

**TOUT EN
FICHES**

LE COURS DE

PHYSIOLOGIE HUMAINE

**TOUT EN
FICHES**

Sous la direction de
Marie-Hélène Canu
Professeure à l'université de Lille,
Faculté des Sciences et Technologies

LE COURS DE

PHYSIOLOGIE HUMAINE

LICENCE SCIENCES DE LA VIE, STAPS, SANTÉ

**2^e
ÉDITION**

Vincent Bérézowski

Professeur à l'université d'Artois, Faculté des Sciences
Jean Perrin (Lens)

Patrick Duriez

Professeur à l'université de Lille, Faculté des Sciences
de la Santé et du Sport

Cécile Langlet

Maître de conférences à l'université de Lorraine (Metz)

Pascal Mariot

Maître de conférences à l'université de Lille, Faculté des
Sciences et Technologies

Olivier Pétrault

Maître de conférences à l'université d'Artois, Faculté
des Sciences Jean Perrin (Lens)

DUNOD

Crédits iconographiques : **illustration de couverture** : AdobeStock_754722 ;
p. 1 : MediaforMedical/Alamy/Howard Barlow ; **p. 16** : iStockPhoto/Nilanewsom,
iStockPhoto/Hulton Archive ; **p. 53 et 54** : V. Bérézowski et O. Pétrault ;
p. 55 : Fotolia/Sebastian Kaulitzki ; **p. 106** : AdobeStock 387761437 ;
p. 133 : O. Pétrault ; **p. 163** : M.-H. Canu ; **p. 199** : Fotolia/Travel book ;
p. 220 : Media for Medical/Doc-Stock/Kage-Microfotografie (gauche), Media for
Medical/Science Source/Biophoto Associates (droite) ; **p. 361** : Fotolia/Koya979
Toutes les photographies non mentionnées ci-dessus sont des auteurs.

Les illustrations de l'ouvrage ont été réalisées par Xavier Amiot,
avec la collaboration de Bernadette Coléno.

Direction artistique : Élisabeth Hébert
Conception graphique de la couverture : Elizabeth Riba
Mise en page : Yves Tremblay

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements</p>		<p>d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.</p> <p>Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).</p>
--	---	--

© Dunod, 2016, 2021

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-082165-5

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

Avant-propos	VII
Remerciements	X

Partie 1 L'organisation du corps humain

Chapitre 1	Introduction à la physiologie	3
	Fiche 1 Introduction à la physiologie	4
	Fiche 2 Les grandes fonctions de l'organisme	6
	Fiche 3 L'homéostasie	8
	Fiche 4 Les mécanismes de régulation	10
	Fiche 5 La communication intercellulaire	12
	Fiche 6 Les systèmes réceptoriels	14
	Focus <i>La physiologie de l'exercice : une histoire ancienne et universelle...</i>	16
	QCM	17
Chapitre 2	Les compartiments liquidiens	19
	Fiche 7 Les secteurs liquidiens	20
	Fiche 8 Transports membranaires et échanges entre secteurs liquidiens	22
	Fiche 9 L'osmose	24
	Fiche 10 L'équilibre ionique	26
	Focus <i>Plasma et sérum sanguin</i>	28
	QCM	29
	Exercices	31
Chapitre 3	Les tissus	33
	Fiche 11 Organisation des tissus	34
	Fiche 12 La matrice extracellulaire	36
	Fiche 13 Les épithéliums	38
	Fiche 14 Les tissus conjonctifs	40
	Fiche 15 Le tissu nerveux	42
	Fiche 16 Le tissu musculaire	44
	Fiche 17 Le tissu sanguin	46
	Fiche 18 Les membranes tissulaires	48
	Focus <i>Les cellules souches</i>	50
	QCM	51
	Exercices	53

Partie 2 Fonctions de relation

Chapitre 4	Le système nerveux	57
	Fiche 19 Phylogenèse	58
	Fiche 20 Conduction et transmission nerveuses	60
	Fiche 21 Les neuromédiateurs	62
	Fiche 22 Le liquide cérebrospinal	64
	Fiche 23 Organisation structurale	66
	Fiche 24 Organisation fonctionnelle	68
	Fiche 25 Système nerveux somatique vs végétatif	70
	Fiche 26 Le système nerveux sympathique	72
	Fiche 27 Le système nerveux parasympathique	74
	Fiche 28 Les réflexes	76
	Focus <i>Douleurs projetées : avoir mal là où il ne se passe rien...</i>	78
	QCM	79
	Exercices	81
Chapitre 5	Organes des sens	83
	Fiche 29 Modalités sensorielles et principes de codage de l'information	84
	Fiche 30 Chimioréception : la gustation	88

	Fiche 31	Chimioréception : l'olfaction	90
	Fiche 32	Le système stato-acoustique : l'oreille	92
	Fiche 33	Le système stato-acoustique : la cochlée	94
	Fiche 34	Le système stato-acoustique : le vestibule	96
	Fiche 35	La sensibilité tactile	98
	Fiche 36	La vision : anatomie de l'œil	100
	Fiche 37	La vision : les photorécepteurs	102
	Fiche 38	La vision : l'information visuelle de la rétine	104
	Focus	<i>La technologie au service de l'audition</i>	106
Chapitre 6	Le système endocrinien		111
	Fiche 39	Les hormones	112
	Fiche 40	Synthèse, libération et transport des hormones	114
	Fiche 41	La réponse hormonale	116
	Fiche 42	Les glandes endocrines	118
	Fiche 43	Le complexe hypothalamo-hypophysaire	120
	Fiche 44	Les troubles endocriniens	122
	Fiche 45	Adaptations endocriniennes à l'effort	124
	Focus	<i>Les perturbateurs endocriniens</i>	126
	QCM		127
	Exercices		129
Chapitre 7	Le système squelettique		131
	Fiche 46	Plans d'organisation et squelettes	132
	Fiche 47	Éléments de biomécanique	134
	Fiche 48	Squelette et classification des os	136
	Fiche 49	Les fonctions des os	138
	Fiche 50	La structure de l'os	140
	Fiche 51	Les articulations	142
	Fiche 52	Activité physique et os	144
	Focus	<i>Les biomatériaux pour l'os</i>	146
	QCM		147
	Exercices		149
Chapitre 8	Le muscle strié		151
	Fiche 53	Le muscle strié : structure macroscopique	152
	Fiche 54	La fibre : structure microscopique	154
	Fiche 55	Le couplage excitation-contraction	156
	Fiche 56	Les propriétés mécaniques du muscle	158
	Fiche 57	Le métabolisme du muscle	160
	Fiche 58	Les différents types de fibres et d'unités motrices	162
	Fiche 59	Tonus musculaire et posture	164
	Fiche 60	La motricité dirigée	166
	Fiche 61	La plasticité musculaire	168
	Fiche 62	Les troubles musculosquelettiques	170
	Focus	<i>Les lésions musculaires</i>	172
	QCM		173
	Exercices		175
Chapitre 9	Le système lymphatique et l'immunité		177
	Fiche 63	Système lymphatique et règne animal	178
	Fiche 64	L'anatomie du système lymphatique	180
	Fiche 65	Les cellules de l'immunité innée	182
	Fiche 66	L'immunité innée	184
	Fiche 67	La réaction inflammatoire	186
	Fiche 68	Les cellules de l'immunité adaptative	188
	Fiche 69	L'immunité adaptative à médiation humorale	190
	Fiche 70	L'immunité adaptative à médiation cellulaire	192
	Focus	<i>Le drainage lymphatique</i>	194
	QCM		195
	Exercices		197

Partie 3 Fonctions de nutrition

Chapitre 10	L'appareil circulatoire	201
	Fiche 71 L'appareil circulatoire des Vertébrés	202
	Fiche 72 La pompe cardiaque : un cœur à quatre cavités	204
	Fiche 73 Organisation générale du cœur	206
	Fiche 74 Organisation de la circulation sanguine	208
	Fiche 75 Biophysique des flux liquidiens	210
	Fiche 76 L'arbre vasculaire	212
	Fiche 77 La réactivité vasculaire	214
	Fiche 78 Le tissu conducteur et l'électrocardiogramme	216
	Fiche 79 Électrophysiologie cardiaque	218
	Fiche 80 Propriétés mécaniques des cellules cardiaques	220
	Fiche 81 Le cycle cardiaque	222
	Fiche 82 La régulation du débit cardiaque	224
	Fiche 83 Régulation de la pression artérielle	226
	Fiche 84 Le baroréflexe	228
	Fiche 85 Adaptation cardiaque à l'effort	230
	Focus <i>L'hémostase</i>	232
	QCM	233
	Exercices	235
Chapitre 11	L'appareil respiratoire	237
	Fiche 86 La loi de Fick	238
	Fiche 87 Organisation de l'appareil respiratoire	240
	Fiche 88 Les voies aériennes supérieures	242
	Fiche 89 Les voies aériennes inférieures	244
	Fiche 90 Les alvéoles I	246
	Fiche 91 Les alvéoles II	248
	Fiche 92 La ventilation pulmonaire	250
	Fiche 93 Volumes et capacités respiratoires	252
	Fiche 94 Transport des gaz respiratoires	254
	Fiche 95 Respirations externe et interne	256
	Fiche 96 Transport du dioxygène (O ₂)	258
	Fiche 97 Transport du dioxyde de carbone (CO ₂)	260
	Fiche 98 Adaptation de la ventilation pulmonaire	262
	Fiche 99 Exercices d'intensité constante	264
	Fiche 100 Exercices d'intensité incrémentale	266
	Focus <i>Adaptations respiratoires en milieux extrêmes : plongée et altitude</i>	268
	QCM	269
	Exercices	271
Chapitre 12	Le système excréteur	273
	Fiche 101 Les organes excréteurs	274
	Fiche 102 Organisation de l'appareil urinaire	276
	Fiche 103 La filtration glomérulaire	278
	Fiche 104 La réabsorption tubulaire	280
	Fiche 105 La sécrétion tubulaire	282
	Fiche 106 La composition de l'urine	284
	Fiche 107 La miction	286
	Fiche 108 Mesures de la fonction rénale	288
	Fiche 109 Fonctions endocrines du rein	290
	Fiche 110 L'équilibre hydro-électrolytique	292
	Focus <i>L'hydratation du sportif</i>	294
	QCM	295
	Exercices	297
Chapitre 13	Le système digestif	299
	Fiche 111 Vers la digestion extracellulaire	300
	Fiche 112 De l'alimentation aux nutriments	302
	Fiche 113 L'appareil digestif : généralités	304
	Fiche 114 Le système nerveux entérique	306
	Fiche 115 La cavité buccale	308
	Fiche 116 L'œsophage et la déglutition	310

Fiche 117	L'estomac	312
Fiche 118	L'intestin grêle	314
Fiche 119	Le gros intestin	316
Fiche 120	La motilité gastrique et intestinale	318
Fiche 121	Le système biliaire	320
Fiche 122	Le pancréas exocrine	322
Fiche 123	Le contrôle des sécrétions et de la motilité digestives	324
Fiche 124	La digestion chimique	326
Fiche 125	L'absorption	328
Focus	<i>Les maladies inflammatoires chroniques de l'intestin (MICI)</i>	330
QCM		331
Exercices		333
Chapitre 14	Métabolisme et énergétique	335
Fiche 126	Notions de bioénergétique	336
Fiche 127	Le métabolisme énergétique cellulaire	338
Fiche 128	Vue d'ensemble du métabolisme	340
Fiche 129	Le pancréas endocrine	342
Fiche 130	Le métabolisme du cholestérol	344
Fiche 131	Métabolisme des protides	346
Fiche 132	Contrôle du comportement alimentaire	348
Fiche 133	La thermorégulation	350
Fiche 134	Le métabolisme phosphocalcique	352
Fiche 135	Métabolisme et activité physique	354
Focus	<i>L'obésité, une accumulation anormale ou excessive de graisse corporelle qui peut nuire à la santé</i>	356
QCM		357
Exercices		359
Partie 4 Fonctions de reproduction		
Chapitre 15	Organisation de l'appareil reproducteur	363
Fiche 136	La reproduction sexuée	364
Fiche 137	La division cellulaire	366
Fiche 138	L'appareil reproducteur masculin	368
Fiche 139	Les testicules	370
Fiche 140	L'appareil reproducteur féminin	372
Fiche 141	Les ovaires	374
Fiche 142	Les cycles reproducteurs	376
Fiche 143	Activité physique et reproduction	378
Focus	<i>La ménopause : causes, mécanismes, conséquences</i>	380
QCM		381
Exercices		383
Chapitre 16	De la fécondation à la puberté	385
Fiche 144	De la fécondation à la gestation	386
Fiche 145	Embryogenèse et fœtogenèse	388
Fiche 146	L'accouchement	390
Fiche 147	Adaptation du nouveau-né à la vie extra-utérine	392
Fiche 148	Modifications anatomophysiologiques dues à la grossesse et lactation	394
Fiche 149	De la naissance à l'âge adulte	396
Focus	<i>La prématurité</i>	398
QCM		399
Exercices		401
Corrigés des exercices		403
Glossaire français-anglais		417
Références bibliographiques		441
Index		443

Avant-propos

L'objectif de cet ouvrage est de proposer aux étudiants une synthèse pédagogique de l'organisation du corps humain et de ses principales fonctions. Ce manuel ne se veut pas exhaustif. Il a bien entendu fallu faire des choix pour présenter les aspects fondamentaux du fonctionnement du corps humain en 149 fiches. Cette seconde édition actualisée a été enrichie d'un chapitre sur les organes des sens.

La physiologie puise dans les données apportées par l'histologie et l'anatomie – sciences uniquement descriptives – pour comprendre les relations entre une structure et une fonction. En outre, la description des mécanismes physiologiques nécessite de s'adresser aux échelons moléculaire et cellulaire mais également à l'échelon macroscopique (organes et systèmes), afin d'en comprendre les régulations. C'est pourquoi nous avons tenté d'équilibrer l'ouvrage entre les nécessaires données anatomiques et le fonctionnement complexe des organes, sans séparer l'un et l'autre. Afin d'aider à la compréhension, la plupart des chapitres débutent par une vision élargie au règne animal, qui présente la forme la plus simple de l'organe et sa complexification progressive. La physiologie étant une discipline intégrative, nous avons fait chaque fois que nécessaire des liens et des renvois entre les différents chapitres. Enfin, l'accent a été mis sur les mécanismes de l'homéostasie.

L'ouvrage est organisé en quatre grandes parties. La première est une présentation générale de la physiologie, de ses objets, et des tissus. Les suivantes sont consacrées aux grandes fonctions : relation, nutrition et reproduction. En ce qui concerne les fonctions de relation, nous n'avons pas souhaité développer tous les aspects de la neurophysiologie (qui sont par ailleurs présentés dans un ouvrage spécifique chez le même éditeur), mais nous nous sommes essentiellement attachés à décrire l'organisation et le rôle du système nerveux végétatif, ce qui est nécessaire pour appréhender les autres grandes fonctions et leur régulation. Pour chaque chapitre, une ou plusieurs fiches sont consacrées à la description des mécanismes d'adaptation à l'exercice ou aux environnements extrêmes. Des focus apportent des compléments historiques ou médicaux.

La présentation de l'ouvrage est adaptée aux méthodes actuelles de lecture et aide les étudiants à acquérir une autonomie croissante : présentation simple, lecture rapide, QCM corrigés pour s'auto-évaluer, exercices d'application corrigés, ressources numériques accessibles sur le site www.dunod.com. L'ouvrage est abondamment illustré de schémas de synthèse en couleur, intégrant eux aussi structure et fonction, dépourvus de détails superflus, et qui permettent d'aider à la compréhension. Un glossaire des termes rencontrés dans l'ouvrage permet de retrouver rapidement la définition d'un terme ou d'une notion et sa traduction en anglais.

L'ouvrage s'adresse aux étudiants en Licences (L1, L2, L3) de Sciences de la Vie ou STAPS, à ceux en Master préparant les concours de l'enseignement, ainsi qu'aux étudiants en Pharmacie. Il pourra être une base pour les étudiants en Master de biologie qui, sans se spécialiser dans la physiologie humaine, ont toutefois besoin de solides notions.

Comment utiliser

Le cours est structuré en 16 chapitres

Chapitre 3 Les tissus



Les objectifs du chapitre

Objectifs

À l'issue de ce chapitre, l'étudiant devra être capable de décrire les structures des quatre grandes familles de tissus de l'organisme, en mettant en parallèle leurs fonctions. Il pourra spécifier leurs particularités et leurs différences tant sur les plans morphologique, cellulaire que fonctionnel.

La première fiche est une présentation générale de l'organisation des tissus (fiche 11). Elle est suivie d'une description de la matrice extracellulaire (fiche 12). Le chapitre se poursuit par les quatre grandes familles de tissus, à savoir les épithéliums (fiche 13), les tissus conjonctifs (fiche 14), le tissu nerveux (fiche 15) et le tissu musculaire (fiche 16). La fiche 17 est consacrée au tissu sanguin. Enfin, dans la dernière fiche sont présentées les membranes tissulaires (fiche 18).

Les ressources numériques sur dunod.com

Ce pictogramme signale la présence d'un contenu spécifique sur le web.

Une signalétique claire :



Points clés



À noter

Exemple

Exemples



Renvois aux fiches

Des compléments en ligne sur le site www.dunod.com, sur la page de présentation de l'ouvrage

fiche 2

Les grandes fonctions de l'organisme

L'augmentation de la taille des organismes multicellulaires au cours de l'évolution a entraîné la spécialisation des cellules, des tissus, des organes et des systèmes dans des rôles bien précis afin de subvenir aux besoins vitaux de l'organisme.

1. Les différentes fonctions physiologiques

Les fonctions peuvent être regroupées en :

- Les **fonctions de nutrition** qui comprennent les cellules de subvenir à leurs besoins énergétiques de type ATP. La fonction de nutrition est leur passage dans le milieu intérieur. La fonction de respiration (ou plutôt de ventilation à l'échelle de l'organisme) a pour rôle de fournir l'organisme en dioxygène (O₂) et d'évacuer le dioxyde de carbone (CO₂). La circulation permet de transporter les nutriments et l'O₂ vers les cellules et de transporter les métabolites et le CO₂ vers les organes spécialisés dans leur élimination. La fonction d'excrétion permet l'élimination d'eau, d'ions et de déchets du métabolisme vers l'extérieur.
- Les **fonctions de relation**, assurées par les systèmes nerveux et endocrinien, permettent la communication de l'organisme avec son environnement et entre les différentes cellules de l'organisme.
- Enfin, les **fonctions de reproduction**, qui ne sont pas des fonctions vitales pour l'organisme contrairement aux précédentes, sont indispensables à la perpétuation de l'espèce, et donc à sa survie. Ces grandes fonctions sont prises en charge par différents systèmes ou appareils.

149 fiches de cours en double-page

Appareil ou système ?

Un appareil est nécessairement constitué d'organes différents, alors qu'un système peut être constitué de tissus pas nécessairement structurés en organes. On parle ainsi d'appareil ou de système digestif mais uniquement de système nerveux, immunitaire ou endocrinien.

2. Les différents systèmes et appareils

Il existe dix systèmes et appareils différents (figure 1) :

- le **système nerveux** et le **système endocrinien** assurent le transport d'informations entre différents tissus de l'organisme ; le système nerveux possède en outre un rôle d'intégration des informations ;
- le **système musculosquelettique** assure la posture et les mouvements de l'organisme dans son environnement ;
- les **systèmes immunitaire et tégumentaire** (peau) protègent l'organisme contre les agressions biologiques, chimiques ou physiques ;
- l'**appareil circulatoire** ou cardiovasculaire, constitué du cœur, des vaisseaux sanguins et lymphatiques et du sang, permet d'apporter nutriments et O₂ aux cellules. Il assure également le transport des hormones ;
- l'**appareil digestif**, constitué de multiples organes (bouche, pharynx, œsophage, estomac, intestin, côlon) et des glandes annexes (glandes salivaires, foie, pancréas), transforme les aliments en nutriments et permet leur transport vers le milieu intérieur ;

De très nombreux schémas

- l'**appareil respiratoire**, constitué de multiples organes (nez, gorge, trachée, bronches, poumons...), permet le passage des gaz entre l'extérieur et l'intérieur de l'organisme ;
- le **système excréteur** a pour fonction principale la filtration du plasma et l'élimination par excrétion des déchets ;
- l'**appareil reproducteur**, constitué notamment de gonades et de glandes annexes, assure les fonctions de reproduction.

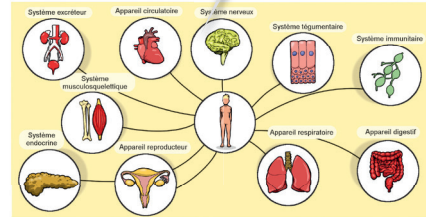


Figure 1 Les différents systèmes et appareils.

3. Correspondance système-fonction

Chaque système est dévolu à une fonction principale mais contribue également à d'autres fonctions. L'exemple qui illustre parfaitement cette notion est le rein, organe majeur du système excréteur, dont la fonction permet de réguler la composition du milieu intérieur. En outre, le rein, en sécrétant une enzyme, la rénine, et en participant à l'élimination d'eau et d'ions, régule le volume plasmatique, donc la pression artérielle et la fonction circulatoire. Le rein sécrète également des hormones. L'1,25-dihydroxyvitamine D₃ régule la production des hématies et contribue à l'activation de la vitamine D, qui régule le métabolisme du calcium. Il en est ainsi pour presque tous les autres systèmes. Dans de nombreux cas, une même fonction physiologique soit dépendante d'un seul appareil, soit dépendante de plusieurs d'entre eux. Dans des appareils différents peuvent participer à une même fonction. Précédemment, la fonction circulatoire est assurée par le système cardiovasculaire et sa régulation dépend notamment du rein.

Des exemples d'application

Exemple

La régulation thermique

Cette fonction dépend de plusieurs systèmes : nerveux, endocrinien, circulatoire, musculaire... En se contractant, les muscles génèrent de la chaleur (c'est le frisson). Lorsque la température corporelle augmente, la vasodilatation permet l'évacuation de la chaleur au niveau de la peau et des muscles.

Des remarques et conseils méthodologiques

cet ouvrage ?

FOCUS L'obésité, une accumulation anormale ou excessive de graisse corporelle qui peut nuire à la santé

Un sujet est obèse quand son indice de masse corporelle (IMC), qui correspond au poids (en kg) divisé par le carré de la taille (en m) est supérieur à 30 (IMC : normalité de 20-25, surpoids 25-30, obésité >30). La prévalence de l'obésité a triplé entre 1975 et aujourd'hui, à la fois dans les pays où l'économie était développée (Continent Nord-Américain, Europe) mais aussi dans ceux où elle a progressé (Asie du Sud-Est, Chine, Continent Sud-Américain, Moyer Orient), ainsi que dans des régions où les revenus sont restés globalement faibles (certains pays africains). L'augmentation touche à la fois les adultes et les enfants, davantage en milieu urbain que rural. Plus de 3,9 milliard d'adultes sont en surpoids ainsi que 2,1 millions d'enfants de moins de 5 ans, plus de 650 millions d'adultes sont obèses dans le monde (population totale en 2020 = 7,8 milliards d'habitants, adultes et enfants confondus).

L'obésité est un facteur de risque majeur de nombreuses pathologies, comme le diabète de type 2, les maladies cardiovasculaires, certains cancers, certaines pathologies neurodégénératives (Alzheimer), les pathologies musculo-squelettiques, certains types de maladies respiratoires comme l'apnée du sommeil, et infectieuses (exemple : facteur de gravité de la Covid-19). A l'échelle mondiale, le surpoids et l'obésité tuent plus que l'insuffisance pondérale (IMC < 18). L'obésité est responsable de 24% de la mortalité en Europe et en France. Les enfants en surpoids ont un risque élevé de le rester à l'âge adulte.

L'obésité est en général associée à une surconsommation de calories alimentaires (graisses, sucres libres) par rapport aux calories dépensées par l'activité physique. L'évolution du mode de vie à travers le monde favorise la sédentarité. Dans les pays occidentaux, les milieux socioculturels défavorisés ont une prévalence augmentée de l'obésité, ainsi qu'un risque de mortalité précoce, par rapport au reste de la population. Un environnement physique et social satisfaisant est indispensable pour permettre à la population d'adopter un mode de vie (alimentation, activité physique) qui permet de conserver un

Des focus biomédicaux ou historiques à la fin de chaque chapitre

une place importante dans le risque individuel de développer une obésité. L'hérédité familiale oscillerait entre 40 et 70%. L'analyse pangénomique d'association (*genome wide association studies*, GWAS) a révélé près de 2000 locus (variants génétiques fréquents (*single nucleotide polymorphisms*, SNP)) associés à une augmentation de l'IMC, mais collectivement, ils ne sont responsables que de 6% de la variance de l'IMC. Leur contribution à la physiopathologie de l'obésité n'est pas élucidée. Toutefois, il existe dans les régions du cerveau où siègent les circuits de récompense, impliqués dans les comportements addictifs (la substance noire (dopamine) et le cortex insulaire), une surexpression de gènes situés à proximité de ceux associés à l'obésité. Il existe des formes rares d'obésité (5% des personnes obèses), pour lesquelles une seule mutation ou une anomalie chromosomique provoque la maladie, souvent dès le plus jeune âge, chez des personnes fréquemment hyperphagiques. A ce jour, 10 gènes codant pour des protéines de la voie hypothalamique leptine/mélanocortine qui régule l'appétit et la satiété ont été identifiés (BDNF, LEP, MGLR, MRAP2, NTRK2, PCSK4, POMC, SH2B1, SIM1). Le développement de l'épigénétique a également montré que l'influence de l'environnement maternel (obésité, diabète, nutrition etc.) et périnatal pouvait favoriser l'apparition d'une obésité chez le futur enfant et l'adulte.

Des renvois pour naviguer d'une fiche à l'autre

124

QCM Pour chaque question, cocher la ou les réponse(s) exacte(s) (les réponses sont au verso).

Des QCM en fin de chapitre pour s'auto-évaluer

Les réponses commentées au verso

5.1 Les papilles gustatives :
 permettent de distinguer des centaines de saveurs
 sont situées uniquement à la pointe de la langue
 contiennent des bourgeons du goût

5.2 L'épithélium olfactif :
 est situé sur la langue.
 possède des cellules qui se renouvellent
 est recouvert d'un mucus produit par les cellules caliciformes

5.3 Quelle est la fonction de l'oreille moyenne ?
 Elle convertit les sons en un signal électrochimique
 Elle collecte les vibrations sonores se propageant dans l'air
 Elle amplifie les sons.

5.4 Les cellules ciliées de l'oreille interne :
 sont dépolarisées lorsque les cils sont inclinés.
 peuvent libérer de l'acétylcholine au niveau de leur pôle basal.
 se renouvellent en permanence.

5.5 Comment sont organisées les projections des voies visuelles vers le cortex ?
 L'œil droit se projette vers le cortex gauche et réciproquement.
 Le champ visuel droit se projette vers le cortex gauche et réciproquement.
 La rétine nasale se projette vers le cortex gauche et la rétine temporale vers le cortex droit.

5.6 Les cônes :
 permettent la vision des couleurs.
 sont plus abondants en périphérie de la rétine qu'au centre.
 sont surtout utilisés en vision scotopique.

5.7 La rhodopsine se trouve :
 dans l'épithélium pigmentaire.
 dans le segment externe des bâtonnets.
 dans le cytoplasme des cellules bipolaires.

5.8 Lorsqu'un photon touche la rhodopsine, cela provoque :
 une dépoliarisation du photorécepteur.
 l'ouverture d'un canal calcique.
 une hyperpolarisation du photorécepteur.

105

EXERCICES

5.1 La figure ci-dessous présente 3 anomalies du champ visuel ou une diminution de la vision dans une zone du champ visuel. Les anomalies sont :
 - Hémi-anopsie latérale homonyme
 - Hémi-anopsie bilatérale
 - Scotome central

Des exercices en fin de chapitre pour réviser

Les corrigés en fin d'ouvrage

5.2 La choline est un antiproliférateur de synthèse (APS). C'est un composé qui possède une affinité pour la mélanine à laquelle il se lie. Il peut ainsi s'accumuler dans l'épithélium pigmentaire de la rétine, et être stocké plusieurs années après l'arrêt du traitement, car son élimination par l'organisme est très lente. En cas de prises importantes et prolongées, les APS peuvent provoquer l'apparition d'une rétinopathie toxique. Aussi, on recommande aux personnes ayant pris ces médicaments de surveiller leur vue pendant les années qui suivent le traitement. Les patients présentent une gêne à la lecture et une difficulté à distinguer le jaune du bleu. En revanche, la vision périphérique est normale. Quelles sont les cellules atteintes principalement par les APS ?

107

Un glossaire français-anglais de 500 termes scientifiques

Cellule présentatrice de l'antigène (CPA) (Antigen Presenting Cell) : Cellule capable d'analyser et de présenter les fractions antigéniques aux lymphocytes T.

Cellule principale (Chief cell). Petite cellule des glandes endocrines (par exemple, les cellules principales du pancréas, les cellules principales de la paroi gastrique).

Cellule satellite (Satellite cell). Cellule qui se trouve à proximité des cellules principales.

Centre pneumotaxique (Pneumotaxic center). Centre du cerveau qui agit sur le centre respiratoire, avec le centre apnéogène, pour provoquer l'expiration et inhiber l'inspiration.

Centrocyste (Centrocyst). Lymphocyte B dérivé des centroblastes et localisé dans les zones claires des centres germinatifs.

Cervelet (Cerebellum). Partie de l'encéphale situé en arrière du cerveau et au-dessous du tronc cérébral, impliqué principalement dans la fonction motrice.

Cétogénèse (Ketogenesis). Synthèse des corps cétoniques.

Champ récepteur (receptive field) : Zone de l'espace dont la stimulation modifie la décharge d'un récepteur ou d'un neurone. Les champs récepteurs sont souvent organisés en zones concentriques antagonistes, ce qui permet d'accroître la discrimination spatiale.

Chimiorécepteur (Chemoreceptor). Récepteur sensoriel spécialisé dans la détection des stimuli chimiques.

Chimiotactisme (Chemotactic migration). Phénomène par lequel les cellules phagocytaires sont attirées vers un foyer inflammatoire où sont présents des facteurs chimiotactiques.

Cholestérolémie (Cholesterolemia). Concentration de cholestérol dans le sang.

Chondrocyte (Chondrocyte). Cellule du tissu cartilagineux située dans une petite loge de la matrice cartilagineuse appelée chondroplaque.

Chorion (Chorion). Ou tissu aréolaire. Définit, d'une façon générale, la couche de cellules conjonctives sous-jacentes d'une muqueuse ou d'un tissu séreux.

Choroïde (choroid) : Enveloppe moyenne de l'œil. Elle forme les corps ciliaires et l'iris dont l'ouverture centrale est la pupille.

Chylomicron (Chylomicron). Ensemble constitué d'acides gras, de cholestérol et de protéines, qui permet le transport des lipides dans le sang.

Chyme (Chyme). Bouillie riche en éléments nutritifs, qui résulte du mélange du bol alimentaire avec le suc gastrique.

Circulation pulmonaire (Pulmonary circulation). Ou « petite circulation ». Sang qui quitte le ventricule droit par l'artère pulmonaire et arrive aux poumons, où il y a gain de l'oxygène et perd du dioxyde de carbone. Le sang qui quitte les poumons par les veines pulmonaires, et revient à l'oreillette gauche.

Circulation systémique (Systemic circulation). Ou « grande circulation ». Sang qui quitte le ventricule gauche par l'aorte et irrigue la totalité des tissus et organes, où il perd de l'oxygène et gagne du dioxyde de carbone, en se transformant en sang veineux. Ce sang est collecté par les deux veines caves, et retourne au cœur dans l'oreillette droite.

Clairement de la créatinine (Creatinine clearance). Ce test détermine avec quelle efficacité les reins extraient la créatinine et d'autres déchets du sang, au moyen d'une formule qui permet de mettre en rapport le taux de créatinine avec l'âge, le poids et le sexe de la personne. Un taux de clairance faible indique un fonctionnement anormal des reins.

Classe de différenciation (Class of differentiation). Antigènes exprimés à la surface des cellules immunitaires, permettant l'adhésion et la transmission du message au noyau, caractéristiques des étapes de différenciation des lymphocytes, et parfois de leur fonction. Ils sont reconnus grâce à des anticorps monoclonaux.

Clone (Clone). Ensemble de cellules dérivées d'une seule cellule initiale et possédant donc la même information génétique.

105

Remerciements

Nous tenons à remercier tout particulièrement les collègues qui, grâce à leurs commentaires constructifs, nous ont aidés à réaliser cet ouvrage :

- Cyril Garnier, maître de conférences, Université de Valenciennes ;
- Damien Leterme, maître de conférences, Université du Littoral ;
- Olivier Richard, maître de conférences, Université d'Orléans ;
- Odile Viltart, maître de conférences, Université de Lille, Sciences et technologies ;
- Hervé Bricourt, maître de conférences, Université d'Artois ;
- Daniel Richard, professeur, Université de Toulouse III Paul Sabatier.

Nous tenons également à remercier Xavier Amiot pour son investissement dans la réalisation des illustrations de cet ouvrage.



L'organisation du corps humain

Chapitre 1

Introduction à la physiologie



Objectifs

L'objectif de ce chapitre est de définir la physiologie, ses problématiques et sa position au sein des différentes disciplines de la biologie. Les grandes fonctions sont présentées succinctement (fiche 2), et sont développées dans les chapitres suivants.

La notion d'homéostasie (fiche 3), un principe fondamental de régulation des grandes fonctions physiologiques, est présentée. Elle est accompagnée d'une description des mécanismes de régulation (fiche 4).

Les modes de communication chimique entre les cellules sont décrits (fiche 5). L'action d'une substance sur sa cellule cible se fait par l'intermédiaire d'un récepteur, qui initie la transduction du signal. Les différents modes de transduction et le couplage récepteur – effecteur sont présentés dans une dernière fiche (fiche 6).

D'une façon générale, ce chapitre aborde des données fondamentales, qui seront utiles pour la compréhension de l'ensemble de l'ouvrage.

Les ressources numériques sur dunod.com



www Ce pictogramme signale la présence d'un contenu spécifique sur le web.

1. Les niveaux d'organisation du vivant

Les organismes vivants pluricellulaires présentent différents niveaux d'organisation structurels et fonctionnels (figure 1). Cette organisation permet de répartir les tâches dans un organisme et spécialise chaque niveau dans une fonction principale.

Le plus petit échelon capable de vie est la cellule. La cellule et les organites qu'elle contient sont constitués de molécules organiques simples ou complexes (glucides, lipides, protéides, acides nucléiques), certaines de très grande taille, les macromolécules. L'ensemble de ces molécules entrent en jeu dans des réactions enzymatiques et biochimiques spécifiques. Les cellules interagissent avec leur environnement constitué d'autres cellules, des liquides circulants et de la matrice extracellulaire, grâce à des systèmes d'adhésion et à des récepteurs membranaires. Elles échangent également des substances avec le milieu ambiant, leur permettant de puiser des nutriments et d'évacuer des déchets. À l'échelon supérieur, les cellules s'organisent en ensembles fonctionnels appelés **tissus**, et l'apposition de plusieurs tissus forme des **organes**, qui eux-mêmes forment des **systèmes** ou **appareils**. La description de ces organes et des appareils correspond à l'anatomie, et leur étude fonctionnelle à la physiologie.

Fiches
2, 112

Historique

Si le terme « physiologie » (étymologiquement la « science de la nature ») apparaît avec Aristote, il prend son sens de « étude du fonctionnement des organismes vivants » au XVI^e siècle, et ce n'est qu'au XIX^e siècle que la discipline devient une science expérimentale, avec les travaux de François Magendie et de son élève Claude Bernard.

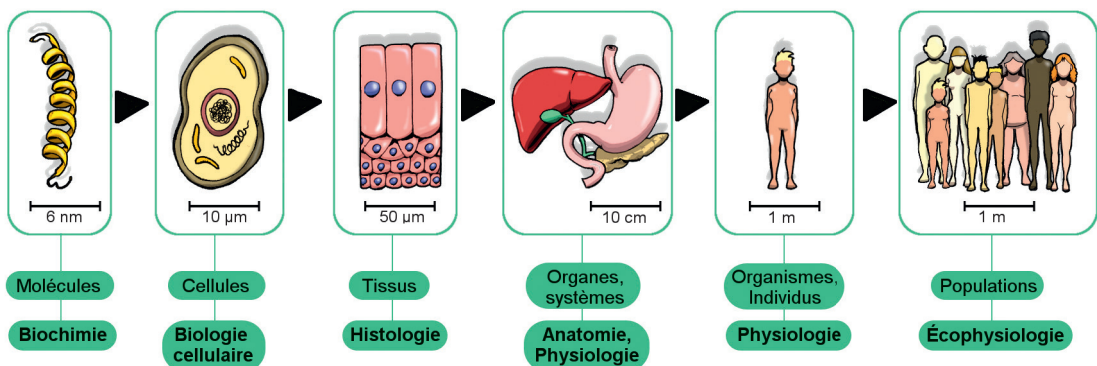


Figure 1 Les niveaux d'organisation du vivant et leur ordre de grandeur.

À l'échelon le plus petit, les fonctions du vivant sont assurées par des molécules impliquées dans les réactions biochimiques. Les cellules constituent l'échelon élémentaire du vivant. Dans les organismes pluricellulaires, ces cellules s'organisent en tissus puis organes et systèmes assurant des fonctions spécialisées.

2. Les problématiques de la physiologie

La physiologie puise dans les données apportées par l'histologie et l'anatomie – sciences uniquement descriptives – pour comprendre les relations entre une structure et une fonction. Pour prendre l'exemple du système digestif, l'approche histologique permet d'appréhender comment cet organe assure la fonction d'absorption des nutriments à travers la muqueuse, et la fonction de motilité (et donc le transit intestinal) grâce aux muscles lisses.

La description des mécanismes digestifs nécessite de s'adresser à l'échelon moléculaire afin de comprendre les événements enzymatiques qui permettent de transformer les aliments en nutriments et les mécanismes de transports moléculaires à la base de l'absorption, mais également à l'échelon macroscopique (organes et systèmes) afin de comprendre la cohérence entre les différents segments du tube digestif. En cela, la physiologie est une science intégrative qui nécessite d'agréger des concepts provenant de plusieurs disciplines de la biologie pour décrire le fonctionnement d'un organisme complexe.

La physiologie étudie donc :

- la coordination des fonctions complexes par l'action concertée d'un ensemble de cellules, de tissus, d'organes différents, voire d'un ensemble de systèmes ;
- les mécanismes de communication et de transport de l'information à l'intérieur de la cellule, entre la cellule et son milieu ambiant, et entre différents tissus de l'organisme ;
- le maintien par l'organisme de l'environnement cellulaire direct, à savoir le milieu intérieur, à travers un certain nombre de mécanismes biologiques permettant de maintenir l'homéostasie ;
- les relations entre organismes d'une même espèce. Cet aspect concerne notamment la physiologie de la reproduction mais également la physiologie comportementale qui fait appel à des spécialités telle que la psychophysiologie ou la neurophysiologie.

3. Physiologie et médecine

La notion de physiologie en médecine reflète le fonctionnement sain de l'organisme. Ainsi, une valeur physiologique de la glycémie, centrée autour de $0,8 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, reflète la valeur moyenne mesurée sur une population d'individus à jeun sans problème de régulation du taux de glucose sanguin. Elle est donc une valeur considérée comme « normale » par la population et par le médecin. On distinguera en médecine un état physiologique d'un état pathologique au cours duquel des altérations entraînent un dysfonctionnement d'un organe ou système.



La physiopathologie

C'est l'étude des fonctions altérées de l'organisme ; son objectif est de comprendre les mécanismes moléculaires, cellulaires et tissulaires à la base de l'apparition et de la progression d'une maladie, dans le but de mettre en place des traitements étiologiques (qui traitent la cause) et pas uniquement symptomatiques (qui traitent les conséquences) de la maladie.

Les grandes fonctions de l'organisme

L'augmentation de la taille des organismes pluricellulaires au cours de l'évolution a entraîné la spécialisation des cellules, des tissus, des organes et des systèmes dans des rôles bien précis afin de subvenir aux besoins vitaux de l'organisme.

1. Les différentes fonctions physiologiques

Les fonctions peuvent être regroupées en trois grandes catégories :

- Les **fonctions de nutrition** qui comprennent la régulation du métabolisme et permettent aux cellules de subvenir à leurs besoins énergétiques (transformation des nutriments en molécules énergétiques de type ATP). La fonction de digestion favorise la transformation des aliments en nutriments et leur passage dans le milieu intérieur. La fonction de respiration (ou plutôt de ventilation à l'échelle de l'organisme) a pour rôle de fournir l'organisme en dioxygène (O_2) et d'évacuer le dioxyde de carbone (CO_2). La circulation permet de transporter les nutriments et l' O_2 vers les cellules et de transporter les métabolites et le CO_2 vers les organes spécialisés dans leur élimination. La fonction d'excrétion permet l'élimination d'eau, d'ions et de déchets du métabolisme vers l'extérieur.
- Les **fonctions de relation**, assurées par les systèmes nerveux et endocrine, permettent la communication de l'organisme avec son environnement et entre les différentes cellules de l'organisme.
- Enfin, les **fonctions de reproduction**, qui ne sont pas des fonctions vitales pour l'organisme contrairement aux précédentes, sont indispensables à la perpétuation de l'espèce, et donc à sa survie. Ces grandes fonctions sont prises en charge par différents systèmes ou appareils.



Appareil ou système ?

Un appareil est nécessairement constitué d'organes différents, alors qu'un système peut être constitué de tissus pas nécessairement structurés en organes. On parle ainsi d'appareil ou de système digestif mais uniquement de système nerveux, immunitaire ou endocrine.

2. Les différents systèmes et appareils

Il existe dix systèmes et appareils différents (figure 1) :

- le **système nerveux** et le **système endocrine** assurent le transport d'informations entre différents tissus de l'organisme ; le système nerveux possède en outre un rôle d'intégration des informations ;
- le **système musculosquelettique** assure la posture et les mouvements de l'organisme dans son environnement ;
- les **systèmes immunitaire** et **tégumentaire** (peau) protègent l'organisme contre les agressions biologiques, chimiques ou physiques ;
- l'**appareil circulatoire** ou cardiovasculaire, constitué du cœur, des vaisseaux sanguins et lymphatiques et du sang, permet d'apporter nutriments et O_2 aux cellules. Il assure également le transport des hormones ;
- l'**appareil digestif**, constitué de multiples organes (bouche, pharynx, œsophage, estomac, intestin, côlon) et des glandes annexes (glandes salivaires, foie, pancréas), transforme les aliments en nutriments et permet leur transport vers le milieu intérieur ;

- l'**appareil respiratoire**, constitué de multiples organes (bouche, pharynx, larynx, bronches, poumons...), permet le passage des gaz entre l'air ambiant et la circulation sanguine ;
- le **système excréteur** a pour fonction principale la filtration du plasma et l'élimination par excrétion des déchets ;
- l'**appareil reproducteur**, constitué notamment de gonades et de glandes annexes, assure les fonctions de reproduction.

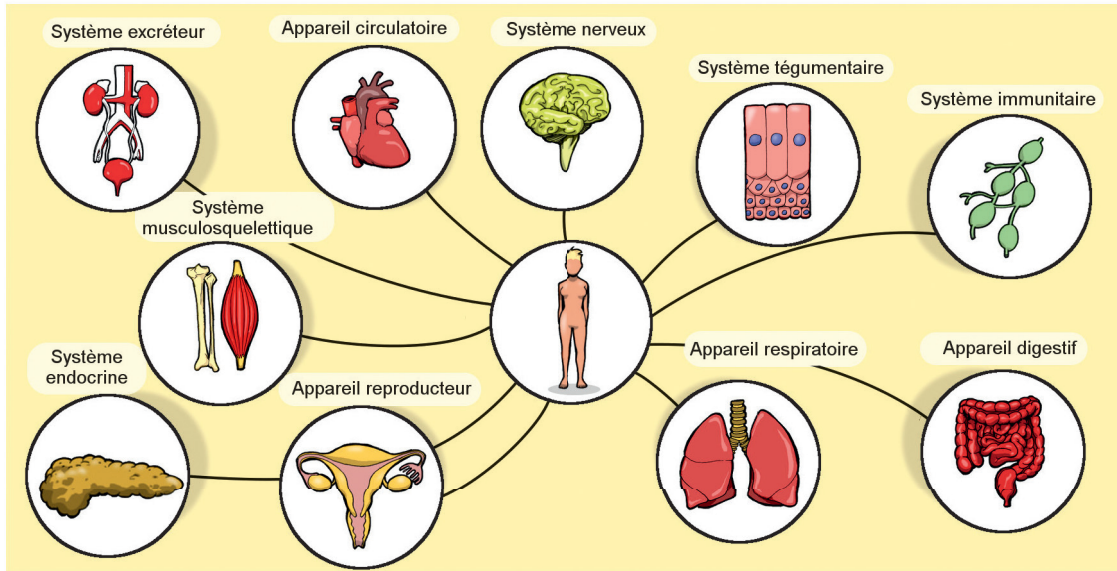


Figure 1 Les différents systèmes et appareils.

3. Correspondance système–fonction

Chaque système est dévolu à une fonction principale mais contribue également à d'autres fonctions. L'exemple qui illustre parfaitement cette notion est le rein, organe majeur du système excréteur, dont la fonction permet de réguler la composition du milieu intérieur. En outre, le rein, en sécrétant une enzyme, la rénine, et en participant à l'élimination d'eau et d'ions, régule le volume plasmatique, donc la pression artérielle et la fonction circulatoire. Le rein sécrète également une hormone, l'érythropoïétine, qui régule la production des hématies et contribue à l'activation de la vitamine D, une hormone impliquée dans le métabolisme du calcium. Il en est ainsi pour presque tous les organes de l'organisme qui, outre leur rôle principal, interviennent dans la régulation d'autres fonctions.

De la même façon, il est rare qu'une fonction physiologique soit dépendante d'un seul appareil. Ainsi, des organes localisés anatomiquement dans des appareils différents peuvent participer à une même fonction. Comme nous l'avons vu précédemment, la fonction circulatoire est assurée par le système cardiovasculaire et sa régulation dépend notamment du rein.

Exemple

La régulation thermique

Cette fonction dépend de plusieurs systèmes : nerveux, endocrine, circulatoire, musculaire... En se contractant, les muscles génèrent de la chaleur (c'est le frisson). Lorsque la température corporelle augmente, la vasodilatation permet l'évacuation de la chaleur au niveau de la peau et des muscles.

1. Stabilité du milieu intérieur

Les fonctions physiologiques sont finement régulées, et le fonctionnement optimal de l'organisme autorise peu de variation des nombreux paramètres tels que la pression artérielle, la température corporelle, etc. Cette régulation est d'autant plus complexe que le milieu environnant n'assure pas les conditions de cette stabilité. Aussi, l'organisme doit s'affranchir de contraintes du milieu extérieur pour maintenir la stabilité de son milieu intérieur. Cette notion de milieu intérieur apparaît pour la première fois en 1865 avec Claude Bernard : « Tous les mécanismes vitaux, quelque variés qu'ils soient, n'ont toujours qu'un but, celui de maintenir l'unité des conditions de la vie dans le milieu intérieur. C'est la stabilité de l'environnement intérieur qui est la condition de la vie libre et indépendante. » Le mot « homéostasie », de *stasis* (état, condition) et *homoios* (semblable), est introduit en 1932 par Walter Bradford Cannon, qui précise cette notion : homéostasie ne signifie pas immobilité ; cela renvoie à une condition qui peut varier mais qui est **relativement** constante.

Pour maintenir cet équilibre, il existe des mécanismes homéostatiques, qui sont retrouvés à tous les niveaux biologiques, c'est-à-dire au niveau cellulaire, mais aussi à l'échelle de l'organisme ou même de l'écosystème. Si la cellule ou l'organisme n'arrive pas à maintenir la stabilité, un déséquilibre apparaît inévitablement ce qui conduit à un trouble, voire une maladie.



Homéostasie

L'homéostasie désigne la capacité de l'organisme à maintenir son milieu interne relativement stable malgré les fluctuations du milieu extérieur.

2. Notion de constante ou de variable biologique

Le paramètre qui est régulé est appelé « constante biologique » par le corps médical, mettant ainsi en avant le fait que ce paramètre doit être maintenu à une valeur de référence. Les physiologistes utilisent plus volontiers le terme de « variable biologique », indiquant par là que la régulation est **dynamique**, et que le paramètre (par exemple la pression artérielle) peut prendre différentes valeurs et varier entre certaines limites autour d'une valeur de référence, sans pour autant que le déséquilibre ne soit pathologique (figure 1). La régulation peut être très stricte (par exemple, le pH du sang doit être maintenu dans des limites très étroites, entre 7.37 et 7.43) ou plus souple (par exemple : la pression artérielle systolique, entre 90 et 140 mmHg).

En physiologie, les variables régulées sont nombreuses et concernent tous les organes. À titre d'exemple, nous pouvons citer des paramètres physiques tels que la pression artérielle, la température corporelle, le débit cardiaque, la fréquence respiratoire ; des paramètres biochimiques tels que la concentration en électrolytes (pH, ions Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , bicarbonate, chlorure), en nutriments (glucose, cholestérol, triglycérides) et en gaz (O_2 et CO_2).

Exemple

La glycémie, ou taux de glucose dans le sang, est une constante fondamentale. La valeur de référence est de 0,8 g par litre de sang, mais elle peut varier entre 0,7 g après un jeûne et 1,1 g après un repas. La régulation de la glycémie fait intervenir des hormones, notamment l'insuline et le glucagon, qui permettent respectivement de stocker le glucose quand il est en excès et d'aller le chercher dans les réserves quand le taux est trop faible. Un défaut d'insuline conduit à une augmentation de la glycémie au-delà des valeurs physiologiques : c'est l'une des causes possibles du diabète.

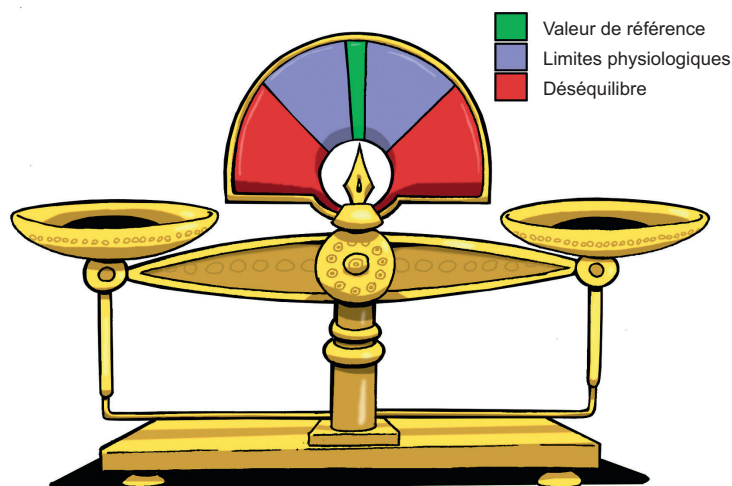


Figure 1 Principe de la régulation homéostatique.

Le fonctionnement des mécanismes homéostatiques est similaire à celui d'une balance devant être continuellement en équilibre. Lorsqu'un des deux plateaux est soumis à un poids, la balance n'est plus équilibrée. Il faut donc ajouter le même poids sur l'autre plateau pour rétablir l'équilibre. De la même façon, l'organisme met en route des systèmes régulateurs, homéostatiques, permettant de maintenir un équilibre dynamique. L'homéostasie permet ainsi de maintenir un paramètre (variable régulée) relativement constant, dans des limites physiologiques.

L'appareil circulatoire est essentiel au maintien de l'homéostasie. Il permet en effet l'**approvisionnement** des cellules en nutriments, le **transport** des liquides et des substances dissoutes dans le sang et la lymphe, et il assure l'**élimination** des déchets. Il participe en outre à la régulation de la température corporelle. La stabilité de la composition sanguine est un élément clé de l'homéostasie car les échanges entre le sang et le liquide extracellulaire sont nombreux et permanents.

Vieillessement

Lorsque l'on vieillit, les mécanismes de régulation homéostatique sont moins efficaces. Le système devient alors de plus en plus instable et le déséquilibre est plus facilement atteint, d'où un risque accru de développer une maladie.

1. Les éléments du mécanisme homéostatique

La régulation d'un paramètre, appelé **variable biologique**, entre des limites physiologiques nécessite plusieurs acteurs : un **capteur**, qui mesure la valeur d'un paramètre physique (comme la température) ou chimique (comme la glycémie) ; un **centre de contrôle** qui analyse les données transmises par le capteur, les compare à la valeur de référence ou au point de consigne, et détermine la réaction à mettre en œuvre ; et un **effecteur** qui agit pour amener la variable régulée au plus près de la valeur de référence par des mécanismes de compensation (figure 1).

2. La régulation peut être nerveuse ou hormonale

Il faut un système de communication rapide et efficace entre les différents acteurs. Dans certains cas, capteur, centre régulateur et effecteur sont anatomiquement très proches, et l'information est transmise grâce à des signaux intracellulaires. Par exemple, lors d'une contraction musculaire répétée, la baisse des stocks de molécules énergétiques stimule le transport de glucose du sang vers la cellule en activité. Dans d'autres cas, la communication afférente (du capteur vers le centre) et efférente (du centre vers l'effecteur) se fait sur des distances importantes. Dans ce cas, le message est véhiculé par le système nerveux ou hormonal. C'est le cas de la thermorégulation : les capteurs situés dans la peau informent par voie nerveuse le centre localisé dans l'hypothalamus, une structure du système nerveux central, qui à son tour envoie un ordre aux vaisseaux sanguins cutanés par voie hormonale pour induire leur constriction ou leur dilatation.

 Fiches
31, 133



L'hypothalamus, grand centre de régulation

L'hypothalamus est au carrefour du système nerveux et hormonal, et il reçoit de nombreuses informations de l'ensemble du corps. De ce fait, il peut assurer la régulation de la température, de la faim (équilibre énergétique), de la soif (équilibre hydrique), de la pression artérielle, du sommeil, de la reproduction...

3. Notion de régulation

La régulation peut se faire par compensation (rétroaction négative), par amplification (rétroaction positive) ou par anticipation (régulation prédictive).

■ Rétroaction négative ou compensation

Le plus souvent, une variation d'un paramètre biologique met en jeu un système de rétroaction (ou *feedback*) négative, permettant de s'opposer à la variation observée et de faire revenir la valeur au plus proche du point de consigne. C'est le principe du thermostat : la baisse de température de la pièce sous le point de consigne entraîne la mise en route de la chaudière. En physiologie, le système effecteur correspond à un **homéostat**. Il peut être assimilé à un régulateur en constance. La plupart des régulations hormonales sont soumises à des mécanismes de rétroaction négative. L'exemple classique est celui de la régulation de la glycémie, évoquée dans la fiche 3.

 Fiche
3

Rétroaction positive ou amplification

Dans des cas plus rares, il peut arriver que l'effecteur amplifie les variations de la variable régulée. On a alors un système de rétroaction positive, qui s'apparente à un régulateur en tendance. Il ne s'agit plus de revenir à une valeur de référence, mais d'accroître le déséquilibre. En réalité, malgré les apparences, il s'agit bien d'un mécanisme homéostatique, mais par lequel le point de consigne est modifié. Ainsi, le système va évoluer en s'éloignant de la valeur de référence initiale, pour se rapprocher d'une nouvelle valeur. Quand celle-ci sera atteinte, le système reviendra à une régulation en constance, afin de maintenir le paramètre au plus près de cette nouvelle valeur. Ces mécanismes de rétroaction positive n'ont pas pour but de créer un déséquilibre, mais de créer les conditions d'un nouvel équilibre.

Exemple

Un exemple de rétroaction positive

Lors de l'accouchement, la pression exercée par le bébé sur le col utérin provoque la libération d'ocytocine par l'hypothalamus, qui renforce l'activité du muscle utérin et accroît donc la pression. Cette boucle s'interrompt à la délivrance, quand la pression revient naturellement à sa valeur initiale.

Anticipation ou régulation prédictive

Il arrive qu'une réponse adaptative se mette en place avant même que la variable n'ait changé. Pour reprendre l'exemple de la glycémie, l'organisme sécrète de l'insuline avant que le taux de glucose dans le sang n'ait varié. Cette sécrétion anticipée d'insuline met en jeu des réponses nerveuses à des stimulations visuelles, olfactives, et gustatives induites par la seule présentation d'un repas. On parle de régulation prédictive.

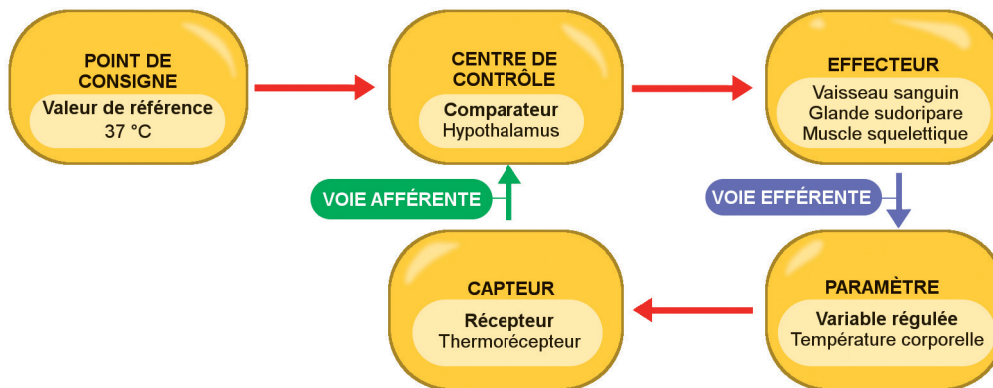


Figure 1 Principe de la boucle de régulation.
Exemple de la thermorégulation.

La survie d'un individu pluricellulaire dépend de la capacité de ses cellules à communiquer entre elles. En effet, pour assurer le maintien de l'homéostasie, les cellules qui constituent un tissu doivent échanger de l'information pour coordonner leur action, de même que les différents organes doivent pouvoir émettre et recevoir des messages, et changer leur fonctionnement en conséquence.

1. La communication chimique

La communication chimique correspond à la transmission de molécules informatives telles que des hormones, des facteurs de croissance, des neurotransmetteurs, des médiateurs de l'inflammation ou même des gaz comme le NO (monoxyde d'azote). Le principe est simple :

- Une cellule synthétise la substance et la libère ; la sécrétion se fait généralement par exocytose, mais certaines substances sont capables de traverser directement la membrane cellulaire et sont libérées par diffusion simple.
- La substance est transportée vers sa cible. Il peut s'agir de la cellule sécrétrice elle-même (communication autocrine) ou de cellules distinctes. Dans ce dernier cas, on distingue les communications paracrine (*para* = à côté de) et endocrine (cellules éloignées) (figure 1).
- La cellule cible porte à sa surface des récepteurs spécifiques. Dans la plupart des cas, il s'agit de protéines transmembranaires qui vont induire une série de réactions biochimiques à l'intérieur de la cellule. Dans certains cas, quand le messenger est capable de traverser directement la membrane plasmique (cas du NO par exemple), il agit sur un récepteur situé à l'intérieur de la cellule. L'activation du récepteur induit des signaux biochimiques dans la cellule.
- Afin d'assurer une spécificité locale et temporelle, des mécanismes cellulaires permettent que le messenger ne s'accumule pas et soit détruit au fur et à mesure de son utilisation. L'inactivation se fait grâce à des enzymes spécifiques localisées à proximité du site récepteur.



Fiche 6

■ Communication autocrine

La substance libérée agit sur la cellule qui l'a sécrétée. Ce mode de communication permet d'exercer un rétrocontrôle positif ou négatif de la sécrétion. Les cellules cancéreuses utilisent la communication autocrine pour stimuler leur survie et leur prolifération.

■ Communication paracrine

La cellule sécrétrice exerce son action dans son environnement proche. La substance est captée par des récepteurs localisés à proximité du lieu de sécrétion, et détruite par des enzymes extracellulaires pour éviter une diffusion plus large.

■ Communication endocrine

Il s'agit d'une communication sur de grandes distances. Une substance (hormone) est produite par une glande, libérée dans la circulation sanguine et transportée par le sang dans l'ensemble de l'organisme. Seules les cellules possédant des récepteurs spécifiques sont sensibles à l'hormone. Ces récepteurs sont capables de détecter de très petites quantités de la substance et de se lier à elle avec une grande affinité.

Communication par contact direct

Les jonctions communicantes (ou jonctions gap) sont le principal moyen de communication entre deux cellules adjacentes. Les membranes des cellules adjacentes sont traversées par des protéines appelées **connexines** qui forment une sorte de pore (le connexon) permettant à de petites molécules ou à des ions de passer directement. Elles permettent ainsi d'assurer un couplage métabolique et électrique entre les cellules. Ce type de communication est fréquemment rencontré au cours du développement. Chez l'adulte, on les trouve aussi en grande quantité dans le tissu cardiaque.

2. Cas particulier du système nerveux : la synapse

Une information est véhiculée de façon rapide, précise et fidèle, au sein d'un même neurone, même sur de grandes distances, au moyen d'impulsions électriques appelées « potentiels d'action ». La communication nerveuse d'une cellule à sa cible peut se faire par voie électrique ou par voie chimique.

- La communication électrique se fait *via* une jonction gap.
- Toutefois, le plus souvent, la communication se fait sous forme chimique. Elle s'apparente à une communication de type paracrine, mais elle est beaucoup plus spécifique. En effet, la zone de contact est très restreinte, et la communication se fait entre une cellule dite pré-synaptique, qui libère le neurotransmetteur, et une partie restreinte de la cellule cible, appelée élément postsynaptique.

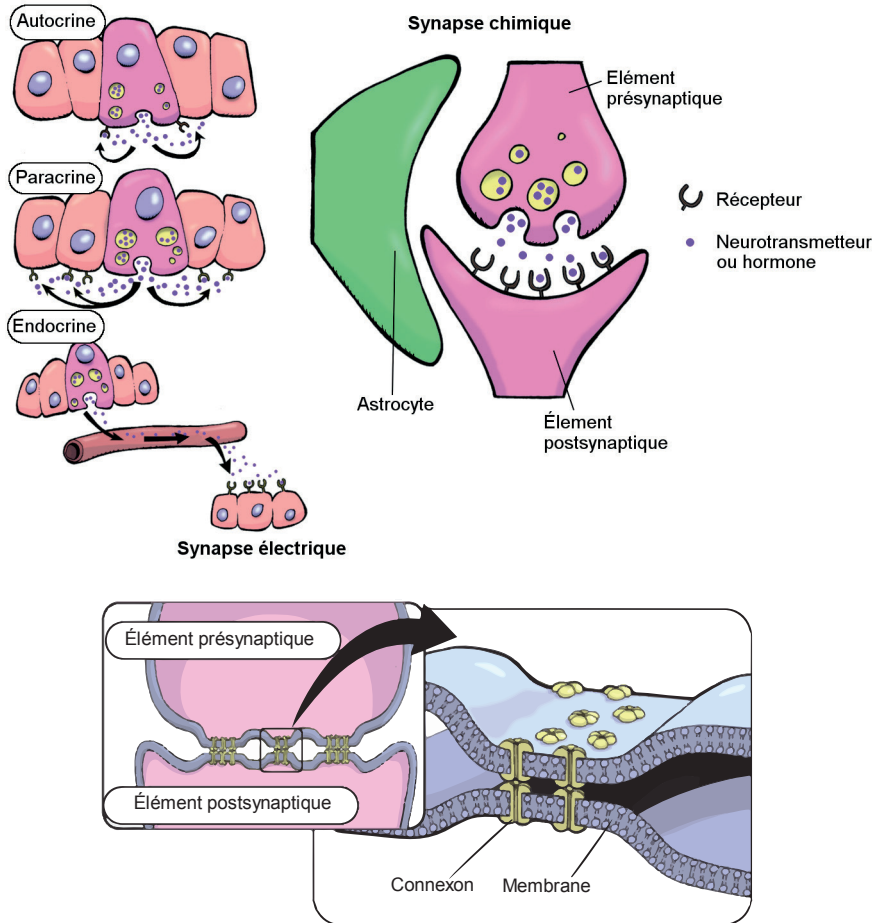


Figure 1 Différents modes de communication cellulaire.

L'astrocyte est une cellule gliale qui participe au contrôle de la communication synaptique.

L'organisme communique des informations très différentes à l'échelle cellulaire. Celles-ci peuvent induire des réponses très longues (croissance, développement) ou de l'ordre de la milliseconde (potentiels d'action). Pour cela, l'organisme dispose de systèmes de transduction variés.

1. Systèmes à action ionotropique

L'action ionotropique met en jeu des systèmes capables de moduler la perméabilité membranaire à un ion induisant une modification du potentiel transmembranaire. Cette action contribue à la genèse et à la propagation de potentiels d'action et peut également affecter des mécanismes sécrétoires (figure 1A). Dans le cas des **canaux ioniques**, il n'existe pas de site spécifique pour un ligand. Néanmoins des modulateurs chimiques (toxines, ATP, calcium) et physiques (déformations de la membrane, stimulation électrique) peuvent interagir avec les protéines formant le canal et conduire à la réponse cellulaire. En revanche, les **récepteurs-canaux ionotropiques**, possèdent un récepteur spécifique à un ligand comme l'acétylcholine, la sérotonine, le glutamate... L'interaction (plus lente) ligand/récepteur modifie la conformation structurale du récepteur-canal qui devient alors perméable à un ion.

2. Systèmes à action métabotrope

L'action métabotrope est une transduction indirecte à but amplificateur qui met en jeu un ensemble de « seconds messagers » intracellulaires ainsi que des cascades de phosphorylation au niveau cytoplasmique. En fonction des protéines cibles (enzymes, canaux ioniques, facteurs de transcription...), les réponses cellulaires s'étendent sur une échelle de temps plus ou moins longue selon le mécanisme sous-jacent : croissance, différenciation ou mort cellulaires, réponses immunes et physiologiques (figure 1B).

Les **récepteurs couplés à une protéine G (RCPG)** sont des protéines formées de sept hélices transmembranaires. Ils sont couplés aux effecteurs cytoplasmiques. Il existe deux catégories de récepteurs : les RCPG « métabotropiques » moteurs de la neurotransmission lente (réponse cellulaire de l'ordre de la minute) et les RCPG sensibles aux peptides hormonaux tels que le glucagon et la calcitonine (réponse cellulaire de l'ordre de l'heure).

Les **récepteurs-enzymes** sont des protéines formées d'une hélice transmembranaire. Ils ont la particularité de porter un système enzymatique cytoplasmique (kinase) activé par le ligand. L'auto-phosphorylation du complexe ligand/récepteur stabilise le système pour induire un effet prolongé (plusieurs heures). Facteurs de croissance, hormones (insuline) ou cytokines sont des ligands naturels de cette famille de récepteurs pouvant agir à long terme sur la synthèse protéique.

3. Systèmes à action nucléaire

En présence de leur ligand, les **récepteurs nucléaires** agissent au niveau du noyau sur une échelle de temps très longue (heures, jours). Ils ont la capacité de réguler la transcription génique grâce à leur fixation sur des séquences de réponse présentes sur l'ADN. Actuellement, deux grands types de récepteurs sont classés selon leur localisation cellulaire et la nature des ligands : le type I cytoplasmique est sensible aux hormones stéroïdes et il se transloque dans le noyau ; le type II est présent nativement dans le noyau et est sensible aux lipides et aux hormones thyroïdiennes. L'action du récepteur nucléaire peut être activatrice ou inhibitrice selon la participation de protéines annexes appelées co-activateurs ou co-répresseurs (figure 1C).

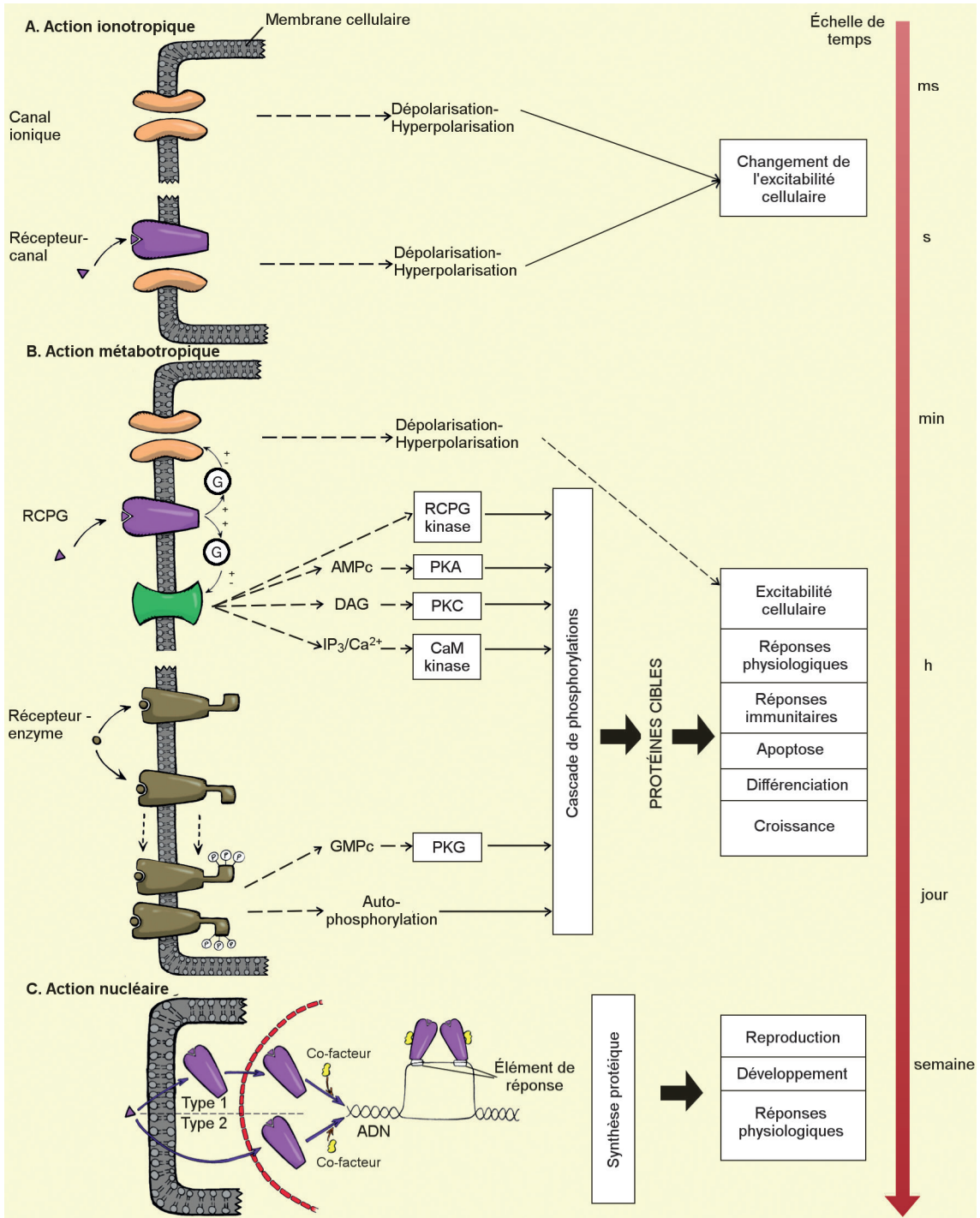


Figure 1 Types de couplage récepteur-effeteur et transduction.

Messagers secondaires : adénosine monophosphate cyclique (AMPc) ; calmoduline kinase (CaM kinase) ; ion calcium (Ca²⁺) ; diacylglycérol (DAG) ; guanosine monophosphate cyclique (GMPc) ; inositol triphosphate (IP₃) ; protéine kinase A, C ou G (PKA, PKC, PKG) ; récepteurs couplés aux protéines G kinase (RCPG kinase).



FOCUS La physiologie de l'exercice : une histoire ancienne et universelle...

Si la notion d'homéostasie est relativement récente, l'idée que la santé dépend d'un équilibre du milieu intérieur est bien plus ancienne. On la trouve dès l'Antiquité, en Asie comme en Grèce...

L'âyurveda, une médecine traditionnelle d'Asie du sud

Dans les hymnes composées en sanskrit dans l'Inde antique, vers 1 500 ans avant notre ère, certains textes portent sur la protection de la santé par les dieux ; il s'agit d'éloigner les monstres et les démons qui apportent les maladies, et de préserver les « humeurs ». Pour les médecins indiens antiques, le corps humain est un ensemble de tissus, issus des éléments fondamentaux de l'Univers (terre, air, feu, eau, éther) dans lesquels circulent des fluides. Ils sont soumis à l'action de trois humeurs, ou *dosha*, nommées *vâta* « souffle », *pitta* « bile » et *kapha* « phlegme ». Ces *dosha* contrôlent toutes les fonctions du corps et doivent être en équilibre. La *Sushruta-Samhitâ* est un ensemble de livres rédigés par Sushruta, un médecin indien dont on situe la vie vers 600 ou 800 avant notre ère. Sushruta préconisait une pratique physique modérée quotidienne (marche, course, nage...) pour maintenir l'équilibre entre les *dosha*.



Les philosophes grecs



Pour Pythagore (570-490 av. J.-C.), l'Univers est constitué de quatre éléments (terre, air, feu, eau) et possède des qualités (chaud, froid, humide, sec). Il pense que les maladies sont la conséquence d'un manque d'harmonie entre les éléments, les qualités et le corps. L'harmonie peut être préservée par une hygiène de vie incluant les activités physiques. Hippocrate de Cos (460-370 av. J.-C.) et ses disciples reprennent cette idée des quatre éléments et qualités. Ils vont plus loin en développant la théorie des humeurs, qui s'apparente aux *dosha* : en effet, l'organisme est régi par quatre humeurs (sang, phlegme, bile jaune et bile noire), et la bonne santé dépend d'un équilibre harmonieux entre elles. Une rupture de l'équilibre se traduit par l'apparition d'une maladie. Selon Hippocrate, la nourriture seule ne peut maintenir un homme en bonne forme physique. Un exercice régulier et modéré est nécessaire également.



Pour chaque question, cocher la ou les réponse(s) exacte(s)
(les réponses sont au verso).

1.1 La notion d'homéostasie :

- a. concerne uniquement la régulation des concentrations en ions
- b. fait intervenir des boucles de rétrocontrôle
- c. est un processus qui permet de maintenir le milieu intérieur dans des limites normales

1.2 L'objet de la physiologie est l'étude :

- a. des molécules de la vie
- b. des organes qui constituent les systèmes
- c. des systèmes ou appareils, qui constituent le tissu

1.3 Il est d'usage de distinguer trois grandes catégories de fonctions :

- a. nutrition, relation et reproduction
- b. nutrition, circulation et reproduction
- c. nerveuse, endocrine et homéostatique

1.4 On parle de communication paracrine quand une cellule agit sur :

- a. elle-même
- b. un organe éloigné
- c. son environnement proche

1.5 La communication synaptique :

- a. se fait nécessairement par l'intermédiaire d'un neurotransmetteur
- b. peut se faire grâce à des jonctions communicantes
- c. se fait entre une cellule présynaptique et un grand nombre de cellules postsynaptiques

1.6 Les récepteurs membranaires :

- a. sont tous ligand-dépendants
- b. sont tous perméables à un ion
- c. peuvent avoir une action à long terme (plusieurs heures)

Réponses

- 1.1** **b.** et **c.** L'homéostasie peut concerner la régulation de l'équilibre ionique, mais aussi d'autres paramètres tels que la température corporelle, la glycémie, etc.
- 1.2** **b.** La discipline qui étudie les molécules de la vie est la biochimie. Les tissus sont des constituants des systèmes, et non l'inverse.
- 1.3** **a.** La circulation fait partie des fonctions dites « de nutrition ». Les systèmes nerveux et endocrine permettent la régulation de l'ensemble des fonctions de l'organisme.
- 1.4** **c.** La réponse a. correspond à une communication autocrine et la réponse b. à une communication endocrine.
- 1.5** **b.** La communication synaptique peut être électrique. Elle se fait dans ce cas directement, sans intervention d'un neurotransmetteur. Sa caractéristique est d'être très spécifique : une cellule agit sur une portion de la cellule cible, située à proximité immédiate.
- 1.6** **c.** Les récepteurs membranaires peuvent être activés par un mécanisme physique (déformation, potentiel...). Les récepteurs de type métabotropiques ne sont pas des canaux ioniques.

Chapitre 2

Les compartiments liquidiens



OBJECTIFS

Ce chapitre décrit les différents secteurs liquidiens (compartiments intra- et extracellulaire) de l'organisme et leur composition. Il permet notamment d'aborder la différence entre le milieu intérieur (ou extracellulaire) et le milieu intracellulaire (fiche 7). Les mécanismes par lesquels les différents compartiments échangent des informations sont présentés. La fiche 8 porte sur les différents types de transport membranaire. Enfin, les forces régulant les mouvements d'eau et de solutés entre les différents compartiments liquidiens sont explicitées dans les fiches 9 et 10 respectivement. Le focus traite d'un secteur particulier : le plasma.

Les ressources numériques sur dunod.com



Ce pictogramme signale la présence d'un contenu spécifique sur le web.

Le constituant majoritaire des organismes vivants est l'eau qui représente 60 à 70 % de la masse d'un individu, et se répartit entre différents compartiments (figure 1).

1. Généralités sur les secteurs liquidiens

On distingue le **compartiment intracellulaire** ou cytosol, séparé de l'environnement cellulaire par la membrane plasmique, et le **compartiment extracellulaire**, comprenant le liquide interstitiel et le plasma, la phase liquide du sang.



Le secteur extracellulaire

Aussi appelé « milieu intérieur », c'est un liquide dont la composition est régulée. Son rôle est de protéger le liquide intracellulaire des variations du milieu extérieur (effet tampon) et, grâce à sa circulation, de permettre l'approvisionnement des cellules en O_2 et en nutriments, et l'évacuation du CO_2 et des produits du métabolisme.

La quantité totale d'eau chez un individu de 70 kg est d'environ 42 L. Les secteurs liquidiens se distinguent par leur proportion dans l'organisme, leur concentration totale en solutés (osmolarité), leur teneur en ions et en protéines. Ces différences de concentration pour chacun des solutés constituent des gradients chimiques. Ces différents liquides sont en équilibre entre eux et soumis à des mécanismes d'échanges et de circulation.



Fiche 8



Comment mesurer le volume d'un compartiment ?

L'injection d'une quantité connue de molécules dans la circulation sanguine permet de déterminer leur dilution dans l'espace disponible. Des molécules aptes à traverser les membranes plasmiques, telles que l'urée, sont utilisées pour évaluer la quantité d'eau totale de l'organisme. Des solutés capables de traverser la paroi vasculaire mais pas la membrane plasmique, comme le mannitol (un sucre), permettent de déterminer le volume du milieu intérieur. L'évaluation du volume plasmatique peut être effectuée à l'aide de composés qui, comme le bleu Evans, restent confinés dans le plasma. Ces mesures de volumes liquidiens sont utiles en pharmacocinétique pour déterminer la biodistribution de médicaments. On procède par prélèvement sanguin puis dosage de la concentration de la molécule étudiée.

2. Le secteur intracellulaire

Le secteur intracellulaire constitue le volume d'eau le plus important : les deux tiers du volume d'eau résident à l'intérieur des cellules, soit environ 28 L. Ce secteur est assimilé généralement au cytosol mais une partie non négligeable de l'eau est située dans les organites intracellulaires. Les constituants essentiels du secteur intracellulaire sont :

- les ions K^+ (quinze fois plus abondants que le Na^+), cation majoritaire,
- les ions phosphate ($H_2PO_4^-$ et HPO_4^{2-}),
- les ions hydrogénocarbonate, appelés « ions bicarbonate » (HCO_3^-), et les ions chlorure (Cl^-).

Les protéines intracellulaires, chargées négativement, contribuent également de manière importante à l'osmolarité intracellulaire et à l'équilibre des charges ioniques (électroneutralité). Dans certains compartiments intracellulaires, la concentration en certains ions peut se révéler plus importante (Ca^{2+} dans le réticulum ou l'appareil de Golgi, H^+ dans les endosomes, lysosomes ou vésicules synaptiques).

3. Le secteur extracellulaire

Aussi appelé « milieu intérieur », il est constitué du plasma, du liquide ou lymphe interstitiel(le) qui baigne directement les cellules des tissus, et de la lymphe canalisée qui circule dans les vaisseaux lymphatiques. Il est séparé du milieu extérieur par les téguments et les barrières épithéliales. La concentration en ions est la même dans les différentes composantes du milieu intérieur. Les ions majoritaires des liquides extracellulaires sont le Na^+ (25 fois plus abondants que le K^+) et le Cl^- . Le plasma se distingue des autres compartiments extracellulaires par une concentration importante de protéines qui ne passent pas la barrière vasculaire (de l'ordre de $70 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$).

4. Le secteur transcellulaire

Le secteur transcellulaire est constitué de liquides, produits par filtration et sécrétion à partir du plasma, présents dans des cavités isolées de l'organisme et séparées du liquide interstitiel par une barrière épithéliale. Ce secteur, dont la composition est proche de celle du liquide interstitiel, est constitué notamment du liquide céphalorachidien présent dans les ventricules et canaux du système nerveux central, et du liquide synovial présent dans les cavités articulaires.

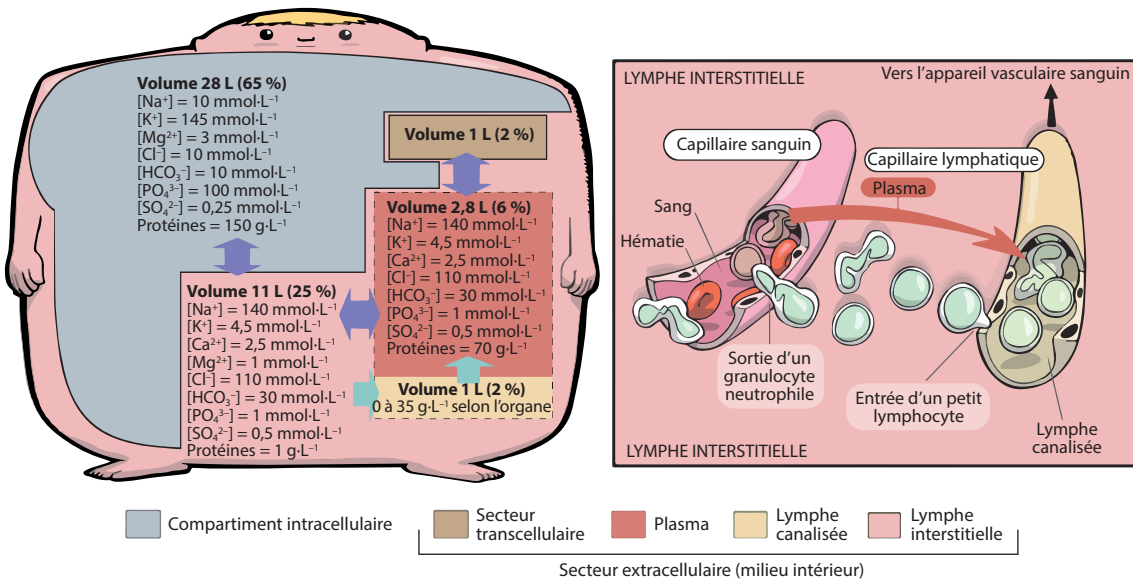


Figure 1 Les compartiments liquidiens.

Gauche : représentation schématique des différents secteurs liquidiens, de leurs volumes respectifs (en pourcentage de la masse d'eau totale de l'organisme), de leur composition et des flux entre les compartiments. La composition du milieu intérieur est similaire dans les différents secteurs, à l'exception de la concentration en protéines, plus élevée dans le plasma. Droite : représentation anatomique des flux de liquides entre plasma sanguin, lymphisme interstitielle et lymphisme canalisée.

Transports membranaires et échanges entre secteurs liquidiens

À l'interface des différents secteurs liquidiens se trouvent des barrières biologiques : membrane plasmique entre secteur intracellulaire et milieu intérieur, paroi vasculaire entre plasma et liquide interstitiel, barrière épithéliale entre milieu intérieur et milieu extérieur. L'eau et les solutés peuvent diffuser soit entre les cellules (transports paracellulaires) soit à travers l'épaisseur des cellules (transports transcellulaires). Au niveau de la membrane plasmique s'effectuent des échanges basés sur des mécanismes de diffusion simple, de transports protéiques (figure 1) et de transports vésiculaires.

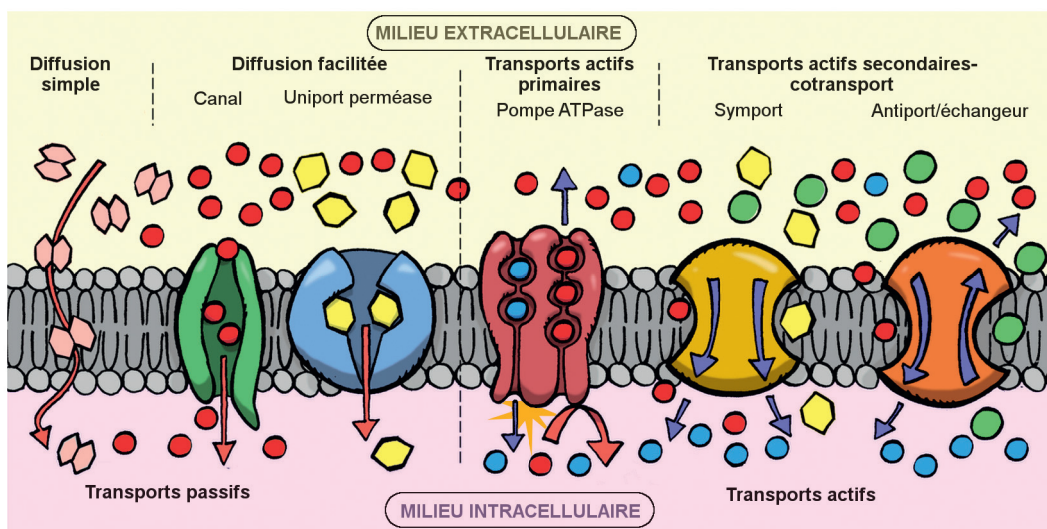


Figure 1 Les différents types de transport membranaire.

1. Les transports passifs d'ions

Les molécules hydrophobes (hormones stéroïdes par exemple) ou apolaires (telles que l' O_2 ou le CO_2) peuvent traverser la bicouche phospholipidique de la membrane par diffusion simple en se solubilisant entre les lipides. La **diffusion simple** s'effectue spontanément, sans besoin d'apport d'énergie d'origine métabolique, selon le gradient de concentration de la molécule, c'est-à-dire du compartiment le plus concentré vers le compartiment le moins concentré. C'est donc un mécanisme de transport passif.

L'échange d'eau et de solutés à travers la membrane est facilité par des protéines membranaires appelées **transporteurs** qui permettent aux cellules d'importer ou d'exporter de manière spécifique et sélective des molécules organiques et des ions. Ces mécanismes peuvent être régulés par le métabolisme cellulaire contrairement à la diffusion simple. Selon le type de protéine, le flux peut s'effectuer selon le gradient de concentration (transport passif facilité) ou contre le gradient de concentration (transport actif).

Au niveau de la membrane plasmique s'effectuent des échanges basés sur des mécanismes de diffusion simple, de transports protéiques (figure 1) et de transports vésiculaires.

Les ions (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl^-) sont transportés passivement à travers la membrane plasmique par des canaux. Ces transports sont particulièrement importants dans les épithéliums, où ils participent aux phénomènes de sécrétion et de réabsorption ionique (épithéliums digestifs, respira-

toires et urinaires par exemple) et dans les cellules excitables (neurones, cellules musculaires) où ces flux d'ions génèrent des signaux électriques, les potentiels d'action.

Les **transports vésiculaires** permettent aux cellules de libérer par exocytose des molécules généralement de grande taille (peptides ou protéines) ou hydrosolubles (neurotransmetteur par exemple) stockées dans des vésicules cytoplasmiques, ou de puiser par endocytose dans le milieu extracellulaire des molécules qui se retrouvent ensuite stockées dans des vésicules intracellulaires.

2. Les transports actifs

En consommant de l'énergie produite par le métabolisme cellulaire sous forme d'ATP, les transports actifs sont capables de transporter des solutés contre leur gradient de concentration. Cette propriété permet aux cellules de générer une différence de concentration transmembranaire pour certains solutés. Ces transports actifs sont qualifiés de primaires car ils sont capables d'hydrolyser l'ATP (ce sont des ATPases).

D'autres transports actifs utilisent comme source d'énergie un gradient de concentration pour un soluté donné qui, en diffusant passivement, fournit l'énergie permettant de transporter d'autres solutés contre leur gradient. Ce sont des transports actifs secondaires car s'ils utilisent une source d'énergie d'origine métabolique – le gradient généré par les transports actifs primaires – ils ne sont pas eux-mêmes capables d'hydrolyser l'ATP. Ce sont obligatoirement des cotransporteurs (ils transportent au moins deux solutés différents).

3. Les transports de molécules organiques

Les molécules organiques comme le glucose et les acides aminés sont transportées par différents types de transporteurs, passifs et actifs. À travers la barrière des entérocytes (cellules de la muqueuse intestinale), le glucose est transporté activement au niveau du pôle apical par des cotransporteurs $\text{Na}^+/\text{Glucose}$ (SGLT1), ce qui permet de diriger le glucose de la lumière intestinale vers le cytosol, puis par des transports facilités (GLUT2) au pôle basal, favorisant ainsi la sortie du glucose vers les vaisseaux sanguins (figure 2). Dans les autres cellules de l'organisme, le glucose diffuse du milieu extracellulaire vers le cytosol par des transports facilités GLUT et alimente ainsi le métabolisme cellulaire. Des mécanismes similaires existent pour les transports d'acides aminés.

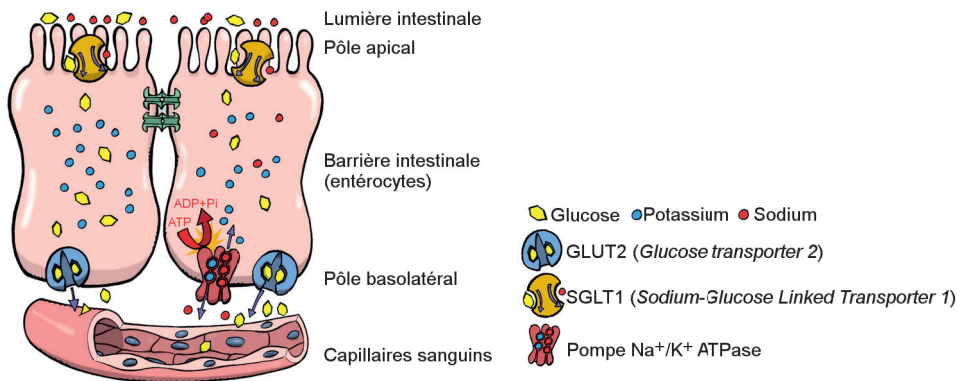


Figure 2 Exemples de transport à travers la barrière intestinale.

Les mouvements de l'eau, solvant biologique, entre les différents secteurs liquidiens peuvent provoquer des variations très importantes de concentration des solutés.

1. L'eau diffuse par osmose

Cette diffusion s'effectue du compartiment le plus riche en eau vers le milieu le moins riche. La présence de solutés dans une solution diminuant la concentration en molécules d'eau, l'osmose s'effectue des secteurs les moins concentrés vers les plus concentrés en solutés. Ce flux d'eau aboutit à équilibrer les concentrations de part et d'autre de la membrane. Bien que l'eau puisse traverser les bicouches lipidiques par diffusion simple malgré son caractère hydrophile, la perméabilité à l'eau des membranes plasmiques est considérablement augmentée par des canaux spécifiques, les **aquaporines**.



L'osmose

C'est le mouvement de molécules d'eau entre deux compartiments liquidiens selon un mécanisme de transport passif (diffusion simple + diffusion facilitée).

2. Notion d'osmolarité et de pression osmotique

La concentration totale s'appelle l'**osmolarité**, et est exprimée en $\text{Osmol}\cdot\text{L}^{-1}$ et correspond à la somme des concentrations en solutés (exprimées en $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) en tenant compte de la dissociation des ions en solution.

L'osmolarité efficace sur les mouvements d'eau s'appelle la **tonicité** (C, exprimée en $\text{Osmol}\cdot\text{L}^{-1}$). La présence de solutés perméants, qui diffusent simplement et s'équilibrent de part et d'autre de la membrane, n'influence pas les mouvements d'eau (figure 1). La tonicité ne tient donc compte que de la concentration des solutés imperméants. L'osmolarité d'une solution contenant 150 mM de NaCl est ainsi de $300 \text{ mOsm}\cdot\text{L}^{-1}$, correspondant à la somme des concentrations de Na^+ et Cl^- .

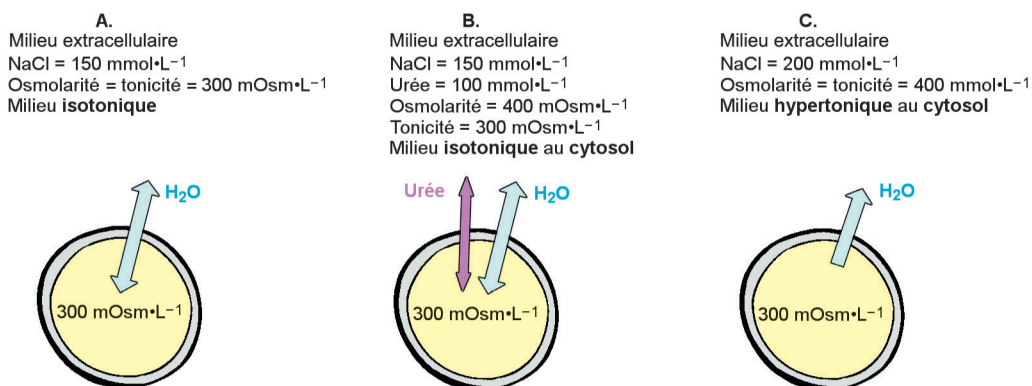


Figure 1 Trois exemples permettant d'illustrer les notions d'osmolarité et de tonicité. Les cellules sont plongées dans des solutions de natures différentes.

A. Les tonicités physiologiques du cytosol et du plasma sont identiques ; les flux d'eau sont à l'équilibre. **B.** Le milieu contient une molécule perméante (par exemple l'urée), qui diffuse et s'équilibre de part et d'autre de la membrane. Sa présence n'influence donc ni la tonicité ni l'osmose. **C.** La concentration en espèces imperméantes (NaCl) est modifiée, la tonicité est affectée. Les concentrations en NaCl et en urée sont les concentrations extracellulaires.



Pression osmotique (π) d'une solution

C'est une force qui attire l'eau depuis une autre solution à travers une membrane semi-perméable séparant les deux compartiments. L'osmose s'effectue des zones de faible π vers les zones de forte π . La valeur de π est donnée par la loi des gaz parfaits et s'exprime en pascal : $\pi = R \times T \times C$
 R = constante des gaz parfaits ($8,32 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), T = température (en K), C = concentration (en M).

Deux solutions d'osmolarité identique sont dites iso-osmotiques. Une solution de faible osmolarité est dite hypo-osmotique au regard d'une autre plus concentrée (hyperosmotique). Deux solutions de tonicité identique sont dites isotoniques. Une solution de plus faible tonicité qu'une autre est dite hypotonique au regard de la première (hypertonique).

Les **mouvements d'eau** peuvent entraîner des **variations de volume** des compartiments liquidiens. L'eau étant la molécule la plus abondante de l'organisme, tout mouvement de sa part entraîne des variations de volume des secteurs concernés. Des cellules plongées dans une solution hypotonique subissent une entrée d'eau et une augmentation de leur volume cellulaire pouvant aboutir à la rupture de leur membrane plasmique, ou lyse cellulaire. A contrario, des cellules plongées dans une solution hypertonique subissent une diminution de volume cellulaire ou plasmolyse, due à une fuite d'eau (figure 2).

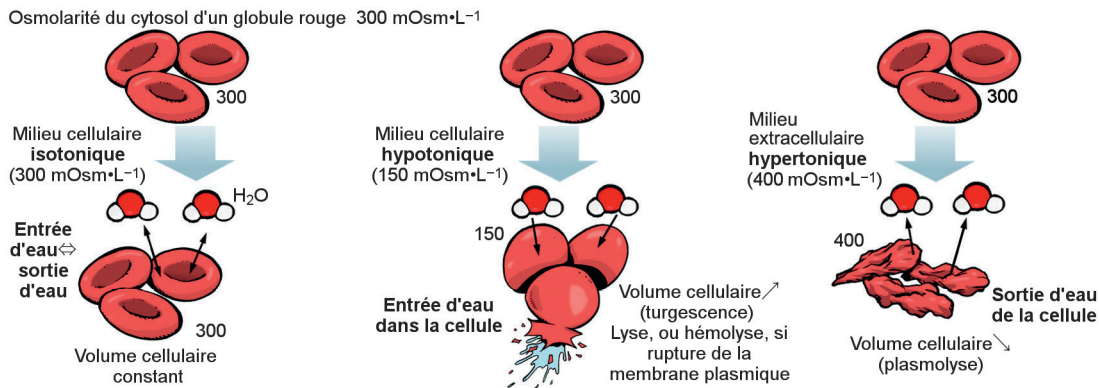


Figure 2 Effet de la tonicité sur le volume cellulaire de globules rouges.

3. Pression oncotique et pression hydrostatique

Au sein des différents liquides organiques, la concentration totale en solutés est relativement identique et influence peu les mouvements d'eau. En revanche, la concentration en protéines libres est très différente entre les compartiments, forte dans les cellules et le plasma et faible dans le liquide interstitiel. La **pression osmotique** spécifique aux protéines est nommée **pression oncotique** et influence les mouvements et la circulation de liquides entre les différents compartiments. La circulation d'eau entre le plasma et le liquide interstitiel est dépendante de deux forces : la pression oncotique qui attire l'eau vers le plasma et la pression hydrostatique (due à la pression sanguine) qui pousse l'eau du sang vers le liquide interstitiel. La différence de ces deux forces entraîne des flux de liquides du sang vers les tissus (côté artériole du lit capillaire) ou des tissus vers le sang (côté veinule).