

Déclic

MÉTABOLISME CELLULAIRE

ATP • Respiration cellulaire • Lactates • Stress oxydatif

PARCOURS : Préparation EIDE

AUTEUR : Anaïs – Daranjo - IDE

DATE : Juin 2026

1. Objectifs du chapitre

À la fin de ce chapitre, tu dois être capable de :

- définir le métabolisme cellulaire ;
- différencier anabolisme et catabolisme ;
- comprendre le rôle des réactions chimiques cellulaires ;
- expliquer le rôle des enzymes ;
- définir l'ATP ;
- décrire la structure générale de l'ATP ;
- expliquer l'hydrolyse de l'ATP ;
- comprendre pourquoi l'ATP est la principale monnaie énergétique de la cellule ;
- expliquer les grandes étapes de la respiration cellulaire ;
- comprendre la glycolyse, le cycle de Krebs, la chaîne respiratoire mitochondriale et la phosphorylation oxydative ;
- différencier métabolisme aérobie et anaérobie ;
- comprendre la production de lactates ;
- faire le lien entre effort musculaire, hypoxie cellulaire et lactates ;
- définir le stress oxydatif ;
- comprendre les notions de radicaux libres, oxydation, réduction et antioxydants ;
- faire le lien entre énergie cellulaire, vieillissement, inflammation, hypoxie, maladie et survie cellulaire.

Introduction générale

Une cellule a besoin d'énergie pour vivre.

Elle doit produire, transformer et utiliser de l'énergie en permanence pour assurer ses fonctions.

Même au repos, une cellule consomme de l'énergie pour :

- maintenir ses gradients ioniques ;
- faire fonctionner ses pompes membranaires ;
- produire des protéines ;
- réparer ses structures ;
- transporter des molécules ;
- communiquer avec les autres cellules ;
- se défendre contre le stress ;
- éliminer ses déchets ;
- maintenir son volume ;
- se diviser dans certains tissus.

Cette énergie est principalement fournie sous forme d'ATP.

L'ATP est une molécule directement utilisable par la cellule. Elle sert à faire fonctionner les mécanismes cellulaires qui demandent de l'énergie.

Pour produire de l'ATP, les cellules utilisent des nutriments, surtout le glucose, les acides gras et parfois les acides aminés.

La voie la plus efficace pour produire de l'ATP est la respiration cellulaire aérobie, qui utilise l'oxygène dans les mitochondries.

Quand l'oxygène manque ou que la demande énergétique est très rapide, la cellule peut utiliser un métabolisme anaérobie. Ce métabolisme produit moins d'ATP et génère des lactates.

La compréhension du métabolisme cellulaire est fondamentale pour comprendre :

- l'effort musculaire ;
- l'hypoxie ;
- l'ischémie ;
- le choc ;
- le sepsis ;
- l'insuffisance respiratoire ;
- l'insuffisance circulatoire ;
- le diabète ;
- la production de chaleur ;
- le stress oxydatif ;
- le vieillissement cellulaire ;
- la mort cellulaire.

4.1. Notion de métabolisme

2. Définition du métabolisme

Le métabolisme correspond à l'ensemble des réactions chimiques qui se déroulent dans une cellule ou dans l'organisme.

Ces réactions permettent de :

- produire de l'énergie ;
- utiliser de l'énergie ;
- fabriquer des molécules ;
- dégrader des molécules ;
- transformer des nutriments ;
- éliminer des déchets ;
- maintenir l'équilibre cellulaire ;
- adapter la cellule aux besoins du corps.

Le métabolisme n'est donc pas seulement lié au poids ou aux calories. C'est l'ensemble de la chimie du vivant.

3. Métabolisme cellulaire

Le métabolisme cellulaire désigne les réactions chimiques qui se produisent dans les cellules.

Chaque cellule possède un métabolisme adapté à sa fonction.

Exemples :

Cellule	Particularité métabolique
Cellule musculaire	consomme beaucoup d'ATP lors de la contraction
Neurone	dépend fortement du glucose et de l'oxygène
Hépatocyte	transforme, stocke, détoxifie et redistribue les nutriments
Cellule adipeuse	stocke les lipides
Cellule rénale tubulaire	consomme beaucoup d'énergie pour réabsorber des substances
Cellule cardiaque	dépend fortement du métabolisme aérobie mitochondrial
Globule rouge	produit son ATP sans mitochondrie, par glycolyse anaérobie

Les cellules n'ont donc pas toutes les mêmes besoins ni les mêmes capacités métaboliques.

4. Réactions chimiques cellulaires

Une réaction chimique transforme une ou plusieurs molécules de départ en une ou plusieurs molécules finales.

Les molécules de départ sont appelées substrats ou réactifs.

Les molécules produites sont appelées produits.

Exemple simplifié :



Dans les cellules, les réactions chimiques sont très nombreuses et très organisées.

Elles sont regroupées en voies métaboliques.

Une voie métabolique est une succession d'étapes où le produit d'une réaction devient le substrat de la suivante.

Exemple :

La glycolyse est une voie métabolique qui transforme progressivement le glucose en pyruvate, tout en produisant un peu d'ATP.

5. Anabolisme

L'anabolisme correspond à l'ensemble des réactions de construction.

La cellule utilise de petites molécules pour fabriquer des molécules plus grandes ou plus complexes.

L'anabolisme consomme généralement de l'énergie.

Exemples d'anabolisme :

- synthèse des protéines à partir des acides aminés ;
- synthèse de l'ADN ;
- synthèse des lipides ;

- synthèse du glycogène à partir du glucose ;
- réparation cellulaire ;
- croissance tissulaire ;
- fabrication de membranes ;
- cicatrisation.

L'anabolisme est important pendant :

- la croissance ;
- la cicatrisation ;
- la grossesse ;
- la prise de masse musculaire ;
- la réparation après une lésion ;
- la production de protéines immunitaires.

6. Catabolisme

Le catabolisme correspond à l'ensemble des réactions de dégradation.

La cellule dégrade des molécules complexes en molécules plus simples.

Le catabolisme libère généralement de l'énergie.

Exemples de catabolisme :

- dégradation du glucose ;
- dégradation des acides gras ;
- dégradation du glycogène ;
- dégradation de certaines protéines selon les besoins ;
- production d'ATP ;
- mobilisation des réserves énergétiques.

Le catabolisme est important pendant :

- le jeûne ;
- l'effort ;
- le stress ;
- la fièvre ;
- les situations de besoin énergétique élevé ;
- certaines maladies chroniques.

7. Comparaison anabolisme / catabolisme

Notion	Anabolisme	Catabolisme
Sens général	construction	dégradation
Énergie	consomme de l'énergie	libère de l'énergie
Exemple	synthèse de protéines	dégradation du glucose
Objectif	construire, réparer, stocker	produire de l'énergie, mobiliser
Situation typique	croissance, cicatrisation	effort, jeûne, stress

Les deux sont indispensables.

Une cellule doit construire et dégrader en permanence.

8. Couplage énergétique

Certaines réactions libèrent de l'énergie.

D'autres consomment de l'énergie.

La cellule couple souvent ces réactions.

L'énergie libérée par une réaction catabolique peut être utilisée pour fabriquer de l'ATP.

Ensuite, l'ATP peut être utilisé pour alimenter une réaction anabolique ou un travail cellulaire.

Exemple :

1. le glucose est dégradé ;
2. cette dégradation libère de l'énergie ;
3. l'énergie permet de produire de l'ATP ;
4. l'ATP est utilisé pour faire fonctionner une pompe membranaire ou synthétiser une protéine.

L'ATP fait donc le lien entre catabolisme et anabolisme.

Enzymes

9. Définition

Une enzyme est une protéine qui accélère une réaction chimique sans être consommée par cette réaction.

Elle agit comme un catalyseur biologique.

Sans enzyme, beaucoup de réactions cellulaires seraient trop lentes pour être compatibles avec la vie.

Les enzymes permettent aux réactions de se produire rapidement, à température corporelle normale.

10. Substrat et site actif

Le substrat est la molécule sur laquelle agit l'enzyme.

Le site actif est la zone de l'enzyme où le substrat se fixe.

Image simple :

enzyme = serrure spécialisée

substrat = clé adaptée

réaction = transformation de la clé en produit

Une enzyme est souvent spécifique d'un substrat ou d'un type de réaction.

11. Rôle des enzymes

Les enzymes permettent :

- d'accélérer les réactions ;
- de contrôler les voies métaboliques ;
- de rendre les réactions compatibles avec la vie ;
- d'organiser le métabolisme ;
- de répondre aux besoins cellulaires ;
- de réguler la production d'énergie.

Exemples d'enzymes :

- amylase ;
- lipase ;
- pepsine ;
- lactate déshydrogénase ;
- ATP synthase ;
- kinases ;
- phosphatases ;
- enzymes de la chaîne respiratoire.

12. Énergie d'activation

Pour qu'une réaction chimique se produise, il faut souvent dépasser une barrière énergétique appelée énergie d'activation.

L'enzyme diminue cette énergie d'activation.

Elle ne change pas le résultat final de la réaction, mais elle permet à la réaction d'aller beaucoup plus vite.

13. Facteurs qui influencent l'activité enzymatique

L'activité des enzymes dépend de plusieurs facteurs.

Facteur	Effet possible
Température	une température trop basse ralentit ; trop haute peut dénaturer
pH	chaque enzyme a un pH optimal
Concentration en substrat	plus de substrat augmente l'activité jusqu'à saturation
Concentration en enzyme	plus d'enzyme peut augmenter la vitesse
Cofacteurs	certaines ions ou vitamines sont nécessaires
Inhibiteurs	diminuent l'activité enzymatique

Facteur	Effet possible
Activateurs	augmentent l'activité enzymatique

14. Température et enzymes

Les enzymes humaines fonctionnent généralement mieux autour de la température corporelle.

Si la température augmente modérément, certaines réactions peuvent s'accélérer.

Mais si la température devient trop élevée, les protéines peuvent se dénaturer.

La dénaturation modifie la forme de l'enzyme, ce qui peut lui faire perdre sa fonction.

C'est une des raisons pour lesquelles les hyperthermies sévères sont dangereuses.

15. pH et enzymes

Chaque enzyme possède un pH optimal.

Exemples :

- la pepsine de l'estomac fonctionne bien en milieu acide ;
- les enzymes pancréatiques fonctionnent mieux en milieu plus alcalin dans le duodénum ;
- les enzymes cellulaires fonctionnent dans des conditions proches du pH physiologique.

Une acidose ou une alcalose importante peut perturber les enzymes et donc le fonctionnement cellulaire.

16. Inhibition enzymatique

Une enzyme peut être freinée par un inhibiteur.

Il existe plusieurs types d'inhibition.

Type	Principe
Inhibition compétitive	l'inhibiteur prend la place du substrat
Inhibition non compétitive	l'inhibiteur modifie l'enzyme ailleurs que sur le site actif
Inhibition irréversible	l'enzyme est durablement bloquée

Beaucoup de médicaments agissent en inhibant des enzymes.

Exemples :

- inhibiteurs de l'enzyme de conversion ;
- inhibiteurs de pompe à protons ;
- statines ;
- anti-inflammatoires non stéroïdiens ;
- certains antibiotiques ;
- anticancéreux.

17. Enzymes et clinique

Les enzymes sont importantes en biologie médicale.

Certaines enzymes ou protéines sont dosées dans le sang pour rechercher une atteinte d'organe.

Exemples :

Marqueur	Intérêt clinique
ALAT / ASAT	souffrance hépatique ou musculaire selon contexte
Lipase	atteinte pancréatique
CK	atteinte musculaire
LDH	marqueur non spécifique de souffrance cellulaire
PAL / GGT	atteinte biliaire ou hépatique selon contexte
Troponine	souffrance myocardique, ce n'est pas une enzyme mais un marqueur cardiaque majeur

La présence anormale de certaines enzymes dans le sang peut traduire une lésion cellulaire.

18. Schéma à insérer

Image conseillée :

Schéma enzyme-substrat : substrat qui se fixe au site actif, transformation en produit, enzyme intacte après la réaction.

4.2. ATP

19. Définition

L'ATP signifie adénosine triphosphate.

C'est la principale molécule énergétique directement utilisable par les cellules.

Elle sert de monnaie énergétique cellulaire.

Cela signifie que la cellule produit de l'ATP à partir des nutriments, puis utilise cet ATP pour réaliser ses travaux.

L'ATP est utilisée très rapidement. Elle n'est pas une grande réserve d'énergie à long terme.

Les réserves à long terme sont surtout :

- glycogène ;
- lipides ;
- protéines dans certaines situations extrêmes.

20. Structure de l'ATP

L'ATP est composée de trois éléments :

- une base azotée : adénine ;
- un sucre : ribose ;
- trois groupements phosphate.

Le nom adénosine triphosphate signifie donc :

- adénosine = adénine + ribose ;
- triphosphate = trois phosphates.

Les liaisons entre les phosphates contiennent une énergie chimique utilisable.

21. ATP, ADP et AMP

L'ATP peut perdre un phosphate et devenir ADP.

L'ADP signifie adénosine diphosphate.

L'ADP peut encore perdre un phosphate et devenir AMP.

L'AMP signifie adénosine monophosphate.

Schéma :

ATP ADP AMP

L'ATP contient trois phosphates.

L'ADP contient deux phosphates.

L'AMP contient un phosphate.

22. Hydrolyse de l'ATP

L'hydrolyse de l'ATP est la réaction qui coupe l'ATP en ADP et phosphate inorganique.

Schéma simplifié :

ATP + H₂O → ADP + Pi + énergie

Pi signifie phosphate inorganique.

Cette réaction libère de l'énergie utilisable par la cellule.

L'énergie libérée sert à effectuer un travail cellulaire.

23. Phosphorylation de l'ADP

Pour reformer de l'ATP, la cellule doit ajouter un phosphate à l'ADP.

Schéma :

ADP + Pi + énergie → ATP

Cette réaction s'appelle phosphorylation.

L'énergie nécessaire peut venir :

- de la respiration cellulaire ;
- de la glycolyse ;
- de la phosphorylation oxydative ;
- de la phosphocréatine dans le muscle ;
- d'autres réactions métaboliques.

24. Rôle énergétique de l'ATP

L'ATP est utilisée pour trois grands types de travail cellulaire.

Type de travail	Exemple
Travail chimique	synthèse des protéines, ADN, lipides
Travail mécanique	contraction musculaire, mouvements cellulaires
Travail de transport	pompes ioniques, transport actif

L'ATP est donc indispensable à la contraction, au transport membranaire, à la synthèse de molécules et au maintien des gradients ioniques.

25. Utilisation par les cellules

Les cellules utilisent l'ATP pour :

- pompe sodium-potassium ;
- pompe calcium ;
- contraction musculaire ;
- mouvement des cils ;
- déplacement de vésicules ;
- endocytose ;
- exocytose ;
- synthèse protéique ;
- division cellulaire ;
- réparation de l'ADN ;
- maintien du volume cellulaire ;
- fonctionnement neuronal ;
- sécrétion hormonale ;
- réabsorption rénale.

26. ATP et pompe sodium-potassium

La pompe sodium-potassium ATPase consomme beaucoup d'ATP.

Elle fait sortir 3 Na⁺ de la cellule et fait entrer 2 K⁺.

Elle permet de maintenir les gradients ioniques indispensables :

- au potentiel de repos ;
- au potentiel d'action ;
- à la contraction musculaire ;
- au transport actif secondaire ;
- au volume cellulaire.

Une grande partie de l'énergie consommée par une cellule sert à maintenir ces gradients.

27. ATP et muscle

Lors d'une contraction musculaire, l'ATP est nécessaire pour :

- détacher la myosine de l'actine ;
- recharger la tête de myosine ;
- permettre le cycle de contraction ;
- repomper le calcium dans le réticulum sarcoplasmique après contraction.

Sans ATP, le muscle ne peut pas se relâcher normalement.

C'est ce qui explique en partie la rigidité cadavérique après la mort : l'absence d'ATP empêche le détachement normal actine-myosine.

28. ATP et cerveau

Le cerveau consomme beaucoup d'énergie.

Il dépend fortement :

- de l'oxygène ;
- du glucose ;
- de la production continue d'ATP.

Les neurones ont peu de réserves énergétiques.

Une interruption de l'apport en oxygène ou en glucose peut rapidement provoquer un dysfonctionnement neurologique.

C'est pourquoi l'hypoglycémie sévère et l'hypoxie sont dangereuses pour le cerveau.

29. ATP et réserves énergétiques

L'ATP est utilisée très vite.

La cellule ne stocke pas de grandes quantités d'ATP.

Elle doit donc en produire continuellement.

Les principales réserves énergétiques sont :

- glycogène dans le foie et les muscles ;
- triglycérides dans le tissu adipeux ;
- protéines musculaires en situation de jeûne prolongé ou catabolisme important.

Dans le muscle, la phosphocréatine permet de régénérer rapidement de l'ATP pendant les efforts très brefs et intenses.

30. Schéma à insérer

Image conseillée :

Schéma de l'ATP : adénine + ribose + trois phosphates, puis hydrolyse $\text{ATP} \rightarrow \text{ADP} + \text{Pi} + \text{énergie}$.

4.3. Respiration cellulaire

31. Définition

La respiration cellulaire est l'ensemble des réactions qui permettent à la cellule de produire de l'ATP à partir des nutriments, en utilisant l'oxygène.

Elle se déroule principalement dans les mitochondries, sauf la glycolyse qui se déroule dans le cytoplasme.

La respiration cellulaire aérobie utilise l'oxygène comme accepteur final d'électrons.

Elle produit beaucoup plus d'ATP que le métabolisme anaérobie.

32. Objectif de la respiration cellulaire

L'objectif principal est de récupérer l'énergie contenue dans les nutriments pour fabriquer de l'ATP.

Le glucose est souvent pris comme exemple.

Réaction simplifiée :



Cette réaction ne se fait pas en une seule étape. Elle se déroule en plusieurs voies métaboliques successives.

33. Grandes étapes de la respiration cellulaire

La respiration cellulaire comprend trois grandes étapes principales :

1. glycolyse ;
2. cycle de Krebs ;
3. chaîne respiratoire mitochondriale et phosphorylation oxydative.

Étape	Localisation	Rôle principal
Glycolyse	cytoplasme	transforme le glucose en pyruvate
Cycle de Krebs	matrice mitochondriale	oxyde l'acétyl-CoA et produit des transporteurs réduits
Chaîne respiratoire	membrane interne mitochondriale	utilise les électrons pour produire beaucoup d'ATP

34. Transporteurs d'électrons

Pendant la respiration cellulaire, l'énergie est en partie transférée à des transporteurs d'électrons.

Les principaux sont :

- NAD⁺, qui devient NADH ;
- FAD, qui devient FADH₂.

NADH et FADH₂ transportent des électrons riches en énergie vers la chaîne respiratoire mitochondriale.

Ils sont essentiels à la production d'ATP.

Glycolyse

35. Définition

La glycolyse est la première étape de la dégradation du glucose.

Elle se déroule dans le cytoplasme.

Elle ne nécessite pas directement d'oxygène.

Elle transforme une molécule de glucose en deux molécules de pyruvate.

Elle produit aussi :

- un peu d'ATP ;
- du NADH.

36. Bilan simplifié de la glycolyse

Pour une molécule de glucose :

- production de 2 pyruvates ;
- gain net de 2 ATP ;
- production de 2 NADH.

La glycolyse est donc rapide, mais peu rentable en ATP comparée à la respiration mitochondriale complète.

37. Importance de la glycolyse

La glycolyse est importante car :

- elle fournit rapidement de l'ATP ;
- elle peut fonctionner sans oxygène ;
- elle fournit du pyruvate pour la mitochondrie ;
- elle est utilisée par presque toutes les cellules ;
- elle est la seule source d'ATP des globules rouges matures.

Les hématies matures n'ont pas de mitochondries. Elles dépendent donc de la glycolyse anaérobie.

38. Devenir du pyruvate

Après la glycolyse, le pyruvate peut suivre deux grandes voies.

Situation	Devenir du pyruvate
Oxygène suffisant	entrée dans la mitochondrie, transformation en acétyl-CoA
Oxygène insuffisant ou demande rapide	transformation en lactate

Le pyruvate est donc un carrefour métabolique.

Cycle de Krebs

39. Définition

Le cycle de Krebs est une voie métabolique située dans la matrice mitochondriale.
Il est aussi appelé cycle de l'acide citrique ou cycle des acides tricarboxyliques.
Il oxyde l'acétyl-CoA pour produire des transporteurs d'électrons.
Il produit peu d'ATP directement, mais il fournit surtout du NADH et du FADH₂.

40. Acétyl-CoA

Avant d'entrer dans le cycle de Krebs, le pyruvate est transformé en acétyl-CoA.
Cette réaction produit aussi du NADH et libère du CO₂.

L'acétyl-CoA peut provenir :

- du glucose ;
- des acides gras ;
- de certains acides aminés.

C'est un point central du métabolisme énergétique.

41. Rôle du cycle de Krebs

Le cycle de Krebs permet :

- l'oxydation de l'acétyl-CoA ;
- la production de NADH ;
- la production de FADH₂ ;
- la production d'un peu de GTP ou ATP selon les tissus ;
- la libération de CO₂ ;
- la fourniture d'intermédiaires pour d'autres synthèses.

Il est donc à la fois énergétique et métabolique.

42. CO₂ et respiration

Le CO₂ produit par le cycle de Krebs diffuse hors de la cellule, rejoint le sang, puis est transporté vers les poumons.
Les poumons l'éliminent lors de l'expiration.
Cela relie directement le métabolisme cellulaire à la respiration pulmonaire.
Quand les cellules produisent plus de CO₂, la ventilation doit s'adapter pour l'éliminer.

Chaîne respiratoire mitochondriale

43. Définition

La chaîne respiratoire mitochondriale est un ensemble de complexes protéiques situés dans la membrane interne des mitochondries.

Elle reçoit les électrons transportés par NADH et FADH₂.

Ces électrons passent d'un complexe à l'autre.

Cette circulation d'électrons permet de pomper des protons et de créer un gradient électrochimique.

44. Rôle de l'oxygène

L'oxygène est l'accepteur final des électrons.

À la fin de la chaîne respiratoire, l'oxygène reçoit les électrons et se combine avec des protons pour former de l'eau.

Sans oxygène, la chaîne respiratoire ne peut plus fonctionner correctement.

Conséquence :

- NADH et FADH₂ ne sont plus correctement réoxydés ;
- le cycle de Krebs ralentit ;
- la production mitochondriale d'ATP chute ;

- la cellule dépend davantage de la glycolyse anaérobie ;
- les lactates augmentent.

45. Gradient de protons

La chaîne respiratoire utilise l'énergie des électrons pour pomper des protons de la matrice mitochondriale vers l'espace intermembranaire.

Cela crée un gradient de protons.

Ce gradient représente une énergie potentielle.

Les protons veulent revenir vers la matrice.

Ils passent à travers une enzyme appelée ATP synthase.

Phosphorylation oxydative

46. Définition

La phosphorylation oxydative est le processus qui produit de l'ATP grâce à l'énergie du gradient de protons créé par la chaîne respiratoire.

Elle se déroule dans la membrane interne mitochondriale.

Elle dépend de :

- NADH ;
- FADH_2 ;
- chaîne respiratoire ;
- oxygène ;
- ATP synthase ;
- intégrité mitochondriale.

47. ATP synthase

L'ATP synthase est une enzyme située dans la membrane interne mitochondriale.

Elle utilise le passage des protons pour fabriquer de l'ATP à partir d'ADP et de phosphate.

Schéma simplifié :



L'ATP synthase est comme une turbine moléculaire.

Le flux de protons fournit l'énergie nécessaire à la production d'ATP.

48. Production d'ATP

La respiration cellulaire aérobie produit beaucoup plus d'ATP que la glycolyse seule.

Pour une molécule de glucose, le rendement total est souvent estimé autour de 30 à 32 ATP selon les conditions cellulaires.

La glycolyse seule produit seulement 2 ATP nets.

Cela montre pourquoi l'oxygène et les mitochondries sont essentiels à une production énergétique efficace.

49. Importance des mitochondries

Les mitochondries sont centrales pour :

- production d'ATP ;
- métabolisme énergétique ;
- gestion du calcium ;
- production de chaleur ;
- apoptose ;
- stress oxydatif ;
- adaptation cellulaire.

Les organes très dépendants de l'énergie sont très sensibles aux dysfonctionnements mitochondriaux.

Exemples :

- cerveau ;
- cœur ;
- muscles ;
- reins ;
- foie.

50. Respiration cellulaire et clinique

La respiration cellulaire peut être perturbée par :

- hypoxie ;
- ischémie ;
- intoxications ;
- anomalies mitochondriales ;
- sepsis ;
- choc ;
- insuffisance respiratoire ;
- insuffisance circulatoire ;
- déficit enzymatique ;
- toxiques bloquant la chaîne respiratoire.

Exemple :

Dans un choc circulatoire, l'oxygène peut être présent dans le sang, mais mal délivré aux tissus. Les cellules manquent d'oxygène utilisable, passent en métabolisme anaérobie et produisent plus de lactates.

51. Schéma à insérer

Image conseillée :

Schéma global de la respiration cellulaire : glucose glycolyse pyruvate acétyl-CoA cycle de Krebs NADH/FADH₂ chaîne respiratoire ATP + CO₂ + H₂O.

Deuxième image conseillée :

Schéma de mitochondrie avec matrice, membrane interne, chaîne respiratoire, gradient de protons et ATP synthase.

4.4. Métabolisme anaérobie

52. Définition

Le métabolisme anaérobie correspond à la production d'ATP en absence d'utilisation suffisante d'oxygène.

Il repose principalement sur la glycolyse.

Il produit peu d'ATP, mais il est rapide.

Il permet à la cellule de continuer à produire un minimum d'énergie quand la respiration mitochondriale ne peut pas couvrir les besoins.

53. Absence d'oxygène

Quand l'oxygène manque, la chaîne respiratoire mitochondriale ralentit ou s'arrête.

Le NADH ne peut plus être efficacement réoxydé en NAD⁺ par la chaîne respiratoire.

Or la glycolyse a besoin de NAD⁺ pour continuer.

La cellule transforme alors le pyruvate en lactate pour régénérer du NAD⁺.

Cela permet à la glycolyse de continuer temporairement.

54. Fermentation lactique

La fermentation lactique est la transformation du pyruvate en lactate.

Elle permet de régénérer le NAD⁺ nécessaire à la glycolyse.

Schéma simplifié :

Pyruvate lactate

Cette réaction est catalysée par la lactate déshydrogénase.

Elle ne produit pas directement beaucoup d'énergie, mais elle permet de maintenir la glycolyse.

55. Lactates

Les lactates sont produits lorsque la glycolyse est très sollicitée ou lorsque l'oxygène disponible est insuffisant par rapport aux besoins.

Les lactates ne sont pas simplement des "déchets".

Ils peuvent être transportés dans le sang et réutilisés par certains tissus.

Le foie peut reconvertir les lactates en glucose par le cycle de Cori.

Cependant, une augmentation importante des lactates peut témoigner d'un déséquilibre entre besoins énergétiques, oxygénation, perfusion et métabolisme.

56. Métabolisme anaérobie et production d'ATP

La glycolyse anaérobie produit seulement 2 ATP nets par molécule de glucose.

C'est très peu comparé à la respiration aérobie complète.

Mais elle a un avantage :

- elle est rapide ;
- elle peut fonctionner sans oxygène ;
- elle permet une survie temporaire dans certaines conditions.

Ce système est utile à court terme, mais insuffisant à long terme pour les organes très dépendants de l'énergie.

57. Effort musculaire

Lors d'un effort intense, la demande en ATP augmente brutalement.

Au début ou pendant les efforts très intenses, les muscles peuvent produire une partie de leur énergie par glycolyse anaérobie.

Cela entraîne une augmentation de la production de lactates.

Exemples :

- sprint ;
- effort explosif ;
- port de charge intense ;
- exercice très rapide ;
- effort dépassant les capacités d'oxygénation du muscle.

La sensation de brûlure musculaire pendant un effort intense n'est pas uniquement due aux lactates. Elle est liée à plusieurs phénomènes métaboliques, dont l'accumulation d'ions H^+ , de métabolites et la fatigue musculaire.

58. Lactates et récupération

Après l'effort, les lactates peuvent être :

- utilisés comme carburant par certains tissus ;
- reconvertis en glucose par le foie ;
- oxydés dans les mitochondries quand l'oxygène est disponible ;
- éliminés progressivement de la circulation.

La récupération nécessite donc une restauration de l'oxygénation, de la circulation et du métabolisme mitochondrial.

59. Hypoxie cellulaire

L'hypoxie cellulaire correspond à un manque d'oxygène au niveau des cellules.

Elle peut être due à plusieurs mécanismes.

Mécanisme	Exemple
Manque d'oxygène dans le sang	insuffisance respiratoire, hypoxémie
Manque d'hémoglobine	anémie sévère
Mauvaise circulation	choc, ischémie, insuffisance cardiaque
Défaut d'utilisation cellulaire	intoxication, dysfonction mitochondriale
Augmentation majeure des besoins	sepsis, effort intense, fièvre sévère

L'hypoxie cellulaire pousse la cellule vers le métabolisme anaérobie.

60. Ischémie

L'ischémie correspond à une diminution ou un arrêt de l'apport sanguin à un tissu.

Elle entraîne un manque :

- d'oxygène ;
- de glucose ;
- de nutriments ;
- d'élimination des déchets.

L'ischémie provoque rapidement une baisse d'ATP.

Si elle persiste, elle peut entraîner une souffrance cellulaire, puis une nécrose.

Exemples :

- infarctus du myocarde ;
- AVC ischémique ;
- ischémie aiguë de membre ;
- ischémie mésentérique.

61. Lactates en clinique

Les lactates sanguins peuvent augmenter dans plusieurs situations.

Exemples :

- choc ;
- sepsis ;
- hypoxie tissulaire ;
- convulsions ;
- effort intense ;
- insuffisance hépatique ;
- certains médicaments ou toxiques ;
- troubles mitochondriaux ;
- arrêt cardiaque ;
- hypoperfusion.

Un lactate élevé n'a pas une seule signification, mais il doit toujours être interprété dans le contexte clinique.

Dans les situations aiguës, il peut être un marqueur de gravité et de mauvaise perfusion tissulaire.

62. Acidose lactique

L'acidose lactique correspond à une acidose métabolique associée à une accumulation importante de lactates.

Elle peut survenir quand la production de lactates dépasse leur utilisation ou leur élimination.

Situations possibles :

- choc septique ;
- choc hémorragique ;
- hypoxie sévère ;
- arrêt cardiaque ;
- intoxications ;
- insuffisance hépatique ;
- certaines défaillances mitochondriales.

C'est une situation potentiellement grave.

63. Métabolisme anaérobie : avantage et limite

Aspect	Avantage	Limite
Vitesse	rapide	rendement faible
Oxygène	peut fonctionner sans O ₂	ne peut pas remplacer longtemps l'aérobie
ATP	produit un minimum d'énergie	seulement 2 ATP/glucose
Lactates	régénèrent le NAD ⁺	accumulation possible
Survie cellulaire	utile temporairement	insuffisant si hypoxie prolongée

64. Schéma à insérer

Image conseillée :

Schéma comparatif : avec oxygène = pyruvate vers mitochondrie ; sans oxygène = pyruvate transformé en lactate.

4.5. Stress oxydatif

65. Définition

Le stress oxydatif correspond à un déséquilibre entre la production de radicaux libres et les capacités antioxydantes de la cellule.

Quand les radicaux libres sont produits en quantité excessive ou insuffisamment neutralisés, ils peuvent endommager les structures cellulaires.

Les principales cibles sont :

- lipides membranaires ;
- protéines ;
- ADN ;
- mitochondries ;
- enzymes ;
- membranes cellulaires.

Le stress oxydatif est impliqué dans le vieillissement cellulaire, l'inflammation et de nombreuses pathologies.

Radicaux libres

66. Définition

Un radical libre est une molécule ou un atome possédant un électron non apparié.

Cette configuration le rend très réactif.

Il cherche à capter ou donner des électrons pour se stabiliser.

Cette réactivité peut provoquer des réactions en chaîne et endommager les molécules voisines.

67. Espèces réactives de l'oxygène

Les radicaux libres les plus connus sont les espèces réactives de l'oxygène.

Exemples :

- anion superoxyde ;
- radical hydroxyle ;
- peroxyde d'hydrogène, qui n'est pas un radical libre strict mais une espèce réactive importante.

Ces molécules peuvent être produites naturellement par le métabolisme cellulaire, notamment au niveau mitochondrial.

68. Production physiologique des radicaux libres

Les radicaux libres ne sont pas toujours anormaux.

Ils sont produits normalement en petite quantité.

Ils peuvent participer :

- à la signalisation cellulaire ;
- à la défense immunitaire ;
- à la destruction de microbes par certains leucocytes ;
- à l'adaptation cellulaire.

Le problème apparaît lorsque la production devient excessive ou que les défenses antioxydantes sont dépassées.

69. Sources de radicaux libres

Les radicaux libres peuvent provenir de plusieurs sources.

Source	Exemple
Mitochondries	chaîne respiratoire
Inflammation	activation des cellules immunitaires
Pollution	substances oxydantes
Tabac	radicaux libres et toxiques
Rayonnements UV	atteinte cutanée et ADN
Alcool	métabolisme hépatique
Ischémie-reperfusion	retour d'oxygène après ischémie
Hyperglycémie chronique	stress oxydatif vasculaire
Certains toxiques	médicaments, métaux, produits chimiques

Oxydation

70. Définition

L'oxydation correspond à une perte d'électrons.

Une molécule oxydée a perdu des électrons.

Dans un sens plus large, on parle aussi d'oxydation lorsque des molécules sont modifiées par des espèces réactives de l'oxygène.

L'oxydation peut altérer :

- lipides ;
- protéines ;
- ADN ;
- mitochondries.

71. Exemple : oxydation des lipides

Les membranes cellulaires contiennent des lipides.

Les radicaux libres peuvent attaquer ces lipides.

Cela provoque une peroxydation lipidique.

Conséquences possibles :

- perte de fluidité membranaire ;
- altération des récepteurs ;
- fuite membranaire ;
- dysfonction cellulaire ;
- inflammation.

72. Exemple : oxydation de l'ADN

Les radicaux libres peuvent endommager l'ADN.

Cela peut provoquer :

- mutations ;
- erreurs de réparation ;
- arrêt du cycle cellulaire ;
- apoptose ;
- risque de transformation tumorale selon contexte.

La cellule possède des systèmes de réparation de l'ADN, mais ils peuvent être dépassés.

Réduction

73. Définition

La réduction correspond à un gain d'électrons.

Oxydation et réduction sont toujours liées.

Quand une molécule perd des électrons, une autre les gagne.

On parle de réaction d'oxydoréduction, ou réaction redox.

74. Réactions redox dans le métabolisme

Les réactions redox sont essentielles dans le métabolisme énergétique.

Exemples :

- NAD^+ accepte des électrons et devient NADH ;
- FAD accepte des électrons et devient FADH_2 ;
- la chaîne respiratoire transfère des électrons ;
- l'oxygène accepte les électrons en fin de chaîne.

La production d'ATP dépend donc de réactions d'oxydoréduction contrôlées.

Le stress oxydatif correspond à une perte de contrôle ou un excès de réactions oxydantes.

Antioxydants

75. Définition

Les antioxydants sont des molécules ou systèmes capables de neutraliser les radicaux libres ou de limiter leurs effets.

Ils protègent les cellules contre les dommages oxydatifs.

Ils peuvent être :

- enzymatiques ;
- non enzymatiques ;
- produits par l'organisme ;
- apportés par l'alimentation.

76. Antioxydants enzymatiques

Les principales enzymes antioxydantes comprennent :

Enzyme	Rôle
Superoxyde dismutase	transforme le superoxyde en peroxyde d'hydrogène
Catalase	transforme le peroxyde d'hydrogène en eau et oxygène
Glutathion peroxydase	réduit les peroxydes
Glutathion réductase	régénère le glutathion réduit

Ces enzymes limitent les effets toxiques des espèces réactives de l'oxygène.

77. Antioxydants non enzymatiques

Exemples d'antioxydants non enzymatiques :

- glutathion ;
- vitamine C ;
- vitamine E ;
- caroténoïdes ;
- polyphénols ;
- acide urique dans certaines limites ;
- coenzyme Q10 ;
- certaines molécules alimentaires.

Ils participent à la neutralisation des radicaux libres.

78. Équilibre oxydants / antioxydants

Le corps a besoin d'un équilibre.

Trop de radicaux libres peut endommager les cellules.

Mais une absence totale de signaux oxydants n'est pas souhaitable non plus, car certaines espèces réactives participent à la signalisation et à la défense immunitaire.

L'objectif physiologique est donc l'équilibre, pas l'absence totale d'oxydation.

Vieillesse cellulaire

79. Stress oxydatif et vieillissement

Le stress oxydatif participe au vieillissement cellulaire.

Au fil du temps, les dommages oxydatifs peuvent s'accumuler.

Ils peuvent toucher :

- ADN ;
- protéines ;
- lipides ;
- mitochondries ;
- membranes ;
- systèmes de réparation.

Les mitochondries sont particulièrement concernées, car elles produisent de l'énergie mais aussi une partie des espèces réactives de l'oxygène.

80. Sénescence cellulaire

La sénescence cellulaire est un état dans lequel une cellule ne se divise plus, mais reste vivante et active métaboliquement.

Elle peut être déclenchée par :

- dommages de l'ADN ;
- stress oxydatif ;
- raccourcissement des télomères ;
- signaux inflammatoires ;
- stress métabolique.

Les cellules sénescents peuvent sécréter des molécules inflammatoires et modifier leur environnement.

81. Apoptose et nécrose

Quand les dommages cellulaires sont importants, la cellule peut mourir.

Il existe plusieurs formes de mort cellulaire.

Type	Description
Apoptose	mort cellulaire programmée, contrôlée
Nécrose	mort cellulaire accidentelle, souvent inflammatoire

L'apoptose permet d'éliminer proprement des cellules inutiles ou dangereuses.

La nécrose survient souvent lors d'une agression sévère, comme ischémie, toxique, traumatisme ou hypoxie prolongée.

82. Ischémie-reperfusion

L'ischémie correspond au manque d'apport sanguin.

La reperfusion correspond au retour du sang et de l'oxygène.

Paradoxalement, le retour brutal de l'oxygène peut produire beaucoup de radicaux libres.

Cela peut aggraver les lésions cellulaires.

Ce phénomène s'appelle lésion d'ischémie-reperfusion.

Il est important dans :

- infarctus ;
- AVC ;
- transplantation ;
- chirurgie vasculaire ;
- arrêt cardiaque ;
- certains états de choc.

83. Stress oxydatif et pathologies

Le stress oxydatif est impliqué dans de nombreuses situations pathologiques.

Exemples :

- inflammation chronique ;
- athérosclérose ;
- diabète ;
- maladies neurodégénératives ;
- cancer ;
- vieillissement cutané ;
- insuffisance respiratoire chronique ;
- maladies cardiovasculaires ;
- atteintes hépatiques ;
- lésions d'ischémie-reperfusion.

Il n'est pas toujours la cause unique, mais il participe souvent aux mécanismes de lésion.

84. Schéma à insérer

Images conseillées :

Schéma stress oxydatif : production de radicaux libres dommages ADN/protéines/lipides antioxydants qui neutralisent.

Schéma oxydation-réduction : perte d'électrons = oxydation, gain d'électrons = réduction.

Synthèse du chapitre

Le métabolisme cellulaire correspond à l'ensemble des réactions chimiques qui permettent aux cellules de vivre, produire de l'énergie, fabriquer des molécules et maintenir leur équilibre.

L'anabolisme construit des molécules et consomme de l'énergie.

Le catabolisme dégrade des molécules et libère de l'énergie.

Les enzymes accélèrent et contrôlent les réactions chimiques cellulaires. Leur activité dépend notamment de la température, du pH, des substrats, des cofacteurs et des inhibiteurs.

L'ATP est la principale monnaie énergétique de la cellule. Son hydrolyse libère de l'énergie utilisée pour le transport actif, la contraction musculaire, la synthèse de molécules, la sécrétion, la division cellulaire et le maintien des gradients ioniques.

La respiration cellulaire aérobie produit beaucoup d'ATP. Elle comprend la glycolyse, le cycle de Krebs, la chaîne respiratoire mitochondriale et la phosphorylation oxydative. L'oxygène est l'accepteur final des électrons dans la chaîne respiratoire.

En absence d'oxygène suffisant, la cellule utilise davantage le métabolisme anaérobie. Le pyruvate est transformé en lactate pour régénérer du NAD^+ et permettre à la glycolyse de continuer. Ce système produit peu d'ATP, mais il est rapide et utile temporairement.

Le stress oxydatif apparaît lorsque la production de radicaux libres dépasse les capacités antioxydantes de la cellule. Il peut endommager les lipides, les protéines, l'ADN et les mitochondries. Il participe au vieillissement cellulaire, à l'inflammation et à de nombreuses pathologies.

À retenir absolument

Notion	Définition courte
Métabolisme	ensemble des réactions chimiques cellulaires
Anabolisme	réactions de construction, consomment de l'énergie
Catabolisme	réactions de dégradation, libèrent de l'énergie
Enzyme	protéine qui accélère une réaction
Substrat	molécule sur laquelle agit une enzyme
ATP	principale monnaie énergétique cellulaire
Hydrolyse ATP	$\text{ATP} \rightarrow \text{ADP} + \text{Pi} + \text{énergie}$
Glycolyse	glucose → pyruvate, dans le cytoplasme
Pyruvate	carrefour entre aérobie et anaérobie
Acétyl-CoA	entrée dans le cycle de Krebs
Cycle de Krebs	produit NADH , FADH_2 et CO_2
Chaîne respiratoire	transfert d'électrons dans la mitochondrie
Oxygène	accepteur final des électrons
Phosphorylation oxydative	production d'ATP par ATP synthase

Notion	Définition courte
Métabolisme anaérobie	production d'ATP sans utilisation suffisante d'O ₂
Lactate	produit à partir du pyruvate en anaérobie
Hypoxie cellulaire	manque d'oxygène au niveau des cellules
Ischémie	diminution ou arrêt de l'apport sanguin
Radical libre	molécule très réactive avec électron non apparié
Oxydation	perte d'électrons
Réduction	gain d'électrons
Antioxydant	neutralise ou limite les radicaux libres
Stress oxydatif	excès d'oxydants par rapport aux défenses
Sénescence	cellule vivante mais arrêtée en division
Apoptose	mort cellulaire programmée
Nécrose	mort cellulaire accidentelle et inflammatoire

Mini-évaluation

Réponds aux questions suivantes :

1. Qu'est-ce que le métabolisme cellulaire ?
2. Quelle est la différence entre anabolisme et catabolisme ?
3. Pourquoi les réactions chimiques cellulaires doivent-elles être contrôlées ?
4. Qu'est-ce qu'une enzyme ?
5. Qu'est-ce qu'un substrat ?
6. Pourquoi la température influence-t-elle l'activité enzymatique ?
7. Pourquoi le pH influence-t-il les enzymes ?
8. Qu'est-ce que l'ATP ?
9. De quoi est composée l'ATP ?
10. Que produit l'hydrolyse de l'ATP ?
11. Pourquoi dit-on que l'ATP est la monnaie énergétique de la cellule ?
12. Cite trois utilisations cellulaires de l'ATP.
13. Pourquoi les neurones dépendent-ils fortement de la production d'ATP ?
14. Quelles sont les grandes étapes de la respiration cellulaire ?
15. Où se déroule la glycolyse ?
16. Que produit la glycolyse ?
17. Quel est le devenir du pyruvate en présence d'oxygène ?
18. Quel est le rôle du cycle de Krebs ?
19. Que transportent NADH et FADH₂ ?
20. Où se situe la chaîne respiratoire mitochondriale ?
21. Quel est le rôle de l'oxygène dans la chaîne respiratoire ?
22. Qu'est-ce que la phosphorylation oxydative ?
23. Quel est le rôle de l'ATP synthase ?
24. Pourquoi la respiration aérobie produit-elle plus d'ATP que la glycolyse seule ?
25. Qu'est-ce que le métabolisme anaérobie ?
26. Pourquoi le pyruvate est-il transformé en lactate ?
27. Pourquoi les lactates peuvent-ils augmenter lors d'un effort intense ?
28. Qu'est-ce que l'hypoxie cellulaire ?
29. Quelle est la différence entre hypoxie et ischémie ?
30. Pourquoi un lactate élevé peut-il être un marqueur de gravité ?
31. Qu'est-ce que le stress oxydatif ?
32. Qu'est-ce qu'un radical libre ?
33. Quelle est la différence entre oxydation et réduction ?
34. Quels sont les rôles des antioxydants ?
35. Quelles structures cellulaires peuvent être abîmées par le stress oxydatif ?
36. Pourquoi les mitochondries sont-elles liées au stress oxydatif ?
37. Qu'est-ce que l'ischémie-reperfusion ?
38. Comment le stress oxydatif participe-t-il au vieillissement cellulaire ?