

1

Notions clés

- La respiration cellulaire implique l'oxydation et la réduction des transporteurs d'électrons.
- La phosphorylation des molécules les rend moins stables.
- Dans la glycolyse, le glucose est converti en pyruvate dans le cytoplasme.
- La glycolyse apporte un petit gain net d'ATP sans utiliser de l'oxygène.

2

Notions clés

- Dans la respiration cellulaire aérobie, le pyruvate est décarboxylé et oxydé, puis converti en composé acétyle et fixé à la coenzyme A pour former l'acétyl-coenzyme A dans la réaction de transition.
- Dans le cycle de Krebs, l'oxydation des groupes acétyle est couplée à la réduction des transporteurs d'hydrogène, en libérant du dioxyde de carbone.
- L'énergie libérée par les réactions d'oxydation est transportée jusqu'aux crêtes mitochondriales par la NAD et la FAD réduites

3

Notions clés

- Le transfert d'électrons entre les transporteurs de la chaîne de transport d'électrons, dans la membrane des crêtes, est couplé au pompage de protons.
- Dans la chimiosmose, les protons diffusent par l'ATP-synthase pour produire de l'ATP.
- Il faut que de l'oxygène se lie aux protons libres, ce qui forme de l'eau, pour que le gradient d'hydrogène soit maintenu.
- La structure de la mitochondrie est adaptée à la fonction qu'elle exerce.

4

Applications et compétences

- Application : la tomographie électronique utilisée pour produire des images des mitochondries actives.
- Compétence : l'analyse des diagrammes des voies de la respiration aérobie pour en déduire où se produisent les réactions de décarboxylation et d'oxydation.
- Compétence : l'annotation d'un diagramme d'une mitochondrie pour indiquer les adaptations à sa fonction.

5

Directives et informations supplémentaires

- Les noms des composés intermédiaires de la glycolyse et du cycle de Krebs ne sont pas requis.

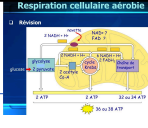
6

Exemples de questions à l'examen

Résumer les processus de la glycolyse (6 points)

Décrire le processus qui a lieu dans la mitochondrie lorsque l'oxygène est présente (8 points)

Explique comment l'énergie chimique est produite par la chaine de transport d'électrons et la chimiosmose (8 points)



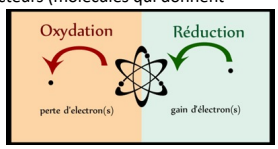
7

Réactions d'oxydoréduction

Oxydant + Réducteur → Réducteur + Oxydant

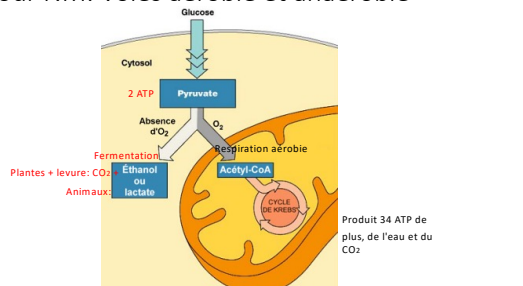
oxydation (perte d'électrons)
réduction (gain d'électrons)

- Oxydation: Perte d'électrons (et d'énergie)
- Réduction: Gain d'électrons (et d'énergie)
- Ces deux processus ont lieu simultanément
- Principaux coupleurs d'oxydants/réducteurs (molécules qui donnent et reçoivent facilement des électrons)
 - NAD⁺ / NADH+H
 - NADP⁺ / NADPH+H⁺
 - FAD / FADH₂



8

Retour NM: Voies aérobie et anaérobie



Glucose → Pyruvate (2 ATP)

Absence d'O₂: Fermentation (Ethanol ou lactate)

Plantes + levure: CO₂

Animaux: lactate

Présence d'O₂: Respiration aérobie (Acétyl-CoA → Cycle de Krebs → Chaine de transport)

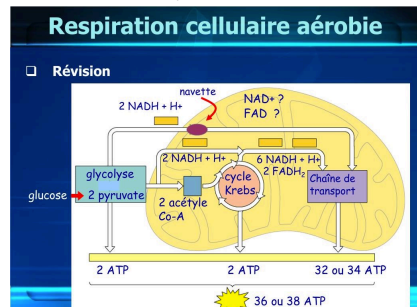
Produit 34 ATP de plus, de l'eau et du CO₂

9

Avant d'aller en détail, voici un résumé

Respiration cellulaire aérobie

Revision



glucose → glycolyse (2 ATP) → 2 pyruvate

2 pyruvate → 2 acétyl Co-A

2 acétyl Co-A → cycle de Krebs (2 ATP) → 6 NADH + H⁺, 2 FADH₂

6 NADH + H⁺, 2 FADH₂ → Chaine de transport (32 ou 34 ATP)

Total: 36 ou 38 ATP

10

Glycolyse

- Se déroule dans le cytoplasme
- Une réaction d'oxydation qui transforme le glucose en pyruvates
- Cette réaction requière un investissement de 2 ATP, toutefois l'oxydation produisant de l'ATP à lieu 2 fois, et chaque réaction produit 2 ATP
- Le bilan est alors 2 ATP produits en totale
- 2x(2 ATP) – 2 ATP = 2 ATP

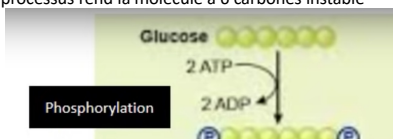
$$C_6H_{12}O_6 \xrightarrow[\text{étape 1 et 3}]{2 \text{ ATP}} 2 \times (NAD^+) \xrightarrow[\text{étape 6}]{2 \times (NADH + H^+)} 2 \times C_3H_4O_3$$

glucose → 2 x (NAD⁺) → 2 x (NADH + H⁺) → acide pyruvique

11

Glycolyse: phosphorylation

- Ce processus requière l'investissement de 2 ATP et d'une molécule de glucose
- Un groupement phosphate de chaque ATP s'attache de chaque bout du glucose (chaîne de 6 carbones)
- Donc on a maintenant 2 ADP et une molécule à 6 carbones avec 2 groupements phosphate
- Ce processus rend la molécule à 6 carbones instable



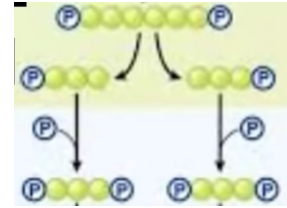
12

Glycolyse: clivage du glucose

- Après que la molécule à 6 carbones devient instable le processus de clivage prend place
- Ce processus est quand la molécule de 6 carbones se divise en deux pour former deux molécules à trois carbones chacune avec un groupement phosphate ajouté
- Maintenant un phosphate inorganique (libre dans le cytoplasme) s'attache à l'autre bout de la molécule à 3 carbones. Donc les deux molécules de 3 carbones ont maintenant 2 groupements phosphate chacune.

13

Clivage du glucose



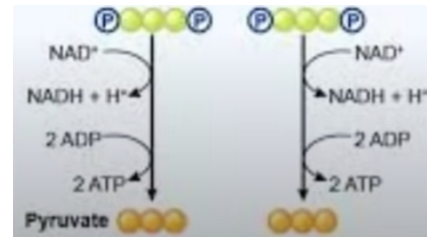
14

Glycolyse: Oxydation

- Chaque fois qu'on a une réaction d'oxydation on a forcément une réaction de réduction
- Dans ce cas, les **molécules à 3 carbones** vont perdre des électrons/énergie (oxydation), alors un autre particule doit gagner des électrons/énergie: **le NAD+ qui deviendra du NADH (réduction)**
- Cette réaction se fait pour chacune des molécules à 3 carbones, donc avec un molécule de glucose, on produira 2 molécules de NADH (molécules à haute énergie)
- On utilise également chacun des groupements phosphate des deux molécules à 3 carbones pour phosphoryler des 4 ADP en 4 molécules d'ATP
- Les molécules à 3 carbones sont maintenant nommées des pyruvates (ou acides pyruviques)

15

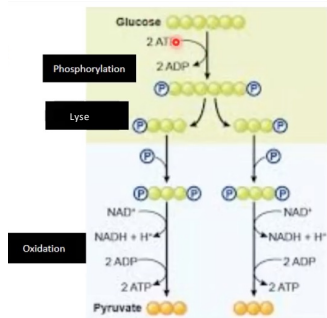
Oxydation



16

Glycolyse: résumé

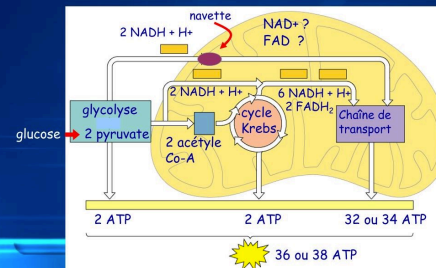
- Réactifs: 1 molécule de glucose, 2 ATP, 2 NAD, 2 phosphores
- Produits: 2 Pyruvates, 4 ATP, 2 NADH
- Total: 2 ATP produits



17

Respiration cellulaire aérobie

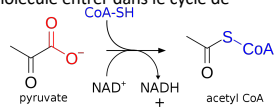
□ Révision



18

Décarboxylation du pyruvate (Link Reaction)

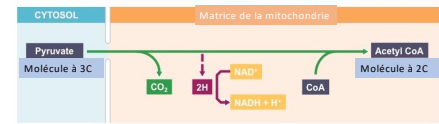
- Les pyruvates entrent dans la mitochondrie, puis se font décapiter (chacun va perdre 1 groupement carbone) qui va être relâché sous forme de CO₂
- En brisant la liaison carbone-carbone, beaucoup d'énergie est relâchée et cette énergie va être utilisé pour réduire le NAD⁺ en NADH
- Ensuite, pour laisser la nouvelle molécule entrer dans le cycle de Krebs, un co-enzyme A est ajouté



19

Décarboxylation du pyruvate

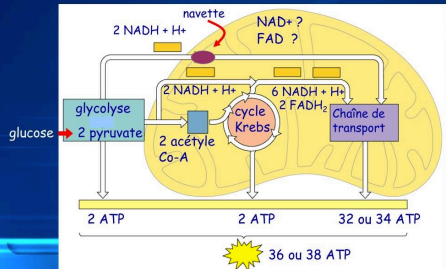
- Donc, on commence avec 2 pyruvates (chaîne de 3 carbones), puis une réaction d'oxydation/réduction prend place et on termine avec 2 Acétyl-CoA, 2 molécules de CO₂ et 2 molécules de NADH
- Le produit principal, l'Acétyl-CoA, peut maintenant entrer dans le cycle de Krebs



20

Respiration cellulaire aérobie

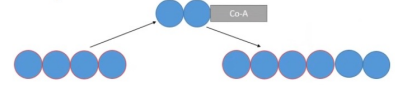
□ Révision



21

Cycle de Krebs

- À lieu dans la matrice de la mitochondrie
- Pour chaque glucose, il y a deux molécule à 2 carbones «Acétyl-CoA»
 - Ainsi: pour chaque molécule de glucose, le cycle de Krebs se produit deux fois
- L'acétyl-CoA va être récupéré par un composé à quatre carbones nommé oxaloacétate (nom n'est pas à savoir)
- Ces deux molécules ensemble deviennent un composé à 6 carbones
- Le coenzyme A, n'étant plus nécessaire se détache



22

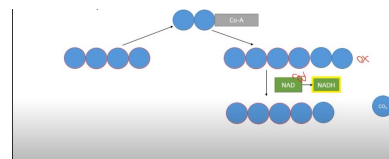
Cycle de Krebs

- Nous allons maintenant aller d'une molécule de 6 carbones à 5 carbones (décarboxylation)
- Ceci va relâcher une molécule de CO₂
- Quand l'on brise le lien entre 2 carbones, il y aura de l'énergie libérée (et un électron), ainsi, il y a oxydation

23

Cycle de Krebs

- Dans ce cas, la molécule à 6 carbones est oxydée (relâche de l'énergie et un electron), le NAD est réduit en NADH (gagné de l'énergie et un electron)



24

Cycle de Krebs

- Ensuite, on ira d'une molécule de 5 carbones à 4 carbones. Nous allons répéter le même processus d'oxydoréduction:
 - Oxydation de la molécule à 5 carbones, réduction du NAD en NADH et relâchement d'une molécule de CO₂
- Cette molécule à 4 carbones sera réutilisée à la première partie du cycle

25

Cycle de Krebs

- Le composé à 4 carbones possède encore quelques électrons résiduels du temps où il était lié à l'acétyl-CoA, donc on peut encore l'oxyder davantage
- Lorsqu'il se fait oxyder, on est en mesure de faire les réductions suivantes
 - NAD → NADH
 - FAD → FADH₂
 - ADP → ATP

Les 2 carbones provenant de l'acétyl-CoA son maintenant sous forme des molécules CO₂

Rappel: le cycle se fait 2 fois pour chaque glucose

26

Cycle de Krebs

- On débute le cycle de Krebs avec:
 - 2 acétyl-CoA (2C)
- Le bilan:
 - 4 CO₂
 - 6 NADH
 - 2 FADH₂
 - 2 ATP
- Ces transporteurs d'électrons à haute énergie (NADH et FADH₂) vont transporter leur énergie provenant du glucose original à l'étape suivante

27

Respiration cellulaire aérobie

□ Révision

glucose → 2 pyruvate → 2 acétyl Co-A → cycle Krebs → 2 NADH + H⁺ → navette → 2 NAD⁺ + ? FAD ? → 6 NADH + H⁺ / 2 FADH₂ → Chaîne de transport → 32 ou 34 ATP

2 ATP (from glycolysis) + 2 ATP (from cycle Krebs) + 32 ou 34 ATP (from chain of transport) = 36 ou 38 ATP

28

La chaîne de transport d'électrons et la chimiosmose

À présent, la décarboxylation des pyruvates et le Cycle de Krebs ont eu lieu dans la matrice de la mitochondrie

La CTE et la Chimiosmose sont des processus qui ont lieu en même temps et se font sur les crêtes de la membrane interne

Schéma de la mitochondrie

- 1 - Membrane externe
- 2 - Espace intermembranaire
- 3 - Membrane interne
- 4 - Matrice
- 5 - Crêtes

©Cycledekrebs.fr

29

- Afin de t'orienter: trouver où les ions d'Hydrogène (H⁺) traversent l'ATP synthase (l'enzyme/pompe) qui permet la formation de l'ATP par l'ADP
- La direction vers laquelle elles se dirigent est la matrice, elles proviennent de l'espace intermembranaire

Membrane externe
Espace intermembranaire
Membrane interne
Matrice

Complexes: I (NADH + H⁺ → NAD⁺ + H⁺), II (FADH₂ → FAD), III (1/2 O₂ + 2H⁺ → H₂O), IV (ATP synthase: ADP + P_i → ATP)

30

- Les transporteurs dans la Chaîne de Transport d'Électrons sont des protéines transmembranaires de la membrane interne
- Les molécules à haute énergie/porteurs d'électrons (NADH et FADH₂) vont donner leurs électrons à ces protéines qui prendront de l'énergie/électrons
- C'est-à-dire, NADH et FADH₂ sont oxydés, les protéines sont réduites

31

- Ainsi, ces protéines sont également des pompes qui envoient des grandes quantités d'ions H⁺ dans la mince espace intermembranaire, créant un fort gradient de concentration
- Les ions H⁺ pourront retourner passivement dans la matrice (par diffusion) dans la matrice par l'entremise d'ATP synthase

32

- ATP synthase (étant une protéine de transport) est également une enzyme qui fonctionne similairement à une turbine.
- Alors que les ions H⁺ y passent au travers, il y a énergie cinétique qui lui permet de catalyser la transformation d'ADP en ATP (**chimiosmose**)

33

- À la fin de la CTÉ, on doit se débarrasser de l'électron qui a été transportée
- Le dernier accepteur d'électron est l'oxygène (il se fait réduire)
- L'oxygène en combinaison avec 2 molécules d'H⁺ vont ainsi former H₂O

34

- Résumé:
 - Se fait sur les crêtes
 - Débuté avec NADH, FADH₂ et l'oxygène
 - Termine avec 34 ATP et H₂O

35

caractéristiques de la mitochondrie

- Membrane externe : contient des protéines de transport pour faire entrer le pyruvate dans les mitochondries pour la chaîne de transport d'électron. Il permet également de séparer son contenu du reste de la cellule.
- Espace intermembranaire : espaces ouvertes à l'intérieur des mitochondries qui accumulent les protons (la concentration accrue d'ions hydrogène permettant une diffusion passive pour le processus d'ATP synthase).
- Membrane interne : contient la chaîne de transport d'électrons et l'ATP synthase pour la phosphorylation oxydative.
- Matrice : Possède des enzymes appropriées et un pH adéquat pour le cycle de Krebs.
- Crêtes : rangées de membranes pliées maximisant la surface dans laquelle se produit la chaîne de transport d'électron.

Schéma de la mitochondrie

©Cycledekrebs.fr

36

Exercice 1: Résumer le processus de la glycolyse (6pts)

La glycolyse, la voie métabolique qui transforme le glucose en acide pyruvique pour les besoins de l'ATP synthase,

- À lieu dans le cytoplasme.
- Le glucose (hexose) est phosphorylé grâce à l'ATP.
- La molécule résultante (l'hexose-phosphate) est divisée en deux pour former 2 trioses phosphatés
- Oxydation de la molécule à 3 carbones. Électron et ion d'hydrogène libre s'attache ensuite à une molécule de NAD pour former du NADH.
- Le processus de glycolyse produit 4 ATP mais, en raison de l'ATP consommé pour phosphoryler le glucose à la deuxième phase, nous ne gagnons que 2 ATP.
- Le produit dérivé de la glycolyse est la création de deux molécules de pyruvate.

37

Exercice 2: Décrire les processus de la respiration cellulaire aérobie. (8pts)

- Le pyruvate est décarboxylé (séparation du CO₂) et le NAD est réduit en NADH;
 - La molécule à deux carbones (groupement acétyle) réagit avec le coenzyme A pour former l'acétyl-CoA.
 - L'acétyl-CoA entre dans le cycle de Krebs.
 - Deux molécules CO₂ sont éliminées (déchets de la réaction)
 - Les molécules riches en électron/énergie sont produites (par réduction) NADH + H⁺ / FADH₂;
 - Chaque tour du cycle produit 3 NADH + H⁺ et 1 FADH₂;
 - 1 ATP est formé par pyruvate à chaque tour (par phosphorylation au niveau du substrat).
 - Le NADH + H⁺ et le FADH₂ entrent dans la chaîne de transport des électrons.
 - L'énergie libérée par la chaîne de transport d'électrons est utilisée dans la phosphorylation oxydative pour la synthèse d'ATP.
 - Lorsque les électrons se déplacent le long de la chaîne de transport, les protons se déplacent dans l'espace intermembranaire.
 - Cela crée un gradient de H⁺ à travers la membrane.
 - L'ATP est synthétisée par le flux (passif) de retour de H⁺ à travers la membrane par l'ATP synthase.
 - L'ATP est synthétisée par chimiosmose
 - La CTE réduit l'oxygène qui sera le récepteur final de l'hydrogène (et d'électrons) qui crée de l'eau
- Il est possible d'accrocher ces points sous forme d'un diagramme /schéma légendé.

38

Exercice 3: Expliquer comment l'ATP est générée par la chaîne de transport des électrons et la chimiosmose. (8pts)

- Les molécules NAD et FAD sont réduites par l'ajout de deux atomes H / 2 électrons
- NADH produit dans la glycolyse (par le cycle de liaison + cycle de Krebs)
- Le NADH et le FADH₂ fournissent des électrons / atomes d'hydrogènes à la chaîne de transport des électrons
- La CTE se retrouve dans la membrane interne / crêtes de la mitochondrie
- Ces électrons libèrent de l'énergie lorsqu'ils se déplacent le long de la chaîne de transport (de porteur à porteur).
- Les électrons qui se trouvent à la fin de la chaîne sera accepté par de l'oxygène/O est le dernier accepteur d'électron.
- Les protéines de la membrane mitochondriale interne agissent comme des pompes à protons (H⁺).
- Elles créent un gradient à travers la membrane mitochondriale interne (concentration de H⁺ plus élevée dans l'espace intermembranaire que dans la matrice).
- Les électrons de la chaîne de transport sont utilisés pour générer ce gradient (alimenter ces pompes).
- L'ATP synthase est une enzyme située dans cette membrane mitochondriale interne (crêtes).
- L'énergie est libérée lors de leur passage le long du gradient/au travers de l'ATP synthase
- L'ATP synthase transforme l'ADP en ATP/ phosphorylation de l'ADP.
- La phosphorylation oxydative «est la production d'ATP en utilisant l'énergie provenant de l'oxydation des aliments.»

39