

*Sciences
de la Vie
et de
la Terre*

Bioénergétique cellulaire



Jean-Jacques BERNARD

ellipses

Table des matières

I. Principes de bioénergétique 11

1. Quelques notions de thermodynamique des processus à l'équilibre .. 13

1.1. Notions de système thermodynamique et d'énergie 13

1.1.1. Définition des systèmes thermodynamiques 13

1.1.2. L'énergie est la capacité d'un système à fournir un travail 15

1.1.3. Caractérisation de l'état d'un système 16

1.2. Les principes de la thermodynamique 16

1.2.1. Le premier principe et les fonctions énergie interne (U) et enthalpie (H) 16

1.2.2. Le second principe de la thermodynamique et la fonction entropie (S) 21

1.3. Enthalpie libre de quelques réactions de la vie cellulaire 29

1.3.1. Notion d'enthalpie libre de réaction 30

1.3.2. Enthalpie libre et constante d'équilibre des réactions 32

1.3.2. Enthalpie libre liée au transfert d'électrons 37

1.3.3. Enthalpie libre des réactions de transferts transmembranaires de solutés 39

2. Les particularités du fonctionnement énergétique des cellules 42

2.1. Les cellules sont des systèmes ouverts qui évoluent loin de l'équilibre 42

2.2. Les cellules possèdent des macromolécules informationnelles 46

2.3. Les barrières énergétiques et les enzymes qui permettent de les franchir ont une grande importance 46

2.4. Les réactions chimiques dans les systèmes biologiques ne mettent jamais en jeu de grandes quantité d'énergie 49

2.5. Un nombre limité de molécules assure les couplages réactionnels	51
2.5.1. Notion de réactions couplées	51
2.5.2. Dans les cellules et les organismes les principales molécules de couplages sont des nucléotides di- et triphosphates et des coenzymes d'oxydoréductases	54
3. Le rôle central de l'ATP et des coenzymes d'oxydoréductases	58
3.1. L'adénosine triphosphate ou ATP	58
3.1.1. L'ATP possède un potentiel d'hydrolyse de ses liaisons phosphates élevé	58
3.1.2. Les cellules possèdent d'autres composés phosphorylés	60
3.2. Les coenzymes d'oxydoréductases	62
3.2.1. Les couples redox et la notion de potentiel d'oxydoréduction	62
3.2.2. Les potentiels d'oxydoréduction des couples NAD ⁺ /NADPH, NAD ⁺ /NADH, FAD/FADH ₂	64
3.2.3. Intervention de NAD et NADP	65
3.2.3. Intervention de FAD	66
4. Les modes de formation de l'ATP	68
4.1. Les phosphorylations au niveau du substrat.....	68
4.2. Les phosphorylations liées aux transferts d'électrons le long de chaînes d'oxydoréduction	69
4.2.1. Phosphorylations oxydatives	70
4.2.2. Photophosphorylations	72
II. Les grandes voies du métabolisme énergétique	73
5. La glycolyse et les fermentations alcoolique et lactique	75
5.1. Les étapes de la glycolyse	75
5.1.1. Phase d'investissement	78
5.1.2. Phase de récupération de l'énergie	79
5.2. Bilan énergétique de la glycolyse	83
5.3. Contrôle de la glycolyse	86
5.3.1 Contrôle, par l'hexokinase, de l'étape 1	87
5.3.2 Contrôle, par la phosphofructokinase-1, de l'étape 3	87
5.3.3. Contrôle, par la pyruvate-kinase-1, de l'étape 10	88
5.4. Les fermentations alcoolique et homolactique	88
5.4.1. La fermentation homolactique	89
5.4.2. La fermentation alcoolique	90
6. La respiration	92
6.1. Localisation et mécanisme général	92
6.1.1. Localisation de la respiration	92
6.1.2. Mécanisme général de la respiration	94

6.2. La formation de l'acétyl-coenzyme A	96
6.2.1. Formation d'acétyl-CoA à partir du pyruvate	96
6.2.2. Formation d'acétyl-CoA à partir d'acides gras	97
6.2.3. Formation d'acétyl-CoA à partir d'acides aminés	98
6.3. L'oxydation de l'acétyl-coenzymeA par les réactions du cycle de l'acide citrique	99
6.3.1. Les étapes du cycle de l'acide citrique	99
6.3.2. Les contrôles du cycle de l'acide citrique	101
6.4. L'oxydation des coenzymes réduits et la réalisation d'un gradient transmembranaire de protons	101
6.4.1. Entrée, dans la mitochondrie, des électrons des NADH produits lors de la glycolyse	102
6.4.2. Enthalpie libre des réactions de transferts d'électrons le long des chaînes respiratoires	104
6.4.3. Constitution des chaînes respiratoires	104
6.4.4. Transfert d'électrons et création d'un gradient de protons	108
6.5. Du gradient transmembranaire de protons à la production d'ATP	109
6.5.1. Mise en évidence du couplage osmochimique	110
6.5.2. Fonctionnement des ATPsynthétases	113
6.6. La respiration cellulaire est un processus à haut rendement énergétique ...	115
7. La photosynthèse	117
7.1. Les lieux de la photosynthèse	117
7.1.1. Les chloroplastes des végétaux	117
7.1.2. Les membranes des Procaryotes	120
7.2. La photosynthèse : réaction d'oxydoréduction en deux phases dont l'une dépend de la lumière	121
7.2.1. La photosynthèse : réaction d'oxydoréduction	121
7.2.2. La photosynthèse : réaction comportant deux phases distinctes	122
7.3. La phase photochimique de la photosynthèse : photophosphorylation et création d'un pouvoir réducteur	125
7.3.1. Le soleil source d'énergie	125
7.3.1.1. Nature de la lumière	125
7.3.1.2. Production de lumière, spectre d'émission	126
7.3.1.3. Énergie portée par les photons	127
7.3.2. Absorption des photons par les pigments	128
7.3.2.1. Structure des pigments photorécepteurs	128
7.3.2.2. L'interception des radiations lumineuses par les pigments photorécepteurs	130
7.3.3. Les pigments photorécepteurs sont groupés en photosystèmes	133

7.3.4. La conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique	136
7.3.4.1. Photophosphorylation acyclique : synthèse d'ATP et création de pouvoir récepteur	136
7.3.4.2. La photophosphorylation cyclique produit uniquement de l'ATP	140
7.4. La phase non photochimique de la photosynthèse	141
7.4.1. L'assimilation du dioxyde de carbone chez les plantes en C3	141
7.4.1.1. Les expériences de Calvin	141
7.4.1.2. Le cycle de Calvin	144
7.4.2. L'assimilation du dioxyde de carbone chez les plantes en C4 et CAM	146
7.4.2.1. Le problème de la photorespiration est contourné par les plantes en C4 et CAM	146
7.4.2.2. le métabolisme en C4	147
7.4.2.3. Le métabolisme en CAM	148

III. Dissipation d'énergie lors de quelques activités cellulaires 151

8. Énergie et activité musculaire	153
Introduction	153
8.1. Bases moléculaires de l'activité musculaire	154
8.1.1. Organisation du myocyte strié	154
8.1.1.1. Les myofibrilles	154
8.1.1.2. Le sarcoplasme	156
8.1.1.3. La membrane plasmique	157
8.1.2. Le moteur moléculaire du mouvement	157
8.1.2.1. Les microfilaments fins	157
8.1.2.2. Les filaments épais de myosine	158
8.1.2.3. L'arrangement des myofilaments	160
8.1.3. Conversion d'énergie chimique en énergie mécanique par l'intermédiaire des myofilaments	160
8.1.4. Contrôle de la contraction au niveau cellulaire	163
8.1.4.1. Stimulation du sarcolemme	163
8.1.4.2. Réponse du réticulum sarcoplasmique	164
8.1.4.3. Action des ions calcium	164
8.2. Les sources d'énergie pour la contraction musculaire	165
8.2.1. Les voies de régénération de l'ATP dans le myocyte	165
8.2.1.1. Les voies anaérobies alactiques	166
8.2.1.1.1. La phosphorylation de l'ADP par la phosphocréatine	166
8.2.1.1.2. Le transfert de groupe phosphoryl d'un ADP à un autre	167
8.2.1.2. La voie anaérobie lactique : la fermentation lactique	167
8.2.1.3. La voie aérobie de la respiration mitochondriale	168
8.2.2. Dynamique de la mise en jeu des différentes voies	169
8.2.2.1. Une phase initiale anaérobie alactique	169
8.2.2.2. Une phase post-initiale anaérobie lactique	170
8.2.2.3. Une phase aérobie	170

8.2.3. La fourniture de dioxygène et la notion de dette en O_2	172
8.2.4. L'utilisation des différents substrats	173
8.2.5. Les différents types de fibres musculaires	174
9. Énergie et transports transmembranaires	176
9.1. Les notions de potentiels chimique et électrochimique	176
9.2. La diffusion simple	178
9.2.1. Le flux de diffusion	178
9.2.2. La perméabilité membranaire aux solutés	180
9.3. La diffusion facilitée ou transport passif	181
9.3.1. Caractéristiques de la diffusion facilitée d'après l'exemple de la diffusion transmembranaire de D-glucose	181
9.3.2. Généralisation	184
9.4. Les transports actifs	188
9.4.1. Les transport actifs primaires (couplages chimio-osmotiques)	189
9.4.1.1. Exemple du transport actif du Na^+ par la pompe ATPase Na^+/K^+ dépendante	189
9.4.1.2. Autres transports actifs primaires importants	196
9.4.2. Les transport actifs secondaires (couplages osmo-osmotiques)	196
9.4.2.1. Exemple du transport couplé de D-glucose et de Na^+ à travers la membrane des entérocytes	197
9.4.2.2. Autres transports actifs secondaires importants	198
10. Énergie et synthèses de macromolécules	199
10.1. Biosynthèse des polymères glucidiques : exemple de la synthèse du glycogène	199
10.2. Biosynthèse des protéines	203
10.2.1. L'activation des acides aminés consomme une mole d'ATP par mole d'acide aminé	204
10.2.2. L'élongation de la chaîne polypeptidique est un processus cyclique qui nécessite du GTP	206
10.3. Biosynthèse des acides nucléiques	209
IV. Les voies annexes du métabolisme énergétique	211
11. Les photosynthèses primitives des bactéries pourpres	213
11.1. Organisation du système de transfert d'électrons chez une bactérie pourpre	213
11.2. Photophosphorylation cyclique chez les bactéries pourpres non sulfureuses	214
11.3. Photophosphorylation acyclique chez les bactéries pourpres sulfureuses	215

12. La photophosphorylation sans chlorophylle des bactéries halophiles	218
13. Les photophosphorylation oxydatives aérobies à partir d'une source minérale d'électrons	221
13.1. Phosphorylation oxydative aérobie à partir de l'hydrogène gazeux	221
13.2. Phosphorylation oxydative aérobie à partir de l'ion ammonium	224
14. Les phosphorylations oxydatives anaérobies (respirations anaérobies)	226
14.1. Respiration sur sulfates	226
14.2. La respiration sur nitrates	227
15. Les phosphorylations au niveau du substrat à partir d'une source minérale d'électrons	229
Conclusion	231
Bibliographie	233
Index	235

*Sciences
de la Vie
et de
la Terre*

LES cellules vivantes se caractérisent notamment par le fait qu'elles réalisent des échanges de matières d'énergie et d'information avec leur environnement. La bioénergétique cellulaire s'occupe particulièrement des échanges et des transferts d'énergie dans les cellules et ceux-ci sont très importants. Les cellules prélèvent dans leur milieu de l'énergie telle que l'énergie du rayonnement solaire ou l'énergie chimique potentielle de molécules organiques. Cette énergie est en partie transformée et permet de réaliser des synthèses, de créer et de maintenir des gradients, de faire fonctionner l'ensemble de la machinerie cellulaire. Au cours de ces processus l'énergie est finalement dissipée en travail et chaleur.

Le but de cet ouvrage est de décrire de manière non exhaustive les principes et les modalités des échanges et des transferts d'énergie au niveau cellulaire.

Il est destiné aux étudiants de premier cycle universitaire en Sciences de la Vie, aux étudiants des classes préparatoires BCPST et VETO ainsi qu'aux candidats aux concours externes et internes de recrutement de l'Éducation nationale (CAPES, Agrégation).

L'ouvrage s'adresse aussi aux professeurs des classes de l'enseignement secondaire (qui pourront y trouver des compléments d'information) ainsi qu'à toutes les personnes intéressées par la biologie.

10BIO/1/97827298-0154-0
20.00 euro



ISBN 2-7298-0154-5