



Ron Milo et Rob Phillips  
*Traduit par Amsha Proag*  
*Illustré par Nigel Orme*

# La biologie cellulaire par les nombres



Ron Milo et Rob Phillips

# La biologie cellulaire par les nombres

Le monde de la cellule, incroyablement encombré mais extraordinairement actif, n'a rien de comparable à notre expérience quotidienne. Un regard quantitatif permet de mieux comprendre l'organisation dynamique de la cellule.

Ce livre explore les grandeurs caractéristiques de la biologie cellulaire : la taille, les concentrations, l'énergie, la durée et l'information aux différentes échelles, de la molécule à la population cellulaire. Pour cela, il rassemble les données issues de travaux scientifiques récents, avec le souci d'établir des relations entre les différents organismes-modèles. Il s'appuie ensuite sur cette classification pour examiner la signification physiologique de ces données, dans un dialogue permanent entre mesures expérimentales, interprétation et prédictions théoriques. Le lecteur pourra ainsi acquérir une intuition profonde des processus qui animent la cellule – et découvrir de nouvelles facettes de ce monde microscopique.

Cet ouvrage est destiné aux étudiants de licence en sciences de la vie, et constitue un support pédagogique pour les enseignants.

978-2-7598-2506-6



9 782759 825066

**edp sciences**  
www.edpsciences.org

**Ron Milo** enseigne la biologie des systèmes à l'Institut Weizmann des Sciences (Israël).

**Rob Phillips** enseigne la biophysique à l'Institut Technologique de Californie (États-Unis).

# **La biologie cellulaire par les nombres**



Ron Milo et Rob Phillips  
*Traduit par Amsha Proag*  
*Illustré par Nigel Orme*

# **La biologie cellulaire par les nombres**

“Cell Biology by the Numbers”, 1st edition (ISBN 9780815345374), by Ron Milo and Rob Phillips was originally published in 2016, all Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by Garland Science, a member of the Taylor & Francis Group LLC.

L'ouvrage « Cell Biology by the Numbers », 1<sup>re</sup> édition (ISBN 9780815345374), de Ron Milo et Rob Phillips a été initialement publié en 2016, tous droits réservés. Cette traduction est publiée avec l'autorisation de Garland Science, membre de Taylor & Francis Group LLC.

**Illustration de couverture** : Cellules immunitaires (macrophages humains) observées en microscopie électronique à balayage et colorées pour l'illustration. © Renaud Poincloux (CNRS).

*Imprimé en France*

ISBN (papier) : 978-2-7598-2506-6 – ISBN (ebook) : 978-2-7598-2615-5

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, 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 intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1<sup>er</sup> de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

© EDP Sciences, 2021

*Ce livre est dédié à nos parents,  
Ada & Igal et Lee & Bob*



# sbcf

Société de Biologie Cellulaire de France

## **Partager avec le public le plus large la compréhension des échelles cellulaires, unités du vivant !**

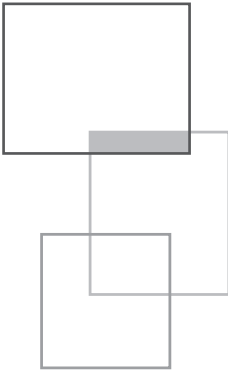
Tous les êtres vivants sont constitués d'une ou de milliards de cellules, dont il est essentiel de comprendre le fonctionnement interne car elles représentent les unités de base des organismes. Les recherches en biologie cellulaire couvrent toutes les champs de la biologie, comme par exemple la microbiologie, la biologie du développement, la neurobiologie, l'évolution et l'immunologie, en interaction avec d'autres disciplines comme la biophysique, la biochimie, la statistique et la biologie quantitative, la modélisation, l'intelligence artificielle. Les découvertes en biologie cellulaire intéressent donc un public large.

Faire comprendre l'étendue, la diversité, les échelles et l'interdisciplinarité de la biologie cellulaire est un enjeu majeur pour la Société de biologie cellulaire de France. Aider les chercheurs à expliquer avec des mots adaptés leurs recherches à un public élargi et répondre aux attentes de la société est aussi un grand défi afin de promouvoir notre discipline.

C'est la raison pour laquelle, la SBCF souhaite s'associer à cet ouvrage qui prend le temps d'expliquer avec des mots simples l'importance des échelles en biologie, afin de permettre aux chercheurs de diffuser leurs découvertes pour que leurs impacts soient mieux appréhendés.

Toutes les informations sur la SBCF sont disponibles *via* ce lien : <https://sbcf.fr/la-sbcf/>





# Table des matières

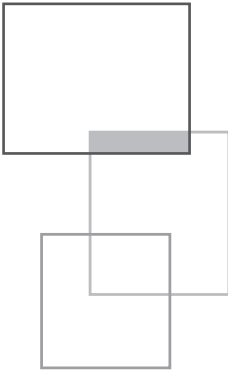
---

<b>Table des Estimations</b>	11
<b>Préface du traducteur</b>	13
<b>Lexique et notations</b>	15
<b>Préface</b>	19
<b>Remerciements</b>	25
<b>Introduction : vers l'intuition numérique en biologie</b>	29
Pourquoi nous devrions nous intéresser aux nombres ?	29
La base de données <i>BioNumbers</i>	32
Comment effectuer des calculs de coin de table	33
Boîte à outils des ordres de grandeur pour la biologie	35
Règles rigoureuses pour des calculs approximatifs	38
La géographie de la cellule	42
<b>Chapitre 1 • La taille et la forme</b>	49
Les cellules et les virus	51
Quelle taille font les virus ?	51
Quelle taille fait une cellule d' <i>E. coli</i> et combien pèse-t-elle ?	56
Quelle taille fait la levure à bourgeon ?	59
Quelle taille fait une cellule humaine ?	62

Quelle taille fait un photorécepteur ?	65
Quelle est la gamme des tailles et des formes de cellules ?	69
Quelle taille font les noyaux des cellules ?	72
Quelle taille fait le réticulum endoplasmique ?	75
Quelle taille font les mitochondries ?	79
Quelle taille font les chloroplastes ?	82
Quelle taille fait une synapse ?	84
Les briques qui composent la cellule	88
Quelle taille font les rouages biochimiques de la cellule ?	88
Entre l'ARNm et la protéine, quelle molécule est la plus grande ?	91
Quelle taille fait la protéine moyenne ?	93
Quelle taille font les machines moléculaires impliquées dans le dogme central ?	99
Quelle est l'épaisseur de la membrane cellulaire ?	102
Quelle taille font les filaments intracellulaires ?	106
<b>Chapitre 2 • Concentrations et nombres absolus</b>	113
Comment fabriquer une cellule	116
De quels éléments se compose la cellule ?	116
Quelle est la densité de la cellule ?	119
Quelles sont les concentrations ambiantes en O <sub>2</sub> et en CO <sub>2</sub> ?	122
Combien de nutriments faut-il fournir dans un milieu de culture ?	128
Quelle est la concentration de cellules bactériennes dans une culture saturée ?	132
Le recensement cellulaire	135
Quel est le pH à l'intérieur de la cellule ?	135
Quelles sont les concentrations des différents ions dans la cellule ?	139
Quelles sont les concentrations des métabolites libres dans la cellule ?	142
Quels sont les lipides les plus abondants dans les membranes ?	147
Combien de protéines y a-t-il dans une cellule ?	152
Quelles sont les protéines les plus abondantes dans une cellule ?	156
Dans quelle mesure l'expression protéique varie-t-elle entre les cellules ?	160
Quelles sont les concentrations des molécules du cytosquelette ?	164
Combien d'ARNm y a-t-il dans une cellule ?	168
Quelle est la proportion relative de protéine et d'ARNm ?	172
Quelle est la composition macromoléculaire de la cellule ?	177
Machines et signaux	181
Quel est l'effectif des facteurs de transcription ?	181
Combien y a-t-il de protéines de signalisation ?	184
Combien de molécules de rhodopsine y a-t-il dans un bâtonnet ?	191
Combien de ribosomes y a-t-il dans une cellule ?	196

<b>Chapitre 3 • Forces et énergies</b>	201
La biologie rencontre la physique	203
Quelle est l'échelle d'énergie thermique et quelle est sa pertinence en biologie ?	203
Quelle est l'échelle d'énergie d'une liaison hydrogène ?	207
Quelle est l'échelle d'énergie associée à l'effet hydrophobe ?	211
Combien d'énergie apportent les photons lors de la photosynthèse ?	213
Comment varie l'entropie lorsque deux molécules forment un complexe ?	216
Quelle force exercent les filaments du cytosquelette ?	219
Quelles sont les limites physiques à la détection par les cellules ?	222
Monnaie et budget énergétiques	228
Combien d'énergie libère l'hydrolyse de l'ATP ?	228
Quelle est l'énergie associée au transfert d'un groupe phosphate ?	232
Combien d'enthalpie libre dégage la combustion du sucre ?	235
Quel est le potentiel redox d'une cellule ?	236
Quelle est la différence de potentiel électrique à travers les membranes ?	243
Quelle est la puissance consommée par la cellule ?	246
Quelle est la relation entre l'activité métabolique et la taille d'une cellule ?	251
<b>Chapitre 4 • Temps et vitesse</b>	255
Les échelles de temps pour les petites molécules	257
Quelles sont les échelles de temps de la diffusion à l'intérieur d'une cellule ?	257
Combien de réactions les enzymes effectuent-elles chaque seconde ?	262
Quel est l'effet de la température sur les vitesses de réaction ?	267
À quelle vitesse fonctionnent les transporteurs membranaires ?	270
Combien d'ions traversent un canal ionique par seconde ?	272
Quel est le temps de renouvellement des métabolites ?	275
Les processus du dogme central	278
Laquelle est la plus rapide, la transcription ou la traduction ?	278
Quel est le temps de maturation des protéines fluorescentes ?	284
À quelle vitesse le protéasome dégrade-t-il les protéines ?	288
À quelle vitesse les molécules d'ARN et les protéines se dégradent-elles ?	291
La dynamique cellulaire	296
À quelle vitesse se propagent les signaux électriques dans les cellules ?	296
Quelle est la vitesse des moteurs moléculaires rotatifs ?	301
Quelles sont les vitesses d'assemblage et de désassemblage du cytosquelette ?	305

À quelle vitesse les moteurs moléculaires se déplacent-ils le long d'un filament ?	310
À quelle vitesse les cellules se déplacent-elles ?	315
Le cycle cellulaire	318
Combien de temps une cellule prend-elle pour copier son génome ?	318
Combien de temps durent les différentes étapes du cycle cellulaire ?	322
À quelle vitesse les différentes cellules du corps se renouvellent-elles ?	325
<b>Chapitre 5 • L'information et les erreurs</b>	329
Le génome	331
Quelle est la taille des génomes ?	331
Combien de chromosomes les différents organismes possèdent-ils ?	334
Combien de gènes y a-t-il dans un génome ?	339
À quel point deux personnes sont-elles génétiquement semblables ?	342
Les mutations et les erreurs	345
Quel est le taux de mutation au cours de la réplication du génome ?	345
Quel est le taux d'erreur de la transcription et de la traduction ?	352
Quel est le taux de recombinaison ?	354
<b>Chapitre 6 • Un cabinet de curiosités quantitatif</b>	359
Combien de cellules y a-t-il dans un organisme ?	360
Combien de fois les chromosomes se répliquent-ils à chaque génération ?	365
Combien de copies d'un gène d'ARN ribosomal y a-t-il dans le génome ?	369
Quelle est la perméabilité de la membrane cellulaire ?	372
Combien de photons faut-il pour fabriquer une cyanobactérie ?	376
Combien de virions sont produits lors d'une infection virale ?	378
<b>Épilogue</b>	381
<b>Références</b>	385
<b>Index</b>	407

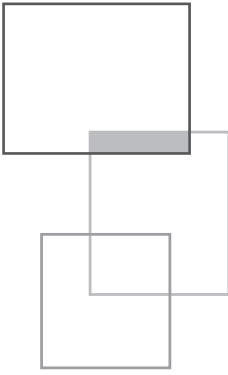


# Table des Estimations

---

Estimation 0-1	Conversion entre le dalton et le gramme.	36
Estimation 0-2	Concentration molaire en unités de <i>E. coli</i> .	37
Estimation 0-3	Relation entre la concentration de soluté et la pression osmotique.	37
Estimation 0-4	Déterminer le nombre approprié de chiffres significatifs pour présenter une valeur.	41
Estimation 2-1	Combien d'atomes y a-t-il dans le corps humain ?	117
Estimation 2-2	Constituants principaux de la cellule.	118
Estimation 2-3	Quel est le volume d'air requis pour fournir l'oxygène nécessaire à la croissance ?	126
Estimation 2-4	Quelle est la densité optique correspondant à la concentration standard d'azote dans le milieu de culture ?	130
Estimation 2-5	Nombre d'ions hydrogène dans une cellule bactérienne à pH=7.	137
Estimation 2-6	Concentration d'alcool au cours de la fermentation de la levure.	147
Estimation 2-7	Combien de protéines y a-t-il dans une cellule ?	153
Estimation 2-8	Proportion de Rubisco parmi les protéines solubles d'une cellule de feuille.	157
Estimation 2-9	Nombre de molécules d'ARNm dans une cellule.	169
Estimation 2-10	Proportion de ribosomes dans la masse sèche cellulaire à un taux de croissance proche du taux maximal.	197
Estimation 2-11	Combien de ribosomes y a-t-il dans un volume cellulaire ?	200

Estimation 3-1	Comprendre la variation de $pK_a$ en fonction de la distance de liaison : la compétition énergie-entropie.	206
Estimation 3-2	Affinité de liaison due à l'effet hydrophobe.	212
Estimation 3-3	Comment varie le taux d'occupation d'un récepteur situé dans un gradient de concentration ?	228
Estimation 3-4	Enthalpie libre de l'hydrolyse de l'ATP en conditions physiologiques.	229
Estimation 3-5	Nombre de protons requis pour maintenir la tension membranaire.	245
Estimation 3-6	Taux de production d'énergie chez l'humain et la bactérie.	246
Estimation 3-7	Combien d'ATP requiert la reptation d'une cellule adhérente ?	248
Estimation 4-1	Relation de Stokes-Einstein et constante de diffusion dans l'eau.	258
Estimation 4-2	Temps de diffusion d'une protéine à travers la cellule.	260
Estimation 4-3	Taux d'association $k_{on}$ pour une réaction contrôlée par la diffusion.	265
Estimation 4-4	Variation de la vitesse pour une augmentation de température de 10 °C.	268
Estimation 4-5	Proportion de membrane occupée par les transporteurs	270
Estimation 4-6	Débit caractéristique des ions qui traversent un canal ionique.	274
Estimation 4-7	Courant caractéristique à travers un canal ionique.	275
Estimation 4-8	Définition du temps de renouvellement.	277
Estimation 4-9	Laquelle est la plus rapide, la transcription ou la traduction ?	279
Estimation 4-10	Quel est le temps de renouvellement des protéines par dégradation active ?	290
Estimation 4-11	Combien d'énergie requiert la rotation d'un flagelle ?	302
Estimation 4-12	Le paradoxe de la réplication du génome.	320
Estimation 5-1	La propension d'une paire de bases à subir une mutation.	347
Estimation 5-2	Nombre de mutations par génération chez l'être humain.	350
Estimation 6-1	Nombre de cellules dans le corps humain.	361
Estimation 6-2	Nombre de réplifications chromosomiques par génération chez l'être humain.	366
Estimation 6-3	Combien faut-il de gènes d'ARNr ?	370
Estimation 6-4	Temps de fuite d'une molécule neutre à travers la membrane.	375
Estimation 6-5	Nombre de photons requis pour fabriquer une cyanobactérie.	378
Estimation 6-6	Proportion du volume cellulaire occupé par des virions en cours de libération.	380



# Préface du traducteur

---

Ce livre est une introduction à la biologie quantitative de la cellule. Il aborde les phénomènes biologiques à travers les nombres qui les décrivent, et montre ce que nous pouvons apprendre des processus cellulaires en s'intéressant aux échelles de ces grandeurs que sont la taille, la concentration, l'énergie, la vitesse et l'information.

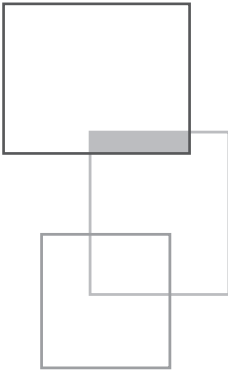
La biologie quantitative est une branche récente des sciences de la vie, et forme depuis peu un domaine d'étude et d'enseignement. Elle bénéficie de l'essor des instruments à haute résolution spatiale et temporelle et des puissants moyens de simulation et d'analyse de données volumineuses. Ces techniques sont présentées au fil des pages, replaçant les mesures dans un contexte expérimental qui permet d'apprécier les solutions astucieuses et les défis qui restent à relever.

Le lecteur, la lectrice, trouveront peut-être insolite la structure de l'ouvrage. Cette organisation en rubriques centrées sur une question, mais interdépendantes, vise à la curiosité et à l'autonomie. Il s'agit d'abord que le lecteur découvre, ou redécouvre, la cellule sous un angle quantitatif, en développant une intuition des échelles en jeu et en aiguisant son raisonnement sur les ordres de grandeur. Puis, le but sera atteint si les thèmes abordés l'inspirent à approfondir une question biologique de son choix et à en éclairer la compréhension. Il me semble en effet que c'est dans la démarche active de recherche, de classification et d'interprétation des valeurs que l'on pourra le mieux acquérir l'intuition des nombres, et étoffer ainsi sa connaissance du monde tout à la fois encombré et dynamique de la cellule.

Pendant les années que j'ai passées dans des laboratoires de biologie et de physique, j'ai pu observer un intérêt croissant pour les approches quantitatives dans l'étude du vivant. J'ai eu envie de favoriser cette ouverture vers l'interdisciplinarité dès la première année d'université, et l'ouvrage de Ron Milo et Rob Phillips me paraît adapté pour ce rôle.

Je souhaite exprimer mes remerciements aux éditions EDP Sciences : à France Citrini pour la volonté de mener ce projet à bien, à Sophie Hosotte pour le suivi de la production, ainsi qu'à toute l'équipe de production. Je remercie également les auteurs pour leur confiance. Je suis reconnaissant à la Société de Biologie Cellulaire de France pour le soutien apporté à cette initiative. Je remercie Corinne Benassayag, Jonathan Fouchard, Arnaud Labrousse, Isabelle Maridonneau-Parini et Christel Moog-Lutz pour leurs encouragements ; Renaud Poincloux pour ses nombreux conseils, ainsi que pour les portraits de macrophages en couverture ; et Denis Hudrisier pour son appui enthousiaste et ses éclaircissements sur les attentes des étudiants et des enseignants. Enfin, je remercie mes parents Ashlékha Callikan-Proag et Virendra Proag, traductrice et scientifique.





# Lexique et notations

---

## Lexique

Dans cet ouvrage, les **ordres de grandeur** font référence à la démarche de présenter une valeur numérique avec une précision qui reflète l'incertitude sur la mesure expérimentale dont cette valeur est issue. « L'ordre de grandeur » d'une certaine quantité correspond à sa valeur caractéristique. Par exemple, l'ordre de grandeur du volume de *E. coli* est  $1 \mu\text{m}^3$  ; on dira aussi que ce volume « est de l'ordre de » 1 fL. Enfin, nous dirons que deux valeurs « diffèrent de  $n$  ordres de grandeurs » lorsque l'ordre de grandeur de leur rapport est de  $10^n$ .

La fonction thermodynamique  $G$ , dont la variation mesure le gain énergétique d'un système lors d'une transformation à pression constante, porte le nom d'**enthalpie libre**. Nous attirons l'attention sur le fait que cette grandeur est parfois appelée « énergie libre » en référence à l'anglais *Gibbs free energy*. Néanmoins, l'énergie libre désigne une grandeur thermodynamique distincte (que les Anglophones appellent en l'occurrence *Helmholtz free energy*) et nous désignerons donc ici systématiquement  $G$  par le nom d'enthalpie libre.

La « tension » désigne deux grandeurs physiques distinctes. La **tension électrique** (*voltage*) entre deux points de l'espace est la différence entre leurs potentiels électriques : elle s'exprime en volts. La **tension superficielle** (*surface tension*) mesure l'énergie requise par unité de surface pour maintenir en contact des corps qui présentent une répulsion. Ces deux grandeurs sont à l'œuvre dans le comportement des bicouches lipidiques : la tension électrique est liée aux différences de concentrations ioniques de part et d'autre de la membrane ; la tension superficielle se manifeste comme une résistance mécanique à la déformation, par exemple dans un processus d'endocytose ou de protrusion.

L'expression générique « force motrice » (*driving force*) sera employée pour décrire l'origine d'un phénomène de mise en mouvement, comme une différence de concentrations qui provoque un écoulement, d'une tension électrique qui occasionne un courant, d'une différence de température source de convection, etc. Il s'agit plutôt d'une description commode de la cause d'un retour à l'équilibre, qu'une grandeur bien définie. En particulier, sa dimension et ses unités dépendent du contexte.

## Notations

Pour faciliter la lecture, les chiffres des milliers, des millions, etc. seront séparés du chiffre suivant par une espace, ainsi :  $10^5 = 100\ 000$  et  $10^6 = 1\ 000\ 000$ . Les décimales seront indiquées par un point et la notation scientifique s'écrira de manière équivalente  $6.02 \times 10^{23}$  ou  $6.02E23$ .

## Conversions

On rappelle les préfixes usuels :

- kilo (k) :  $10^3$  ; méga (M) :  $10^6$  ; giga (G) :  $10^9$  ; téra (T) :  $10^{12}$  ; péta (P) :  $10^{15}$  ;
- milli (m) :  $10^{-3}$  ; micro ( $\mu$ ) :  $10^{-6}$  ; nano (n) :  $10^{-9}$  ; pico (p) :  $10^{-12}$  ; femto (f) :  $10^{-15}$ .

NB :  $1\ \mu\text{m}$  se dit 1 « micron », le « micromètre » étant un instrument de mesure.

La comparaison des différentes échelles est au cœur de la biologie quantitative. Aussi, il est essentiel de s'entraîner à manipuler ces préfixes afin de faciliter la voie à l'intuition des échelles mises en jeu dans la cellule. Ainsi :

- 1 millimètre =  $1\ \text{mm} = 10^{-3}\ \text{m} = 10^{-6}\ \text{km} = 10^3\ \mu\text{m} = 10^6\ \text{nm}$  ;
- 1 micron carré =  $1\ \mu\text{m}^2 = (1\ \mu\text{m})^2 = (10^{-6}\ \text{m})^2 = 10^{-12}\ \text{m}^2$  ;
- 1 micron cube =  $1\ \mu\text{m}^3 = (1\ \mu\text{m})^3 = (10^{-6}\ \text{m})^3 = 10^{-18}\ \text{m}^3$ .

## Unités

Les unités de mesure récurrentes dans cet ouvrage sont les suivantes.

1 mole, notée 1 mol, est une unité sans dimension permettant de se passer de puissances de 10 élevées dans les mesures relatives aux composants élémentaires de la matière. 1 mol d'entités (atomes, molécules...) correspond à  $N_A$  entités.  $N_A$ , le nombre d'Avogadro, vaut  $\approx 6.02 \times 10^{23}$  et correspond au nombre d'atomes contenus dans un gramme d'hydrogène.

1 Å = 1 Ångström = 0.1 nm.

1 L = 1 litre = 1 dm<sup>3</sup> = 10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup> ; 1 µL = 1 mm<sup>3</sup> ; 1 fL = 1 µm<sup>3</sup>.

1 M = 1 mol/L.

1 Da = 1 dalton = 1 g/mol correspond à la masse d'un atome d'hydrogène.

La densité d'un corps (par rapport à l'eau) est sans dimension. Elle est le rapport de la masse volumique du corps à celle de l'eau.

Les unités de temps sont les unités communes : 1 h = 60 min = 3 600 s. Les fréquences, ou le nombre d'événements qui se produisent par unité de temps, seront exprimées en s<sup>-1</sup>, min<sup>-1</sup>, h<sup>-1</sup> : par exemple, la dégradation de 10 protéines par seconde correspond à une fréquence de 10 s<sup>-1</sup>. De plus, 1 Hz = 1 hertz = 1 s<sup>-1</sup>.

1 N = 1 newton = 1 kg·m/s<sup>2</sup>.

1 V = 1 volt est l'unité de potentiel électrique et de tension (différence de potentiel).

1 W = 1 watt = 1 N·m/s = 1 V·A.

1 J = 1 joule = 1 N·m = 1 W·s = 1 C·V.

Les longueurs de séquences seront notées :

- pour un acide nucléique double-brin : 1 pb = 1 paire de bases ; on utilisera, à l'aide des préfixes ci-avant, 1 kpb = 10<sup>3</sup> pb ; 1 Mpb = 10<sup>6</sup> pb, 1 Gpb = 10<sup>9</sup> pb ;
- pour un acide nucléique simple-brin : 1 nt = 1 nucléotide ;
- pour un polypeptide ou une protéine : 1 aa = 1 acide aminé.



- stoechiométrie  
   composition élémentaire · 116  
   cytosquelette · 167  
   réplication · 320  
   respiration · 126  
   signalisation · 187  
 Stokes, loi de · 313  
 Stokes-Einstein, relation de ·  
   258, 303  
 Sturtevant, Alfred · 355  
 superoxyde dismutase · 263  
 symbiote · 127, 133, 230  
 synapse  
   reconstruction 3D · 87  
   taille · 85  
*Synechococcus* · 316, 377, 379  
 système sensoriel  
   limites de détection · 223
- T**
- T7 (bactériophage) · 52, 55, 319, 379  
 tableau périodique · 119  
 tampon, effet · 136  
 TAP-tag · 157  
 tardigrades · 361  
 taux de recombinaison · 355  
 taux d'occupation d'un récepteur · 227  
 température  
   agitation thermique · 268  
   calorie · 236  
   croissance · 269  
   énergie thermique · 202  
   fluctuations thermiques · 223  
   liaisons hydrogène · 209  
   spectre solaire · 213  
   vitesses de réaction · 267, 269, 283  
 temps de renouvellement  
   dégradation des protéines · 288, 291  
 temps de séjour (substrat) · 266  
 termites · 132  
 test de cohérence  
   éléments constitutifs de la cellule ·  
   119  
   nombre de cellules · 365  
   nutriments · 129  
   principes · 20, 33  
   protéasome et dégradation · 288  
   rapport protéine/ARNm · 174  
 thermodynamique  
   compétition enthalpie-entropie · 205  
   eQuilibrator (base de données) · 233  
   réaction favorable · 237, 262  
   second principe · 373  
*Thiomargarita namibiensis* · 70  
 thylacoïde · 82  
 titine · 97  
 tomographie électronique · 53, 76, 86,  
   198  
 tour redox · 237  
 traduction  
   et croissance · 272  
   inhibition · 286  
   observation microscopique · 278  
   taux d'erreur · 353  
   vitesse · 278  
 transcription  
   ARN de transfert · 353  
   ARN ribosomal · 369  
   facteurs de · Voir facteurs de  
   transcription  
   inhibition · 280, 292  
   observation microscopique · 278  
   taux d'erreur · 353  
   vitesse · 278  
 transcriptome · 168, 170, 352  
 transduction  
   cellules ciliées · 224  
 transduction de signal  
   chimiotactisme · 301  
   hydrolyse de l'ATP · 234  
   rétine · 192  
   système à deux composants · 185  
 transfert de protéines · 294  
 transitions et transversions · 349  
 transporteurs  
   régulation du pH · 136  
   vitesses · 270

transposons, éléments transposables ·  
342, 350  
*Treponema primitia* · 303  
triacylglycérol · 150  
triose-phosphate isomérase · 94, 265  
trisomie · 336  
trophosomes · 132  
tubuline · Voir microtubules  
TufB (homologue de EF-Tu) · 158

## U

ubiquitine · 289

## V

vacuoles · 83, 136, 156  
Venter, Craig · 344  
vésicules  
synaptiques · 85, 87  
transport · 151, 311, 314  
*Vibrio cholerae* · 316, 335, 340  
vidéo-microscopie · 295, 306, 312, 316

## VIH

libération de virions · 379  
taille · 54  
taille de génome · 332, 340  
transcriptase inverse · 102

## virus

capside virale · 53  
densité · 120  
génome · 331, 339  
génome fractionné · 335  
géométrie · 53  
libération de virions · 378  
mutation · 348  
organisation du génome · 335  
réplication · 319  
stockage d'information · 329  
taille · 55

virus géants · 54  
virus de la grippe · 53  
virus de la marbrure chlorotique de la  
cornille · 55, 335  
virus de la mosaïque du tabac · 55, 360  
viscosité · 260, 313  
vision · 65, 87, 191  
volume

adipocytes · 364  
air nécessaire à la croissance · 126  
cellulaire · 58, 60, 62, 155  
cellules-modèles · 45  
cytoplasme · 77  
effet de dilution · 294  
et croissance · 197  
loi d'échelle · 251  
noyau · 74, 331  
organites · 77  
photosynthèse et respiration · 114  
virions · 380

Voronoi, carte proportionnelle de ·  
159, 177

## W

Wallace, Alfred · 345  
*Western blot* · Voir transfert de protéines  
Wnt/caténine- $\beta$ , voie de signalisation ·  
191  
WormAtlas (base de données) · 367

## X

*Xenopus laevis* · 110, 306

## Y

YFP (protéine fluorescente) · 161  
EYFP · 287  
maturation · 286