

## 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
<b>3. Le rôle central de l'ATP et des coenzymes d'oxydoréductases .....</b>	<b>58</b>
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 NADP <sup>+</sup> /NADPH, NAD <sup>+</sup> /NADH, FAD/FADH <sub>2</sub> .....	64
3.2.3. Intervention de NAD et NADP .....	65
3.2.3. Intervention de FAD .....	66
<b>4. Les modes de formation de l'ATP .....</b>	<b>68</b>
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**

---

<b>5. La glycolyse et les fermentations alcoolique et lactique .....</b>	<b>75</b>
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
<b>6. La respiration .....</b>	<b>92</b>
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
<b>7. La photosynthèse .....</b>	<b>117</b>
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<sub>2</sub> 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<sup>+</sup> par la pompe  
ATPase Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> 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<sup>+</sup>  
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

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