

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 NADP ⁺ /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 O₂ 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 |