée à la surproduction de TAFs ou au manque d'inhibiteurs naturels de l'angiogenèse. Lorsque le cancer croît, il commence à entrer en compétition avec les tissus normaux concernant l'espace et les nutriments disponibles, ce qui finit par réduire la taille des tissus normaux et éventuellement leur mort. Certaines cellules malignes peuvent se détacher de la tumeur initiale et envahir une cavité ou passer dans le plasma sanguin ou plasma lymphatique pour aller envahir d'autres tissus, établissant des tumeurs secondaires. Les cellules malignes ont la capacité de résister aux défenses anti-tumorales de l'organisme. La douleur associée aux cancers apparaît lorsque la tumeur comprime des nerfs ou bloque le conduit d'un organe, entraînant ainsi l'accumulation de sécrétions qui exercent alors une pression

supplémentaire, ou lorsque des tissus ou organes meurent, écrasés par la masse tumorale ou privés d'apports sanguins.

Causes du cancer

Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de la transformation néoplasique d'une cellule normale.

Les carcinogènes Les agents environnementaux en sont une des causes : des substances présentes dans l'air que nous respirons, l'eau que nous buvons, la nourriture que nous mangeons. Un agent chimique ou un rayonnement qui induit un cancer est appelé un agent carcinogène. Les agents carcinogènes induisent des mutations, c'est-à-dire des changements permanents de la séquence génique d'un gène. L'Organisation Mondiale de la Santé estime que les agents carcinogènes sont associés à 60-90 % de tous les cancers chez l'Homme. Les hydrocarbures présents dans les goudrons produits par les cigarettes, le gaz radon issu de la croûte terrestre, les radiations ultraviolettes du soleil sont autant d'exemples d'agents carcinogènes.

Les oncogènes De nombreux chercheurs concentrent actuellement leurs efforts sur l'étude des gènes inducteurs de cancers, encore appelés oncogènes. Lorsqu'ils sont activés de manière inappropriée, ces gènes ont la capacité de transformer une cellule normale en une cellule cancéreuse. La plupart des oncogènes dérivent de gènes normaux appelés des proto-oncogènes, gènes qui régulent normalement la croissance et le développement. Les proto-oncogènes, à la suite de modifications quelconques, subissent des modifications qui (1) induisent son expression de manière inappropriée, (2) le font s'exprimer de manière excessive, (3) ou qui le font s'exprimer au mauvais moment. Certains oncogènes induisent l'expression excessive de facteurs de croissance, des agents chimiques qui stimulent la croissance cellulaire. D'autres peuvent induire des modifications d'un récepteur de la membrane plasmique, induisant l'apparition d'un signal ou permettant d'être activé par un facteur de croissance. Il en résulte que le schéma de croissance d'une cellule peut devenir tout à fait anormal.

Au sein de toutes les cellules, les proto-oncogènes remplissent des fonctions cellulaires normales jusqu'au moment où la cellule subit une modification maligne. Il apparaît que certains proto-oncogènes sont transformés en oncogènes par des mutations. D'autres proto-oncogènes sont activés par des réarrangements chromosomiques : ces réarrangements placent les proto-oncogènes à proximité d'autres gènes qui augmentent leur niveau d'expression.

Les virus oncogènes Certains cancers ont une origine virale. Les virus sont de minuscules assemblages d'acides nucléiques, sous la forme d'ARN ou d'ADN, qui ne peuvent se reproduire qu'à l'intérieur des cellules qu'ils infectent. Certains virus, appelés virus oncogènes, induisent le cancer en provoquant une prolifération cellulaire anormale. Par exemple, le papillomavirus humain est l'agent causal du cancer du col de l'utérus chez la femme. Le virus déclenche la production d'un protéasome qui détruit la protéine p53, une protéine qui supprime normalement la division cellulaire non contrôlée. En l'absence de cette protéine suppresseur, les cellules prolifèrent sans contrôle.

Certaines études suggèrent que certains cancers peuvent être liés à des cellules possédant un nombre anormal de chromosomes. Il en résulte que ces cellules peuvent avoir des copies surnuméraires d'oncogènes ou à l'inverse posséder un nombre insuffisant de gènes suppresseurs de tumeurs, ce qui dans les deux cas peut amener à une prolifération cellulaire incontrôlée. Il y a également des évidences

comme quoi le cancer peut trouver son origine dans des cellules souches qui se transforment en cellules souches cancéreuses capables de former des tumeurs malignes.

Plus tard dans cet ouvrage, nous étudierons le processus de l'inflammation, qui est un mécanisme défensif faisant réponse à une lésion tissulaire. Il apparaît que l'inflammation contribue à plusieurs étapes du développement cancéreux. Certaines évidences démontrent que l'inflammation chronique stimule la prolifération des cellules transformées et leur survie, induit l'angiogenèse et contribue à l'invasion et la formation de métastases. Il y a une relation claire entre certaines conditions inflammatoires et la transformation maligne de tissus enflammés. Par exemple, la gastrite chronique (inflammation de la muqueuse stomacale) et les ulcères peptiques sont probablement à l'origine de 60 à 90 % des cancers de l'estomac. L'hépatite chronique (inflammation du foie) et la cirrhose du foie sont sans doute responsables de 80 % des cancers du foie. Le cancer colorectal est 10 fois plus fréquent chez les patients atteints de maladies inflammatoires chroniques du côlon, comme la rectocolite ulcéro-hémorragique et la maladie de Crohn. De même, la relation entre la silicose et l'asbestose, deux maladies chroniques des bronches, et le cancer du poumon est connue depuis longtemps. L'inflammation chronique est également le contributeur sous-jacent de l'arthrite rhumatoïde et des maladies cardiovasculaires.

Carcinogenèse : mécanisme à étapes multiples

La **carcinogenèse** est un mécanisme de développement du cancer en plusieurs étapes au sein desquelles pas moins de 10 mutations distinctes doivent s'accumuler dans la cellule avant qu'elle ne devienne cancéreuse. La progression des modifications génétiques amenant au cancer est mieux comprise concernant le cancer colorectal. Ces cancers, comme les cancers du poumon et du sein, prennent des dizaines d'années à se développer. Concernant le cancer du côlon, la tumeur commence comme une zone où la prolifération cellulaire est plus importante, résultant d'une mutation. Cette prolifération évolue vers une croissance anormale mais non cancéreuse, appelée adénome. Après deux ou trois mutations supplémentaires, la mutation du gène suppresseur de tumeur p53 apparaît et le carcinome se développe. Le fait que tant de mutations soient nécessaires pour qu'un cancer ne se développe indique que la croissance cellulaire est normalement vérifiée par de très nombreux points de contrôle. Il n'est donc pas surprenant qu'un système immunitaire affaibli contribue également à la genèse des cancers.

Traitement du cancer

Classiquement, le traitement du cancer comprend la chirurgie, la chimiothérapie et la radiothérapie. De nombreux cancers sont traités par ablation chirurgicale. La chirurgie est aussi utilisée pour diagnostiquer et évaluer l'éventuelle dissémination du cancer. Cependant, la chimiothérapie et la radiothérapie sont préférées à la chirurgie lorsqu'un cancer touche plusieurs régions du corps ou lorsque le fonctionnement du cerveau pourrait être altéré par le geste chirurgical. Souvent, la chirurgie, la chimio- et la radiothérapie sont combinées. La chimiothérapie consiste en l'administration de médicaments qui tuent les cellules cancéreuses. La radiothérapie brise les chromosomes, bloquant ainsi la division cellulaire. Du fait que les cellules cancéreuses se divisent rapidement, elles sont plus vulnérables à la chimio- et à la radiothérapie que les cellules normales. Malheureusement pour les

patients, les cellules des follicules pileux, les cellules sanguines progénitrices de la moelle osseuse, les cellules épithéliales du système digestif se divisent aussi très rapidement. De ce fait, les effets secondaires de la chimio- et de la radiothérapie comprennent la perte des cheveux du fait de la mort des follicules pileux, les nausées et vomissements liés à la mort des cellules qui recouvrent l'estomac et les intestins, et une plus grande susceptibilité aux infections liée à une diminution de la production des globules blancs dans la moelle osseuse.

Le traitement du cancer n'est pas facile car il ne s'agit pas d'une maladie simple, et parce que les cellules qui constituent une tumeur ne sont pas homogènes et que de ce fait, elles ne réagissent pas toutes de la même manière au traitement. Alors que toutes les cellules d'une même tumeur dérivent d'une seule cellule anormale, le temps que la tumeur atteigne une taille cliniquement détectable, elle a évolué et peut être constituée de populations diverses de cellules anormales. Par exemple, certaines cellules cancéreuses métastasent rapidement alors que d'autres ne le font pas. Certaines sont sensibles aux médicaments de la chimiothérapie alors que d'autres sont résistantes. Du fait de ces différences de sensibilités aux drogues, un seul agent chimiothérapeutique peut détruire les cellules sensibles et laisser les autres proliférer.

Parmi les thérapies proposées pour le traitement du cancer, on retrouve :

- L'immunothérapie, qui permet par différentes procédures de modifier et de stimuler les réponses immunitaires pour combattre le cancer.
- La thérapie ciblée, qui permet grâce à certains médicaments de cibler certains gènes et protéines spécifiques retrouvées dans les cellules cancéreuses pour empêcher leur croissance et leur multiplication ou pour interrompre leur vascularisation.
- Les greffes de cellules souches, qui permettent de remplacer les cellules hématopoïétiques chez les patients dont la moelle osseuse rouge a été détruite par la radiothérapie et la chimiothérapie.
- L'hormonothérapie, qui permet de modifier les différentes concentrations d'hormones en ralentissant ou en stoppant la croissance des cellules cancéreuses sensibles au contrôle hormonal dans différents tissus comme les seins ou la prostate.
- Les thérapies alternatives et complémentaires qui utilisent des moyens alternatifs à la médecine tels que l'herboristerie, les vitamines et compléments alimentaires ; l'exercice physique, les techniques de relaxation, le massage, les prières, l'hypnothérapie et l'acupuncture.

Terminologie médicale

La plupart des chapitres de cet ouvrage sont suivis par un glossaire des termes médicaux importants concernant les conditions normales et pathologiques. Vous devez vous familiariser à ces termes car ils sont essentiels à votre vocabulaire médical.

Certains des états décrits dans le glossaire ou dans le texte sont locaux ou systémiques. Une *maladie locale* affecte une partie ou une zone limitée de l'organisme. Une *maladie systémique* affecte l'ensemble du corps ou plusieurs zones de l'organisme.

Anaplasie La perte de la différenciation cellulaire et de la fonction qui sont caractéristiques de la plupart des cancers.

Atrophie Une diminution de la taille des cellules, avec une diminution subséquente de la taille du tissu ou de l'organe affecté.

Dysplasie Altération de la taille, de la forme et de l'organisation des cellules liée à une irritation ou une inflammation chronique. Peut évoluer vers la néoplasie (formation tumorale habituellement maligne) ou au contraire retourner vers l'état normal si l'irritation disparaît.

Hyperplasie Augmentation du nombre de cellules d'un tissu liée à l'aug-

mentation de la fréquence des divisions.

Hypertrophie Augmentation de la taille des cellules sans qu'elles ne se divisent.

Marqueurs tumoraux Une substance introduite dans la circulation par les cellules tumorales et qui indique la présence d'une tumeur, de même que sa nature exacte. Les marqueurs tumoraux sont utilisés pour le dépistage du cancer, établir un diagnostic, faire un pronostic, évaluer une réponse au traitement ou suivre la recrudescence du cancer aussi appelée vieillissement prématuré de l'adulte.

Métaplasie Transformation d'un type cellulaire en un autre type cellulaire.

Progéniture Ensemble des descendants d'un individu.

Protéomique L'étude du protéome (toutes les protéines d'un organisme) dans le but d'identifier toutes les protéines produites. Cela implique de déterminer la structure tridimensionnelle des protéines pour que les médicaments puissent être conçus en vue de modifier l'activité protéique dans le cadre de l'aide au diagnostic et au traitement d'une maladie.

Résumé du chapitre

Introduction

1. Une cellule est l'unité vivante structurelle et fonctionnelle de base de l'organisme.
2. La biologie cellulaire est l'étude scientifique des structures et fonctions cellulaires.

3.1 Parties de la cellule

1. La **Figure 3.1** présente un survol des structures typiques du corps cellulaire.
2. Les parties principales de la cellule sont la membrane plasmique, le cytoplasme, le contenu cellulaire entre la membrane plasmique et le noyau, et le noyau.

3.2 Membrane plasmique

1. La membrane plasmique qui entoure et contient le cytoplasme cellulaire, est composée de protéines et de lipides.
2. En accord avec le modèle de la mosaïque fluide, la membrane est une mosaïque de protéines flottant comme des icebergs sur une mer de lipides en bicouche.
3. La bicouche lipidique est constituée de deux couches de lipides organisés dos-à-dos, de cholestérols et de glycolipides. L'organisation est en bicouche.

car les lipides sont amphipathiques, c'est-à-dire possédants à la fois des parties polaires et non polaires.

4. Des protéines intégrées sont situées dans ou passent au travers de la membrane lipidique ; les protéines périphériques sont associées aux lipides membranaires ou aux protéines intégrées et sont situées à la surface interne ou externe de la membrane.

5. La plupart des protéines sont des glycoprotéines avec des groupes hydrocarbonés fixés aux extrémités externes des protéines, faisant face au fluide extracellulaire. Ensemble avec les glycolipides, les glycoprotéines forment le glycocalyx sur la surface externe des cellules.

6. Les protéines membranaires ont toute une variété de fonctions. Des protéines intégrées sont des canaux et des transporteurs qui aident des solutés spécifiques à traverser la membrane ; des récepteurs qui servent de sites de reconnaissance cellulaire ; des enzymes qui catalysent des réactions chimiques ; des protéines d'ancrage qui fixent les membranes plasmiques à des filaments protéiques dans et hors de la cellule. Les protéines périphériques servent d'enzymes et d'amarres ; participent au soutien de la membrane plasmique, servent d'ancrage aux protéines intégrées à la membrane, et participent aux activités mécaniques. Les glycoprotéines membranaires servent de marqueurs de l'identité cellulaire.

7. La fluidité membranaire est plus importante en présence de doubles liaisons dans les queues des acides gras qui forment la double couche lipidique. Le cholestérol rend la membrane plasmique plus résistante mais moins fluide à la température corporelle normale. La fluidité membranaire autorise des interactions au sein de la membrane plasmique, rendant possible le mouvement des composants membranaires, et permettant à la membrane de se refermer lorsqu'elle est tordue ou percée.

8. La perméabilité sélective de la membrane permet à certaines substances de la traverser plus facilement que d'autres. La double couche lipidique est perméable à la plupart des molécules apolaires et non chargées. Elle est imperméable aux ions et aux molécules chargées ou polaires autres que l'eau et l'urée. Les canaux et transporteurs augmentent la perméabilité membranaire aux substances chargées et polaires de petites et moyennes dimensions comme des ions qui ne peuvent traverser seuls la membrane.

9. La perméabilité sélective de la membrane plasmique permet l'existence de gradients de concentrations, ou différences de concentrations de substances chimiques de part et d'autre de la membrane.

3.3 Transport membranaire

1. Lors des processus d'échanges passifs, une substance se déplace au travers de la membrane en descendant son gradient de concentration, en utilisant tout simplement sa propre énergie cinétique pour se déplacer. Lors des processus d'échanges actifs, l'énergie cellulaire est utilisée pour transporter une substance au travers de la membrane contre son gradient de concentration.

2. Lors de la diffusion, les molécules ou les ions se déplacent d'une zone où ils sont forts concentrés vers une zone où ils le sont moins jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint. Le taux de diffusion au travers de la membrane dépend de l'importance du gradient de concentration, de la température, de la masse de la substance qui diffuse, de la surface de transfert disponible, de la distance sur laquelle la diffusion doit se faire (NdT : et de la perméabilité de la membrane envers cette substance).

3. Des molécules hydrophobes non polaires telles que l'oxygène, le dioxyde de carbone, l'azote, les stéroïdes, et les vitamines liposolubles (A, E, D et K), plus les petites molécules polaires non chargées telles que l'urée et les petits alcools diffusent par diffusion simple au travers de la bicouche lipidique de la membrane plasmique.

4. En ce qui concerne la diffusion facilitée par des canaux, un soluté descend son gradient de concentration en traversant la membrane plasmique via un canal membranaire. Nous pouvons citer en exemple les canaux ioniques qui permettent à des ions spécifiques tels que K^+ , Cl^- , Na^+ , ou Ca^{2+} de traverser la membrane plasmique (ces ions sont trop hydrophiles pour traverser pour passer au travers de la membrane apolaire). Concernant la diffusion facilitée

par transporteurs, un soluté tel que le glucose se lie à une protéine transporteuse spécifique d'un côté de la membrane, et est libéré de l'autre côté de la membrane après que le transporteur ait changé de conformation.

5. L'osmose est une sorte de diffusion par laquelle il y a un mouvement net d'eau au travers d'une membrane sélectivement perméable depuis une zone où l'eau est plus concentrée vers une zone où elle l'est moins. Dans une solution isotonique, les globules rouges maintiennent leur forme normale ; dans une solution hypotonique, ils gonflent ce qui induit l'hémolyse ; et dans une solution hypertonique, ils se contractent et deviennent crénelés.

6. Des substances qui traversent la membrane à l'encontre de leur gradient de concentration le font par le biais d'un transport actif. Les substances transportées activement sont notamment le Na^+ , K^+ , H^+ , Ca^{2+} , I^- et Cl^- , les acides aminés, ainsi que les monosaccharides. Deux sources d'énergie permettent ce transport actif : l'énergie apportée par l'hydrolyse de l'ATP est utilisée pour le transport actif primaire ; et l'énergie potentielle stockée dans un gradient de concentration du Na^+ ou du H^+ est utilisée dans le transport actif secondaire. Le transport actif primaire le plus utilisé est la pompe sodium-potassium, encore appelée Na^+-K^+ ATPase. Les transporteurs actifs secondaires sont constitués des symporteurs et d'antiporteurs qui sont tous les deux entraînés par un gradient de concentration de Na^+ ou de K^+ . Les symporteurs déplacent deux substances dans la même direction au travers de la membrane plasmique, tandis que les antiporteurs déplacent deux substances en sens opposé.

7. Au cours de l'endocytose, de petites vésicules se détachent de la membrane plasmique pour amener du matériel dans la cellule au travers de la membrane ; lors de l'exocytose, des vésicules fusionnent avec la membrane plasmique pour amener du matériel hors de la cellule. L'endocytose médiée par des récepteurs permet la capture sélective de grosses molécules et de particules (les ligands) qui se lient à des récepteurs membranaires spécifiques au niveau de zones membranaires appelées puits et recouvertes de clathrine. Au cours de l'endocytose non contrôlée de liquide extracellulaire, ou pinocytose, une vésicule entoure le fluide pour l'amener dans la cellule.

8. La phagocytose est l'ingestion de particules solides. Certains globules blancs détruisent de cette manière des microbes qui ont pénétré dans l'organisme.

9. Au cours de la transcytose, des vésicules d'endocytose sont créées d'un côté de la cellule, sont déplacées vers l'autre côté de la cellule et leur contenu est expulsé par exocytose de l'autre côté de la cellule.

3.4 Cytoplasme

1. Le cytoplasme - tout le contenu cellulaire entouré de la membrane plasmique à l'exception du noyau - est constitué du cytosol et des organites. Le cytosol est la partie fluide du cytoplasme, contenant de l'eau, des ions, du glucose, des acides aminés, des acides gras, des protéines, des lipides, de l'ATP et des déchets. Il est le site des nombreuses réactions chimiques essentielles à la vie cellulaire. Les organites sont des structures spécialisées et caractérisées par des formes et fonctions spécifiques.

2. Les composants du cytosquelette, un réseau de plusieurs protéines filamenteuses qui s'étend au travers du cytoplasme, est constitué des microfilaments, des filaments intermédiaires et des microtubules. Le cytosquelette est responsable de la structure et des mouvements cellulaires.

3. Le centrosome est constitué de la matrice péricentriolaire et d'une paire de centrioles. La matrice péricentriolaire organise la formation des microtubules au sein des cellules qui ne se divisent pas et est à l'origine du fuseau mitotique dans les cellules en mitose.

4. Les cils et flagelles, qui sont des projections mobiles de la surface cellulaire, sont formés par les corps basaux. Les cils meuvent le liquide le long de la surface cellulaire, les flagelles font se déplacer toute la cellule.

5. Les ribosomes sont constitués de deux sous-unités produites au sein du noyau et sont composés d'ARN et de protéines ribosomiales. Ils sont le site de la synthèse protéique.

6. Le réticulum endoplasmique (RE) est un réseau membranaire qui forme des sacs aplatis ou des tubules ; il s'étend dans l'ensemble du cytoplasme depuis l'enveloppe nucléaire. Le RE rugueux est parsemé de ribosomes qui synthétisent les protéines ; les protéines entrent ensuite dans l'espace au sein du RE pour y être transformées et triées. Le RE rugueux produit les protéines sécrétées, les protéines membranaires ainsi que les protéines des organites ; il forme les glycoprotéines, synthétise les phospholipides ; il attache les protéines aux phospholipides. Le RE lisse ne porte pas de ribosomes. Il synthétise les acides gras et les stéroïdes, il inactive les drogues et autres substances potentiellement dangereuses ; enlève le phosphate du glucose-6-phosphate ; et libère les ions calciques qui déclenchent les contractions musculaires.

7. L'appareil de Golgi est constitué de sacs aplatis appelés citernes. Les citernes d'entrée, médianes et de sortie de l'appareil de Golgi contiennent différents enzymes qui permettent à chacune des citernes de modifier, de trier et d'emballer les protéines dans des vésicules de sécrétion, des vésicules membranaires ou de transport vers différentes destinations au sein de la cellule.

8. Les lysosomes sont des vésicules entourées d'une membrane et qui contiennent des enzymes digestifs. Les endosomes, phagosomes et vésicules de pinocytose y amènent du matériel pour y être dégradé. Les lysosomes fonctionnent également pour dégrader les organites usagés (autophagie), la digestion des cellules hôtes (autolyse), ainsi que pour la digestion extracellulaire.

9. Les peroxysomes contiennent des oxydases qui oxydent les acides aminés, les acides gras, et les substances toxiques ; le peroxyde d'hydrogène produit au cours du processus est détruit par une catalase. Les protéases contenues dans les protéasomes, un autre type d'organite, dégradent continuellement les protéines non nécessaires, endommagées ou mal construites en les sectionnant en de petits peptides.

10. Les mitochondries sont constituées d'une membrane mitochondriale externe et lisse, d'une membrane mitochondriale interne porteuse des crêtes mitochondriales, et d'un fluide qui remplit la cavité et appelé la matrice mitochondriale. Ces usines énergétiques de la cellule produisent la plupart de l'ATP cellulaire et jouent un rôle important dans l'apoptose.

3.5 Noyau

1. Le noyau est entouré d'une double enveloppe nucléaire parsemée de pores nucléaires qui contrôlent le mouvement de substances entre le noyau et le cytoplasme ; du nucléole qui produit les ribosomes ; et des gènes organisés en chromosomes et qui contrôlent la structure cellulaire et dirigent les activités cellulaires.

2. Les cellules somatiques humaines possèdent 46 chromosomes, 23 étant hérités de chaque parent. Le génome correspond à l'information génétique totale possédée par une cellule ou un organisme.

3.6 Synthèse protéique

1. Les cellules produisent des protéines en transcrivant et traduisant l'information génétique contenue dans l'ADN.

2. Le code génétique est constitué d'une série de règles qui relient la séquence des triplets de bases de l'ADN aux codons correspondants de l'ARN et aux acides aminés qu'ils spécifient.

3. Lors de la transcription, l'information génétique codée dans la séquence des triplets de bases de l'ADN sert de modèle pour copier cette information en une séquence complémentaire de codons de l'ARN messager. La transcription commence sur l'ADN au niveau d'une région appelée le promoteur. Les régions de l'ADN qui codent pour la synthèse protéique sont appelées des exons ; celles qui ne le sont pas des introns.

4. Le pré-ARNm nouvellement synthétisé est modifié avant de quitter le noyau.

5. Au cours du processus de traduction, la séquence de nucléotides de l'ARNm contrôle la séquence en acides aminés de la protéine. L'ARNm se lie à un ribosome, des acides aminés spécifiques se fixent sur leurs ARNt correspondants, et les anticodons des ARNt se lient aux codons de l'ARNm, amenant les acides

aminés spécifiques à leur position sur le polypeptide en croissance. La traduction commence au codon START et se termine au codon STOP.

3.7 Division cellulaire

1. La division cellulaire, le processus par lequel les cellules se reproduisent elles-mêmes, consiste en la division nucléaire (mitose ou méiose) et la division cytoplasmique (cytocinèse). La division cellulaire qui remplace les cellules ou qui en ajoute de nouvelles est appelée division cellulaire somatique et implique la mitose et la cytocinèse. La division cellulaire qui résulte en la production de gamètes (spermatozoïdes et ovules) est appelée la division cellulaire reproductrice et consiste en une méiose et une cytocinèse.

2. Le cycle cellulaire, une séquence ordonnée d'événements au cours desquels une cellule somatique duplique son contenu et se divise en deux, est constitué de l'interphase et de la phase mitotique. Les cellules somatiques humaines contiennent 23 paires de chromosomes homologues et sont donc diploïdes ($2n$). Avant la phase mitotique, les molécules d'ADN ou chromosomes se répliquent de telle manière que deux ensembles identiques de chromosomes peuvent être légués à la génération de cellules suivantes.

3. Une cellule entre deux divisions et qui réalise tous les processus vitaux à l'exception de la division cellulaire, est dite en interphase, laquelle est constituée de trois phases : G_1 , S et G_2 . Au cours de la phase G_1 , la cellule réplique ses organites et ses composants cytosoliques, et commence la réplication du centrosome ; au cours de la phase S survient la duplication de l'ADN, et au cours de la phase G_2 , des enzymes et d'autres protéines sont synthétisés et la réplication du centrosome est achevée.

4. La mitose est le partage des chromosomes en deux ensembles identiques, et leur distribution dans deux noyaux égaux ; elle consiste en plusieurs étapes : prophase, métaphase, anaphase et télophase.

5. Lors de la cytocinèse, qui débute généralement à la fin de l'anaphase et se termine lorsque la mitose est entièrement achevée, se forme un sillon de clivage autour de la plaque métaphasique qui se resserre, enserrant la cellule pour former deux portions de cytoplasme.

6. Une cellule peut soit rester en vie et fonctionner sans se diviser, croître et se diviser, ou mourir. Le contrôle de la division cellulaire dépend de kinases protéiques spécifiques et cycline-dépendantes.

7. L'apoptose est la mort cellulaire programmée et normale. Elle survient déjà au cours du développement fœtal et se poursuit tout au long de la vie d'un organisme.

8. Certains gènes régulent à la fois la division cellulaire et l'apoptose. Des anomalies au niveau de ces gènes sont associées à une grande variété de maladies et de désordres.

9. Lors de la reproduction sexuée, chaque nouvel organisme est le résultat de l'union de deux gamètes différents, un de chaque parent. Les gamètes ne contiennent qu'un ensemble simple de chromosomes (23) et sont donc haploïdes (n).

10. La méiose est le processus qui produit les gamètes haploïdes ; elle consiste en deux divisions nucléaires successives appelées méiose I et méiose II. Au cours de la méiose I, les chromosomes homologues s'apparient (le synopsis) et réalisent des enjambements ; il en résulte deux cellules haploïdes qui sont génétiquement différentes entre-elles et différentes de la cellule parentale diploïde du début. Au cours de la méiose II, deux cellules haploïdes se divisent pour former quatre cellules haploïdes.

3.8 Diversité cellulaire

1. La taille des cellules est mesurée en micromètres. Un micromètre (μm) équivaut à 10^{-6} m. La taille des cellules du corps humain varie de $8\ \mu\text{m}$ à $140\ \mu\text{m}$.

2. La forme de la cellule est adaptée à sa fonction.

3.9 Vieillesse ET cellules

1. Le vieillissement est un processus normal qui s'accompagne par une altération

progressive des réponses adaptatives homéostatiques de l'organisme.

2. De nombreuses théories du vieillissement ont été proposées, incluant un

arrêt génétiquement programmé des divisions cellulaires, l'accumulation de radicaux libres, ainsi qu'une intensification de l'auto-immunité.

Questions de réflexion

1. La mucine est une protéine présente dans la salive et d'autres sécrétions. Lorsqu'elle est mélangée avec de l'eau, elle devient la substance glissante connue comme étant le mucus. Retracer le chemin suivi par la mucine au travers de la cellule depuis sa synthèse jusqu'à sa sécrétion, tout en listant tous les organites et les processus impliqués dans sa fabrication.

2. Marc ne consomme pas d'alcool, alors que son frère Sébastien boit régu-

lièrement de grandes quantités d'alcool. Si vous pouviez examiner les cellules hépatiques de chacun de ces deux frères, verriez-vous une différence entre elles concernant leur RE lisse et leurs peroxysomes ? Expliquez.

3. Les marathoniens peuvent se déshydrater du fait de leur activité physique extrême. Quels types de liquides doivent-ils consommer en vue de réhydrater leurs cellules ?

Réponses aux questions des figures

3.1 Les trois parties principales de la cellule sont la membrane plasmique, le cytoplasme et le noyau.

3.2 Le glycocalyx est l'enveloppe sucrée située sur la face externe de la membrane plasmique. Il est constitué des parties carbohydratées des glycolipides membranaires et des glycoprotéines.

3.3 La protéine membranaire qui se lie à l'insuline agit comme un récepteur.

3.4 Parce que la fièvre induit une augmentation de la température corporelle, les niveaux de tous les processus de diffusion augmentent.

3.5 Les molécules hydrophobes non polaires (l'oxygène, le dioxyde de carbone, l'azote, les acides gras, les stéroïdes et les vitamines liposolubles) comme les molécules polaires non chargées (l'urée et les petits alcools) se déplacent au travers de la bicouche lipidique de la membrane plasmique par diffusion simple.

3.6 La concentration en K^+ est plus élevée dans le cytosol des cellules de l'organisme que dans les liquides extracellulaires.

3.7 Oui. L'insuline induit l'apparition de transporteurs de glucose (GluT) dans la membrane plasmique, ce qui augmente la capture cellulaire du glucose via une diffusion facilitée par des transporteurs.

3.8 Non. La concentration en eau ne peut jamais être identique dans les deux branches puisque le bras gauche contient de l'eau pure et que la branche droite contient une solution dont la concentration en eau est de moins de 100 %.

3.9 Une solution de NaCl à 2% va induire la contraction des GRs car elle est hypertonique.

3.10 L'ATP ajoute un groupement phosphate à la pompe protéique, ce qui modifie la forme tridimensionnelle de la pompe. L'ATP transfère de l'énergie à la pompe pour la faire fonctionner.

3.11 Dans le transport actif secondaire, l'hydrolyse de l'ATP est utilisée indirectement pour promouvoir l'activité des protéines symporteurs ou antiporteurs ; alors que cette réaction fait fonctionner directement la pompe protéique dans le transport actif primaire.

3.12 La transferrine, les vitamines, et les hormones sont d'autres exemples de ligands qui peuvent induire l'endocytose médiée par récepteur.

3.13 La liaison de particules sur un récepteur de la membrane plasmique induit la formation de pseudopodes.

3.14 L'endocytose induite par récepteur et la phagocytose impliquent des récepteurs protéiques ; l'endocytose de masse ne le nécessite pas.

3.15 Les microtubules participent à la formation des centrioles, des cils et des flagelles.

3.16 Une cellule sans centrosome n'est probablement pas capable de se diviser.

3.17 Les cils déplacent des liquides à la surface cellulaire, les flagelles déplacent une cellule entière.

3.18 Les petites et grandes sous-unités ribosomiales sont synthétisées séparément dans le nucléole au sein du noyau, et sont ensuite assemblées dans le cytoplasme.

3.19 Des ribosomes sont fixés au RE rugueux, pas sur le RE lisse. Le RE rugueux synthétise des protéines qui vont être exportées hors de la cellule ; le RE lisse est associé à la synthèse des lipides et à d'autres réactions métaboliques.

3.20 La face d'entrée reçoit et modifie des protéines reçues du RE rugueux, la face de sortie modifie, trie et emballe les molécules en vue de leur transport vers d'autres destinations.

3.21 Certaines protéines sont sécrétées par exocytose, d'autres sont incorporées au sein de la membrane plasmique et d'autres encore sont placées dans vésicules de stockage qui deviennent des lysosomes.

3.22 La digestion des organites usagés par les lysosomes est appelée autophagie.

3.23 Les crêtes mitochondriales augmentent la surface disponible pour les réactions chimiques et contiennent certains des enzymes nécessaires à la production d'ATP.

3.24 La chromatine est un complexe d'ADN, de protéines et de certains ARNs.

3.25 Un nucléosome est une molécule d'ADN double brin enroulée deux fois autour d'un axe de huit histones (protéines).

3.26 Ce sont les protéines qui déterminent les caractéristiques physiques et chimiques des cellules.

3.27 La séquence de bases AGCT de l'ADN sera traduite en une séquence de bases UCGA de l'ARNm par l'ARN polymérase.

3.28 Le site P maintient l'ARNt attaché au polypeptide en croissance. Le site A maintient l'ARNt porteur de l'acide aminé suivant qui doit être attaché au polypeptide en croissance.

3.29 Lorsqu'un ribosome rencontre un codon STOP sur le site A, il libère la protéine complète de l'ARNt final.

3.30 L'ADN est répliqué pendant la phase S de l'interphase du cycle cellulaire.

3.31 La réplication de l'ADN doit être terminée avant la cytokinèse de manière à ce que chaque nouvelle cellule obtienne un génome complet.

3.32 La cytokinèse débute généralement à la fin de l'anaphase.

3.33 Le résultat des enjambements est que les quatre gamètes haploïdes obtenus sont génétiquement différents les uns des autres et différents de la cellule de départ qui les a produits.

3.34 Au cours de l'anaphase I de la méiose, les chromatides appariés sont maintenus ensemble par le centromère et ne sont pas séparés. Au cours de l'anaphase de la mitose, les chromatides appariés sont séparés et les centromères divisés.

3.35 Le spermatozoïde, qui utilise un flagelle pour sa locomotion, est la seule cellule du corps à se mouvoir sur des grandes distances.

TORTORA | DERRICKSON

Anatomie et physiologie humaines

Une référence mise à jour et en couleurs

La 6^e édition française de ce classique, *Anatomie et physiologie humaines*, présente un contenu de grande qualité, écrit dans un style simple, clair et direct. Elle offre une iconographie encore plus riche et impressionnante et de nombreux éléments pédagogiques innovants. Cette nouvelle édition du Tortora, entièrement mise à jour, permet au lecteur de s'initier à l'anatomie et à la physiologie et d'acquérir de solides bases scientifiques.

L'homéostasie, l'état d'équilibre physiologique dynamique de l'organisme

Le fil conducteur des chapitres est l'homéostasie, chacun d'eux présente, pour les différents concepts, les relations établies entre les structures anatomiques et leurs fonctions physiologiques. Ce livre offre une présentation des concepts plus accessible aux étudiants en médecine, en kinésithérapie, en ostéopathie, en sciences du sport et en sciences paramédicales.

- Les **illustrations spécifiques** montrent les différentes étapes des cycles de régulation de l'homéostasie.

- Les **intérêts cliniques**, en lien avec le thème abordé, permettent aux étudiants de mieux comprendre les mises en application cliniques, professionnelles ou dans la vie de tous les jours.
- Les **déséquilibres homéostatiques**. À la fin de la plupart des chapitres on trouve des présentations de certaines pathologies et troubles causés par des ruptures de l'équilibre homéostatique.
- Les **questions d'ouverture** de chaque chapitre et leurs illustrations.
- La rubrique **Focus sur l'homéostasie** met en relief l'approche intégrante développée dans le manuel.
- L'emploi de la **nomenclature internationale** et de la nomenclature spécifique à la terminologie médicale.

Traduction de la 16^e édition américaine

Frédéric Pariaud, ostéopathe DO, enseignant en anatomie et éthique du soin.

Renan Bain, ostéopathe DO, enseignant en anatomie et embryologie.

- Plus de 1 300 illustrations et photos
- Nomenclature internationale
- 240 Cas cliniques
- 1 500 questions d'auto-évaluation
- 11 focus sur l'homéostasie

Chez le même éditeur



ISBN : 978-2-8073-3444-1



deboeck
SUPÉRIEUR

www.deboecksuperieur.com