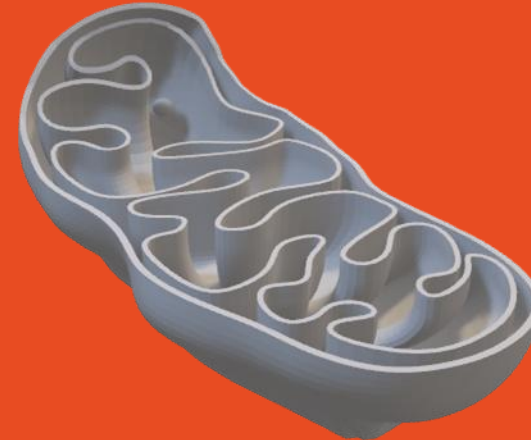
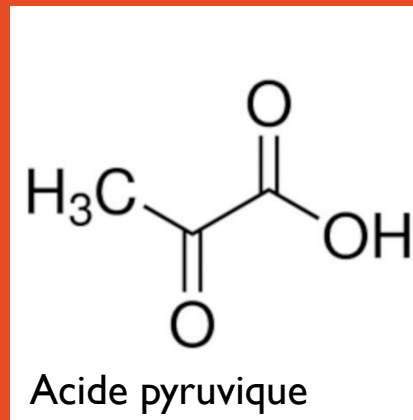
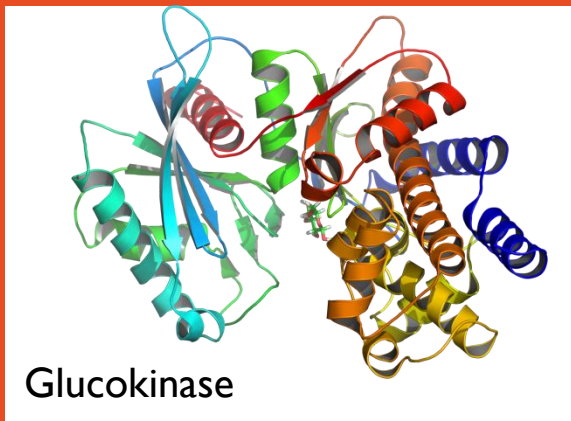


SV-E-2 LE DEVENIR DE LA MATIÈRE ORGANIQUE

SV- E LE MÉTABOLISME CELLULAIRE



OBJECTIFS D'APPRENTISSAGE

Savoirs visés	Capacités exigibles
<p>Dans les cellules, aussi bien autotrophes qu'hétérotrophes, la matière organique a trois devenirs : elle peut (1) être stockée ou exportée, (2) servir à la biosynthèse de nouvelles molécules organiques, ou (3) entrer dans les voies cataboliques fournissant son énergie à la cellule.</p>	<ul style="list-style-type: none">- Réaliser des colorations de tissus afin d'identifier différentes réserves cellulaires au microscope optique.
<p>(1) Le stockage de la matière organique permet de constituer des réserves. Chez les Chlorophytes, les trioses phosphates produits par le cycle de Calvin sont stockés transitoirement sous forme d'amidon dans le stroma chloroplastique ou sont convertis en glucides exportables vers d'autres cellules. Le glucose absorbé par une cellule hétérotrophe animale peut être stocké sous forme de glycogène dans le cytosol. Le stockage ou le déstockage des réserves glucidiques dépend de l'activité d'enzymes.</p>	<ul style="list-style-type: none">- Illustrer la notion de carrefour métabolique à partir de l'exemple de l'acétyl Coenzyme A- Construire un bilan de matière et d'énergie de la glycolyse.
<p>(2) La matière organique permet de synthétiser de nouvelles molécules : c'est l'anabolisme. Les principales molécules du vivant ont un squelette carboné qui dérive d'intermédiaires de voies du métabolisme. Des interconversions entre familles de molécules sont possibles, elles aboutissent à la biosynthèse des principales molécules à rôle structural, métabolique ou informationnel à partir de carrefours métaboliques.</p>	<ul style="list-style-type: none">- Construire un bilan de matière et d'énergie du cycle de Krebs.
<p>(3) La matière organique absorbée ou stockée peut entrer dans les voies cataboliques desquelles la cellule tire son énergie. Le catabolisme peut être oxydatif aérobie (respiration) ou non (fermentation).</p>	<ul style="list-style-type: none">- Schématiser l'organisation fonctionnelle de la chaîne respiratoire, utilisant les variations de potentiel d'oxydoréduction ($\Delta E'$) et d'enthalpie libre de réaction ($\Delta rG'$).
<p>La glycolyse est une voie métabolique permettant la biosynthèse d'ATP (par transphosphorylation ou phosphorylation liée au substrat), de coenzymes réduits et de pyruvate par une chaîne de réactions partant du glucose. L'oxydation du glycéraldéhyde-3-P dans le cytosol en est une réaction clef. La glycolyse est l'objet d'un contrôle cellulaire. Il participe à l'ajustement de la production d'ATP aux besoins de la cellule.</p>	<ul style="list-style-type: none">- Comparer les chaînes de transfert d'électrons des chloroplastes et des mitochondries.
<p>Dans le cas de la fermentation, la glycolyse est la seule voie de production d'ATP. Des réactions biochimiques spécifiques de chaque voie fermentaire oxydent les coenzymes réduits, les rendant à nouveau disponibles pour la glycolyse.</p>	<ul style="list-style-type: none">- Comparer le bilan énergétique de la respiration cellulaire avec pour substrat initial le glucose et un acide gras.
<p>Dans le cas de la respiration cellulaire, le pyruvate est importé dans la mitochondrie et subit une décarboxylation à l'origine d'acétyl-CoA.</p>	<ul style="list-style-type: none">- Comparer le bilan de production d'ATP de la fermentation et de la respiration.
<p>Les acides gras peuvent également être importés dans la matrice mitochondriale et produire de l'acétyl-CoA par β-oxydation. Le catabolisme des acides aminés passe par le pyruvate ou un intermédiaire du cycle de Krebs.</p>	
<p>Le cycle de Krebs est une voie de convergence du catabolisme utilisant l'acétyl-CoA chez toutes les cellules à catabolisme aérobie. Il réalise la décarboxylation oxydative totale des composés, couplée à la production de nucléotides énergétiques et la réduction de coenzymes.</p>	
<p>La chaîne respiratoire est une chaîne de transfert d'électrons issus de coenzymes réduits vers un accepteur final minéral à plus fort potentiel d'oxydoréduction. Ce transfert est associé à des conversions chimio-osmotiques (via la chaîne respiratoire) et osmo-chimiques (via l'ATP synthase) qui permettent la production d'ATP. L'ATP est donc synthétisée en quantité variable selon le métabolite initial et la voie métabolique.</p>	

PLAN DU COURS

I. La matière organique est oxydée partiellement dans le cytosol : glycolyse et fermentations

- A. Vue d'ensemble de la glycolyse
- B. Les trois étapes de la glycolyse : activation du substrat, oxydation, formation d'ATP
- C. Bilan énergétique de la glycolyse
- D. Les contrôles exercés sur les étapes les plus exergoniques de la glycolyse
- E. La glycolyse, un carrefour métabolique siège d'entrées de métabolites d'origine variée
- F. Les coenzymes sont régénérés par fermentation en conditions anaérobies ou aérobies

II. Le cycle de Krebs, voie de convergence du catabolisme

- A. En amont du cycle de Krebs : formation de l'acétyl-coenzyme A dans la matrice mitochondriale
- B. Le cycle de Krebs : oxydation totale de l'acétylCoa et l'obtention d'un pouvoir réducteur

III. Des transferts d'électrons exergoniques dans la chaîne respiratoire mitochondriale, une membrane hautement spécialisée

- A. Mise en évidence de transfert entre un donneur et un accepteur d'électrons : réduction d'O₂ et oxydation de NADH, H⁺
- B. Entrée dans la matrice mitochondriale des coenzymes réduits
- C. une série de transporteurs d'électrons dans la membrane mitochondriale
- D. présentation de la chaîne respiratoire mitochondriale
- E. Le bilan d'énergie et de matière du cycle de Krebs

IV. La matière organique peut être stockée ou utilisée pour des biosynthèses

- A. La MO peut être stockée sous forme de réserve ou exportée (exemple des glucides)
- B. La MO est à l'origine de la synthèse de nouvelles molécules

GÉNÉRALITÉS



Une définition de « Métabolisme » ?

Ensemble des réactions biochimiques se réalisant à vitesse élevée dans des conditions physico-chimiques compatibles avec la vie.

→ Implique transfert d'énergie (déjà traité) et transfert de matière, intimement liés !



Catabolisme =

Exemple ?

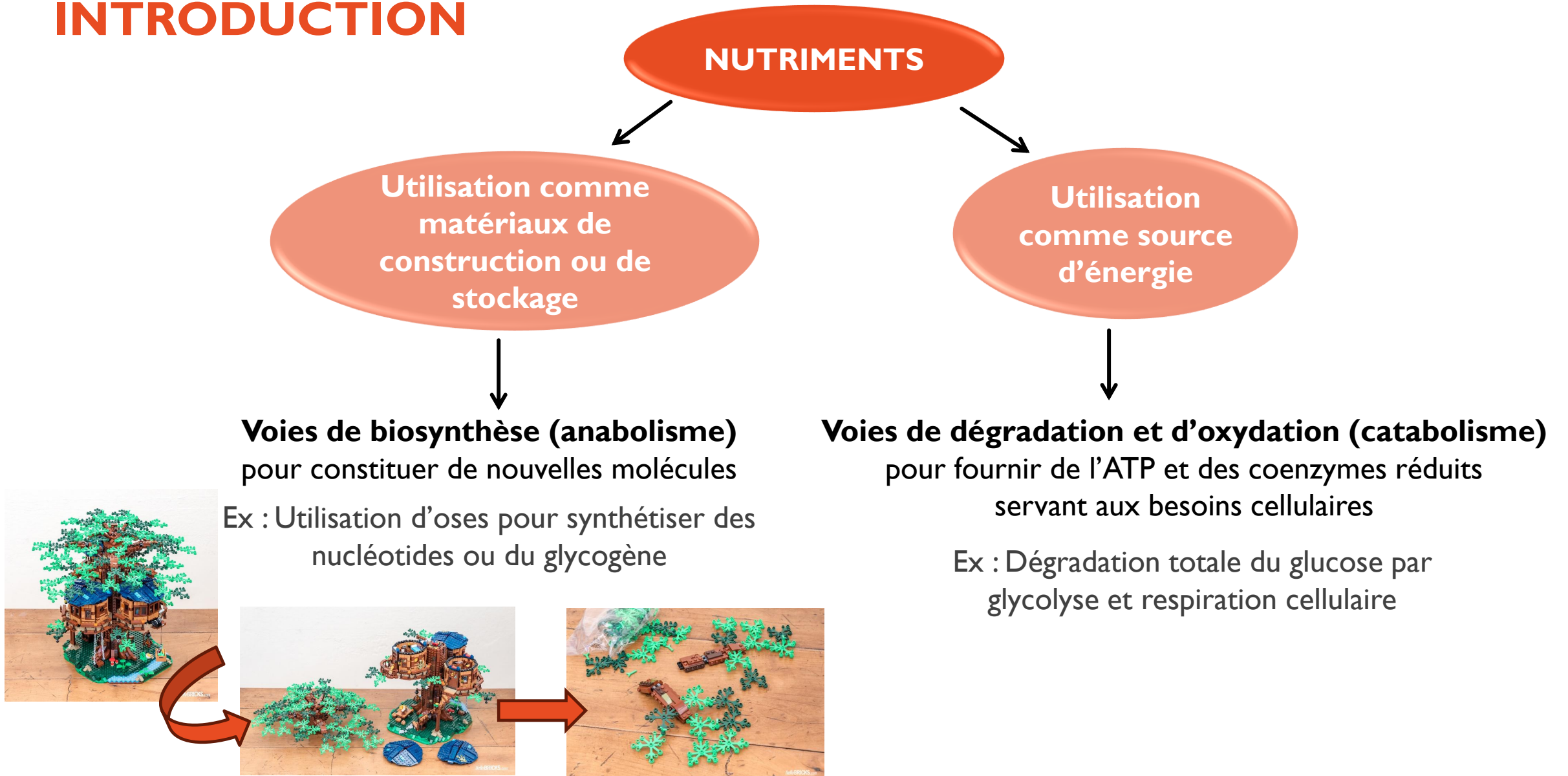
Anabolisme =

Exemple ?



→ La biochimie métabolique résulte d'un équilibre entre dégradation (catabolisme) et synthèse (anabolique).

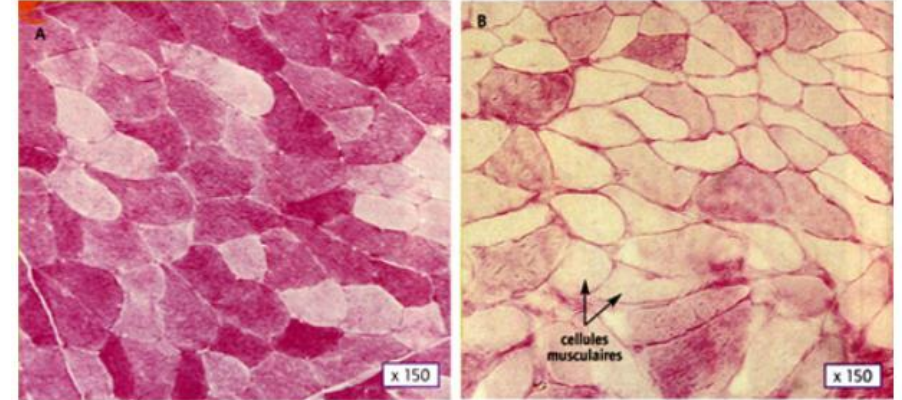
INTRODUCTION



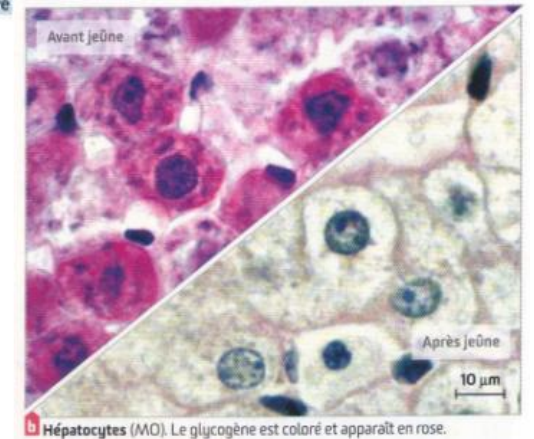
Comment se réalise l'approvisionnement en matière d'une cellule eucaryote animale ?

Comment fonctionnent les différentes voies métaboliques (la glycolyse, la fermentation ou la respiration aérobie) ?

Ces voies sont-elles contrôlées et quels en sont les bilans de matière et d'énergie ?



⚠ Observation au microscope d'un fragment de muscle de la cuisse au repos (A) et après un effort (B). Le fragment est prélevé, puis coloré. Plus les cellules musculaires sont foncées, plus elles sont riches en glucose de réserve.



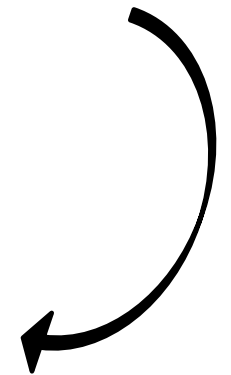
Ⓛ Hépatocytes (MO). Le glycogène est coloré et apparaît en rose.

coloration du glycogène dans des myocytes et hépatocytes

DIGESTION AU SENS STRICT

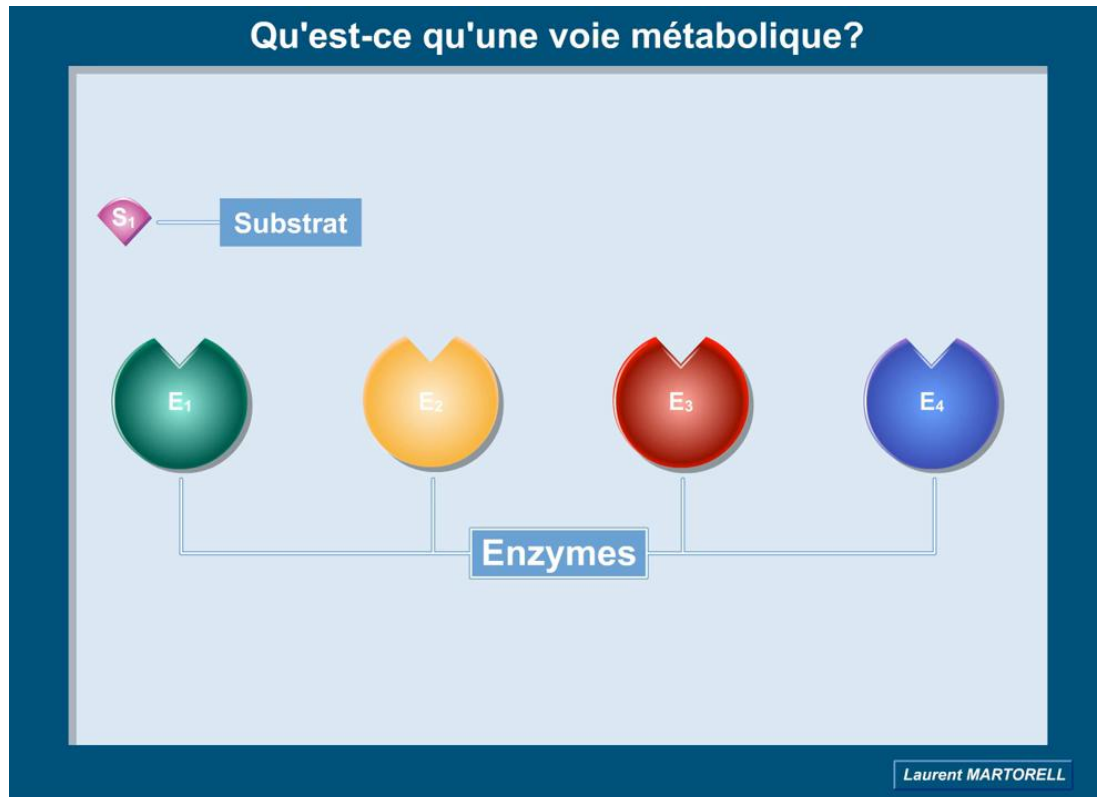


- Décomposition des aliments en molécules suffisamment petites (nutriments) pour être absorbées par l'organisme
- **Digestion mécanique** : fragmentation en plus petites macromolécules
- **Digestion chimique** : obtention de molécules simples



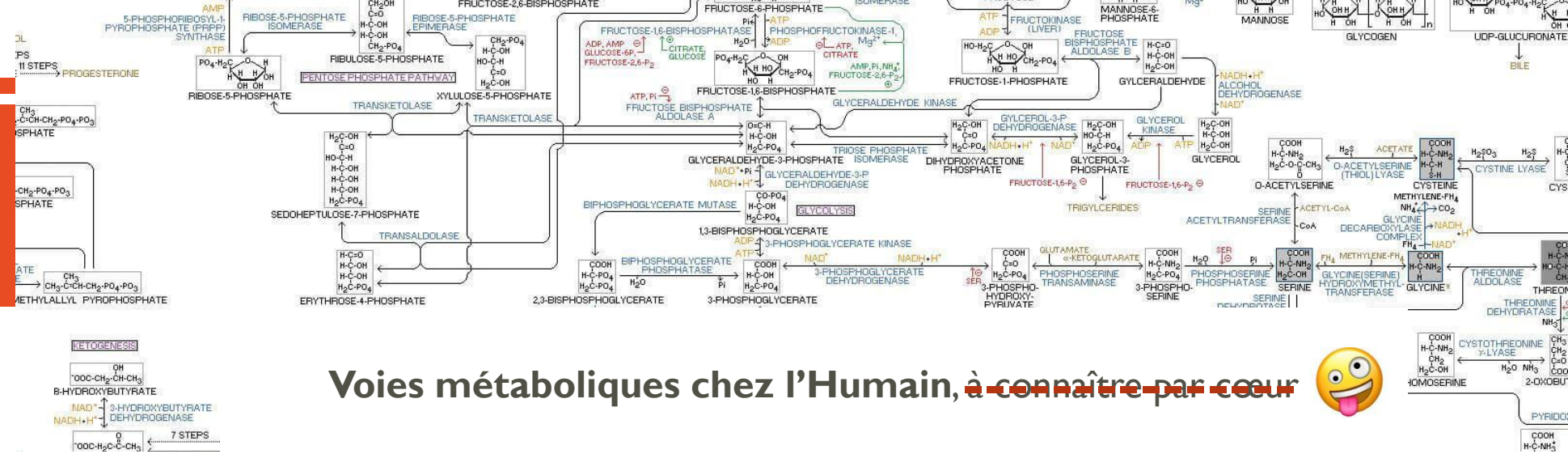
GÉNÉRALITÉS

Voie métabolique : ensemble de réactions chimiques catalysées par une série d'enzymes qui agissent de manière séquentielle.
Dans une voie métabolique, le produit de la réaction catalysée par une enzyme sert de substrat pour la réaction suivante.
Remarque : Les voies métaboliques peuvent être linéaires, ramifiées, ou même cycliques.



Les cellules vivantes comportent un grand nombre de voies métaboliques, souvent connectées les unes aux autres, qui constituent le **réseau métabolique cellulaire**.

Vous voulez voir à quoi cela ressemble ?

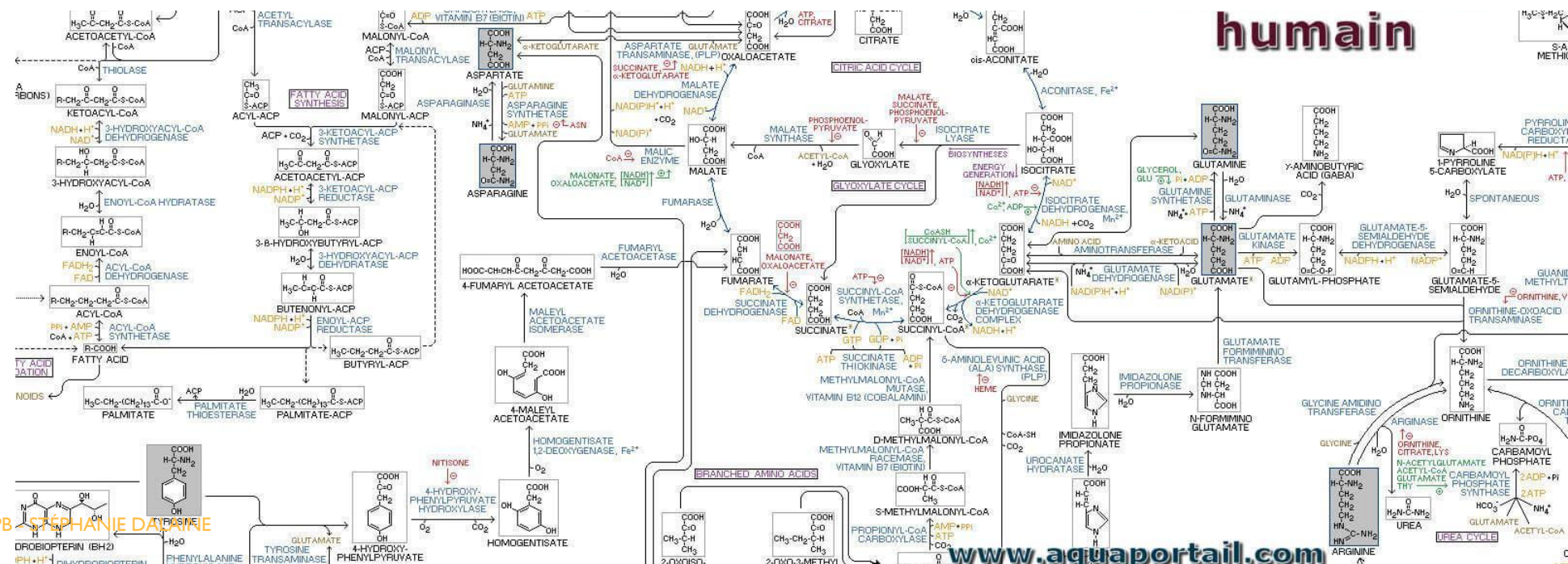


Voies métaboliques chez l'Humain, à connaître par cœur



Mais à explorer au plaisir !

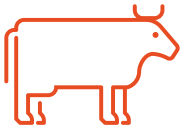
<https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/2016/metabolisme>



LA RESPIRATION CELLULAIRE

Cf SV-A-1

Rappels sur les notions de respiration externe vs interne = la **respiration cellulaire**.



Respiration ≠ Ventilation pulmonaire

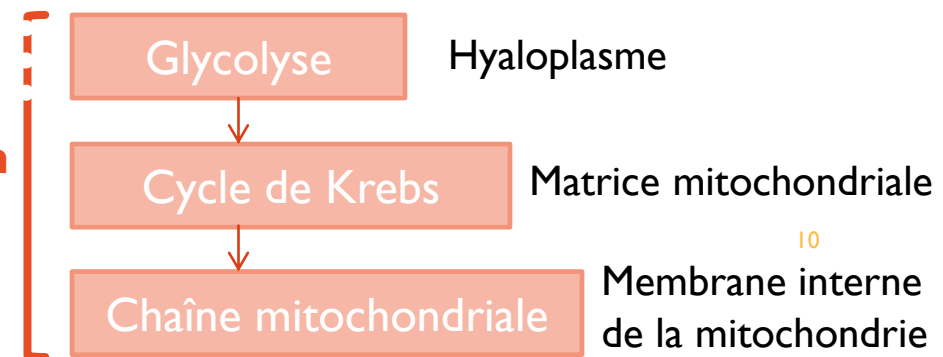
Respiration cellulaire = Ensemble des processus du catabolisme d'une cellule permettant de convertir l'énergie chimique contenue dans le glucose en ATP.

Une succession de réactions, dans le **cytoplasme** puis la **mitochondrie**, permettent de cliver et d'oxyder les grosses molécules biologiques (jouant le rôle de donneurs d'électrons) en molécules plus petites, en présence d'un accepteur d'électrons (le dioxygène), ce qui libère de l'énergie.

Contours définitionnels variables !

- Sens strict : mécanismes mitochondriaux uniquement
- Sens large : catabolisme oxydatif du glucose
- Sens encore plus large : catabolisme oxydatif aérobie (tous nutriments)

Respiration cellulaire



10

PLAN DU COURS

I. La matière organique est oxydée partiellement dans le cytosol : glycolyse et fermentations

- A. Vue d'ensemble de la glycolyse
- B. Les trois étapes de la glycolyse : activation du substrat, oxydation, formation d'ATP
- C. Bilan énergétique de la glycolyse
- D. Les contrôles exercés sur les étapes les plus exergoniques de la glycolyse
- E. La glycolyse, un carrefour métabolique siège d'entrées de métabolites d'origine variée
- F. Les coenzymes sont régénérés par fermentation en conditions anaérobies ou aérobies

II. Le cycle de Krebs, voie de convergence du catabolisme

- A. En amont du cycle de Krebs : formation de l'acétyl-coenzyme A dans la matrice mitochondriale
- B. Le cycle de Krebs : oxydation totale de l'acétylCoa et l'obtention d'un pouvoir réducteur

III. Des transferts d'électrons exergoniques dans la chaîne respiratoire mitochondriale, une membrane hautement spécialisée

- A. Mise en évidence de transfert entre un donneur et un accepteur d'électrons : réduction d'O₂ et oxydation de NADH, H⁺
- B. Entrée dans la matrice mitochondriale des coenzymes réduits
- C. une série de transporteurs d'électrons dans la membrane mitochondriale
- D. présentation de la chaîne respiratoire mitochondriale
- E. Le bilan d'énergie et de matière du cycle de Krebs

IV. La matière organique peut être stockée ou utilisée pour des biosynthèses

- A. La MO peut être stockée sous forme de réserve ou exportée (exemple des glucides)
- B. La MO est à l'origine de la synthèse de nouvelles molécules

I. LA MATIÈRE ORGANIQUE EST OXYDÉE PARTIELLEMENT DANS LE CYTOSOL : GLYCOLYSE ET FERMENTATIONS

Vous savez déjà plein de choses sur la glycolyse !

Où ? Quoi ? Comment ?

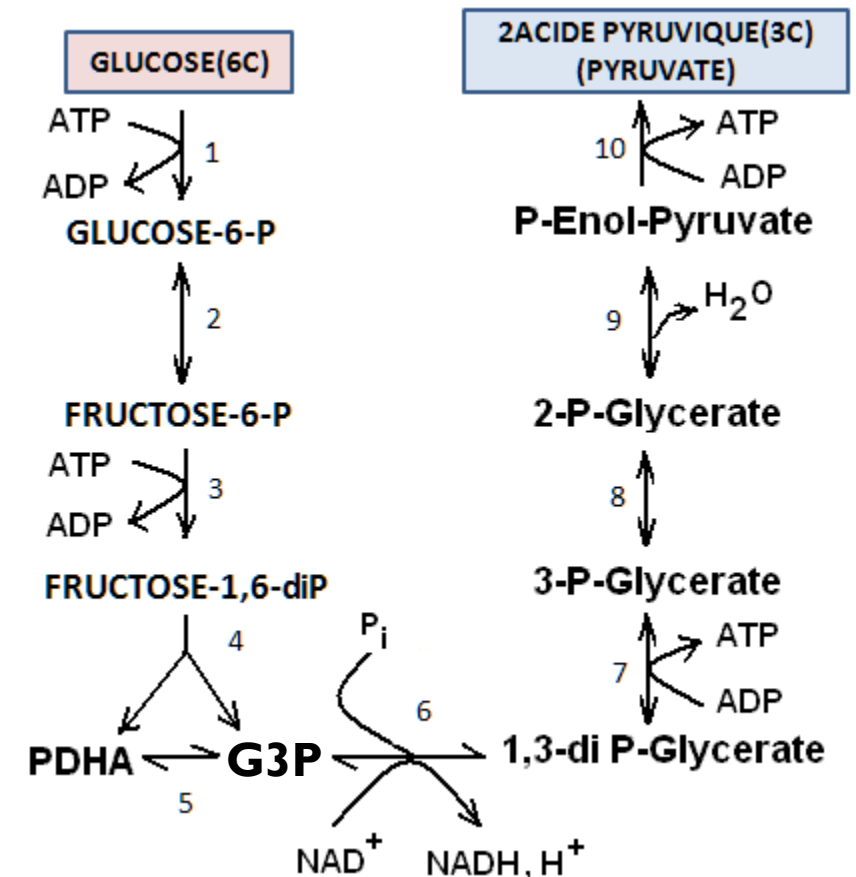
Glycolyse (n.f., du grec *glykys* «sucre» et *lysis* «casser») :
Voie cytoplasmique de dégradation du glucose
et de production d'énergie par couplages chimio-chimiques

Particularités :

- chez tous les êtres vivants
- dans le hyaloplasme
- en conditions aérobies (avec O_2) ou anaérobies (sans O_2)

Objectifs :

- Analyser les différentes étapes
- Identifier les modes de contrôle
- Faire un bilan de matière et d'énergie



I. LA MATIERE ORGANIQUE EST OXYDEE PARTIELLEMENT DANS LE CYTOSOL : GLYCOLYSE ET FERMENTATION

A. VUE D'ENSEMBLE DE LA GLYCOLYSE

▪ Contre-intuitif !

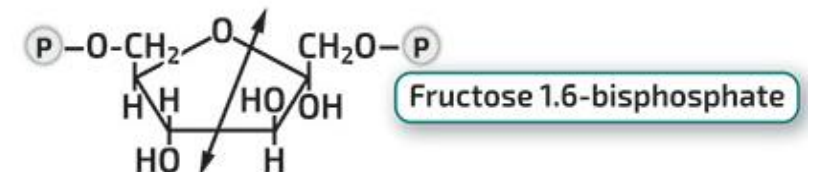
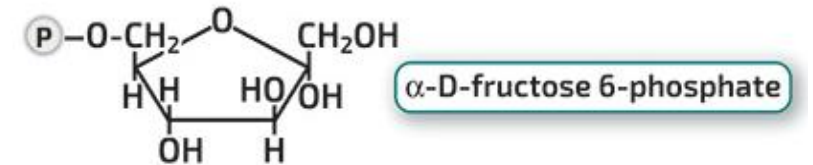
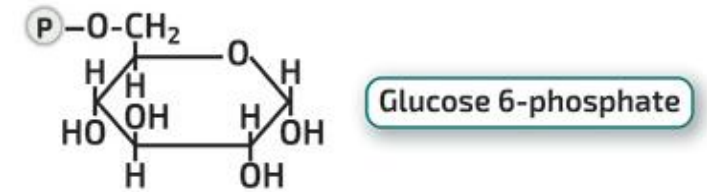
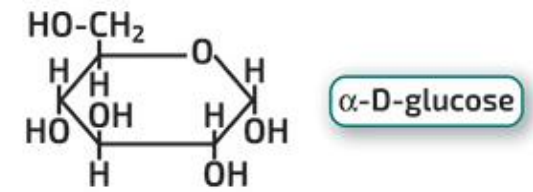
On commence par consommer deux molécules d'ATP (n° 1 et 3)...

... pour **phosphoryler le glucose**, de manière à :

- le **séquestrer dans la cellule** (pas de transporteur à G6P dans la membrane plasmique),
- **maintenir la concentration en glucose relativement basse** dans le cytoplasme facilitant l'entrée de molécules de glucose supplémentaires,
- **accroître sa réactivité.**

= Investissement

- Glycolyse = voie catabolique qui ne consomme pas d'O₂

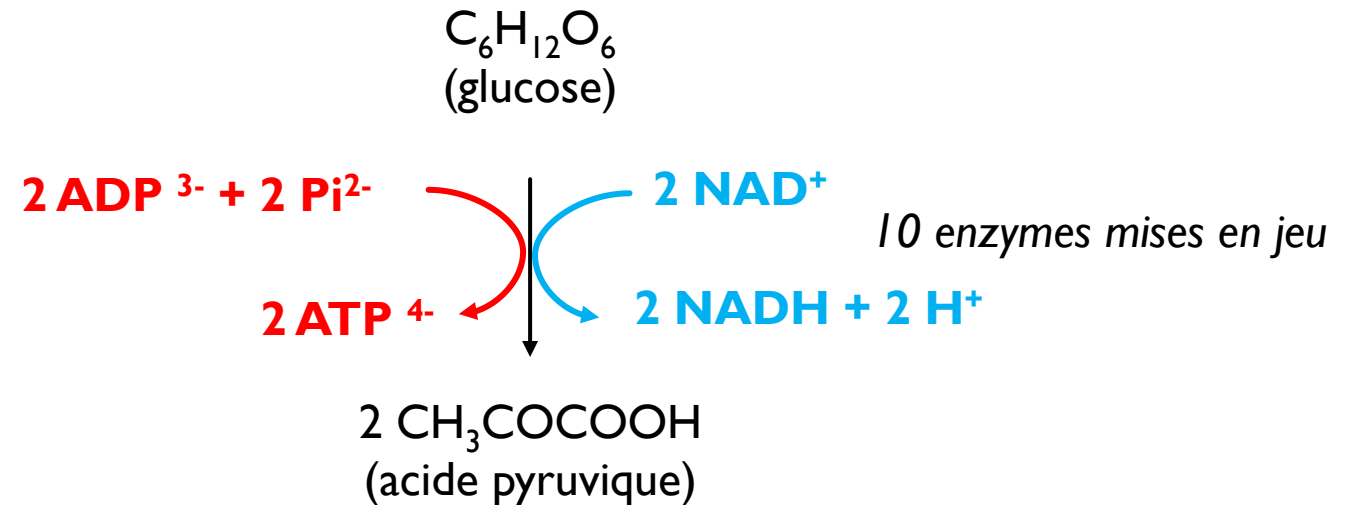


I. LA MATIERE ORGANIQUE EST OXYDEE PARTIELLEMENT DANS LE CYTOSOL : GLYCOLYSE ET FERMENTATION



A. VUE D'ENSEMBLE DE LA GLYCOLYSE

- oxydation du glucose (sans O_2) associée à la réduction de coenzymes rédox NAD^+ en $NADH, H^+$
 - réaction **exergonique**
 - ⇒ réaction couplée à la synthèse endergonique d'ATP
- En milieu anaérobie la glycolyse sera suivie chez certaines cellules d'une **fermentation** cytosolique.
- En milieu aérobie et pour les cellules eucaryotes, la glycolyse se poursuivra par la **respiration mitochondriale**.



Équation-bilan de la glycolyse



PLAN DU COURS

I. La matière organique est oxydée partiellement dans le cytosol : glycolyse et fermentations

- A. Vue d'ensemble de la glycolyse
- B. Les trois étapes de la glycolyse : activation du substrat, oxydation, formation d'ATP
- C. Bilan énergétique de la glycolyse
- D. Les contrôles exercés sur les étapes les plus exergoniques de la glycolyse
- E. La glycolyse, un carrefour métabolique siège d'entrées de métabolites d'origine variée
- F. Les coenzymes sont régénérés par fermentation en conditions anaérobies ou aérobies

II. Le cycle de Krebs, voie de convergence du catabolisme

- A. En amont du cycle de Krebs : formation de l'acétyl-coenzyme A dans la matrice mitochondriale
- B. Le cycle de Krebs : oxydation totale de l'acétylCoa et l'obtention d'un pouvoir réducteur

III. Des transferts d'électrons exergoniques dans la chaîne respiratoire mitochondriale, une membrane hautement spécialisée

- A. Mise en évidence de transfert entre un donneur et un accepteur d'électrons : réduction d'O₂ et oxydation de NADH, H⁺
- B. Entrée dans la matrice mitochondriale des coenzymes réduits
- C. une série de transporteurs d'électrons dans la membrane mitochondriale
- D. présentation de la chaîne respiratoire mitochondriale
- E. Le bilan d'énergie et de matière du cycle de Krebs

IV. La matière organique peut être stockée ou utilisée pour des biosynthèses

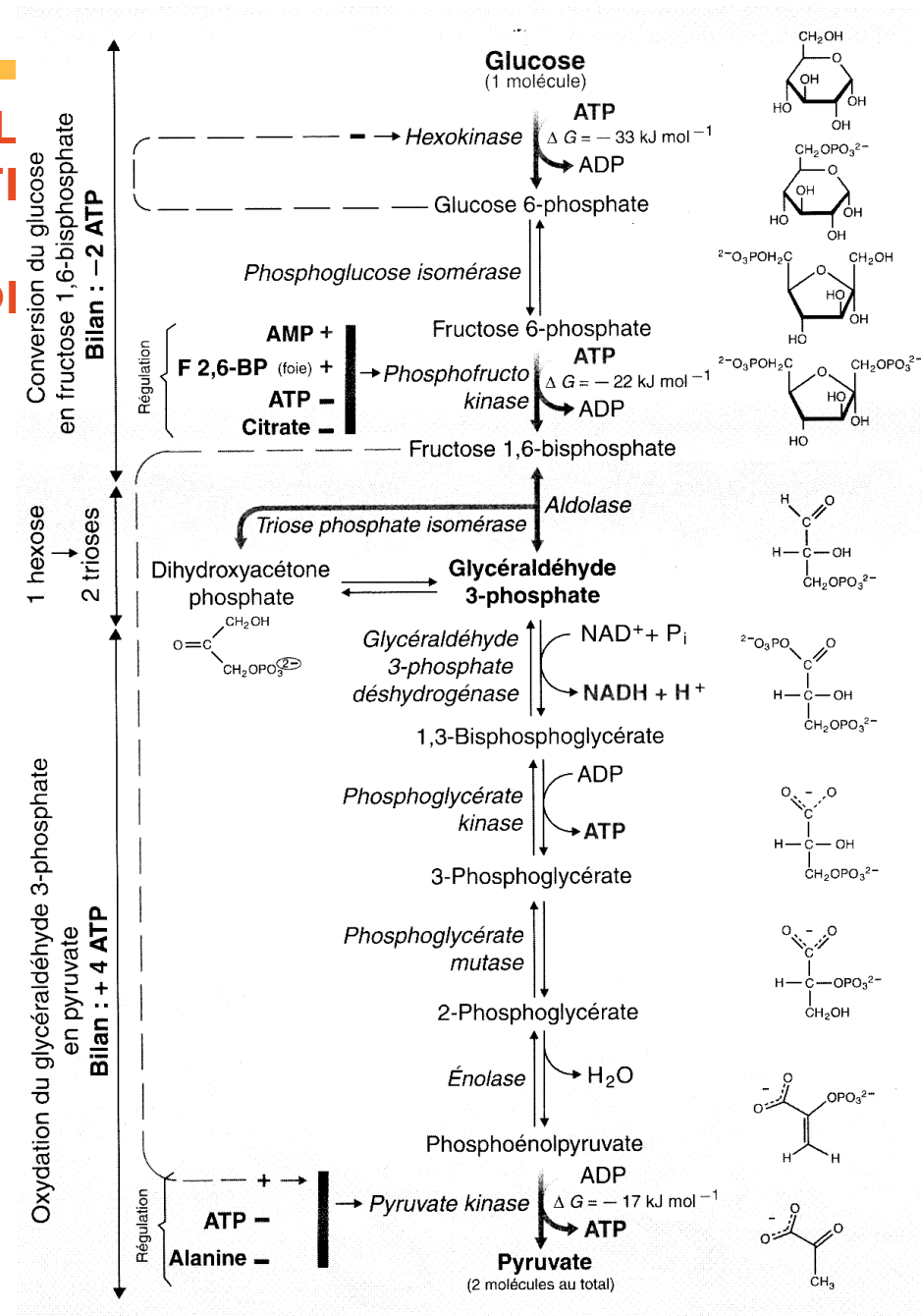
- A. La MO peut être stockée sous forme de réserve ou exportée (exemple des glucides)
- B. La MO est à l'origine de la synthèse de nouvelles molécules

I. LA MATIERE ORGANIQUE EST OXYDEE PARTIELL DANS LE CYTOSOL : GLYCOLYSE ET FERMENTATI

B. LES TROIS ETAPES DE LA GLYCOLYSE : ACTIVATIOI SUBSTRAT, OXYDATION, FORMATION D'ATP

La glycolyse se réalise en **dix étapes** catalysées par **dix enzymes** et se décompose en **deux grandes phases** successives pour chaque molécule de glucose entrant dans la voie :

- une **phase d'investissement énergétique** nécessitant l'hydrolyse de deux molécules d'ATP.
- une **phase de récupération énergétique** assurant la production de quatre molécules d'ATP et deux molécules de NADH, H+.



Les étapes de la glycolyse

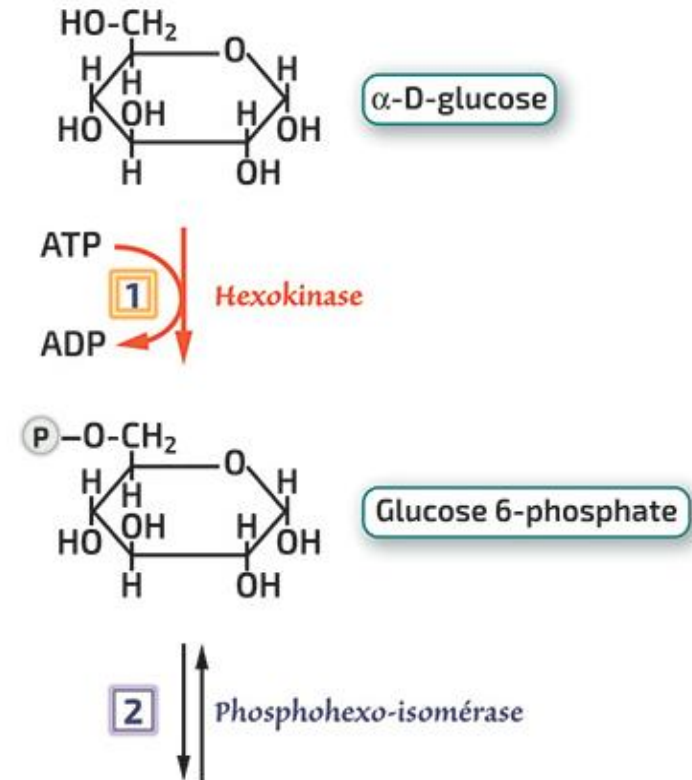
I. LA MATIERE ORGANIQUE EST OXYDEE PARTIELLEMENT DANS LE CYTOSOL : GLYCOLYSE ET FERMENTATION



B. LES TROIS ETAPES DE LA GLYCOLYSE : ACTIVATION DU SUBSTRAT, OXYDATION, FORMATION D'ATP

I. Activation endergonique du substrat et clivage en 2 trioses-phosphate

- 1^{ère} réaction : **phosphorylation endergonique du glucose**
 - Catalysée par l'hexokinase
 - ⇒ Formation de **G6-P = carrefour métabolique**
 - ✓ précurseur de 3 voies métaboliques :
Ex: la glycolyse, la voie des pentoses phosphates et la synthèse de glycogène = glycogénogenèse
 - Étape **non spécifique de la glycolyse**
 - **glucose piégé dans la cellule** car G6-P ne peut plus être transporté par ses transporteurs

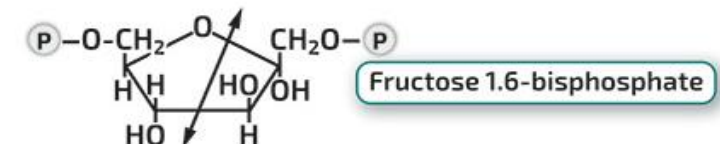
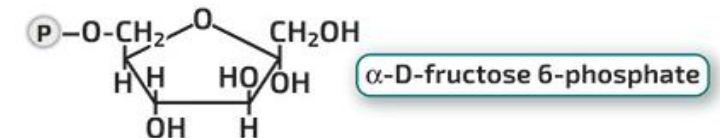
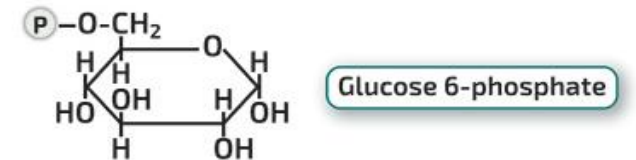
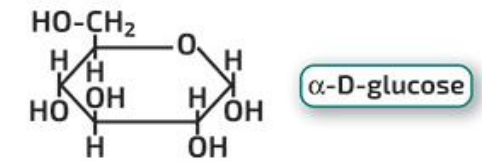


B. LES TROIS ETAPES DE LA GLYCOLYSE : ACTIVATION DU SUBSTRAT, OXYDATION, FORMATION D'ATP



I. Activation endergonique du substrat et clivage en 2 trioses-phosphate

- 2ème réaction : formation du fructose 1,6-diphosphate (F1,6 – BP)
 - **Isomérisation du G6-P en F6-P**
 - ✓ Phosphohexo-isomérase
 - Phosphorylation du F6-P en F1,6- BP
 - ✓ **Phosphofructo-kinase I = PFK-I**
 - ✓ **Transfert de groupement phosphoryle**
 - ⇒ 2^e investissement d'ATP

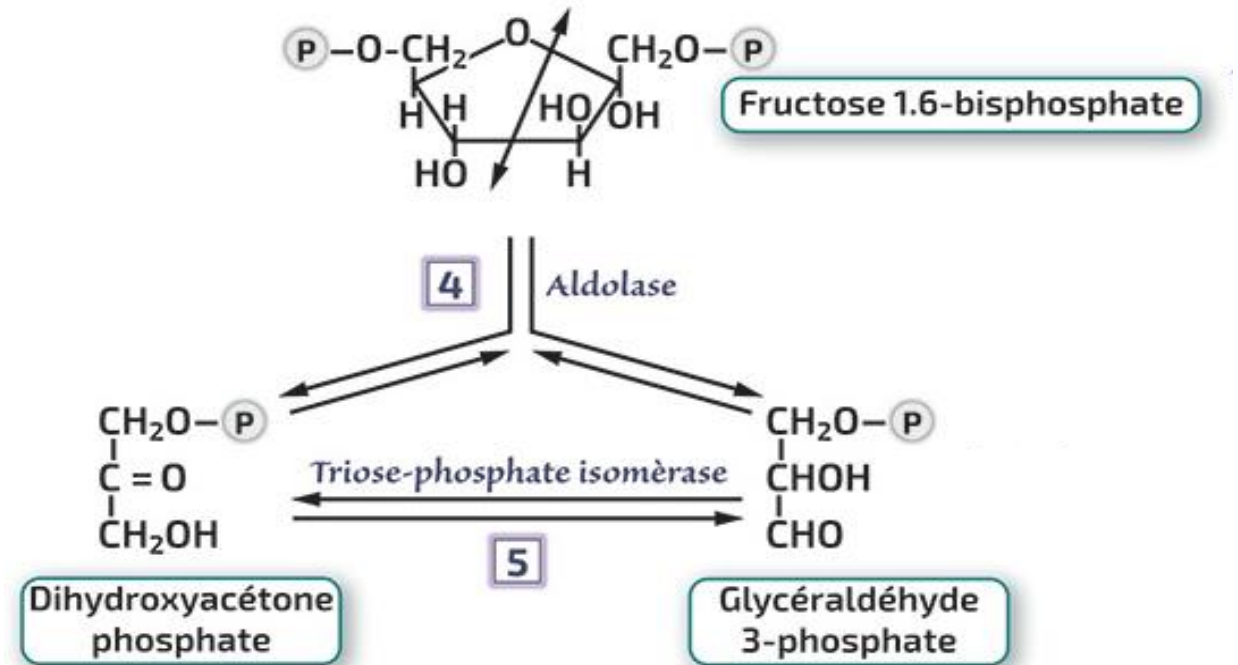


B. LES TROIS ETAPES DE LA GLYCOLYSE : ACTIVATION DU SUBSTRAT, OXYDATION, FORMATION D'ATP



I. Activation endergonique du substrat et clivage en 2 trioses-phosphate

- 3ème réaction : Le fructose 1,6-biphosphate est scindé en deux trioses-P
 - (n°4) 1 C6 = 2 C3 par une aldolase
 - Seul le glycéraldéhyde-3-P (G3P) est oxydé
 - ⇒ **équilibre d'isomérisation tiré** vers la droite (par loi d'action de masse)
 - **trioles** beaucoup **plus réactifs** que les hexoses, car non cycliques
 - ⇒ fonction aldéhyde ou cétone pas masquée



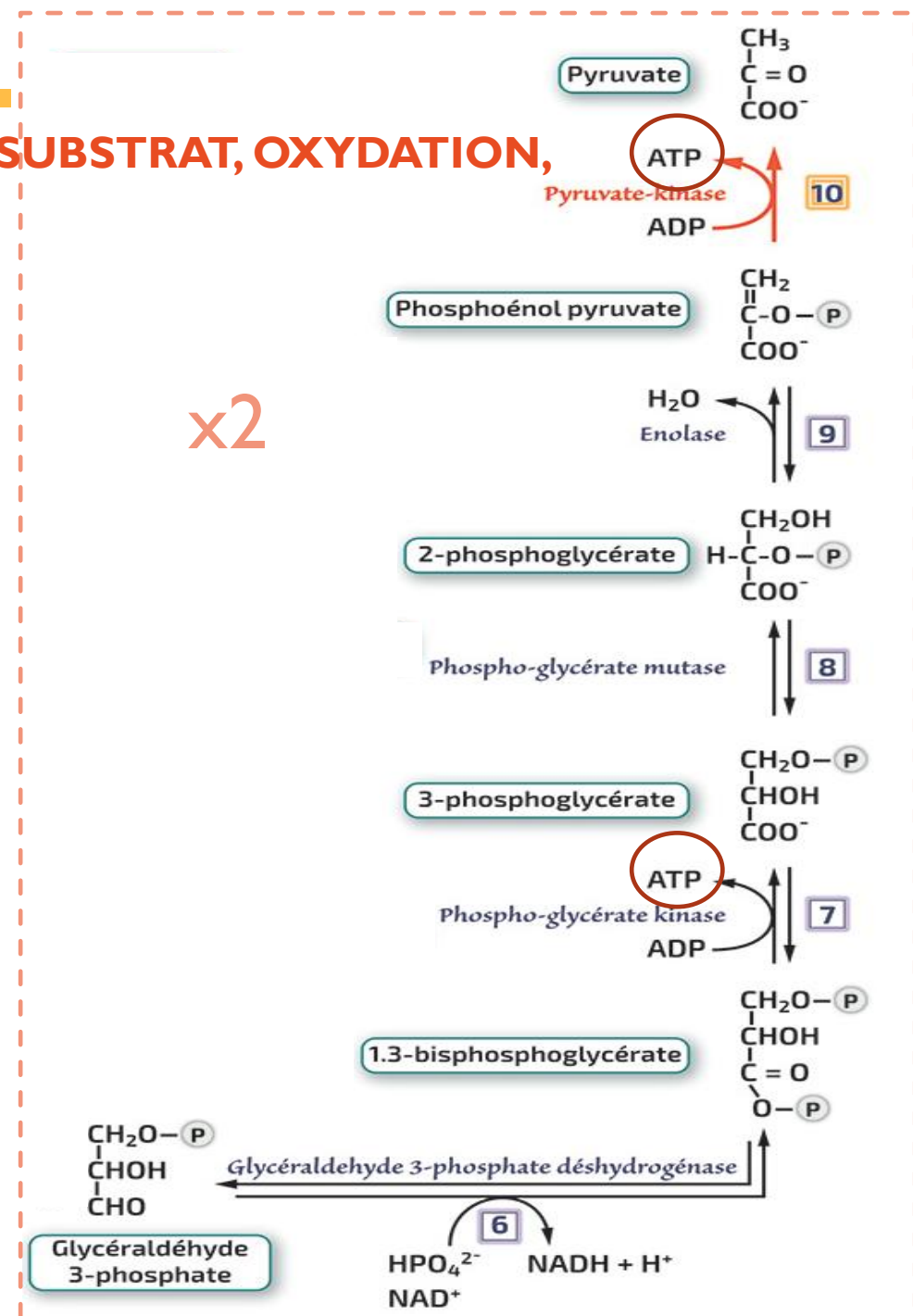
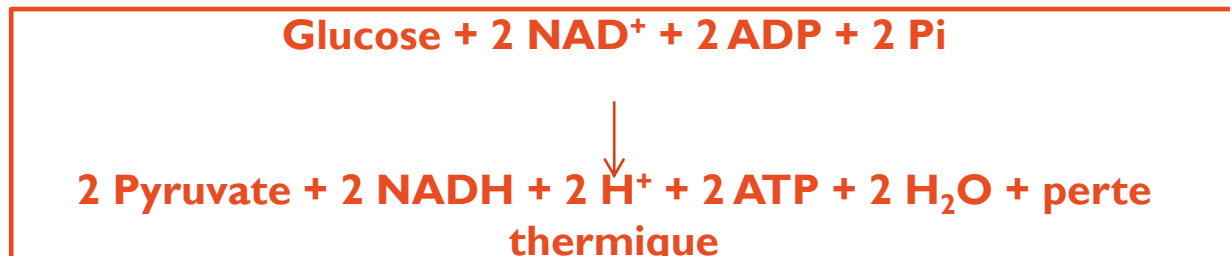
B. LES TROIS ETAPES DE LA GLYCOLYSE : ACTIVATION DU SUBSTRAT, OXYDATION, FORMATION D'ATP

2. L'étape clé de l'oxydation du glycéraldéhyde 3P

Après une oxydation (n°6),
on récupère... (n°7 et n°10) 2 ATP seulement ?
Bilan = 2 consommés + 2 produits = nul

Non, car 2 G3P issus d'1 glucose : donc x2 !
4 ATP produits par phosphorylation du substrat
+ Pouvoir réducteur (2 NADH+H⁺)
= Retour sur investissement

Équation-bilan de la glycolyse ?



B. LES TROIS ETAPES DE LA GLYCOLYSE : ACTIVATION DU SUBSTRAT, OXYDATION, FORMATION D'ATP

3. Synthèse d'ATP par transphosphorylation = phosphorylation du substrat

	Enzyme	Etape 10 de la glycolyse	$\Delta G^{0'}$ en kJ/mol	
Réaction globale	Pyruvate kinase	PEP + ADP → ATP + Pyruvate	-31,4	Exergonique
½ Réaction		PEP + H ₂ O → Pyruvate + Pi	-61,9	Exergonique
½ Réaction		ADP + Pi → ATP + H ₂ O	+30,5	Endergonique

- liaison à haut potentiel d'hydrolyse du phosphoryl sur le carbone 1 du BPG instable

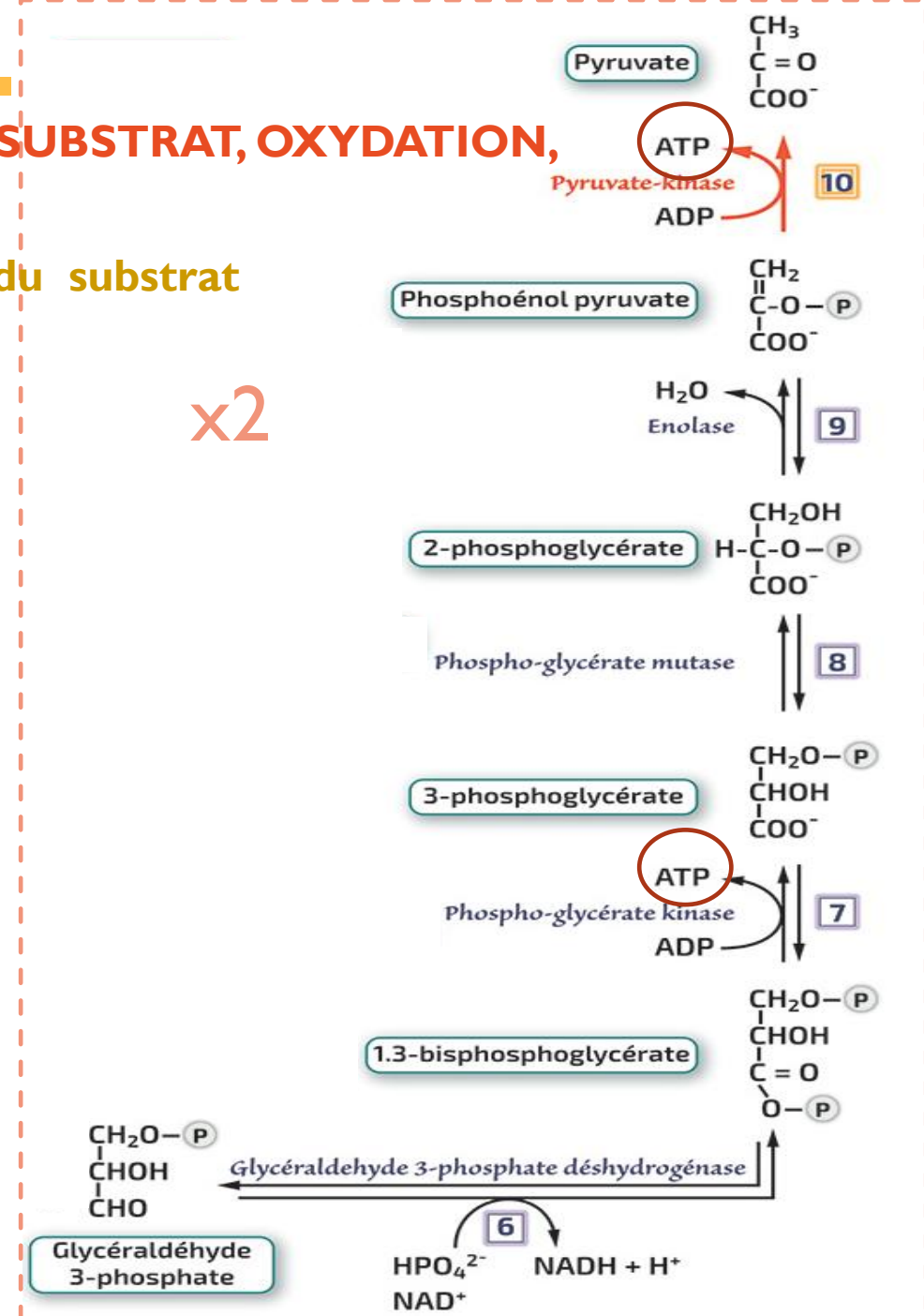
- ⇒ immédiatement hydrolysée
 - ✓ hydrolyse **couplée** à la formation d'une autre **liaison à haut potentiel d'hydrolyse** = phosphoryl transféré sur l'ADP → ATP
 - ✓ **transphosphorylation** = phosphorylation au niveau du substrat.

- réorganisation (isomérisation + déshydratation) → phosphoénolpyruvate PEP

- PEP = molécule à haut potentiel d'hydrolyse

- ⇒ **deuxième transphosphorylation** couple l'hydrolyse du PEP à la formation d'ATP à partir d'ADP.

x2



PLAN DU COURS

I. La matière organique est oxydée partiellement dans le cytosol : glycolyse et fermentations

- A. Vue d'ensemble de la glycolyse
- B. Les trois étapes de la glycolyse : activation du substrat, oxydation, formation d'ATP
- C. Bilan énergétique de la glycolyse
- D. Les contrôles exercés sur les étapes les plus exergoniques de la glycolyse
- E. La glycolyse, un carrefour métabolique siège d'entrées de métabolites d'origine variée
- F. Les coenzymes sont régénérés par fermentation en conditions anaérobies ou aérobies

II. Le cycle de Krebs, voie de convergence du catabolisme

- A. En amont du cycle de Krebs : formation de l'acétyl-coenzyme A dans la matrice mitochondriale
- B. Le cycle de Krebs : oxydation totale de l'acétylCoa et l'obtention d'un pouvoir réducteur

III. Des transferts d'électrons exergoniques dans la chaîne respiratoire mitochondriale, une membrane hautement spécialisée

- A. Mise en évidence de transfert entre un donneur et un accepteur d'électrons : réduction d'O₂ et oxydation de NADH, H⁺
- B. Entrée dans la matrice mitochondriale des coenzymes réduits
- C. une série de transporteurs d'électrons dans la membrane mitochondriale
- D. présentation de la chaîne respiratoire mitochondriale
- E. Le bilan d'énergie et de matière du cycle de Krebs

IV. La matière organique peut être stockée ou utilisée pour des biosynthèses

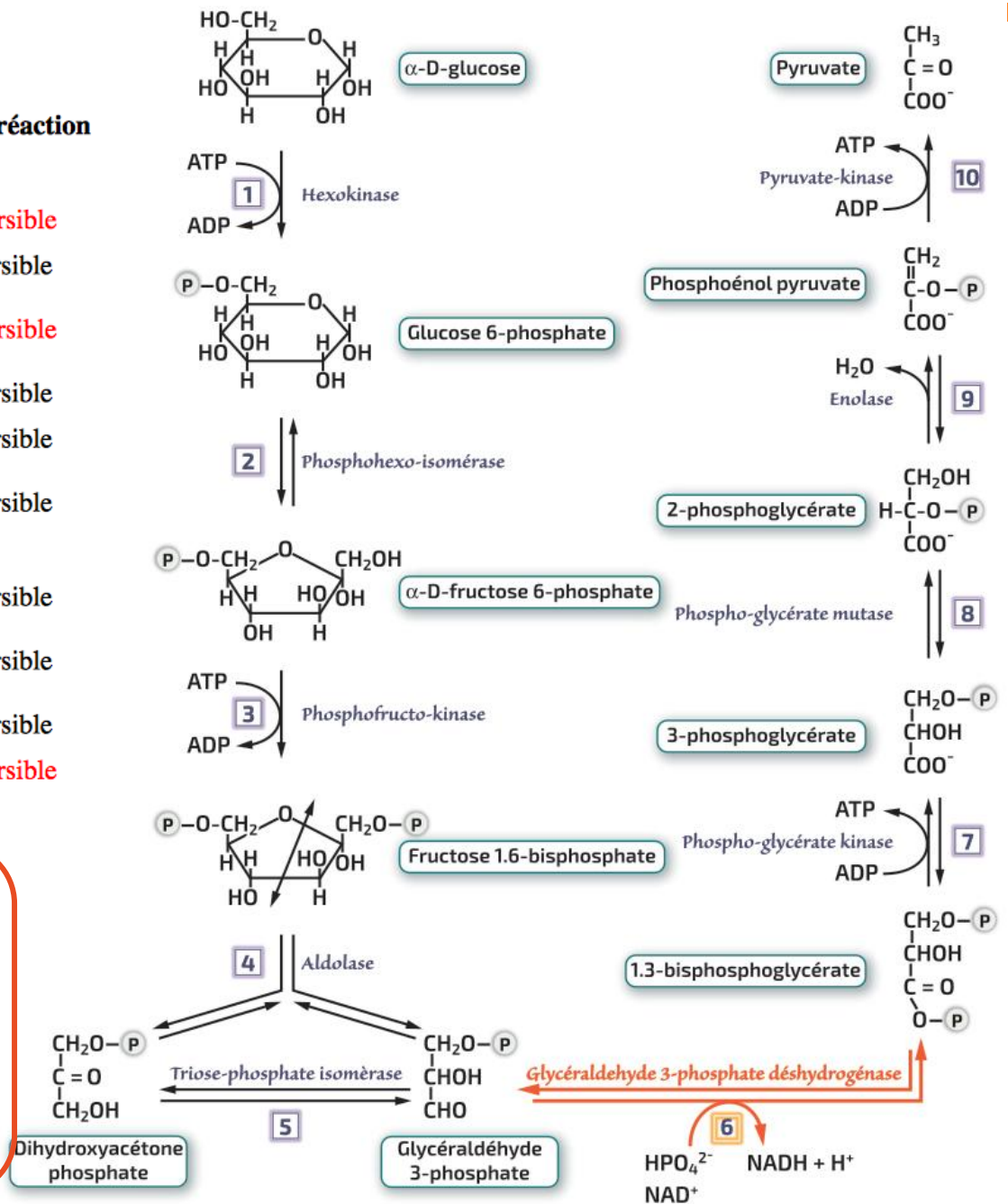
- A. La MO peut être stockée sous forme de réserve ou exportée (exemple des glucides)
- B. La MO est à l'origine de la synthèse de nouvelles molécules

C. BILAN ENERGETIQUE DE LA GLYCOLYSE

Etapes de la glycolyse	Enzyme	ΔG^0 en kJ/mol	$\Delta Gr'$ en kJ/mol	Type de réaction
Etape 1	Hexokinase	-16,7	-33	Irréversible
Etape 2	Glucose 6-phosphate isomérase	+1,7	-2	Réversible
Etape 3	Phosphofructokinase 1	-14	-26	Irréversible
Etape 4	Aldolase	+23,9	-1	Réversible
Etape 5	Triose-phosphate isomérase	+7,6	-1	Réversible
Etape 6	Glyceraldéhyde 3-phosphate déshydrogénase	+6,7	-1	Réversible
Etape 7	Phosphoglycérate kinase	-18,8	-1	Réversible
Etape 8	Phosphoglycérate mutase	+4,4	-3	Réversible
Etape 9	Enolase	+1,8	-3	Réversible
Etape 10	Pyruvate kinase	-31,4	-14	Irréversible

Figure 5 : Variations d'enthalpie selon les étapes de la glycolyse

- réactions 1, 3 et 10 : variations d'enthalpie libre très négatives = fortement exergoniques
 - ⇒ Déplacement de l'équilibre réactionnel vers la synthèse des produits
 - ⇒ **trois réactions sont irréversibles.**
- Lorsque la cellule est correctement approvisionnée en glucose, la glycolyse est donc thermodynamiquement favorisée vers la production du pyruvate selon la réaction globale



PLAN DU COURS

I. La matière organique est oxydée partiellement dans le cytosol : glycolyse et fermentations

- A. Vue d'ensemble de la glycolyse
- B. Les trois étapes de la glycolyse : activation du substrat, oxydation, formation d'ATP
- C. Bilan énergétique de la glycolyse
- D. Les contrôles exercés sur les étapes les plus exergoniques de la glycolyse
- E. La glycolyse, un carrefour métabolique siège d'entrées de métabolites d'origine variée
- F. Les coenzymes sont régénérés par fermentation en conditions anaérobies ou aérobies

II. Le cycle de Krebs, voie de convergence du catabolisme

- A. En amont du cycle de Krebs : formation de l'acétyl-coenzyme A dans la matrice mitochondriale
- B. Le cycle de Krebs : oxydation totale de l'acétylCoa et l'obtention d'un pouvoir réducteur

III. Des transferts d'électrons exergoniques dans la chaîne respiratoire mitochondriale, une membrane hautement spécialisée

- A. Mise en évidence de transfert entre un donneur et un accepteur d'électrons : réduction d'O₂ et oxydation de NADH, H⁺
- B. Entrée dans la matrice mitochondriale des coenzymes réduits
- C. une série de transporteurs d'électrons dans la membrane mitochondriale
- D. présentation de la chaîne respiratoire mitochondriale
- E. Le bilan d'énergie et de matière du cycle de Krebs

IV. La matière organique peut être stockée ou utilisée pour des biosynthèses

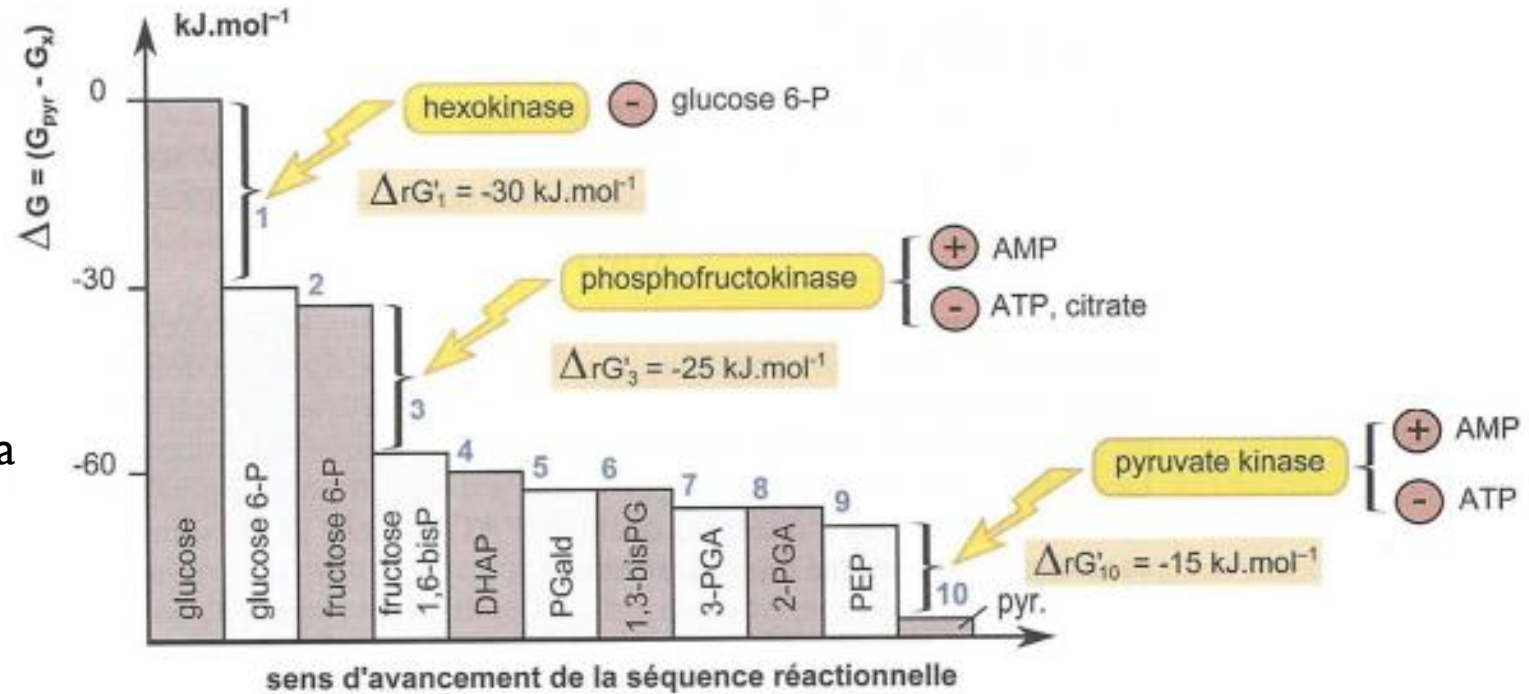
- A. La MO peut être stockée sous forme de réserve ou exportée (exemple des glucides)
- B. La MO est à l'origine de la synthèse de nouvelles molécules

D. LES CONTROLES EXERCES SUR LES ETAPES LES PLUS EXERGONIQUES DE LA GLYCOLYSE



Réaction irréversible : Réaction qui a une variation d'enthalpie libre élevée, qui est fortement exergonique et énergétiquement très favorisée, et donc irréversible.

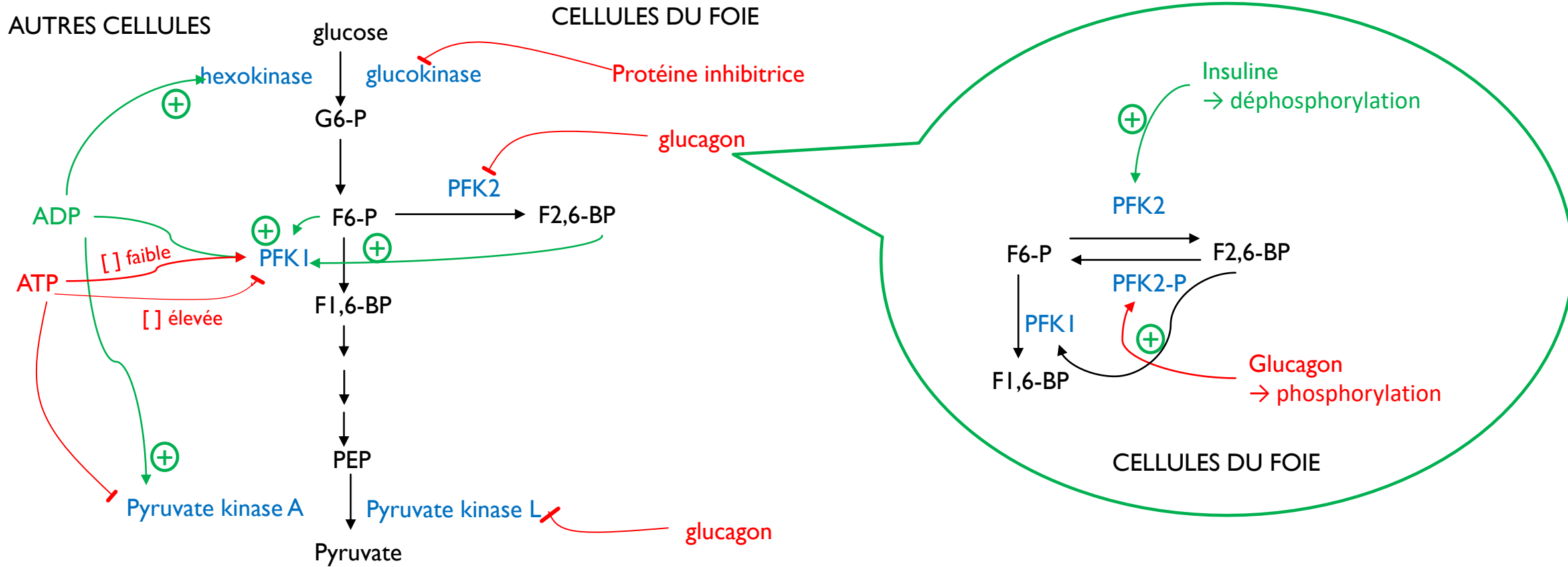
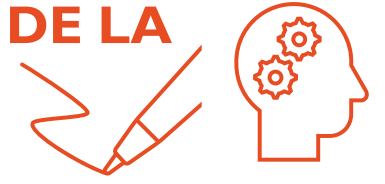
- 1 à 10 : numéros des réactions chimiques
- Trois réactions ont un $\Delta rG'$ très négatif
 - ⇒ elles tirent l'ensemble des réactions de la glycolyse vers la formation du pyruvate
- Contrôle s'exerce sur les enzymes qui catalysent les réactions très exergoniques ($\Delta rG''$ très négatif) donc irréversibles : les points de contrôle : R1, R3 et R10.
 - Ces 3 enzymes peuvent être contrôlées par des **effecteurs allostériques**.



Profil énergétique de la glycolyse et les 3 niveaux de contrôle

D'après Peycru et al. (2013)

D. LES CONTROLES EXERCES SUR LES ETAPES LES PLUS EXERGONIQUES DE LA GLYCOLYSE

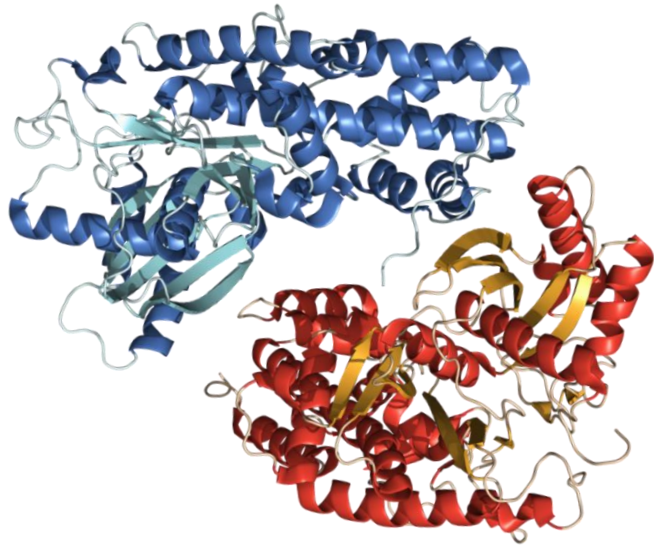


Contrôle des enzymes clé de la glycolyse

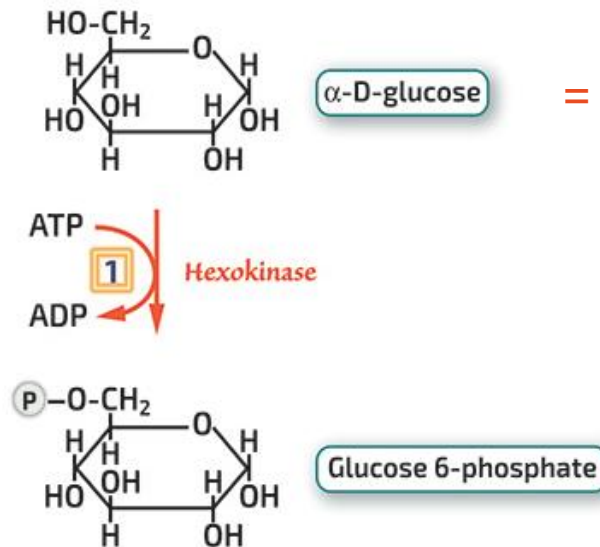
D. LES CONTROLES EXERCES SUR LES ETAPES LES PLUS EXERGONIQUES DE LA GLYCOLYSE

Cf. Enzymo

I. Contrôle de l'hexokinase, une enzyme michaelienne



Structure de l'hexokinase
(2 sous unités)
obtenue par cristallographie



- L'hexokinase est une enzyme michaelienne inhibée par le glucose-6-phosphate
= Régulation de l'activité enzymatique, inhibée par son propre produit (rétrocontrôle négatif)

- La transcription du gène codant l'hexokinase est induite par l'insuline.
= Régulation génétique

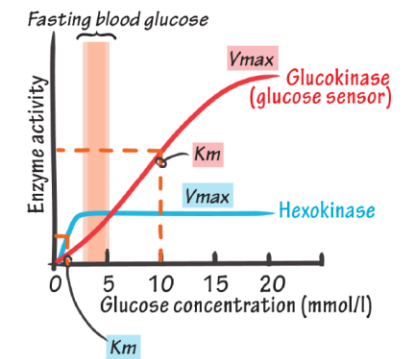
Remarque :

- Hexokinase dans la plupart des cellules
- Glucokinase dans le foie et le pancréas.

Dans le foie, stockage important de glucose après un repas par exemple : régulation de la glycémie.

La moitié des diabètes MODY sont dus à une mutation dans le gène codant la glucokinase.

Kinetics



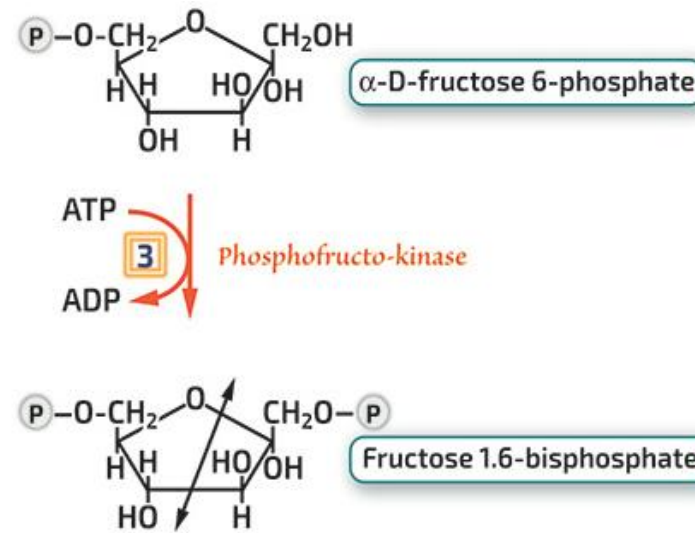
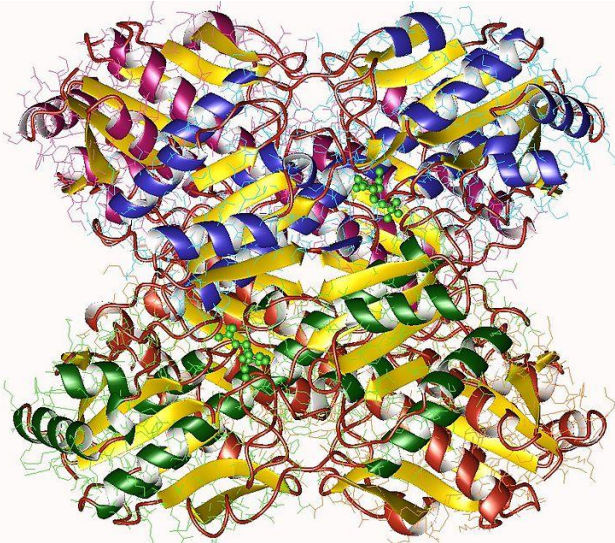
Km
Glucokinase > Hexokinase
 Spares glucose stores for brain, muscle & other tissues.

Vmax
Glucokinase > Hexokinase
 At fasting glc conc. - Hexokinase is at Vmax, Glucokinase activity varies according to glc conc.

D. LES CONTROLES EXERCES SUR LES ETAPES LES PLUS EXERGONIQUES DE LA GLYCOLYSE



2. Contrôle de la PFK I par des effecteurs allostériques



La PFK possède deux sites de liaison à l'ATP :

- Un site où l'ATP est substrat
- Un site où l'ATP agit comme inhibiteur allostérique.

La PFK est inhibée par le phosphoénolpyruvate (produit de la glycolyse) et par le citrate (participant du cycle de Krebs).

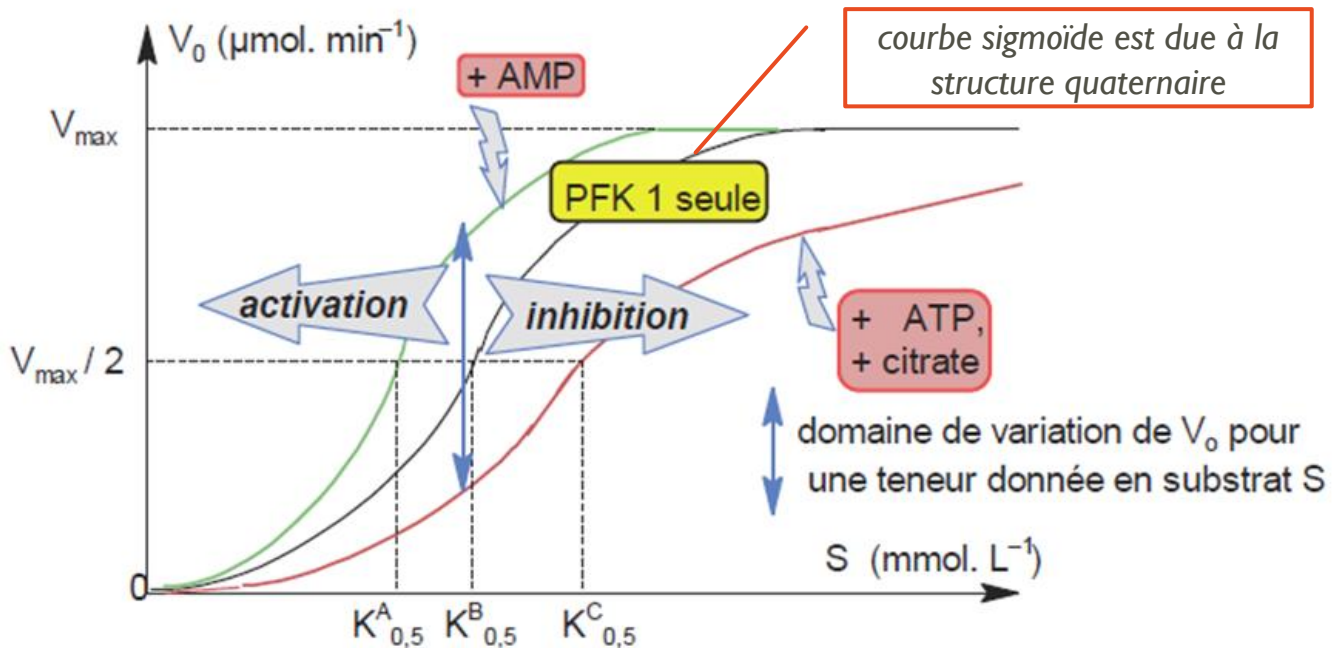


L'AMP et le fructose-6-P sont des activateurs allostériques de la PFK.

Structure du tétramère de phosphofructokinase (PFK I) (homotétramérique) obtenue par cristallographie

D. LES CONTROLES EXERCES SUR LES ETAPES LES PLUS EXERGONIQUES DE LA GLYCOLYSE

2. Contrôle de la PFK I par des effecteurs allostériques



Activité de la PFK1 et son contrôle par effecteurs allostériques

Ceci permet de **stimuler** la glycolyse lorsque la charge énergétique de la cellule diminue (peu d'ATP) ou quand le substrat s'accumule, et de **ralentir** la glycolyse lorsque l'organisme est en excès d'énergie ou de produits.
= Système d'autocontrôle



La PFK possède **deux sites de liaison à l'ATP** :

- Un site où l'ATP est substrat
- Un site où l'ATP agit comme inhibiteur allostérique.

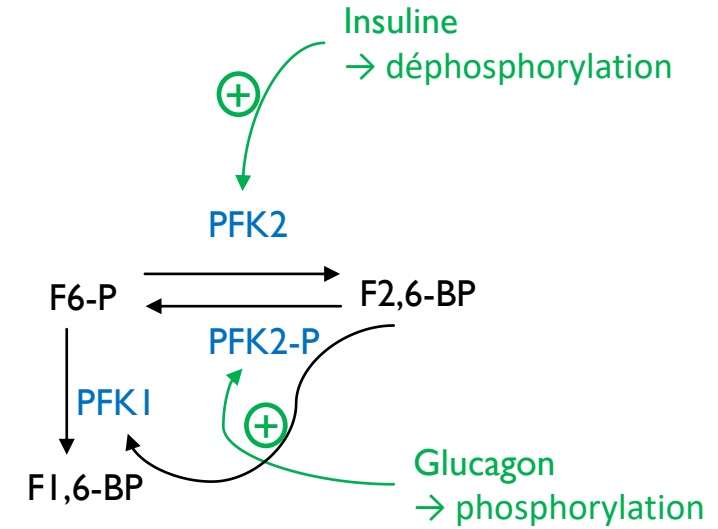
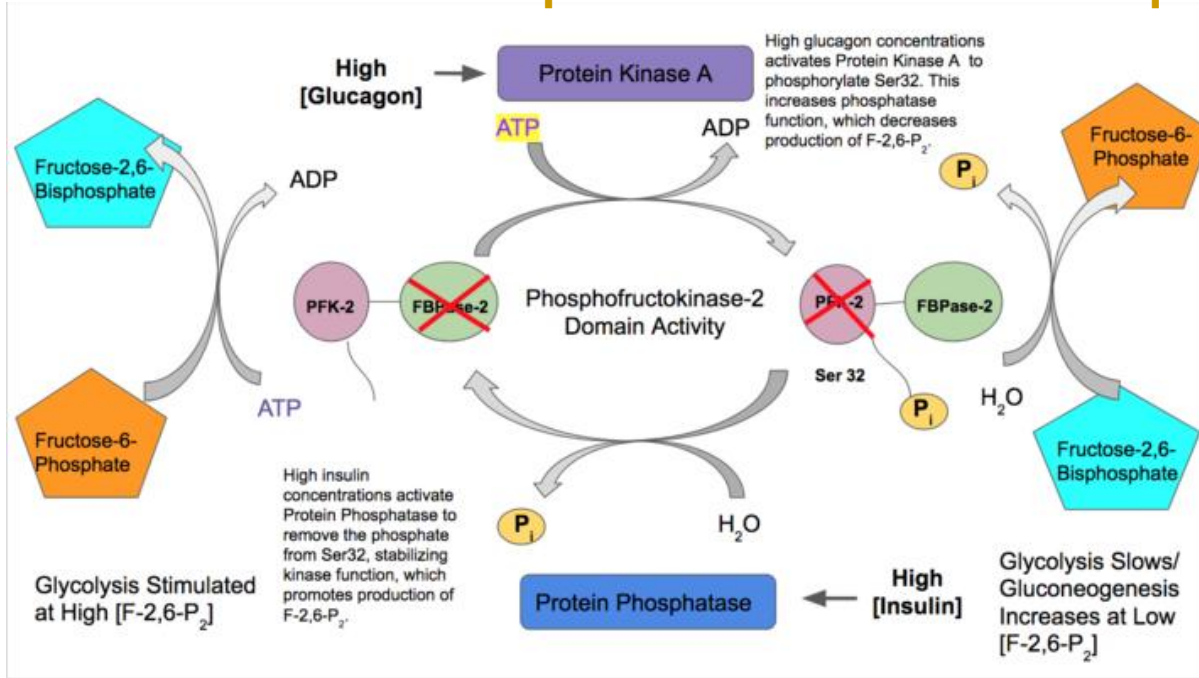
La PFK est inhibée par le phosphoénolpyruvate (produit de la glycolyse) et par le citrate (participant du cycle de Krebs).



L'AMP et le fructose-6-P sont des activateurs allostériques de la PFK.

D. LES CONTROLES EXERCES SUR LES ETAPES LES PLUS EXERGONIQUES DE LA GLYCOLYSE

2. Contrôle de la PFKI par des effecteurs allostériques



Activité de la PFK1 et son contrôle dans le foie

Glycémie élevée

⇒ ↗ [insuline]

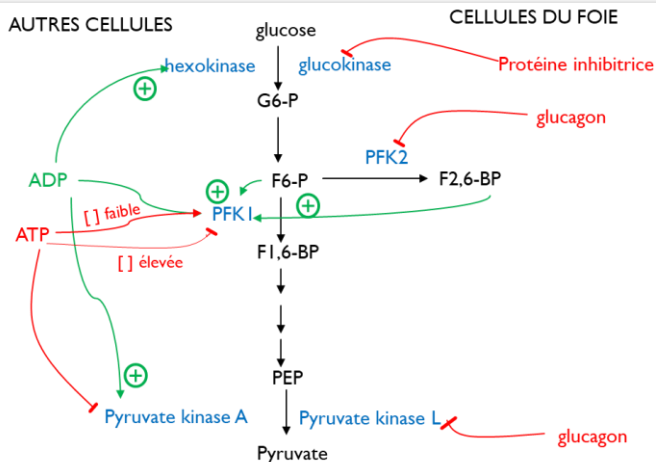
⇒ ↗ [PFK2]

⇒ ↗ [F-2,6-BP]

⇒ Augmentation de l'affinité de PFK I pour F-6-P

⇒ ↗ glycolyse

⇒ ↗ [ATP]



PLAN DU COURS

I. La matière organique est oxydée partiellement dans le cytosol : glycolyse et fermentations

- A. Vue d'ensemble de la glycolyse
- B. Les trois étapes de la glycolyse : activation du substrat, oxydation, formation d'ATP
- C. Bilan énergétique de la glycolyse
- D. Les contrôles exercés sur les étapes les plus exergoniques de la glycolyse
- E. La glycolyse, un carrefour métabolique siège d'entrées de métabolites d'origine variée
- F. Les coenzymes sont régénérés par fermentation en conditions anaérobies ou aérobies

II. Le cycle de Krebs, voie de convergence du catabolisme

- A. En amont du cycle de Krebs : formation de l'acétyl-coenzyme A dans la matrice mitochondriale
- B. Le cycle de Krebs : oxydation totale de l'acétylCoa et l'obtention d'un pouvoir réducteur

III. Des transferts d'électrons exergoniques dans la chaîne respiratoire mitochondriale, une membrane hautement spécialisée

- A. Mise en évidence de transfert entre un donneur et un accepteur d'électrons : réduction d'O₂ et oxydation de NADH, H⁺
- B. Entrée dans la matrice mitochondriale des coenzymes réduits
- C. une série de transporteurs d'électrons dans la membrane mitochondriale
- D. présentation de la chaîne respiratoire mitochondriale
- E. Le bilan d'énergie et de matière du cycle de Krebs

IV. La matière organique peut être stockée ou utilisée pour des biosynthèses

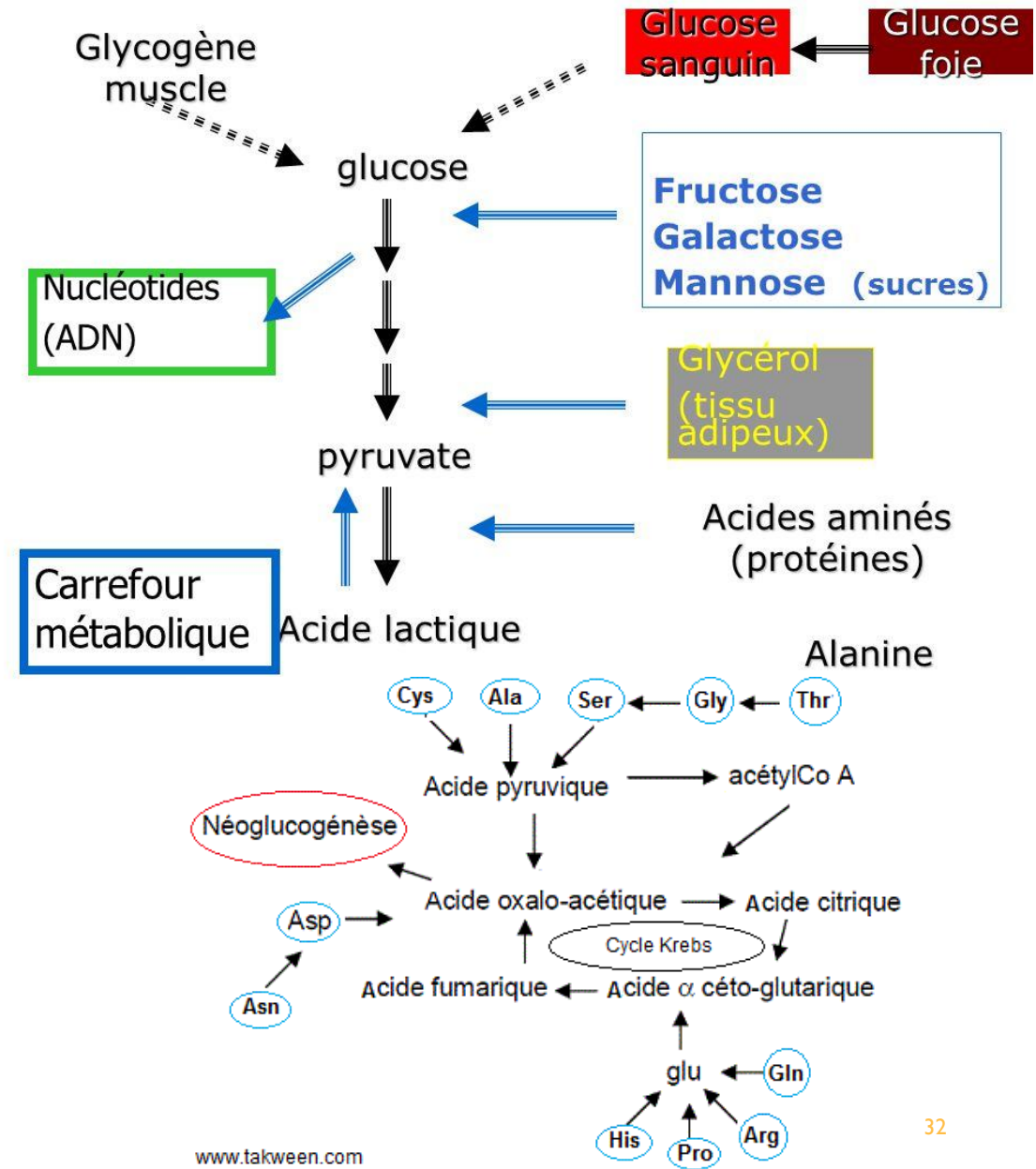
- A. La MO peut être stockée sous forme de réserve ou exportée (exemple des glucides)
- B. La MO est à l'origine de la synthèse de nouvelles molécules

E. LA GLYCOLYSE, UN CARREFOUR METABOLIQUE SIEGE D'ENTREES DE METABOLITES D'ORIGINE VARIEE

I. Les substrats initiaux de la glycolyse



- Origines du glucose :
 - **origine plasmatique** : β D-glucose prélevé dans le milieu extracellulaire par un transporteur membranaire de type perméase GLUT
 - **origine intracellulaire** : réserves de **glycogène** pour la cellule animale (ou d'amidon pour la cellule végétale)
 - ✓ **Glycogénolyse** = dépolymérisation du glycogène en glucose 1-phosphate (G1P) puis (G6P) = substrat de la glycolyse
 - ✓ glucose 6-phosphate peut provenir de **l'interconversion d'oses** comme le galactose ou le mannose avec comme intermédiaire le glucose 1-phosphate.



E. LA GLYCOLYSE, UN CARREFOUR METABOLIQUE SIEGE D'ENTREES DE METABOLITES D'ORIGINE VARIEE

2. Approvisionnement diversifié de la glycolyse

- Autres métabolites (que glucose), servent de substrats intermédiaires à la voie glycolytique



➤ origine glucidique :

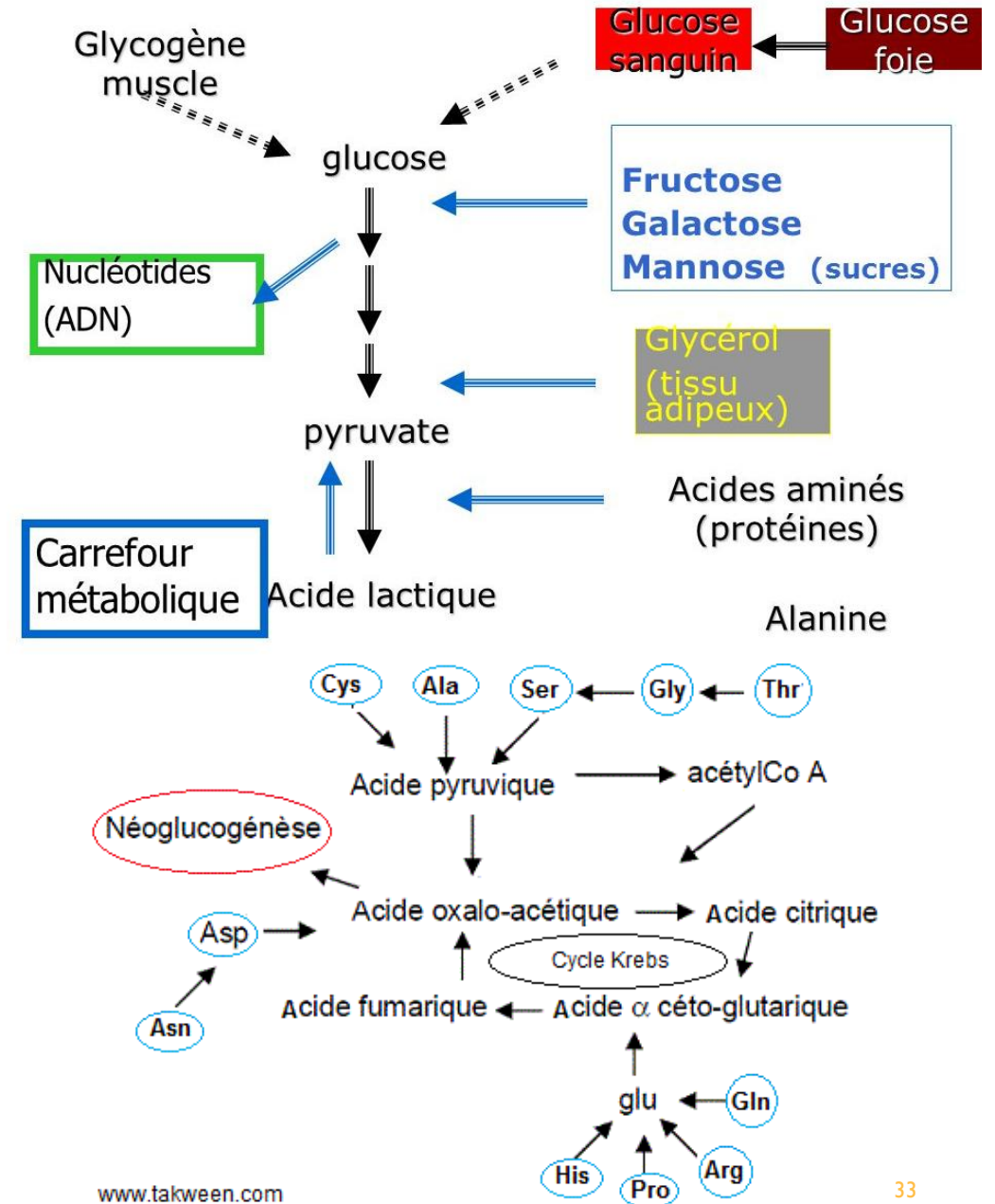
- ✓ galactose → G6P
- ✓ mannose → F6P
- ✓ fructose → DHAP + G3P

➤ origine lipidique :

- ✓ **glycérol**, produit du catabolisme des **triacylglycérols** → en glycérol 3-phosphate (glycérol-kinase) → oxydé en DHAP (glycérol-phosphate déshydrogénase)

➤ origine protéique : « acides aminés glucoformateurs »

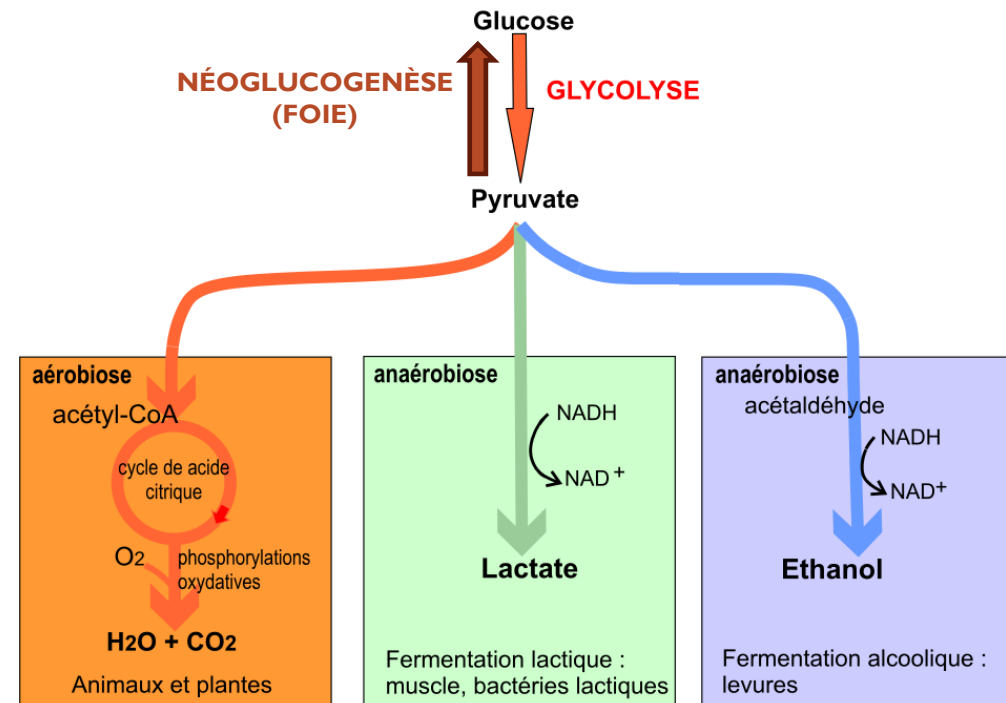
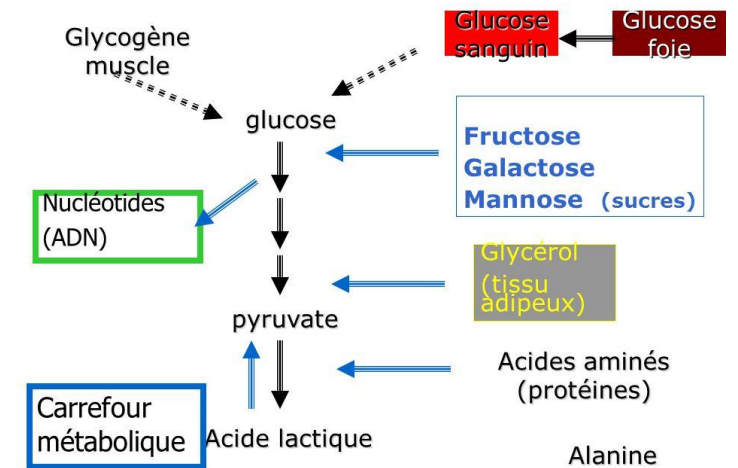
- ✓ **alanine, cystéine, sérine** → pyruvate
- ✓ Réaction de **transamination** (alanine aminotransférase) : Alanine + α -Cétoglutarate → Glutamate + Pyruvate
- ✓ Réaction de **désamination** (sérine déshydratase) : Sérine → NH_3 + Pyruvate



E. LA GLYCOLYSE, UN CARREFOUR METABOLIQUE SIEGE D'ENTREES DE METABOLITES D'ORIGINE VARIEE

3. Devenirs du pyruvate

- Pyruvate = produit final de la glycolyse
 - ⇒ plaque tournante = carrefour métabolique cytosolique
 - **Lactate** en condition anaérobie par fermentation
 - **Glucose** par néoglucogénèse dans la cellule hépatique
 - **Acétyl-coenzyme A**, en condition aérobie dans mitochondrie



Le pyruvate, produit final de la glycolyse, est un carrefour métabolique (source Wikipédia)

PLAN DU COURS

I. La matière organique est oxydée partiellement dans le cytosol : glycolyse et fermentations

- A. Vue d'ensemble de la glycolyse
- B. Les trois étapes de la glycolyse : activation du substrat, oxydation, formation d'ATP
- C. Bilan énergétique de la glycolyse
- D. Les contrôles exercés sur les étapes les plus exergoniques de la glycolyse
- E. La glycolyse, un carrefour métabolique siège d'entrées de métabolites d'origine variée
- F. Les coenzymes sont régénérés par fermentation en conditions anaérobies ou aérobies

II. Le cycle de Krebs, voie de convergence du catabolisme

- A. En amont du cycle de Krebs : formation de l'acétyl-coenzyme A dans la matrice mitochondriale
- B. Le cycle de Krebs : oxydation totale de l'acétylCoa et l'obtention d'un pouvoir réducteur

III. Des transferts d'électrons exergoniques dans la chaîne respiratoire mitochondriale, une membrane hautement spécialisée

- A. Mise en évidence de transfert entre un donneur et un accepteur d'électrons : réduction d'O₂ et oxydation de NADH, H⁺
- B. Entrée dans la matrice mitochondriale des coenzymes réduits
- C. une série de transporteurs d'électrons dans la membrane mitochondriale
- D. présentation de la chaîne respiratoire mitochondriale
- E. Le bilan d'énergie et de matière du cycle de Krebs

IV. La matière organique peut être stockée ou utilisée pour des biosynthèses

- A. La MO peut être stockée sous forme de réserve ou exportée (exemple des glucides)
- B. La MO est à l'origine de la synthèse de nouvelles molécules

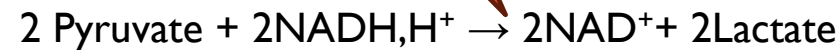
F. LES COENZYMES SONT REGENERES PAR FERMENTATION EN CONDITIONS ANAEROBIES OU AEROBIES



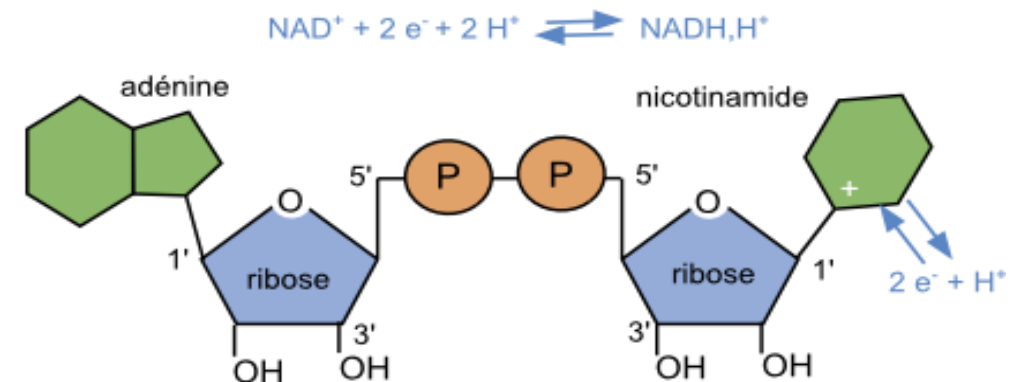
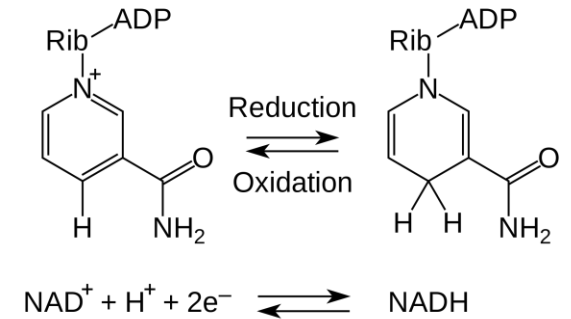
I. 1er exemple : fermentation lactique des cellules musculaires

- cellules musculaires striées squelettiques pas toujours rapidement approvisionnées en dioxygène
 - ⇒ fonctionnement en fermentation
 - électrons et protons du coenzyme réduit sont cédés au pyruvate (lactate-déshydrogénase)

lactate-déshydrogénase



- ⇒ glycolyse se poursuit tant que du glucose est disponible
- Lactate = molécule oxydée évacuée hors de la cellule, récupérée par voie sanguine
 - acheminée jusqu'aux cellules hépatiques → converti à nouveau en glucose par néoglucogenèse (voie inverse de la glycolyse).

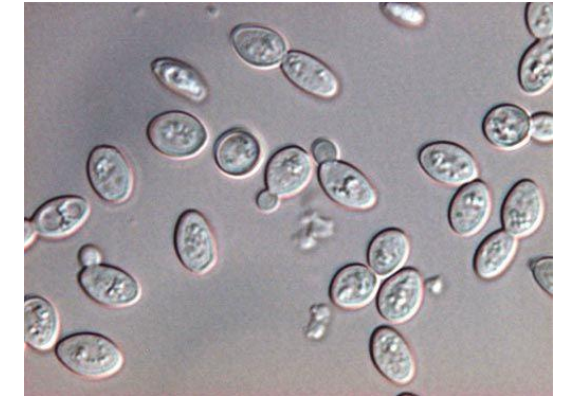


Le NAD+, nicotinamide adénosine dinucléotide

F. LES COENZYMES SONT REGENERES PAR FERMENTATION EN CONDITIONS ANAEROBIES OU AEROBIES

2. 2^{ème} exemple : fermentation alcoolique des levures

- fermentation : alcoolique chez les levures, propionique, butyrique chez les procaryotes...
 - ⇒ régénération du coenzyme oxydé



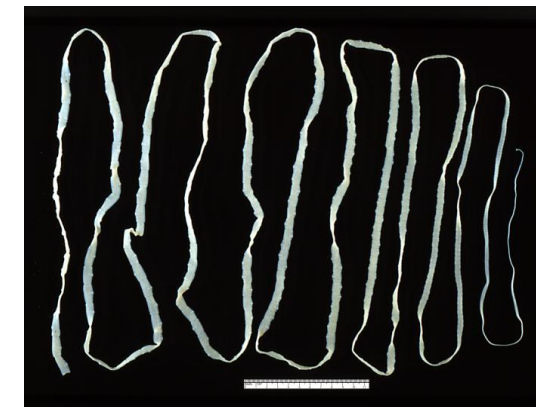
Levures de boulanger au MO
contraste interférentiel de Nomarski

3. Rendement de la fermentation

- En situation anaérobie, le bilan net de la glycolyse = 2 ATP (tout le coenzyme réduit est réoxydé par fermentation)
 - ⇒ **Rendement: $2 \times (-30,5) / - 2860 = 0.021$ soit 2,1 %.**
 - ✓ faible



- **Glycolyse** = seule voie de production possible d'ATP:
 - **cellules de parasites vivant dans la lumière intestinale**
 - **globules rouges**
 - ✓ disponibilité quasi constante en glucose dans la lumière du tube digestif ainsi que dans le plasma sanguin compense largement le faible rendement énergétique de la glycolyse en situation anaérobie pour ces cellules.



Taenia saginata, au métabolisme anaérobie,
parasite du tube digestif



Hématies, au métabolisme anaérobie
(dépourvues de mitochondrie)

F. LES COENZYMES SONT REGENERES PAR FERMENTATION EN CONDITIONS ANAEROBIES OU AEROBIES

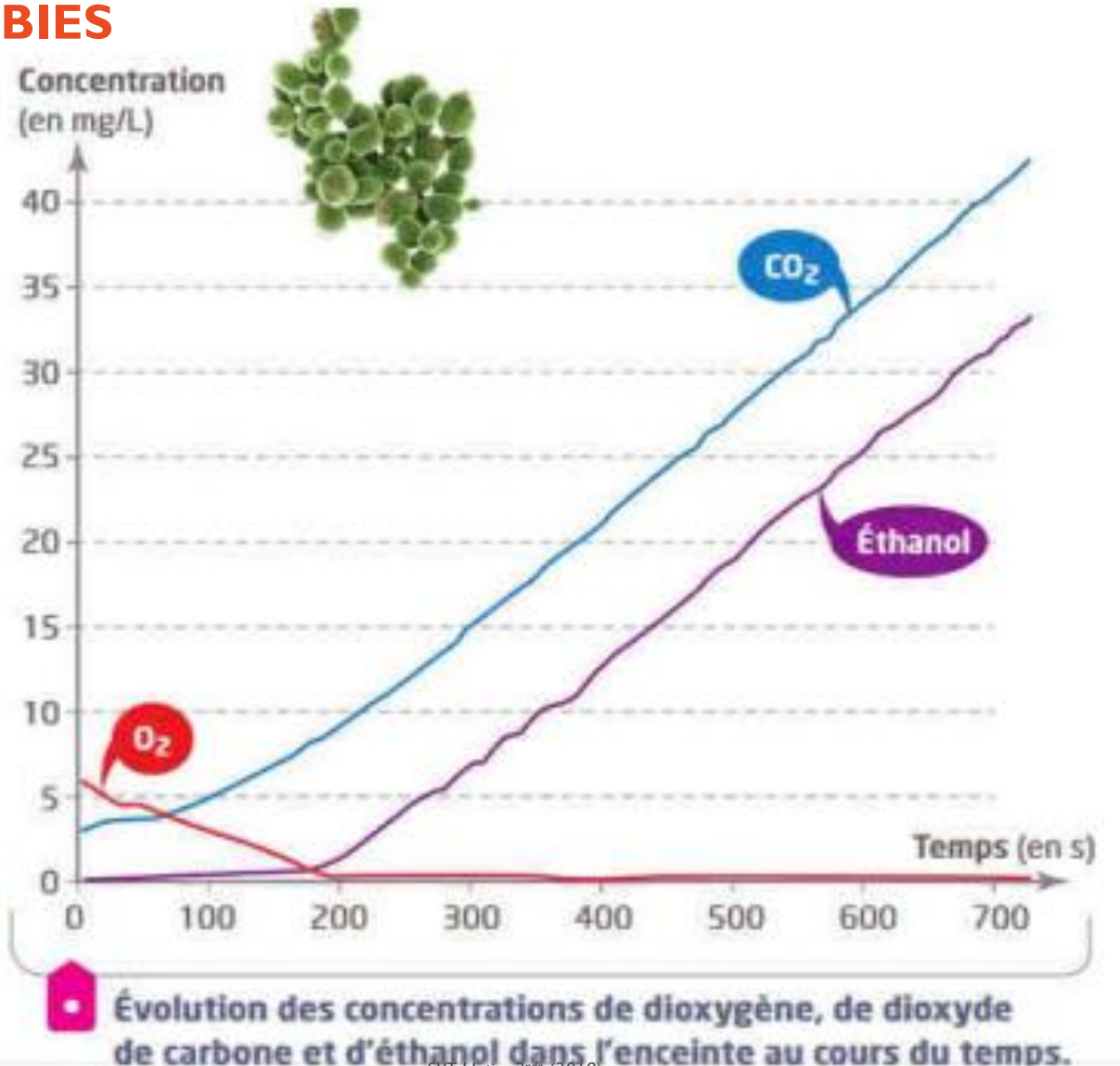
Une culture de levures *Saccharomyces cerevisiae* est placée dans une enceinte fermée. On ajoute une importante quantité de glucose dans le milieu, et on suit l'évolution des concentrations de différentes molécules :

- à l'aide de 3 sondes dans l'enceinte, pour le dioxygène, le dioxyde de carbone et l'éthanol ;

- à l'aide de bandelettes pour le glucose.

La concentration de ce dernier diminue tout au long de l'expérience.

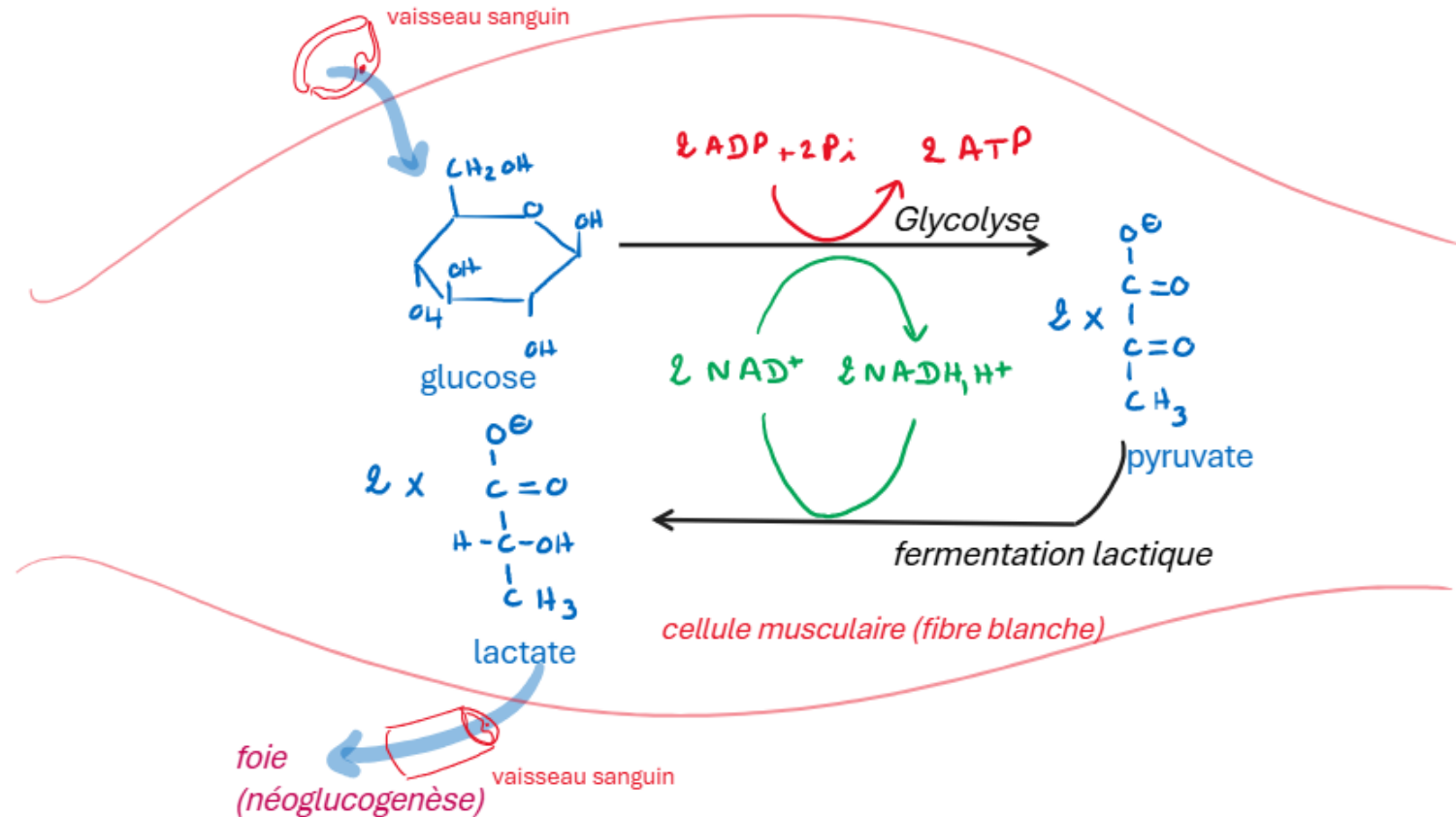
- A partir de l'exploitation du graphique et de vos connaissances, montrer que les levures sont capables de réaliser des voies métaboliques différentes.



F. LES COENZYMES SONT REGENERES PAR FERMENTATION EN CONDITIONS ANAEROBIES OU AEROBIES



- Si absence de dioxygène
 - ⇒ **pyruvate** obtenu par glycolyse demeure dans le cytosol
 - réduction en **lactate** par la lactate-déshydrogénase
 - Couplage avec oxydation d'un **NADH⁺,H⁺** en **NAD⁺**.
- **fermentation lactique**
 - ✓ dans les **cellules musculaires** humaines
 - ✓ **bactéries lactiques** utilisées dans la fabrication du yaourt.



Idée reçue: les courbatures (micro-lésions musculaires) ne sont pas dues à accumulation d'acide lactique; les crampes, oui (néanmoins travaux récents révèlent que crampes surtout dues à altération de la régulation nerveuse)

F. LES COENZYMES SONT REGENERES PAR FERMENTATION EN CONDITIONS ANAEROBIES OU AEROBIES

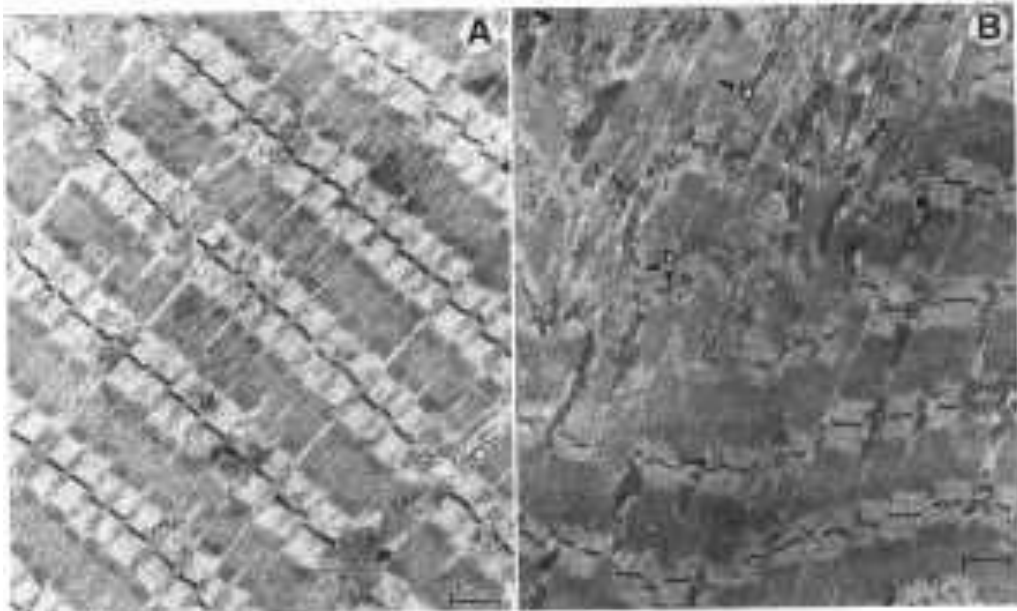
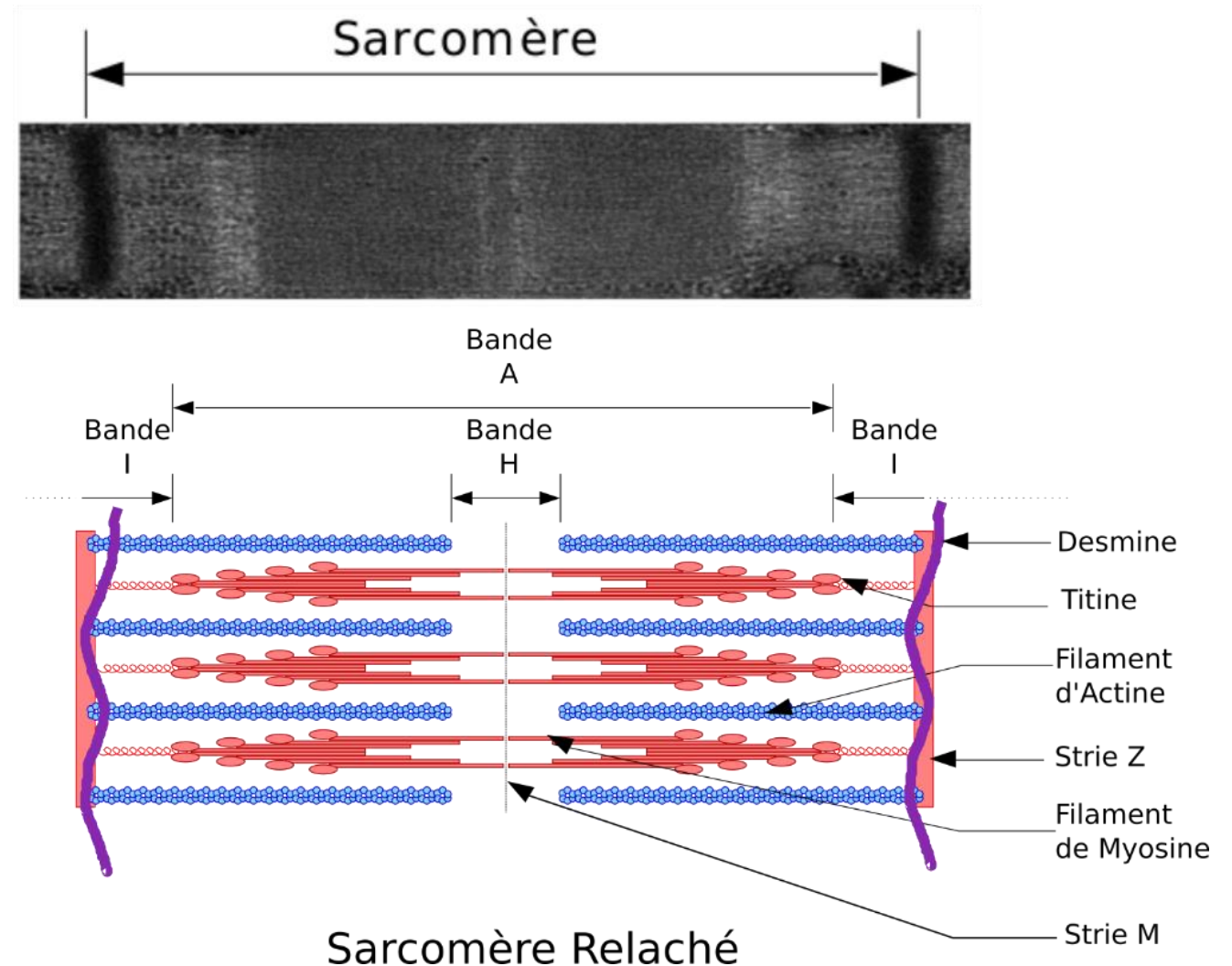
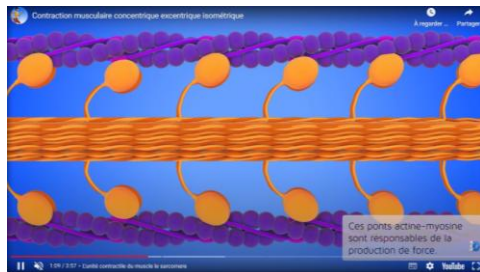


Image extraite de l'étude montrant la rupture des filaments de desmine (à droite) après une contraction musculaire excentrique.

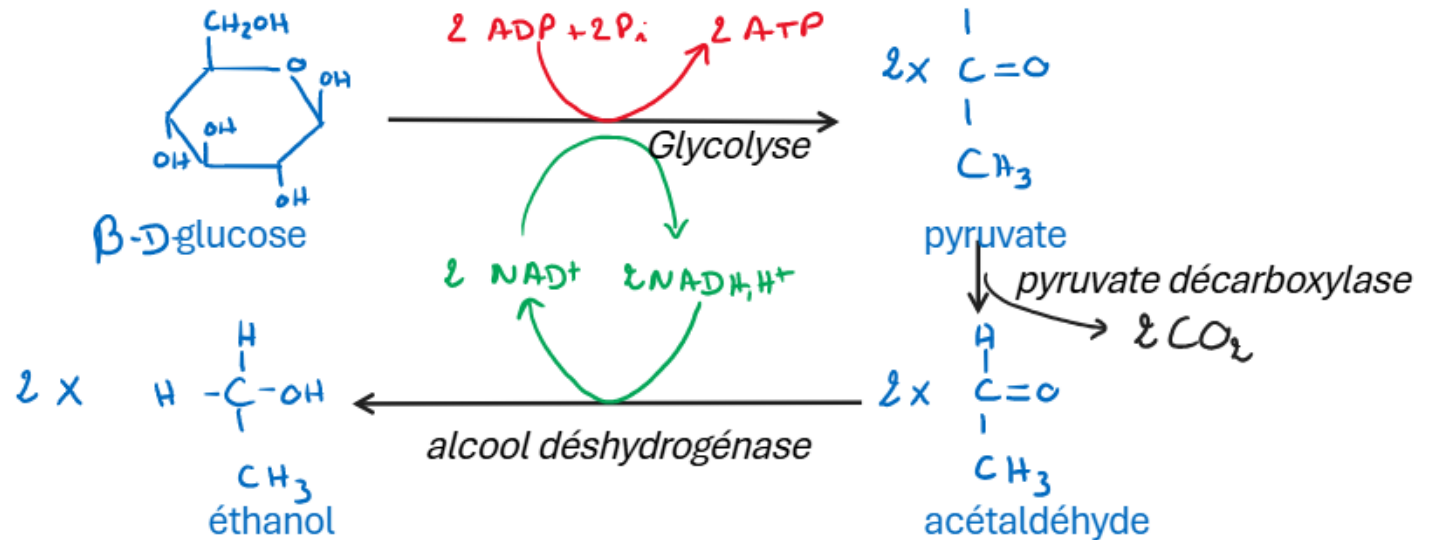
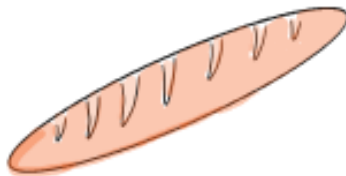


Sarcomère Relaché

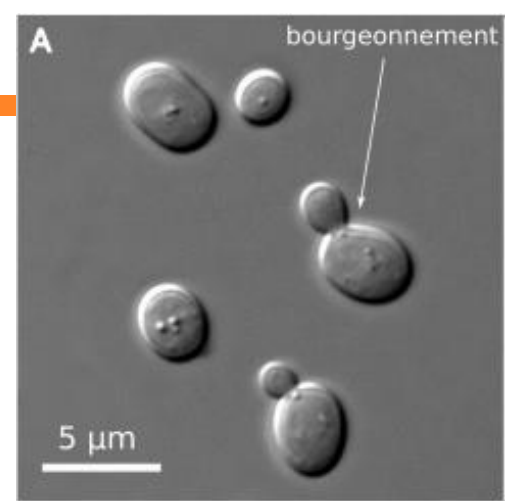
<https://www.youtube.com/watch?v=x2CTIZImmSY>

F. LES COENZYMES SONT REGENERES PAR FERMENTATION EN CONDITIONS ANAEROBIES OU AEROBIES

Chez des micro-organismes comme les levures et dans les tissus de certaines plantes, le pyruvate peut être réduit en alcool éthylique (éthanol), là aussi avec consommation d'un NADH, H⁺. C'est la fermentation alcoolique.



Levures de bière (*Saccharomyces cerevisiae*) en bourgeonnement



<https://planet-vie.ens.fr/thematiques/microbiologie/biologie-du-vin-et-de-la-biere>

→ Ces processus permettent de réoxyder les transporteurs réduits au cours de la glycolyse afin de permettre à celle-ci de se poursuivre.

F. LES COENZYMES SONT REGENERES PAR FERMENTATION EN CONDITIONS ANAEROBIES OU AEROBIES

Rendement ?

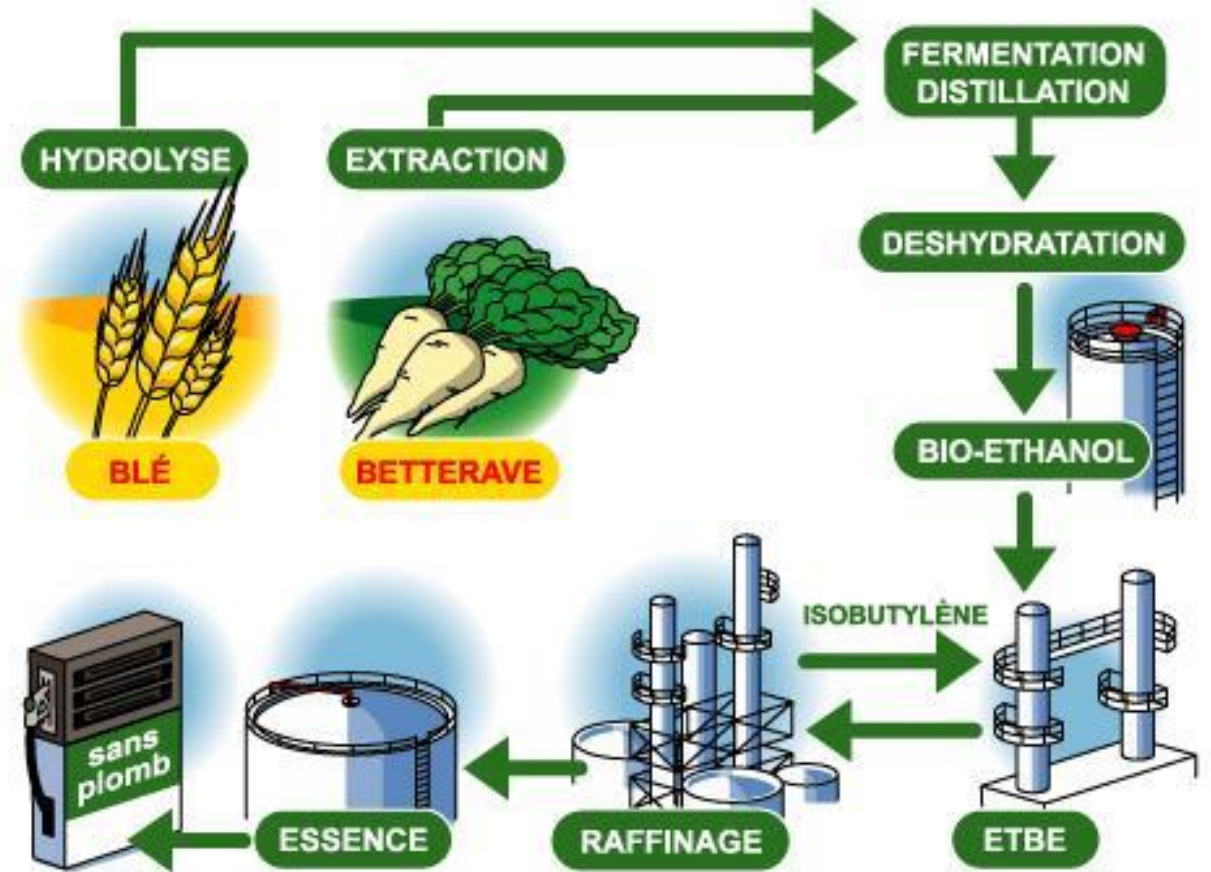
Sensiblement inférieur à celui de la respiration aérobie...

Seules **deux molécules d'ATP** sont produites par molécule de glucose fermentée.

Rendement énergétique = 2 %

Ceci vient du fait que les produits de la fermentation sont encore riches en énergie.

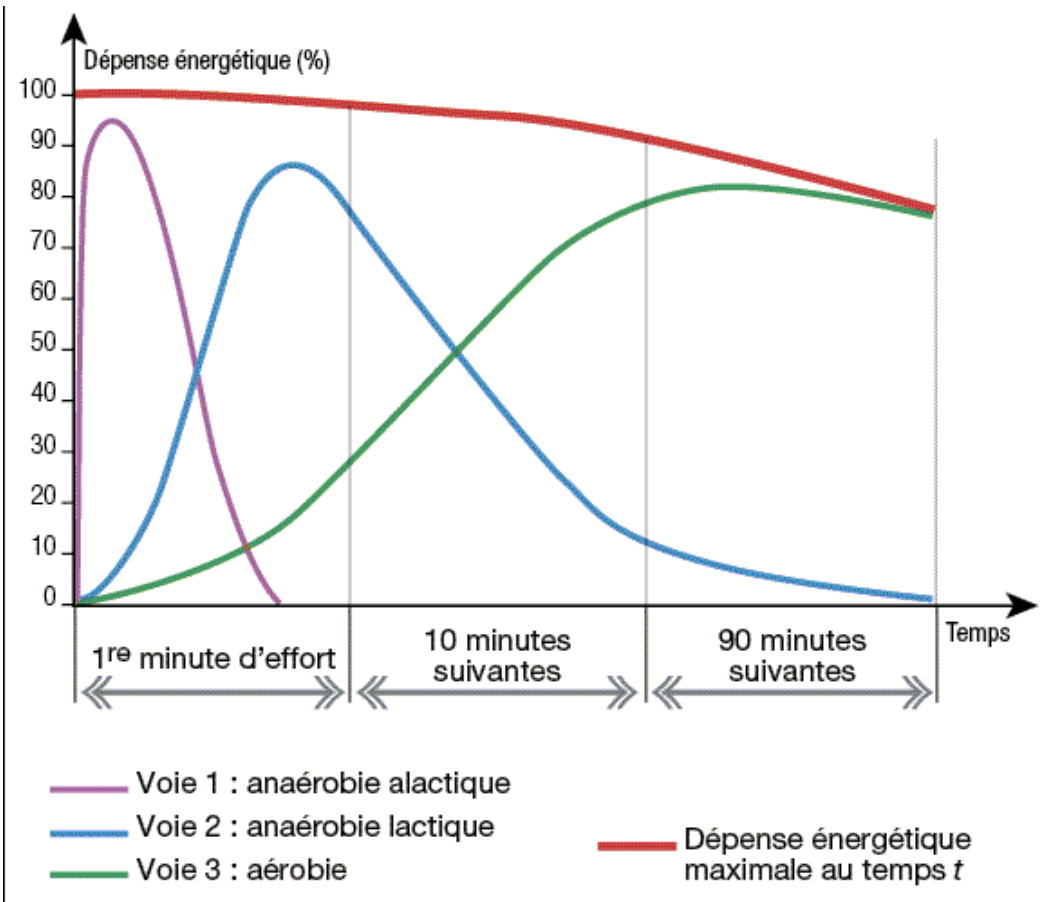
Ex : l'éthanol est un combustible susceptible d'être utilisé comme biocarburant à la place de l'essence pour alimenter des moteurs à combustion interne.



F. LES COENZYMES SONT REGENERES PAR FERMENTATION EN CONDITIONS ANAEROBIES OU AEROBIES

Métabolismes et efforts

Les trois voies de régénération de l'ATP



Activité sportive	Durée	pourcentage de la dépense énergétique totale couvert par chacun des types de métabolismes									
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
ski de fond	3 à 5 h	[Bar chart showing ~5% anaerobic alactic, ~95% aerobic]									
marathon	2h10 à 3h	[Bar chart showing ~5% anaerobic alactic, ~95% aerobic]									
marche	1 à 3h	[Bar chart showing ~5% anaerobic alactic, ~95% aerobic]									
nage libre (1 500 m)	15 à 16 min	[Bar chart showing ~5% anaerobic alactic, ~95% aerobic]									
course (3 000 m)	7,32 à 8 min	[Bar chart showing ~10% anaerobic alactic, ~90% aerobic]									
course (1 500 m)	3,31 à 3,50 min	[Bar chart showing ~15% anaerobic alactic, ~85% aerobic]									
nage libre (200 m)	1,49 à 2,15 min	[Bar chart showing ~25% anaerobic alactic, ~75% aerobic]									
course (400 m)	43 à 49 s	[Bar chart showing ~35% anaerobic alactic, ~65% aerobic]									
course (100 m)	10 à 11s	[Bar chart showing ~90% anaerobic alactic, ~10% aerobic]									
haltérophilie	quelques secondes	[Bar chart showing ~100% anaerobic alactic]									

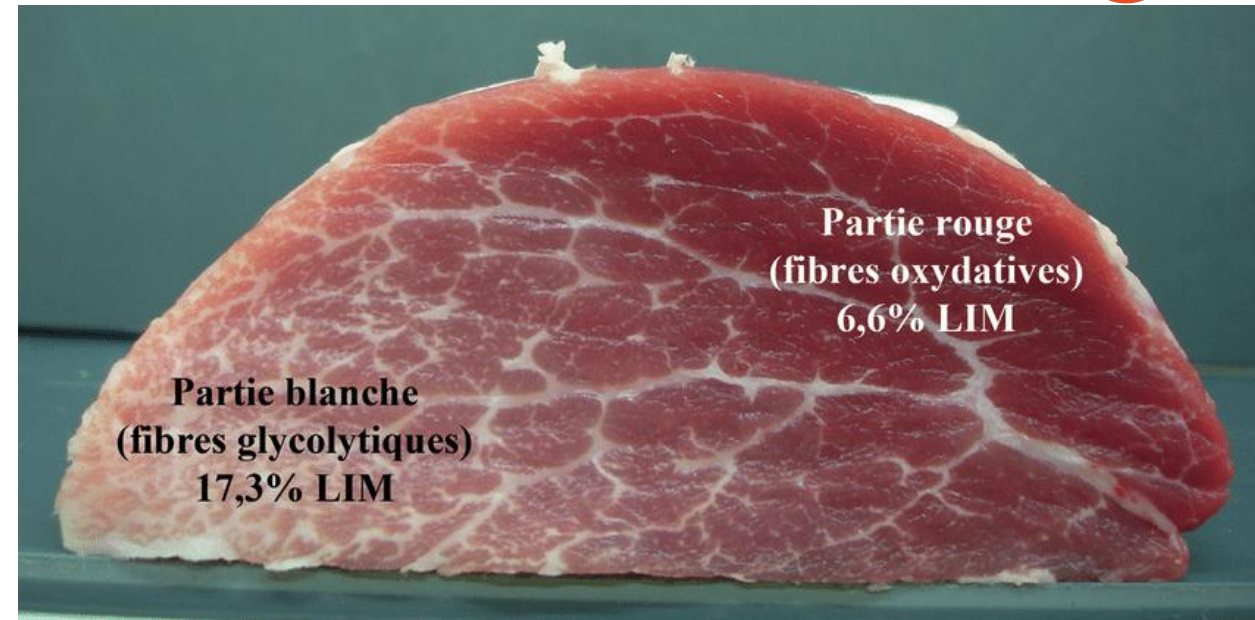
- métabolisme anaérobie alactique
- métabolisme anaérobie lactique
- métabolisme aérobie



F. LES COENZYMES SONT REGENERES PAR FERMENTATION EN CONDITIONS ANAEROBIES OU AEROBIES



caractéristiques	Fibres rouges (type I)	Fibres blanches (type II)
Mitochondries	+++	+ / -
Myoglobine	+++	+ / -
Glycogène	+ / -	+++
Métabolisme	Aérobie	Anaérobie
Muscles concernés	Posturaux	Phasiques
Fatigabilité	Faible	Forte
Contraction	Lente	Rapide



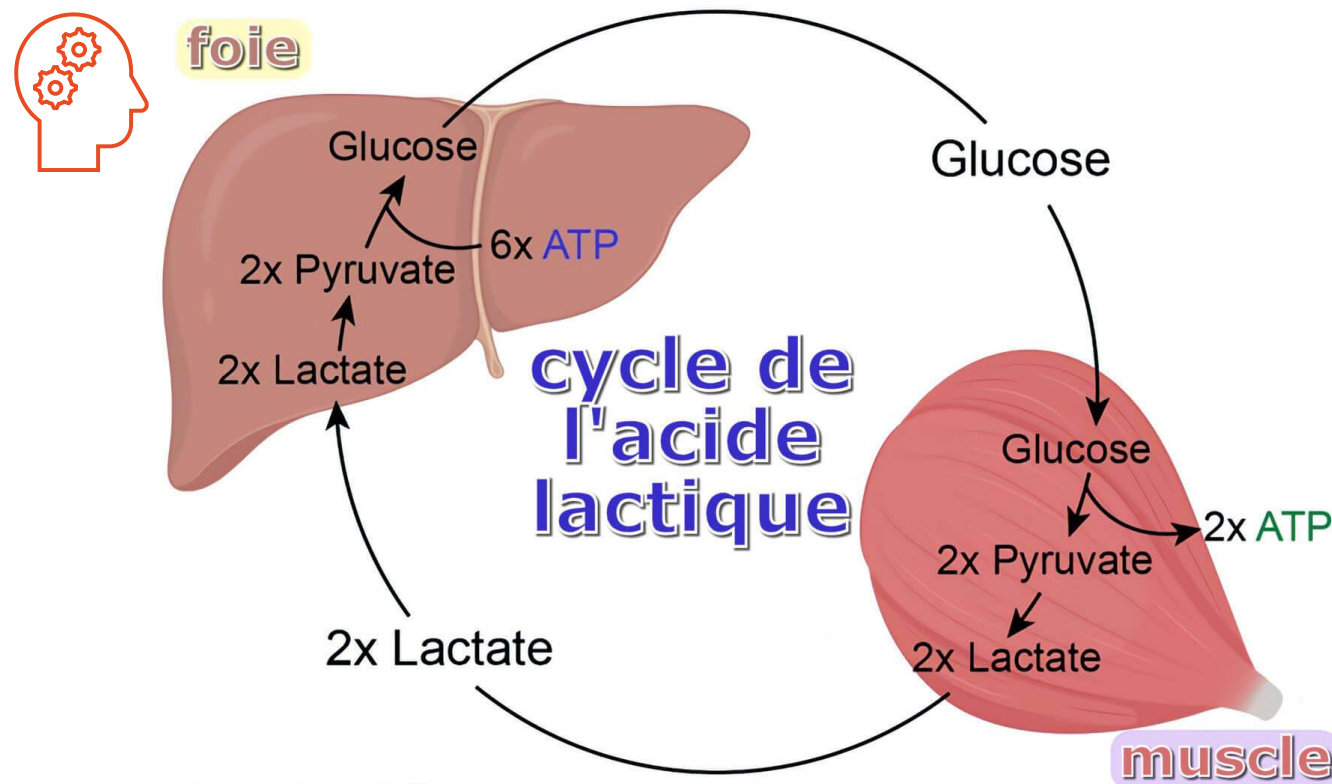
Coupe transversale du muscle Semitendinosus d'un porc de race Basque de 145 kg de poids vif (Lefaucheur, communication personnelle). La teneur en Lipides IntraMusculaires (LIM) est environ trois fois plus élevée dans la partie blanche glycolytique que la partie rouge plus oxydative du muscle.

F. LES COENZYMES SONT REGENERES PAR FERMENTATION EN CONDITIONS ANAEROBIES OU AEROBIES

Inconvénients ?

Une fermentation est une **dégradation partielle** du substrat organique qui aboutit à un **résidu** organique, parfois toxique.

Ex : Chez les mammifères, le lactate est un **déchet** qui s'accumule dans le sang. Mais il est détoxifié par le foie.



PLAN DU COURS

I. La matière organique est oxydée partiellement dans le cytosol : glycolyse et fermentations

- A. Vue d'ensemble de la glycolyse
- B. Les trois étapes de la glycolyse : activation du substrat, oxydation, formation d'ATP
- C. Bilan énergétique de la glycolyse
- D. Les contrôles exercés sur les étapes les plus exergoniques de la glycolyse
- E. La glycolyse, un carrefour métabolique siège d'entrées de métabolites d'origine variée
- F. Les coenzymes sont régénérés par fermentation en conditions anaérobies ou aérobies

II. Le cycle de Krebs, voie de convergence du catabolisme

- A. En amont du cycle de Krebs : formation de l'acétyl-coenzyme A dans la matrice mitochondriale
- B. Le cycle de Krebs : oxydation totale de l'acétylCoa et l'obtention d'un pouvoir réducteur

III. Des transferts d'électrons exergoniques dans la chaîne respiratoire mitochondriale, une membrane hautement spécialisée

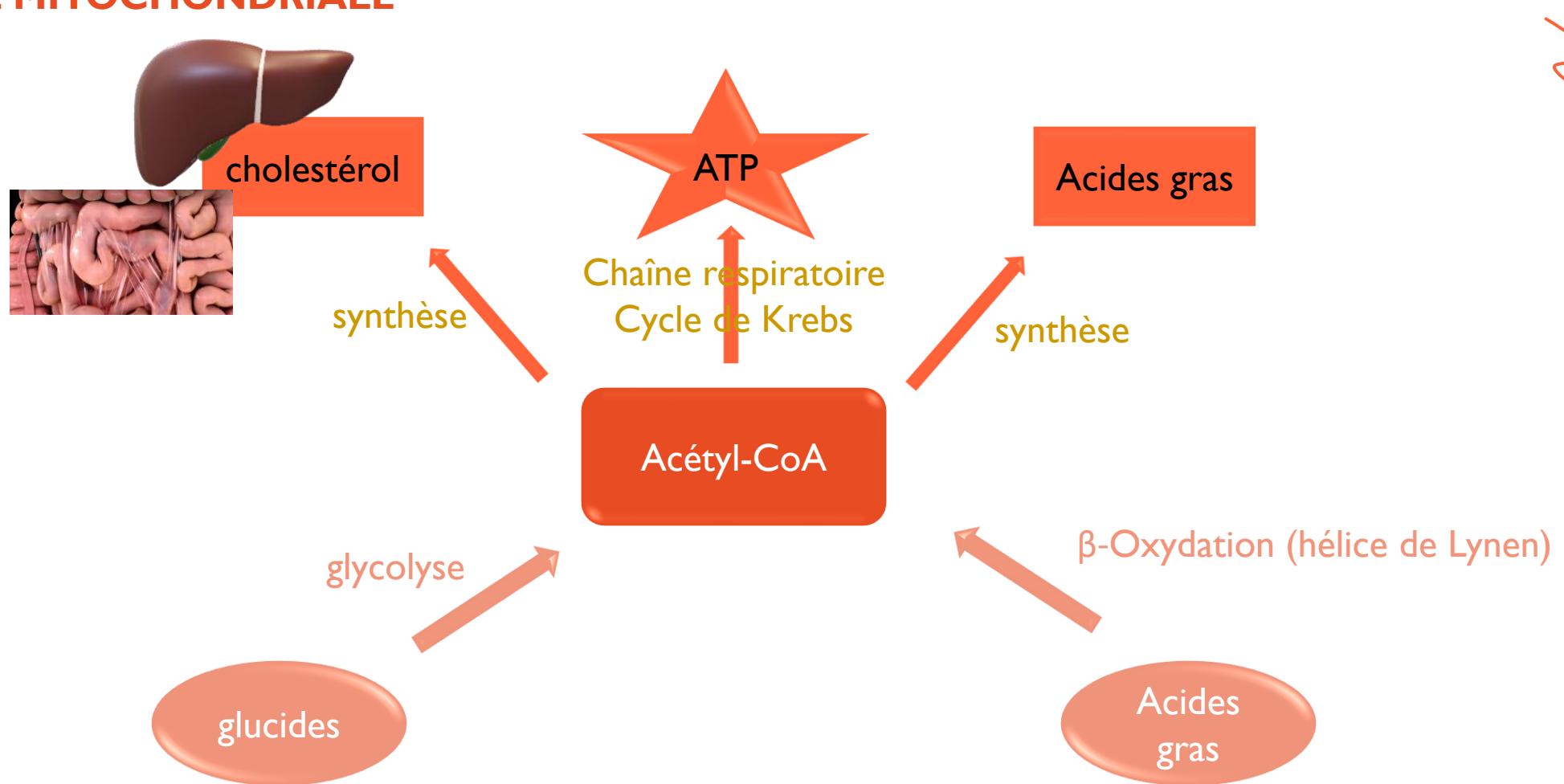
- A. Mise en évidence de transfert entre un donneur et un accepteur d'électrons : réduction d'O₂ et oxydation de NADH, H⁺
- B. Entrée dans la matrice mitochondriale des coenzymes réduits
- C. une série de transporteurs d'électrons dans la membrane mitochondriale
- D. présentation de la chaîne respiratoire mitochondriale
- E. Le bilan d'énergie et de matière du cycle de Krebs

IV. La matière organique peut être stockée ou utilisée pour des biosynthèses

- A. La MO peut être stockée sous forme de réserve ou exportée (exemple des glucides)
- B. La MO est à l'origine de la synthèse de nouvelles molécules

III. LE CYCLE DE KREBS, VOIE DE CONVERGENCE DU CATABOLISME

A. EN AMONT DU CYCLE DE KREBS : FORMATION DE L'ACÉTYL-COENZYME A DANS LA MATRICE MITOCHONDRIALE



L'acétyl-CoA synthétisé dans la matrice mitochondrial un carrefour métabolique

III. LE CYCLE DE KREBS, VOIE DE CONVERGENCE DU CATABOLISME

A. EN AMONT DU CYCLE DE KREBS : FORMATION DE L'ACÉTYL-COENZYME A DANS LA MATRICE MITOCHONDRIALE

Coenzyme : n.m. petite biomolécule, non protéique, indispensable au fonctionnement d'une enzyme

- 3 types de coenzymes de nature nucléotidique :

- **Coenzymes de transfert de groupements phosphoryle**

Ex: ATP, GTP (synthèse prot), UTP (synthèse polysides)

- **Coenzymes d'oxydo-réduction**

Ex : NAD⁺, NADP⁺, FAD

- **Coenzymes de transfert de groupements acétyle et acyle**

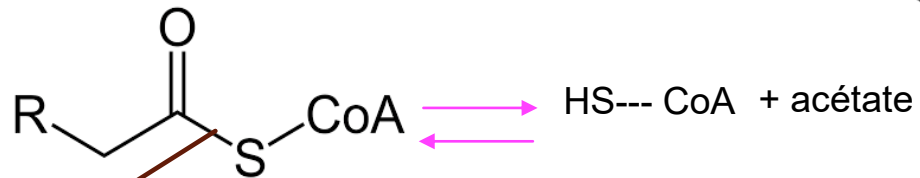
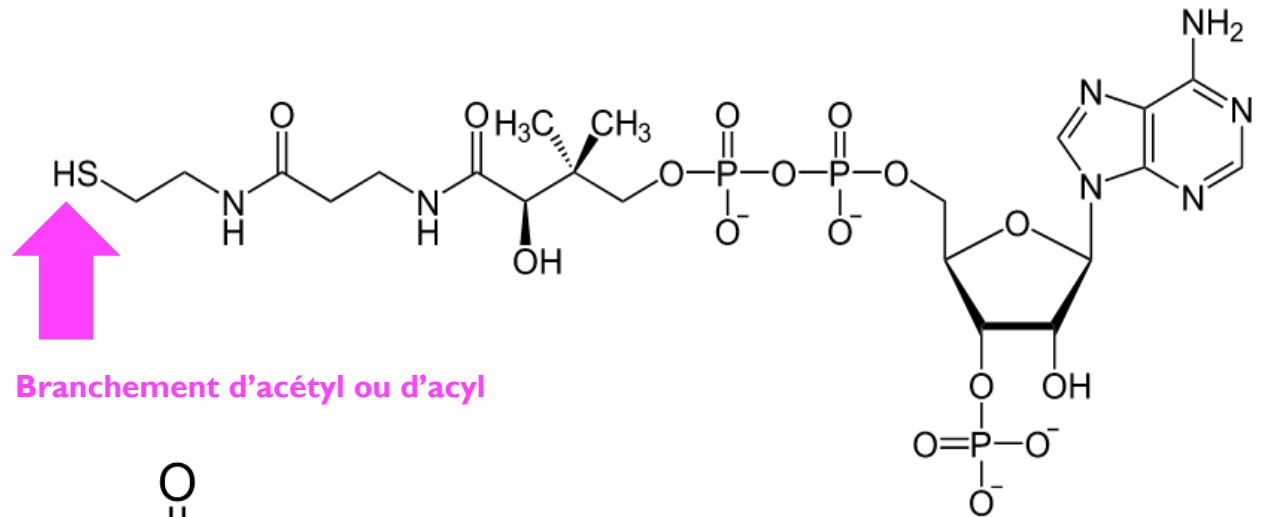
Ex: **Coenzyme A**

✓ Adénosine 3',5' diphosphate + résidu de vitamine B5 + 1 résidu terminal à groupe sulfhydryle (-SH)

✓ Haut potentiel énergétique:

Acétyl-CoA → Acétate + CoA-SH avec

$\Delta rG^{\circ} = -33,4 \text{ kJ/mole}$



Liaison thioester

Formule développée du CoA (coenzyme A)



A. EN AMONT DU CYCLE DE KREBS : FORMATION DE L'ACÉTYL-COENZYME A DANS LA MATRICE MITOCHONDRIALE

I. Origines de l'Acétyl-CoA

- Entrée du **pyruvate** dans la mitochondrie :
 - membrane externe perméable via les porines
 - Membrane interne : symport H^+ /Pyruvate
 - ✓ cf fort gradient protonique, entretenu par la chaîne respiratoire favorable à l'entrée en continu du pyruvate dans la matrice
- Entrée des **AA**:
 - membrane externe perméable via les porines
 - Membrane interne : transporteur passif (gradient favorable à entrée d'AA)
- Entrée des **acides gras** dans la mitochondrie :
 - Réserve cellulaire = **gouttelettes de TG hydrolysées par triacylglycérol lipase** → glycérol (rejoint la glycolyse) + **AG**
 - membrane externe diffusion passive des **AG**
 - Membrane interne : navette à carnitine

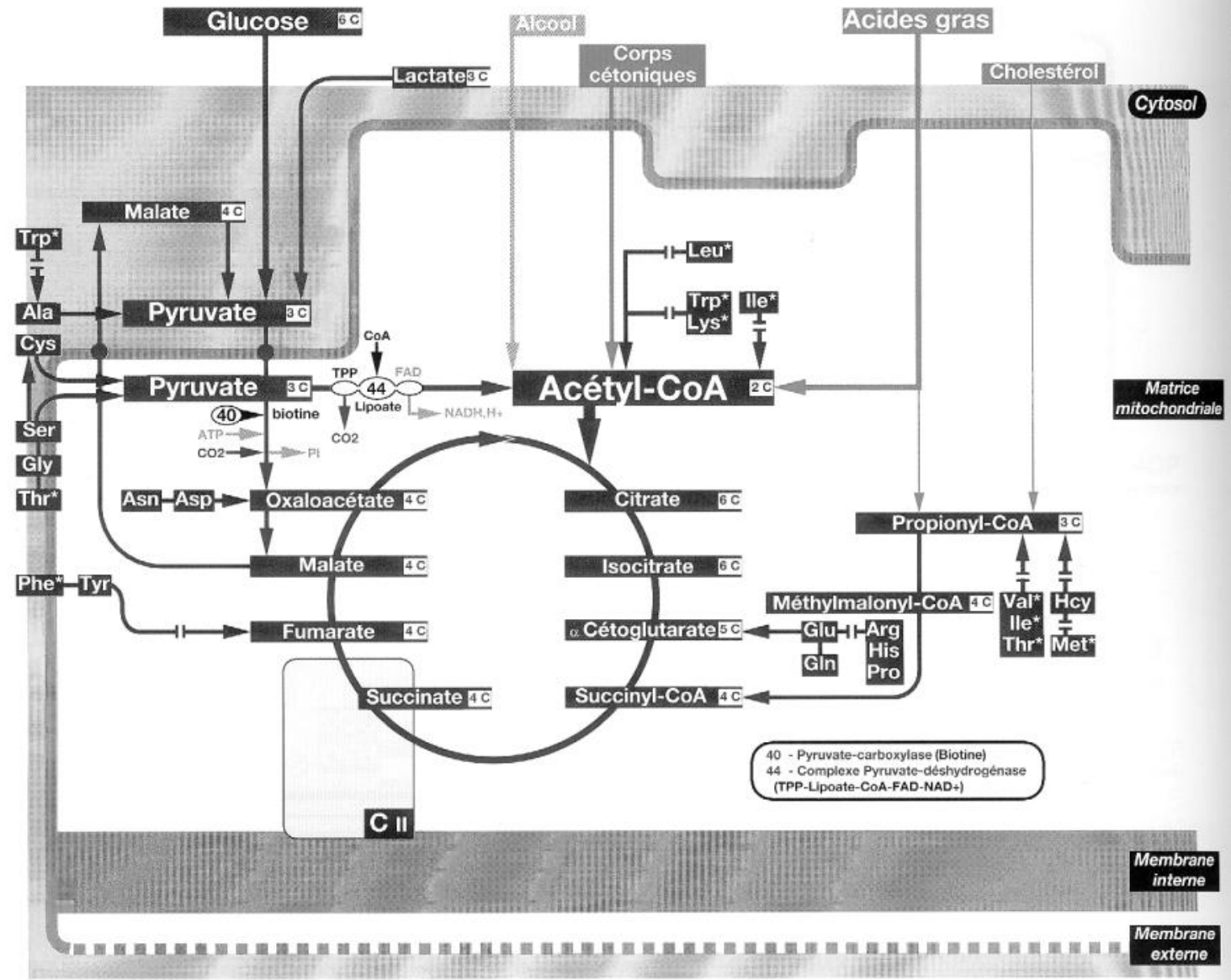


Figure 17 : L'Acétyl-CoA, molécule carrefour, multiples origines qui convergent vers le cycle de Krebs

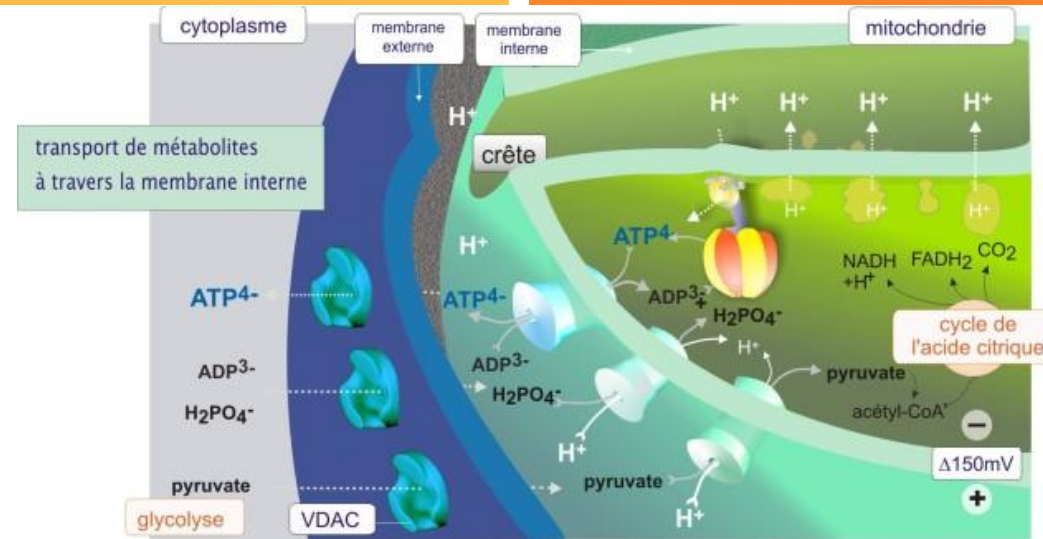
A. EN AMONT DU CYCLE DE KREBS : FORMATION DE L'ACÉTYL-COENZYME A DANS LA MATRICE MITOCHONDRIALE

I. Origines de l'Acétyl-CoA

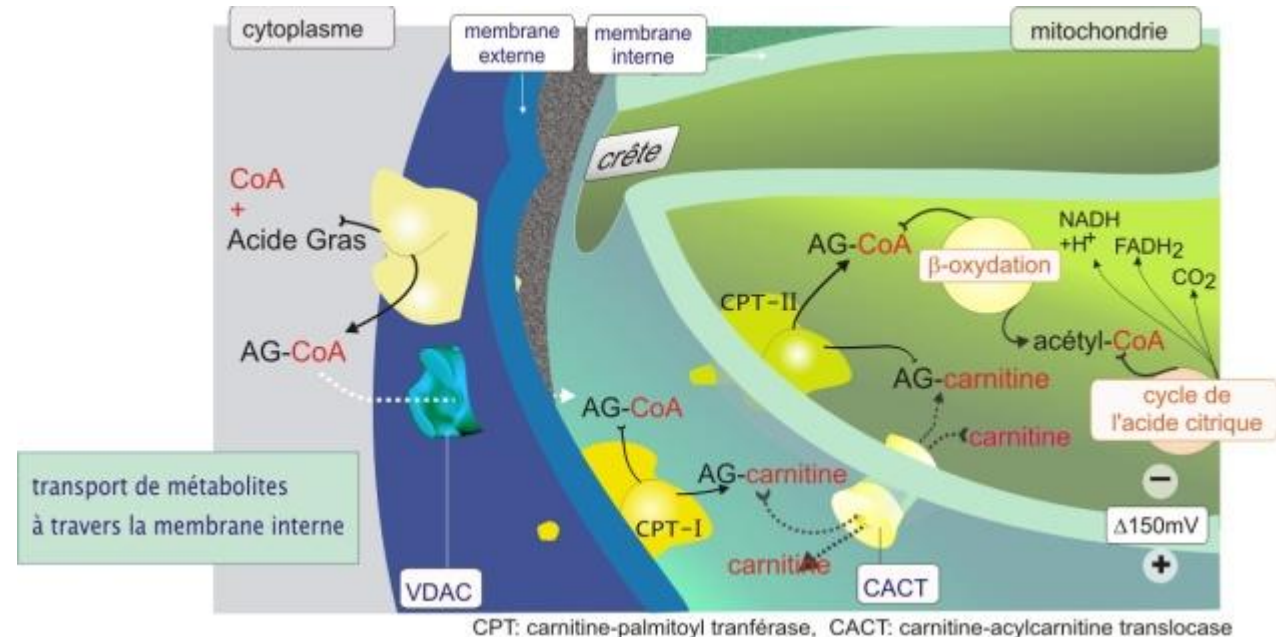
- Entrée du **pyruvate** dans la mitochondrie :
 - **Membrane interne : symport H^+ /Pyruvate**

- Entrée des **AA**:
 - membrane externe perméable via les porines
 - Membrane interne : transporteur passif (gradient favorable à entrée d'AA)

- Entrée des **acides gras** dans la mitochondrie :
 - Réserve cellulaire = **gouttelettes de TG hydrolysées par triacylglycérol lipase** → glycérol (rejoint la glycolyse) + **AG (ac. Palmitique le + abondant)**
 - membrane externe diffusion passive facilitée des **AG sous forme d'acylCoA**
 - **Membrane interne: navette à carnitine**
 - ✓ *carnitine/acylcarnitine translocase (CACT, poids moléculaire de 33 kDa)*



Transport d'ATP/ADP, Pi et pyruvate (source: Unisciel)



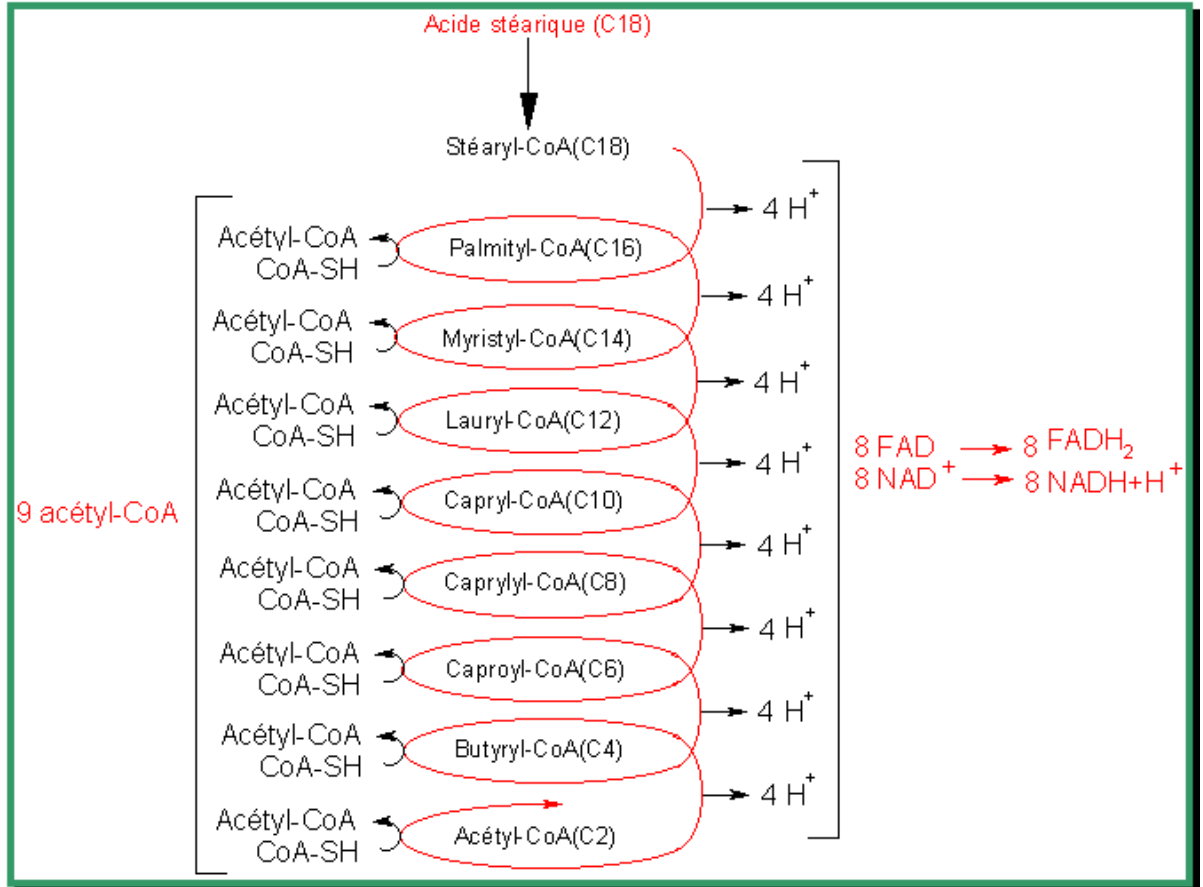
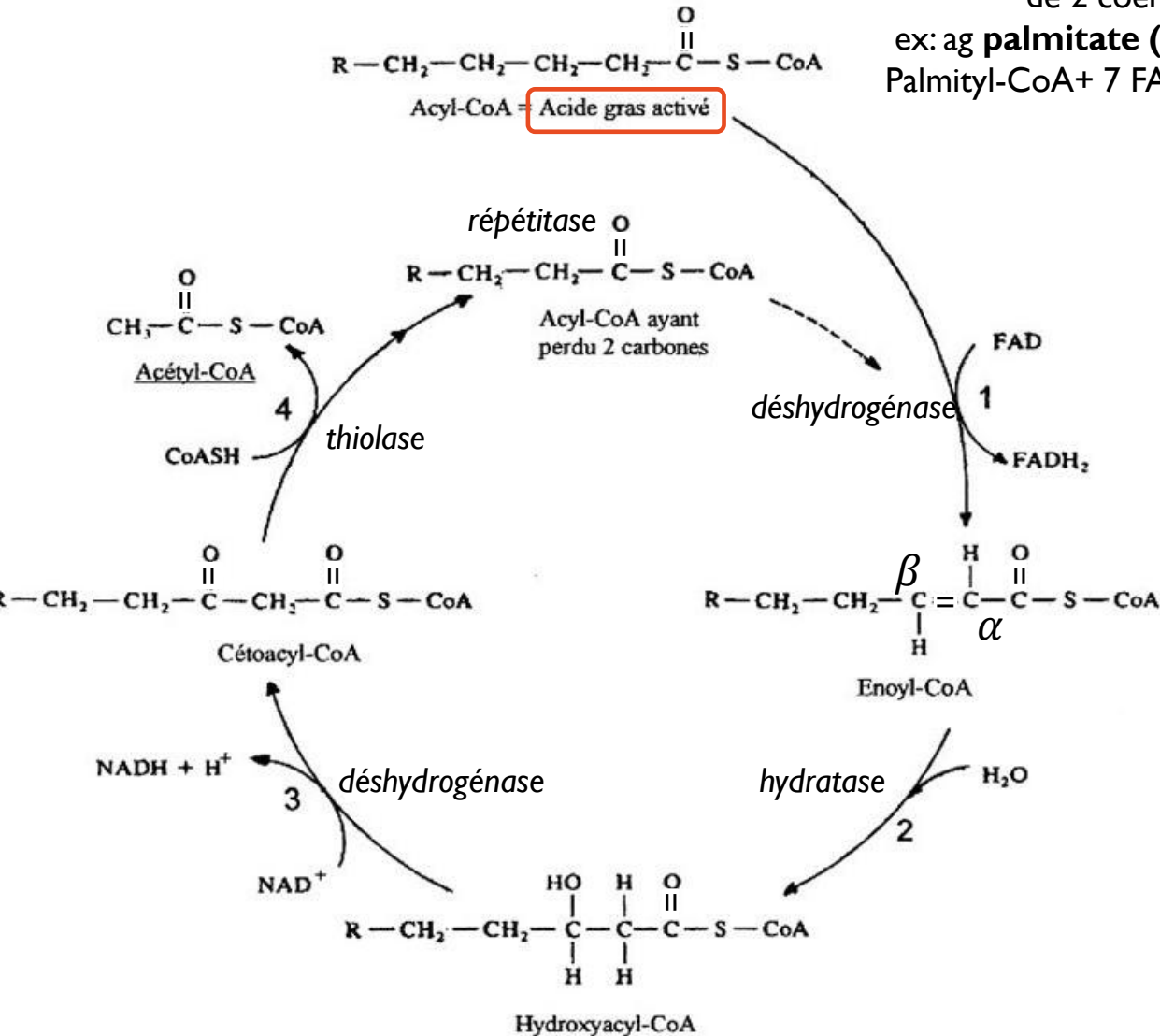
Le transport des acides gras (Source Unisciel)

A. EN AMONT DU CYCLE DE KREBS : FORMATION DE L'ACÉTYL-COENZYME A DANS LA MATRICE MITOCHONDRIALE



I. Origines de l'Acétyl-CoA

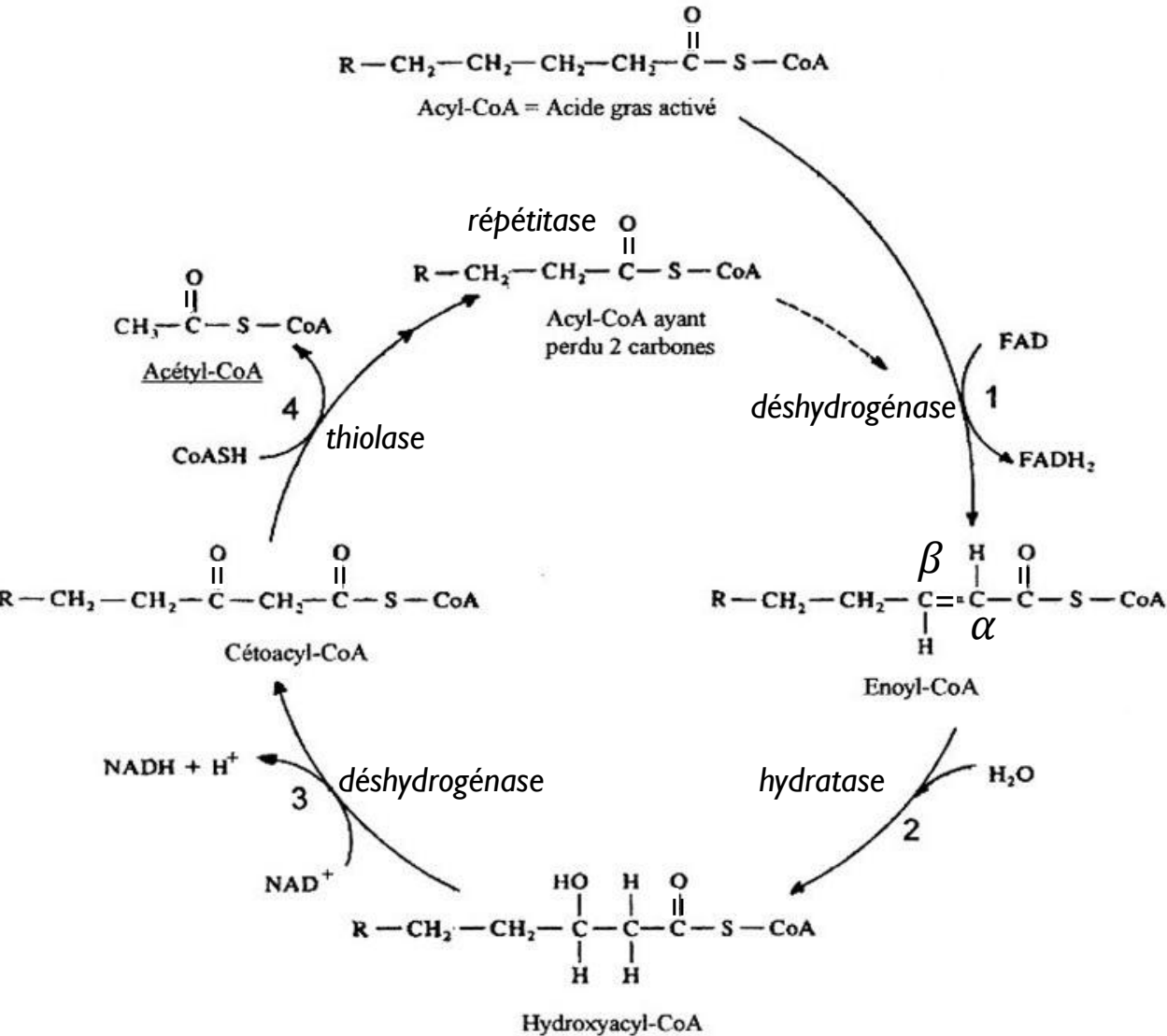
- matrice mitochondriale, à chaque tour d'hélice de Lyden
 - raccourcissement du squelette carboné deux atomes de carbone (acétyl-CoA) + réduction de 2 coenzymes
- ex: ag **palmitate (C16)** → **8 acétyl-CoA** avec **7 tours d'hélice de Lyden**
 $\text{Palmityl-CoA} + 7 \text{ FAD} + 7 \text{ NAD}^+ + 7 \text{ CoASH} + 7 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 8 \text{ acétyl-CoA} + 7 \text{ FADH}_2 + 7 \text{ NADH, H}^+$



A. EN AMONT DU CYCLE DE KREBS : FORMATION DE L'ACÉTYL-COENZYME A DANS LA MATRICE MITOCHONDRIALE



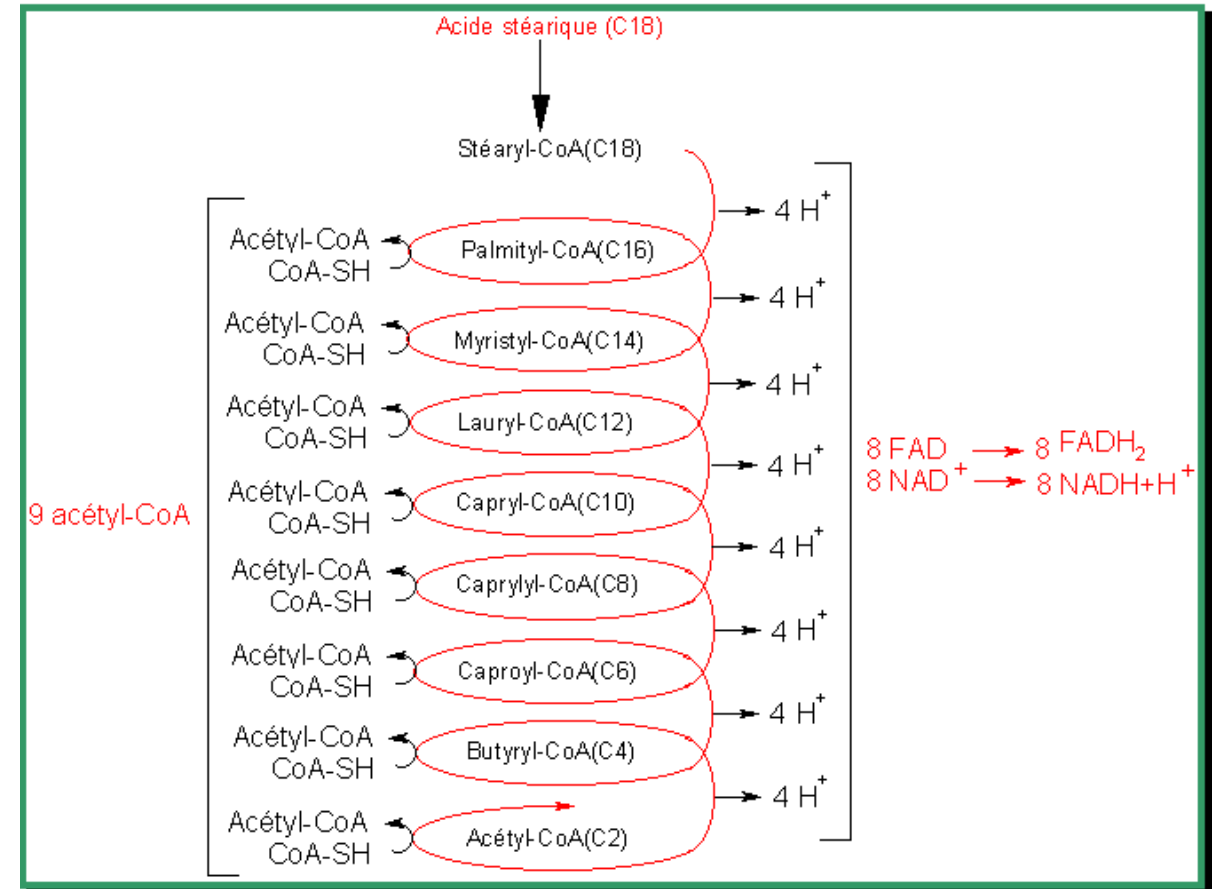
I. Origines de l'Acétyl-CoA

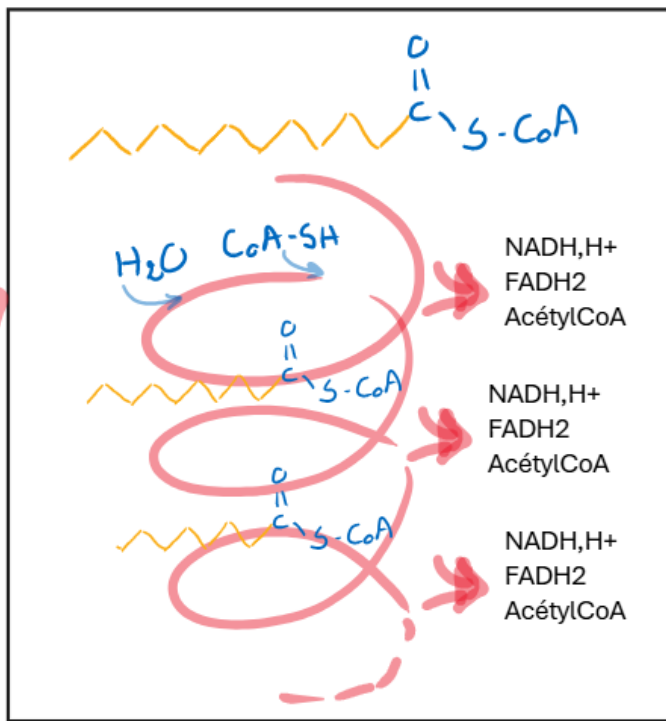
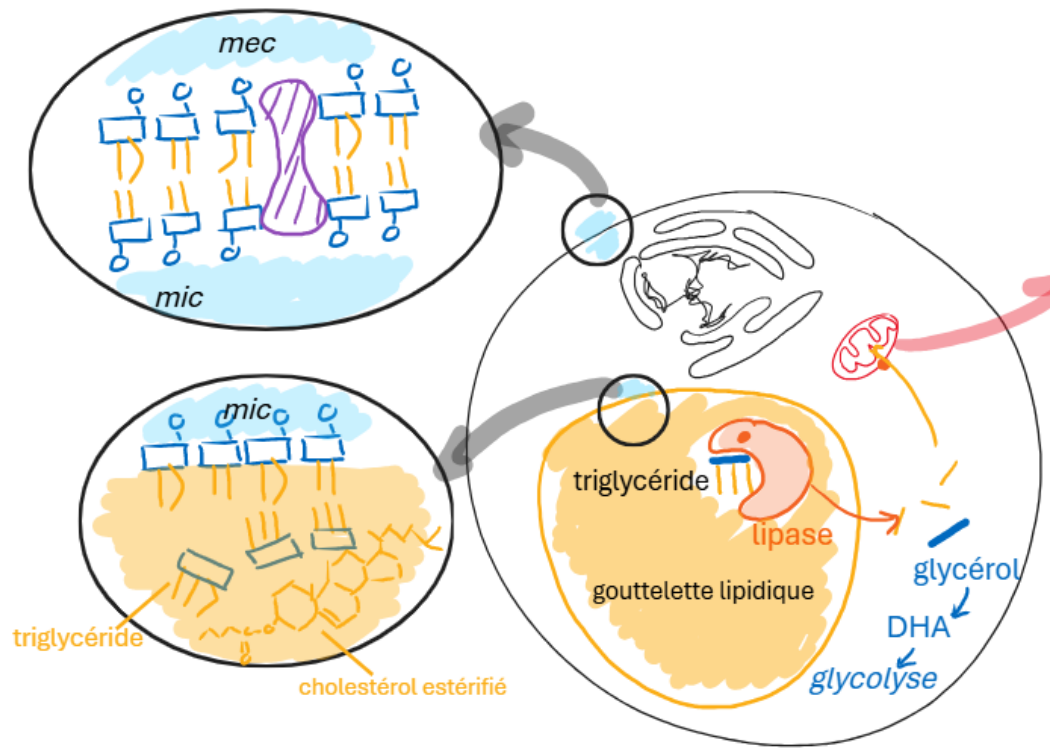


matrice mitochondriale, à chaque tour d'hélice de Lyden

⇒ raccourcissement du squelette carboné deux atomes de carbone (acétyl de 2 coenzymes)

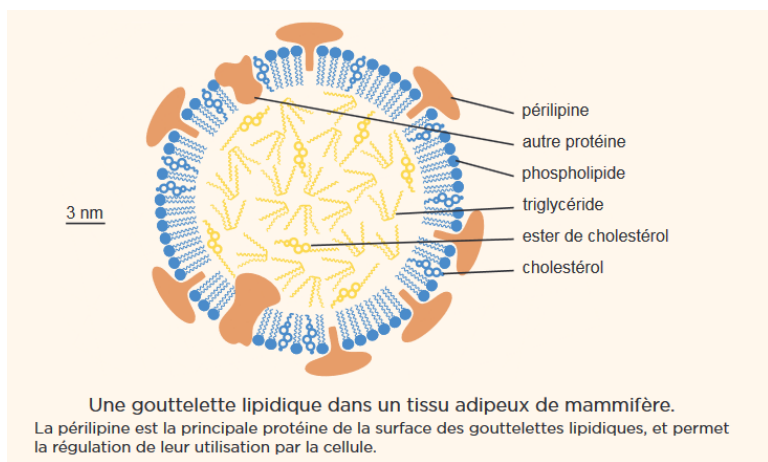
ex: ag **palmitate (C16)** → **8 acétyl-CoA** avec **7 tours d'hélice de Lyden**
 Palmityl-CoA + 7 FAD + 7 NAD⁺ + 7 CoASH + 7 H₂O → **8 acétyl-CoA** + 7 FADH₂ + 7 NADH + 7 H⁺





Hélice de Lyden dans la matrice mitochondriale

Adipocyte



Les lipides et leur rôle de réserve, exemple de l'adipocyte (S. Dalaine)

D'après J'intègre Dunod ed 2021

A. EN AMONT DU CYCLE DE KREBS : FORMATION DE L'ACÉTYL-COENZYME A DANS LA MATRICE MITOCHONDRIALE

2. Production d'Acétyl - Coenzyme A par décarboxylation oxydative du pyruvate

- Juste avant le cycle de Krebs, en conditions aérobies (présence d'O₂)
- Le pyruvate est transporté dans la matrice mitochondriale.
 - Passage de la membrane externe par une perméase
 - Passage de la membrane interne par un symport protons H⁺ / pyruvate.
- Oxydation par complexe **pyruvate déshydrogénase** en acétyl-CoA avec libération de CO₂ et de NADH, H⁺= **décarboxylation oxydative**.
- Puis l'acétyl-CoA entre dans le cycle de Krebs.

Figure 21 : l'entrée du pyruvate dans la mitochondrie et sa décarboxylation oxydative par la pyruvate déshydrogénase

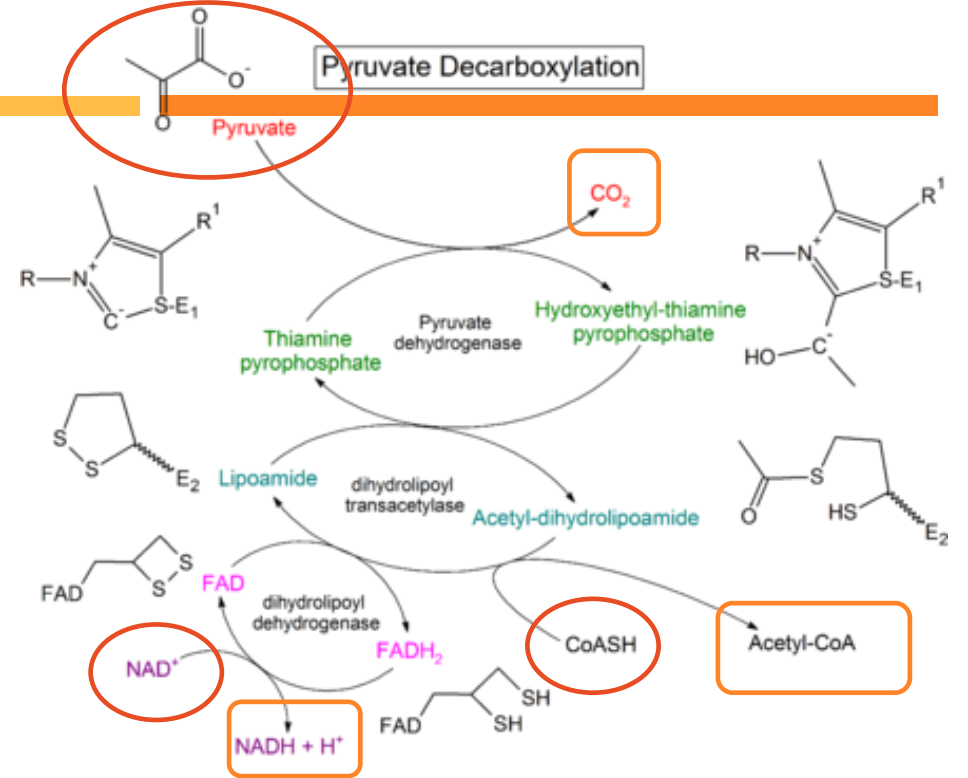
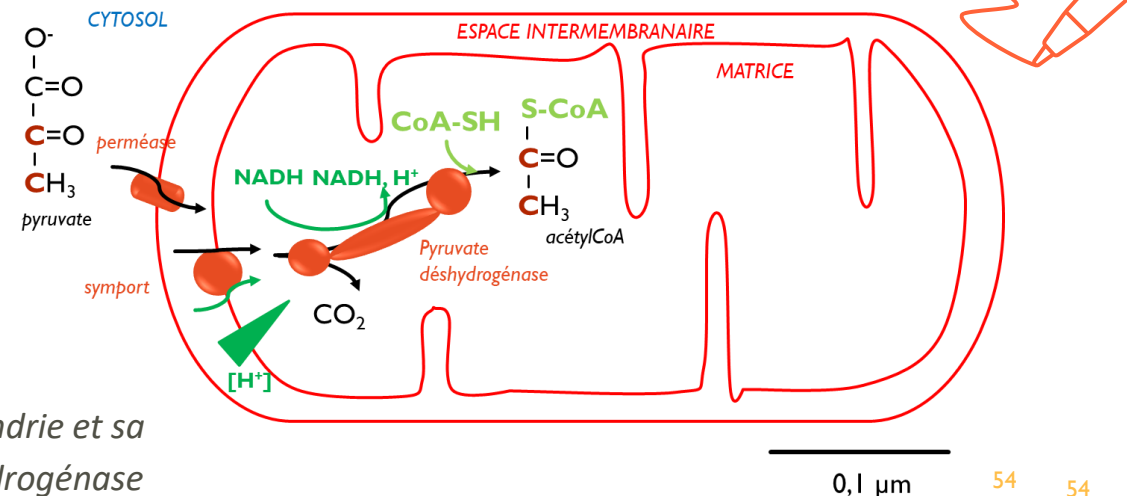
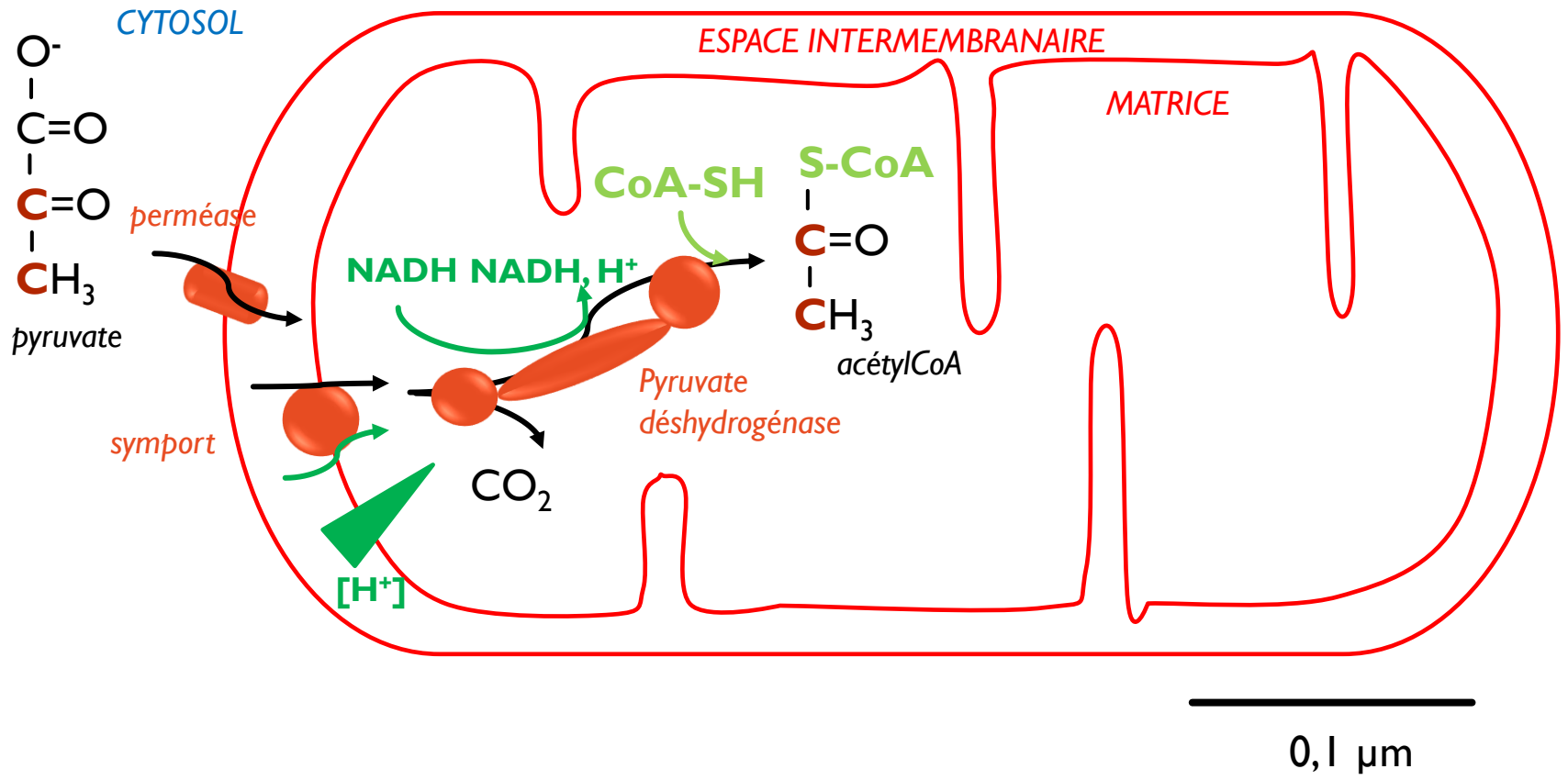
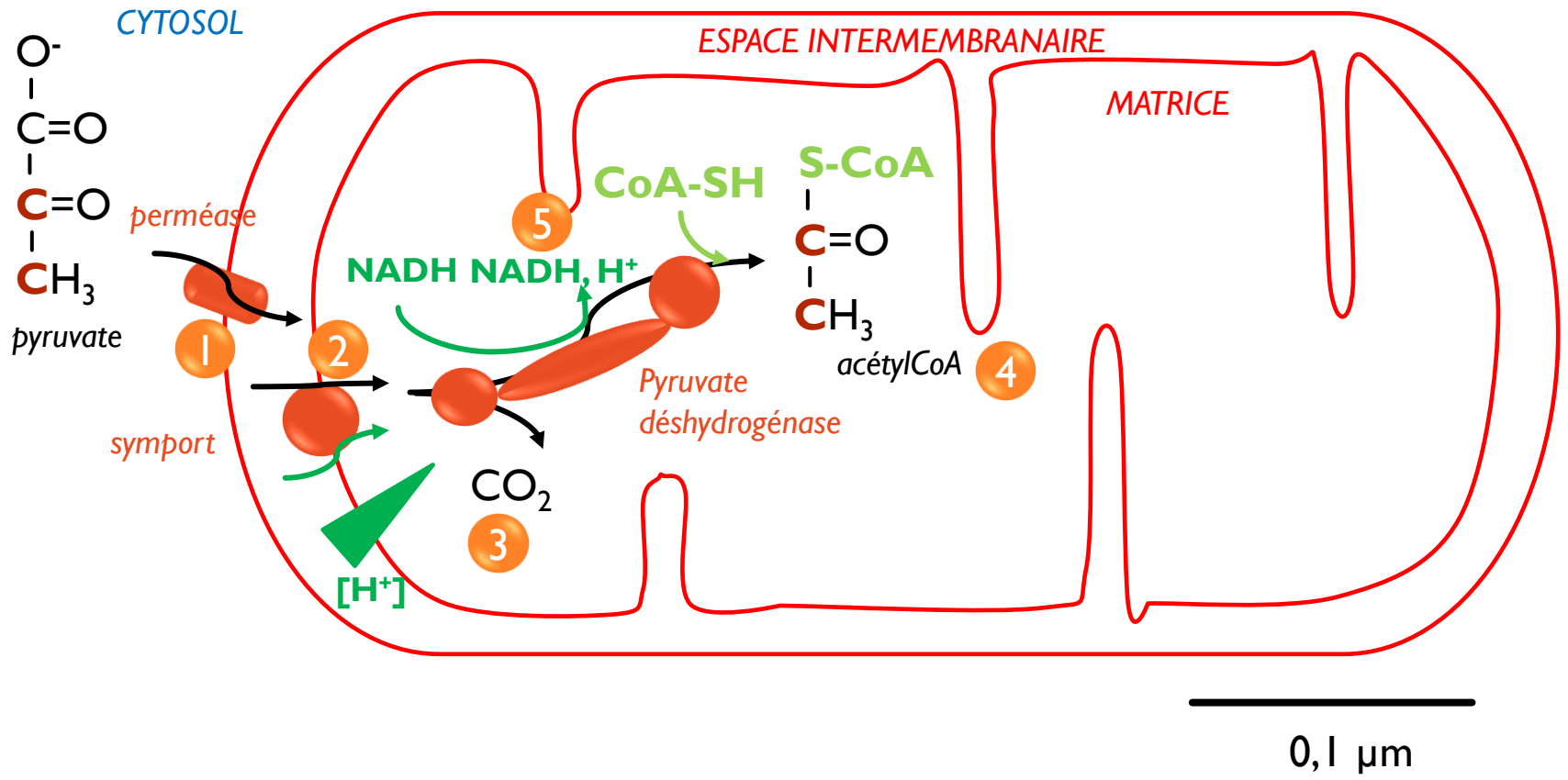


Figure 20 : Mécanisme séquentiel de décarboxylation oxydative par le complexe pyruvate-déshydrogénase







PLAN DU COURS

I. La matière organique est oxydée partiellement dans le cytosol : glycolyse et fermentations

- A. Vue d'ensemble de la glycolyse
- B. Les trois étapes de la glycolyse : activation du substrat, oxydation, formation d'ATP
- C. Bilan énergétique de la glycolyse
- D. Les contrôles exercés sur les étapes les plus exergoniques de la glycolyse
- E. La glycolyse, un carrefour métabolique siège d'entrées de métabolites d'origine variée
- F. Les coenzymes sont régénérés par fermentation en conditions anaérobies ou aérobies

II. Le cycle de Krebs, voie de convergence du catabolisme

- A. En amont du cycle de Krebs : formation de l'acétyl-coenzyme A dans la matrice mitochondriale
- B. Le cycle de Krebs : oxydation totale de l'acétylCoa et l'obtention d'un pouvoir réducteur

III. Des transferts d'électrons exergoniques dans la chaîne respiratoire mitochondriale, une membrane hautement spécialisée

- A. Mise en évidence de transfert entre un donneur et un accepteur d'électrons : réduction d'O₂ et oxydation de NADH, H⁺
- B. Entrée dans la matrice mitochondriale des coenzymes réduits
- C. une série de transporteurs d'électrons dans la membrane mitochondriale
- D. présentation de la chaîne respiratoire mitochondriale
- E. Le bilan d'énergie et de matière du cycle de Krebs

IV. La matière organique peut être stockée ou utilisée pour des biosynthèses

- A. La MO peut être stockée sous forme de réserve ou exportée (exemple des glucides)
- B. La MO est à l'origine de la synthèse de nouvelles molécules

B. LE CYCLE DE KREBS : OXYDATION TOTALE DE L'ACÉTYLCOA ET L'OBTENTION D'UN POUVOIR REDUCTEUR

= Cycle des acides tricarboxyliques

= Cycle de l'acide citrique

Où ? Dans la matrice mitochondriale

Remarque : Les procaryotes (qui ne possèdent pas de mitochondries) contiennent les enzymes du cycle de Krebs dans leur cytosol.

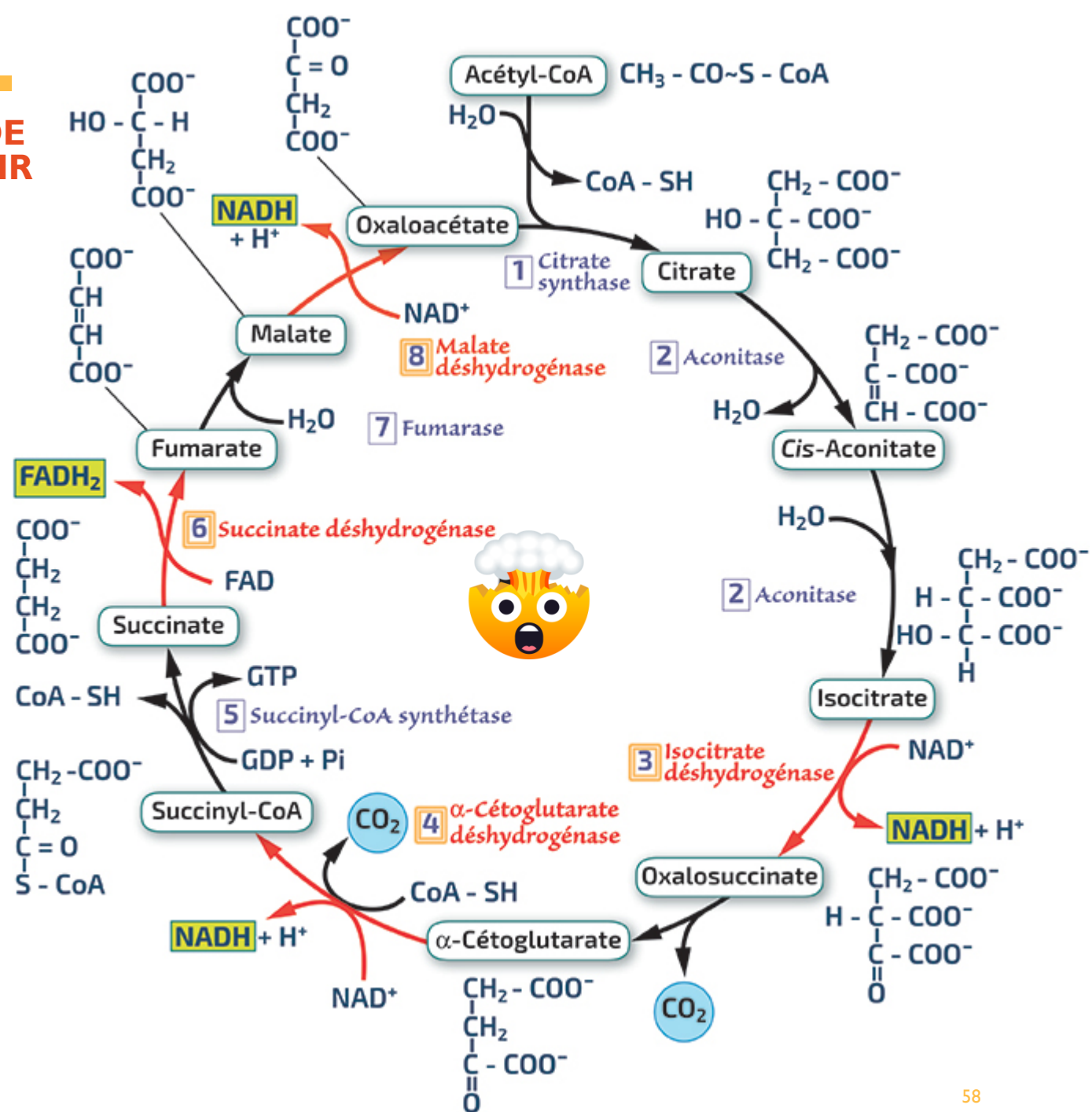


Hans Adolf Krebs
(1900-1981) Médecin
Nobel 1953



Contours définitionnels variables :
décarboxylation du pyruvate en acétyl-CoA incluse ou non !

- Objectifs :**
- Analyser les différentes étapes
 - Identifier les modes de contrôle
 - Faire un bilan de matière et d'énergie

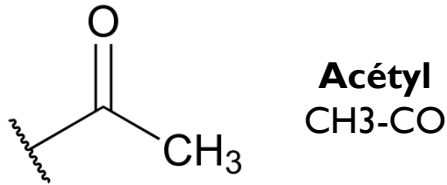


I. les étapes du cycle de Krebs

Cycle de Krebs (version simplifiée) :

Bilan du point de vue des atomes de carbone

n°2 : Transfert du groupe acétyl de l'acétyl-CoA sur de l'oxaloacétate pour former du citrate

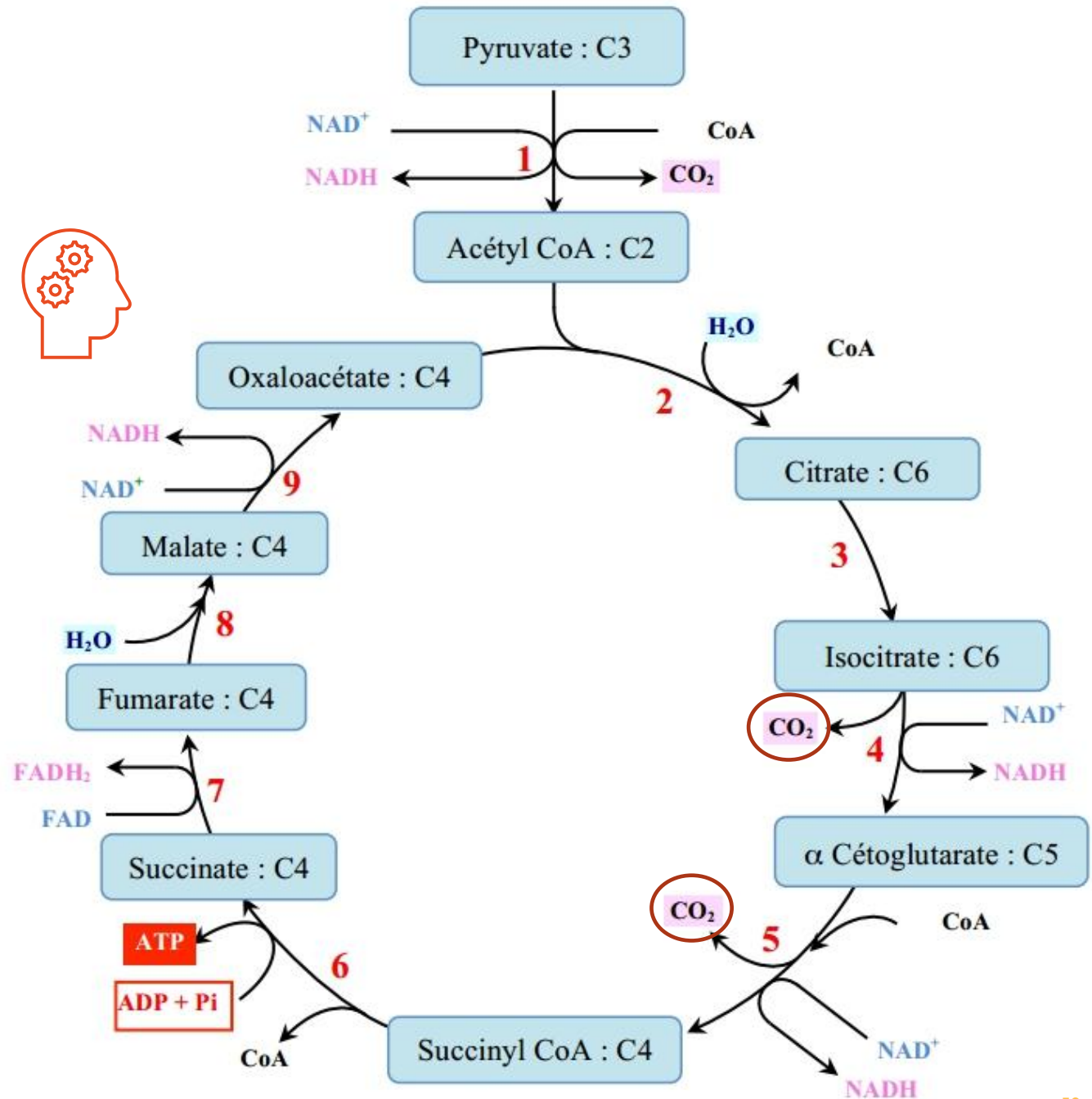


n°4 et n°5 : **Décarboxylation totale** du groupe acétyl en **2 CO₂**

Tous les intermédiaires du cycle de Krebs — comme le citrate, le succinate, le fumarate ou l'oxaloacétate — sont régénérés à chaque tour du cycle.

Bilan du point de vue de l'ATP

n°6 : Production d'un GTP par tour, converti en ATP



I. les étapes du cycle de Krebs

Cycle de Krebs (version simplifiée) :

Bilan du point de vue du pouvoir réducteur

n° 1, 4, 5, 7 et 9 = Oxydations : Récupération de 10 électrons sur les transporteurs réduits (4 NADH+H⁺ et 1 FADH₂)

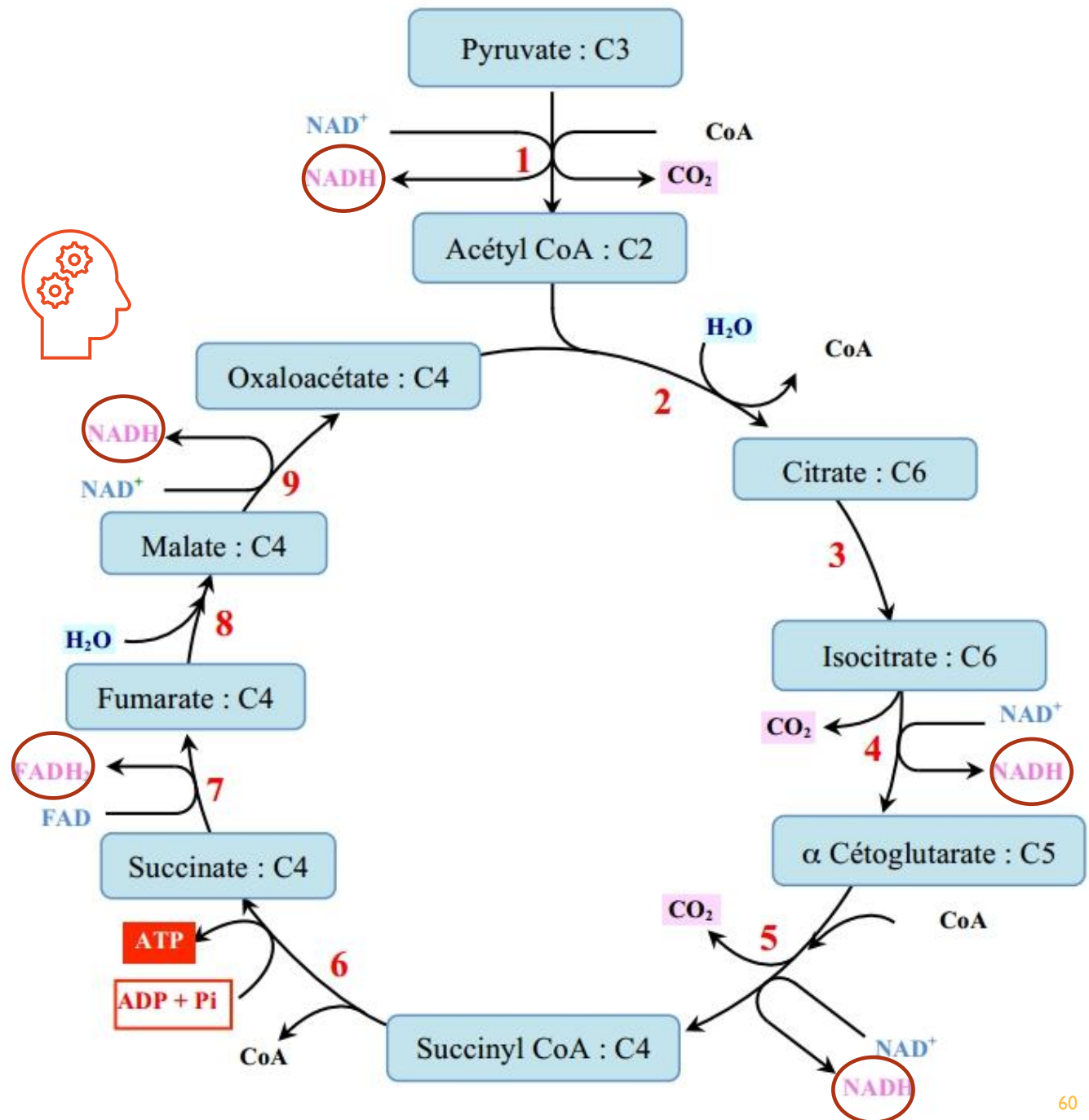
Équation-bilan du cycle de Krebs ?

(Décarboxylation oxydative du pyruvate incluse)



Un seul ATP !?!

→ L'essentiel de l'énergie chimique potentielle est produite sous forme de pouvoir réducteur



B. LE CYCLE DE KREBS : OXYDATION TOTALE DE L'ACETYLCOA ET L'OBTENTION D'UN POUVOIR REDUCTEUR

2. Les coenzymes redox, des intermédiaires réactionnels

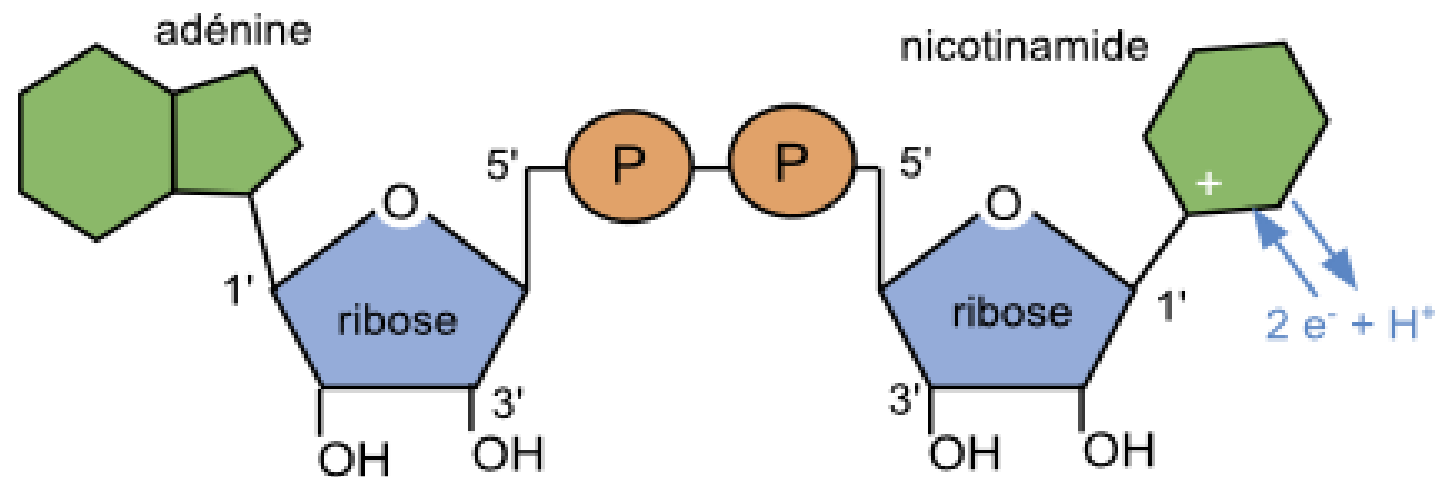
2.1. Présentation des coenzymes redox

- agents oxydants et réducteurs se présentent par paires
 - ✓ Ex: NAD^+ et NADH, H^+
- agents réducteurs puissants sont couplés à des agents oxydants puissants.
 - ✓ Ex: NAD^+ est un oxydant faible mais NADH, H^+ est un puissant réducteur, il peut donc être facilement couplé à un couple à fort potentiel oxydant, le couple $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$.

Coenzymes redox : molécules qui seront sous leur forme réduite facilement capables de céder des e^- et sous leur forme oxydée difficilement capables d'en prendre

Coenzymes redox = puissants réducteurs

NADH, H^+ est un puissant réducteur



Nicotinamide adénosine dinucléotide - NAD^+

représentation de la NAD^+

2. Les coenzymes redox, des intermédiaires réactionnels

2.1. Présentation des coenzymes redox

- $\text{NAD}^+ / \text{NADH}, \text{H}^+$
- $\text{FAD} / \text{FADH}_2$

Même potentiel redox pour NADP^+ et NAD^+

$$E_{\text{NAD}^+/\text{NADH},\text{H}^+} = -0,32 \text{ V}$$

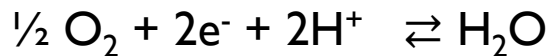
$$E_{\text{FAD}/\text{FADH}_2} = -0,06 \text{ V}$$

- Rappel énergie d'oxydoréduction :

$$\Delta G'^{\circ} = -nF\Delta E$$

n : nbre d' e^- circulant entre deux couples

- La réaction redox suivante associée au métabolisme respiratoire est donc exergonique :



$$E_{\text{NAD}^+/\text{NADH},\text{H}^+} = -0,32 \text{ V}$$

$$E_{\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}} = +0,81 \text{ V}$$

$$\Delta G'^{\circ} = -nF\Delta E \text{ avec } \Delta E = 0,81 - (-0,32)$$

$$\text{A.N. } \Delta G'^{\circ} = -2 \cdot 96\,500 \cdot 1,13$$

$$\Delta G'^{\circ} = -218 \text{ kJ.mol}^{-1}$$

D'où viennent
ces NADH
réduites?

B. LE CYCLE DE KREBS : OXYDATION TOTALE DE L'ACETYLCOA ET L'OBTENTION D'UN POUVOIR REDUCTEUR

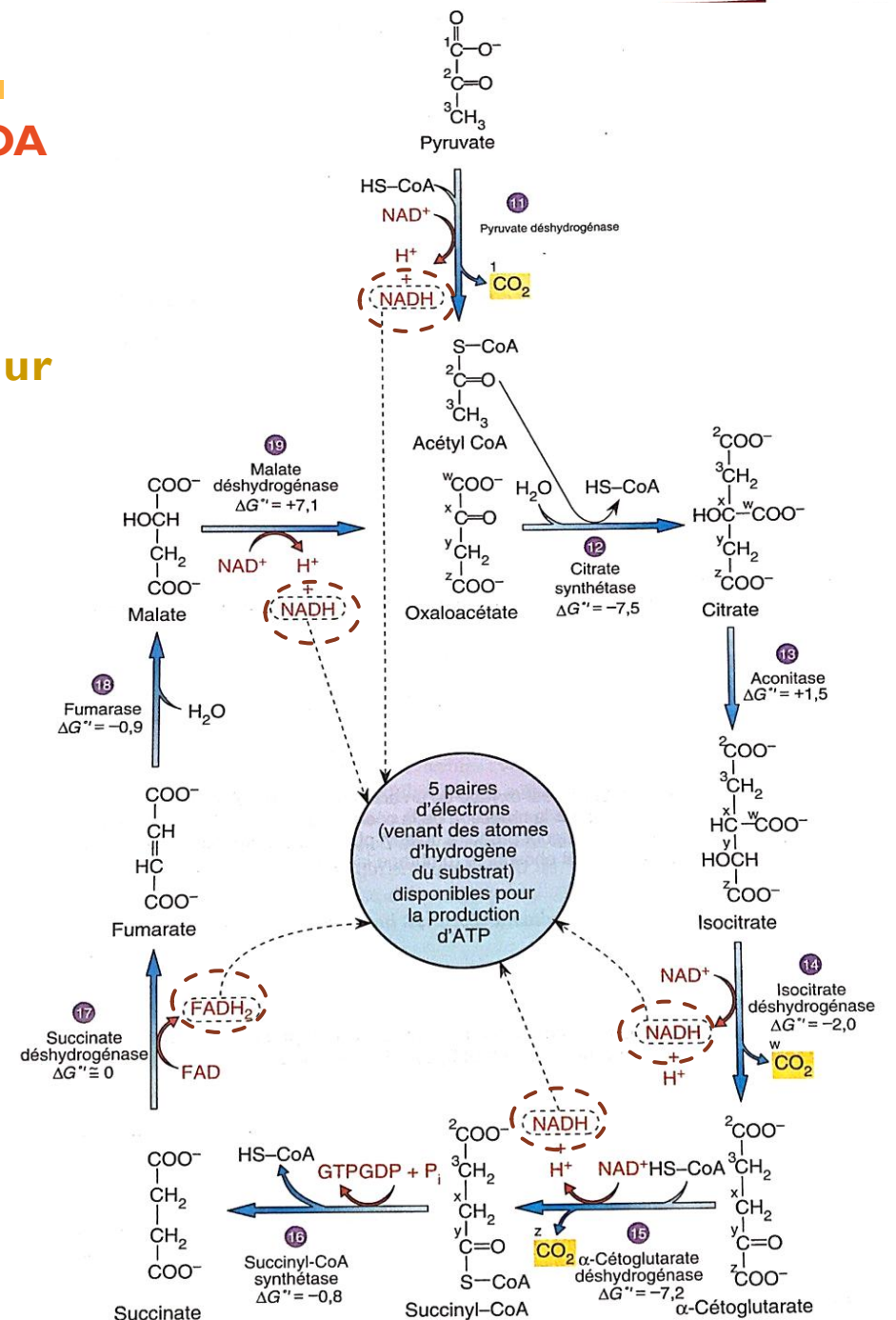
2. Les coenzymes redox, des intermédiaires réactionnels

2.2. Mise en évidence de la formation d'un pouvoir réducteur dans la matrice mitochondriale au sein du cycle de Krebs

Surligner dans le cycle de Krebs les réactions rédox aboutissant à la formation d'une coenzyme réduite.

- **Cinq des neuf réactions du cycle de l'acide tricarboxylique** (ou cycle de Krebs ou cycle de décarboxylation oxydative ou cycle un peu dur des fois lorsqu'on est fatigué) catalysées par des **déshydrogénases**
 - ⇒ **transfert des paires d'e-** des substrats aux coenzymes
- Au cours de **l'oxydation des molécules organiques** lors du **catabolisme du cycle de Krebs**: électrons transférés des molécules organiques réduites aux NAD^+ et FAD
- électrons transférés spontanément, dans la **chaîne redox de la membrane interne mitochondriale**, de NADH, H^+ (ou FADH_2) à O_2
- ⇒ libération d'une forte variation d'enthalpie libre.

Figure 23 : le cycle de Krebs ou cycle de l'acide tricarboxylique ou cycle de l'acide citrique ou cycle de décarboxylation oxydative



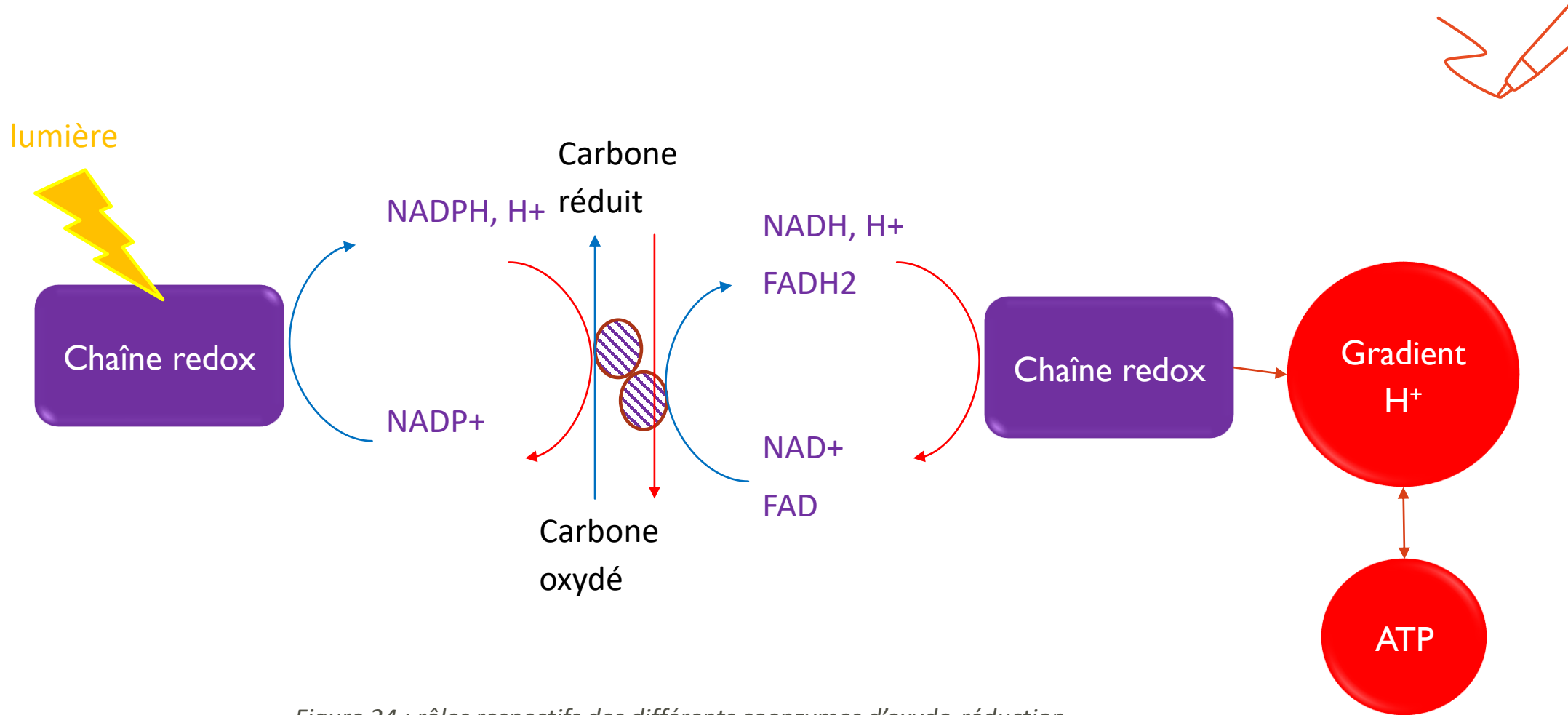


Figure 24 : rôles respectifs des différents coenzymes d'oxydo-réduction

Cette obtention d'un pool de coenzymes réduits constitue un **fort pouvoir réducteur** qui va être utilisé au sein de la **chaîne respiratoire mitochondriale**.

PLAN DU COURS

I. La matière organique est oxydée partiellement dans le cytosol : glycolyse et fermentations

- A. Vue d'ensemble de la glycolyse
- B. Les trois étapes de la glycolyse : activation du substrat, oxydation, formation d'ATP
- C. Bilan énergétique de la glycolyse
- D. Les contrôles exercés sur les étapes les plus exergoniques de la glycolyse
- E. La glycolyse, un carrefour métabolique siège d'entrées de métabolites d'origine variée
- F. Les coenzymes sont régénérés par fermentation en conditions anaérobies ou aérobies

II. Le cycle de Krebs, voie de convergence du catabolisme

- A. En amont du cycle de Krebs : formation de l'acétyl-coenzyme A dans la matrice mitochondriale
- B. Le cycle de Krebs : oxydation totale de l'acétylCoa et l'obtention d'un pouvoir réducteur

III. Des transferts d'électrons exergoniques dans la chaîne respiratoire mitochondriale, une membrane hautement spécialisée

- A. Mise en évidence de transfert entre un donneur et un accepteur d'électrons : réduction d'O₂ et oxydation de NADH, H⁺
- B. Entrée dans la matrice mitochondriale des coenzymes réduits
- C. une série de transporteurs d'électrons dans la membrane mitochondriale
- D. présentation de la chaîne respiratoire mitochondriale
- E. Le bilan d'énergie et de matière du cycle de Krebs

IV. La matière organique peut être stockée ou utilisée pour des biosynthèses

- A. La MO peut être stockée sous forme de réserve ou exportée (exemple des glucides)
- B. La MO est à l'origine de la synthèse de nouvelles molécules

III. DES TRANSFERTS D'ÉLECTRONS EXERGONIQUES DANS LA CHAÎNE RESPIRATOIRE MITOCHONDRIALE, UNE MEMBRANE HAUTEMENT SPÉCIALISÉE

A. MISE EN ÉVIDENCE DE TRANSFERT ENTRE UN DONNEUR ET UN ACCEPTEUR D'ÉLECTRONS : RÉDUCTION D'O₂ ET OXYDATION DE NADH

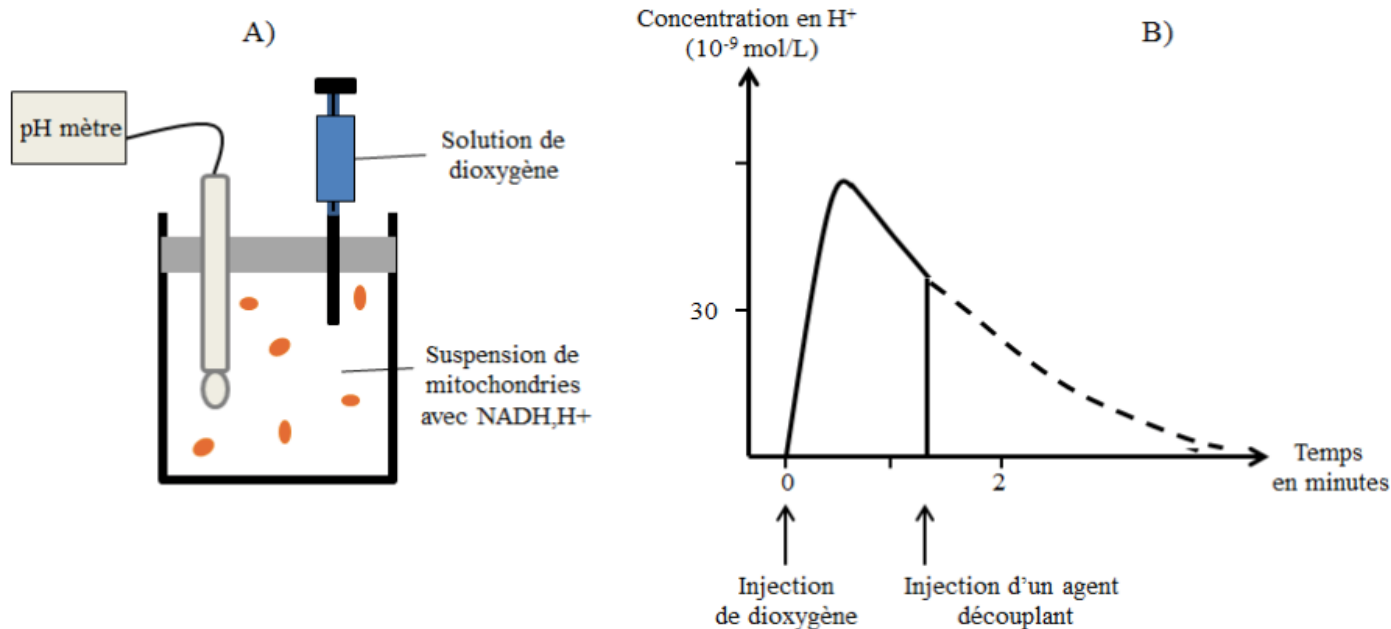
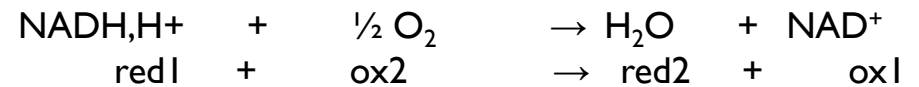


Figure 25 : Mise en évidence du transfert d'électrons entre le pouvoir réducteur et le dioxygène (dans Segarra, 2017)

- **Oxydation de NADH,H⁺**
 - couplée à la réduction du dioxygène
 - couplée à une expulsion de protons hors de la matrice mitochondriale
- Transfert d'électrons entre donneur (NADH, H⁺ ou FADH₂) et accepteur (O₂)



Avec comme demi-réactions :



$$\Delta G'^{\circ} = -nF\Delta E'^{\circ}$$

$$\Delta E'^{\circ} = E'^{\circ} \text{O}_2/\text{H}_2\text{O} - E'^{\circ} \text{NADP}^+/\text{NADPH,H}^+ = 0,81 - (-0,32) = +1,13\text{V}$$

d'où $\Delta G'^{\circ} = -218 \text{ kJ.mol}^{-1}$ de NADH, H⁺ oxydé

- ⇒ L'oxydation du pouvoir réducteur NADH, H⁺ et le transfert des électrons sur le dioxygène est une réaction spontanée et exergonique.

PLAN DU COURS

I. La matière organique est oxydée partiellement dans le cytosol : glycolyse et fermentations

- A. Vue d'ensemble de la glycolyse
- B. Les trois étapes de la glycolyse : activation du substrat, oxydation, formation d'ATP
- C. Bilan énergétique de la glycolyse
- D. Les contrôles exercés sur les étapes les plus exergoniques de la glycolyse
- E. La glycolyse, un carrefour métabolique siège d'entrées de métabolites d'origine variée
- F. Les coenzymes sont régénérés par fermentation en conditions anaérobies ou aérobies

II. Le cycle de Krebs, voie de convergence du catabolisme

- A. En amont du cycle de Krebs : formation de l'acétyl-coenzyme A dans la matrice mitochondriale
- B. Le cycle de Krebs : oxydation totale de l'acétylCoa et l'obtention d'un pouvoir réducteur

III. Des transferts d'électrons exergoniques dans la chaîne respiratoire mitochondriale, une membrane hautement spécialisée

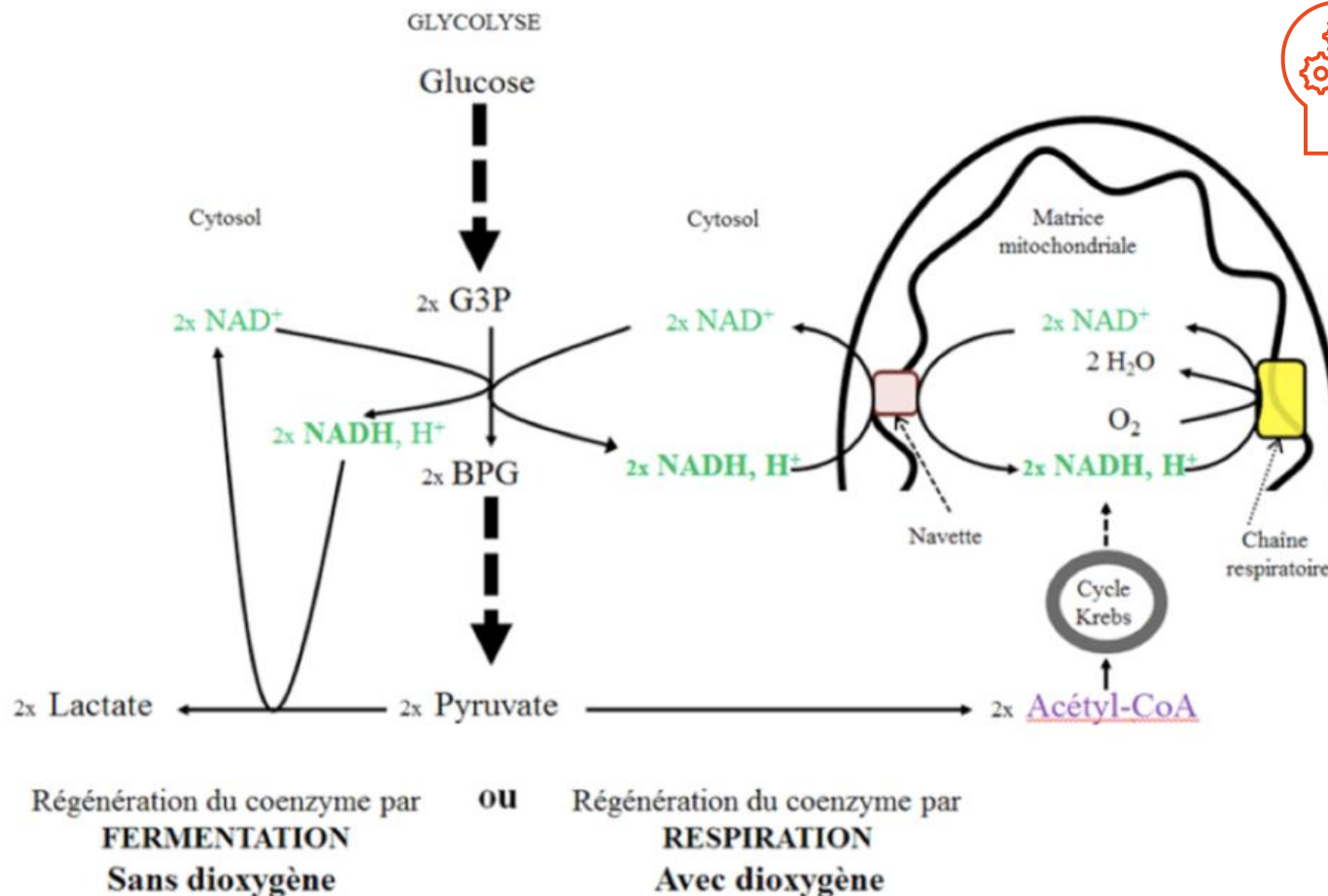
- A. Mise en évidence de transfert entre un donneur et un accepteur d'électrons : réduction d'O₂ et oxydation de NADH, H⁺
- B. Entrée dans la matrice mitochondriale des coenzymes réduits
- C. une série de transporteurs d'électrons dans la membrane mitochondriale
- D. présentation de la chaîne respiratoire mitochondriale
- E. Le bilan d'énergie et de matière du cycle de Krebs

IV. La matière organique peut être stockée ou utilisée pour des biosynthèses

- A. La MO peut être stockée sous forme de réserve ou exportée (exemple des glucides)
- B. La MO est à l'origine de la synthèse de nouvelles molécules

III. DES TRANSFERTS D'ÉLECTRONS EXERGIQUES DANS LA CHAÎNE RESPIRATOIRE MITOCHONDRIALE, UNE MEMBRANE HAUTEMENT SPÉCIALISÉE

B. ENTREE DANS LA MATRICE MITOCHONDRIALE DES COENZYMES REDUITS

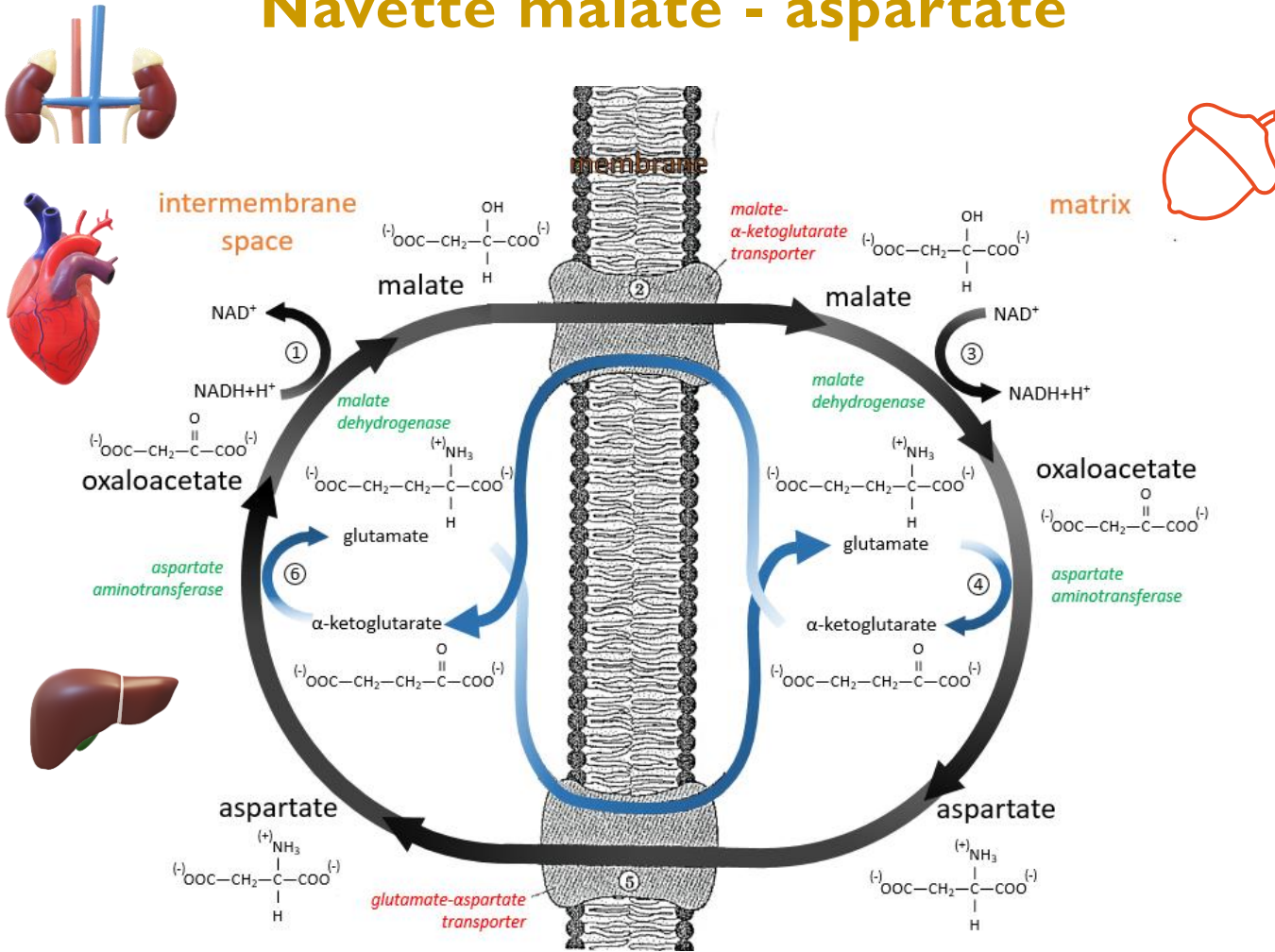


- **Membrane interne mitochondriale: imperméable aux coenzymes**
- Deux types de **navettes**:
 - 1 NADH, H⁺ est converti en 1 NAD⁺, H⁺ : navette **malate-aspartate** (**cœur, foie et rein**), qui assure la transmission intégrale du pouvoir réducteur
 - 1 NADH, H⁺ est converti en 1 **FADH₂** : navette à **glycéról-phosphate** (muscle et cerveau).

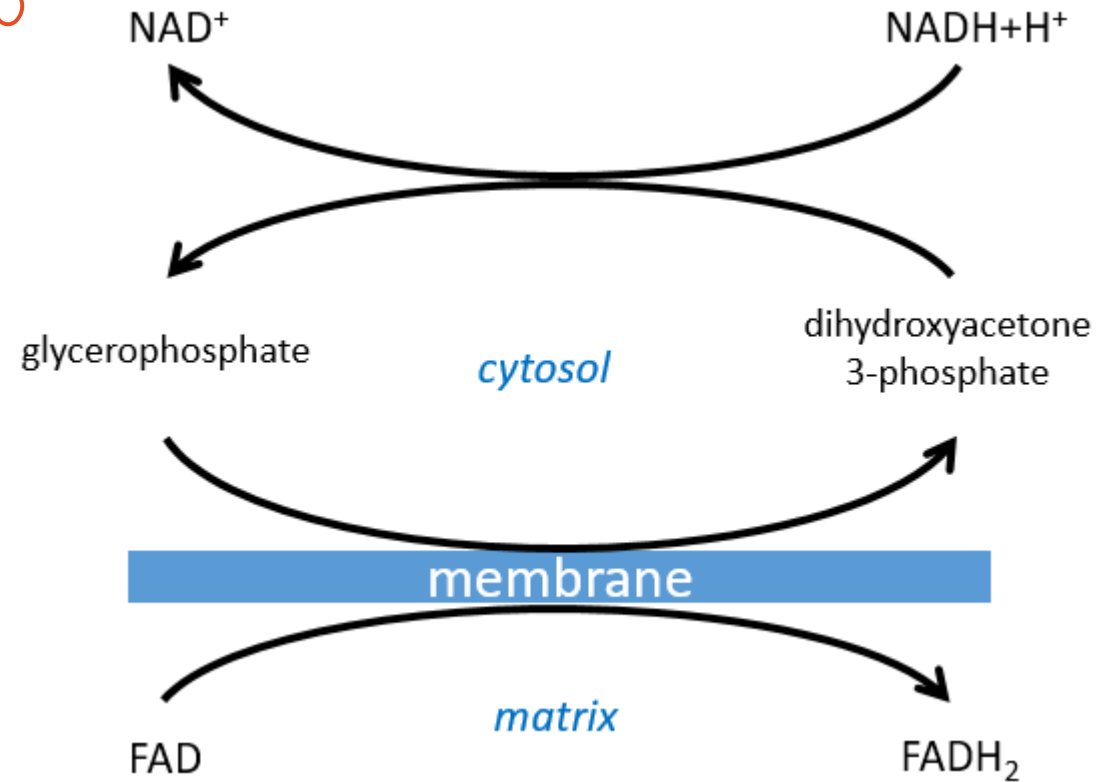
Figure 16 : Les navettes

B. ENTREE DANS LA MATRICE MITOCHONDRIALE DES COENZYMES REDUITS

Navette malate - aspartate



Navette glycérol-phosphate



PLAN DU COURS

I. La matière organique est oxydée partiellement dans le cytosol : glycolyse et fermentations

- A. Vue d'ensemble de la glycolyse
- B. Les trois étapes de la glycolyse : activation du substrat, oxydation, formation d'ATP
- C. Bilan énergétique de la glycolyse
- D. Les contrôles exercés sur les étapes les plus exergoniques de la glycolyse
- E. La glycolyse, un carrefour métabolique siège d'entrées de métabolites d'origine variée
- F. Les coenzymes sont régénérés par fermentation en conditions anaérobies ou aérobies

II. Le cycle de Krebs, voie de convergence du catabolisme

- A. En amont du cycle de Krebs : formation de l'acétyl-coenzyme A dans la matrice mitochondriale
- B. Le cycle de Krebs : oxydation totale de l'acétylCoa et l'obtention d'un pouvoir réducteur

III. Des transferts d'électrons exergoniques dans la chaîne respiratoire mitochondriale, une membrane hautement spécialisée

- A. Mise en évidence de transfert entre un donneur et un accepteur d'électrons : réduction d'O₂ et oxydation de NADH, H⁺
- B. Entrée dans la matrice mitochondriale des coenzymes réduits
- C. une série de transporteurs d'électrons dans la membrane mitochondriale
- D. présentation de la chaîne respiratoire mitochondriale
- E. Le bilan d'énergie et de matière du cycle de Krebs

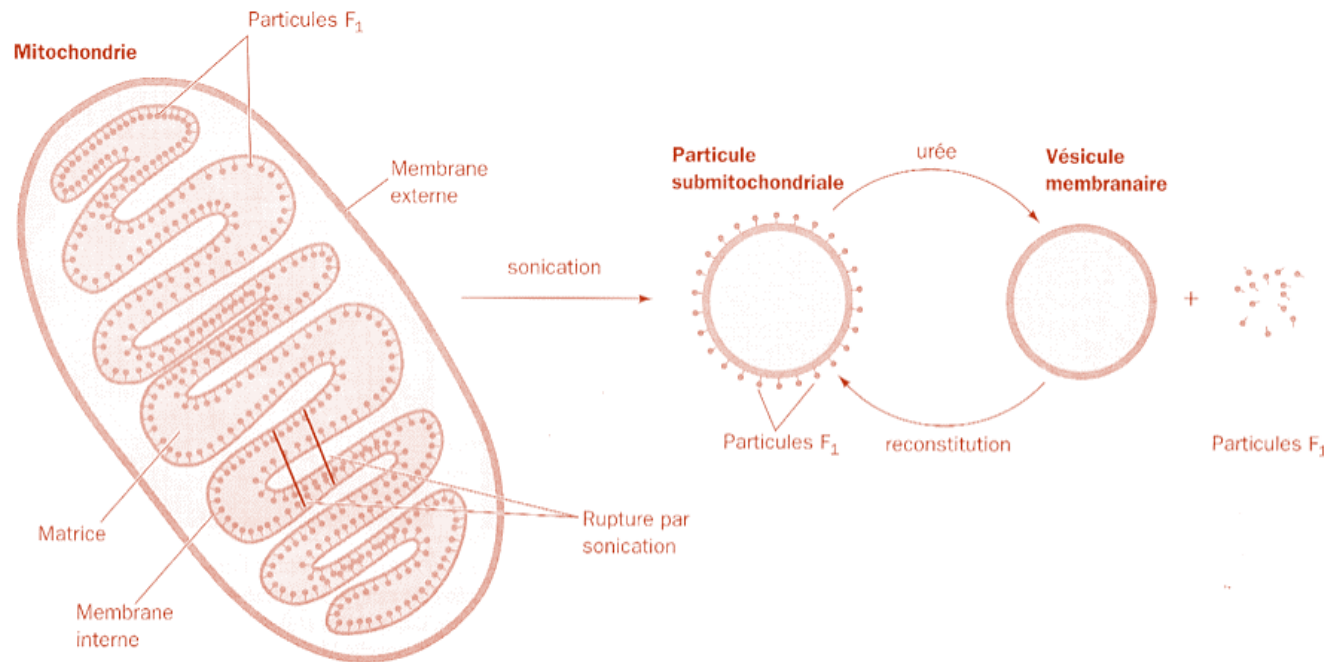
IV. La matière organique peut être stockée ou utilisée pour des biosynthèses

- A. La MO peut être stockée sous forme de réserve ou exportée (exemple des glucides)
- B. La MO est à l'origine de la synthèse de nouvelles molécules

C. UNE SÉRIE DE TRANSPORTEURS D'ÉLECTRONS DANS LA MEMBRANE MITOCHONDRIALE



I. Identification des protéines de la chaîne redox de la membrane interne mitochondriale



Micrographies électroniques et dessins d'interprétation de la membrane mitochondriale à différents stades de « dissection ». (a) Crêtes de mitochondries intactes montrant les particules F_1 se projetant dans la matrice. [D'après Parsons, D.F., *Science* **140**, 985 (1963). Copyright (c) 1963 American Association for the Advancement of Science. Avec autorisation.] (b) Particules submitochondriales mon-

trant leurs « champignons » F_1 se projetant à l'extérieur. Les particules submitochondriales sont préparées par ultrasonication de membranes internes mitochondriales [Avec la permission de Peter Hinkle, Cornell University.] (c) Particules submitochondriales après traitement à l'urée. [Avec la permission d'Efraim Racker, Cornell University.]

Figure 38 : Obtention de vésicules de membrane interne par sonication

- Ultrasons fragmentent les crêtes de la membrane interne (source: Voet et Voet, De Boeck, 2005).
- Sonication → vésicules de membrane interne (appelées particules submitochondriales)
- Détermination de la localisation des protéines par immunocytochimie sur vésicules intactes ou non
- Séparation des protéines par électrophorèse puis identification par Western Blot

C. UNE SÉRIE DE TRANSPORTEURS D'ÉLECTRONS DANS LA MEMBRANE MITOCHONDRIALE

2. Les types de transporteurs d'électrons

(a) Flavoprotéine (ici FMN de la DADH déshydrogénase)

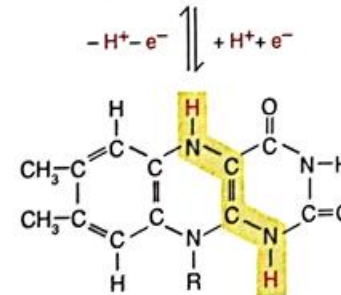
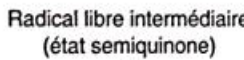
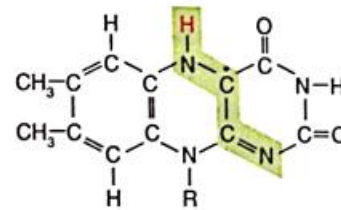
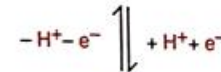
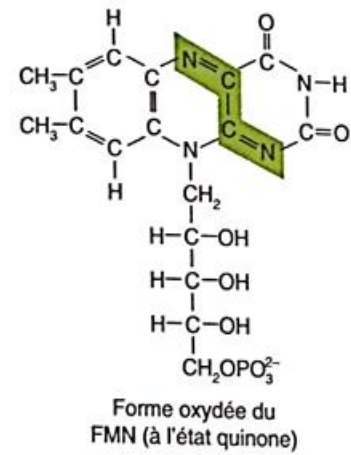
⇒ capables d'accepter et de céder 2H^+ et 2e^-

(b) Hème du cytochrome c

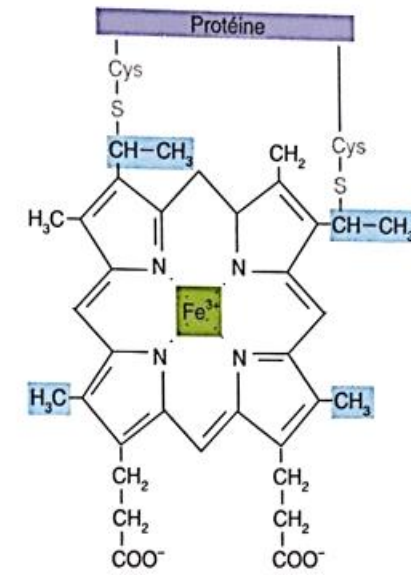
⇒ groupements hème (cf myoglobine).
L'atome de fer est capable de passer réversiblement de Fe^{2+} à Fe^{3+}

(c) Ubiquinone

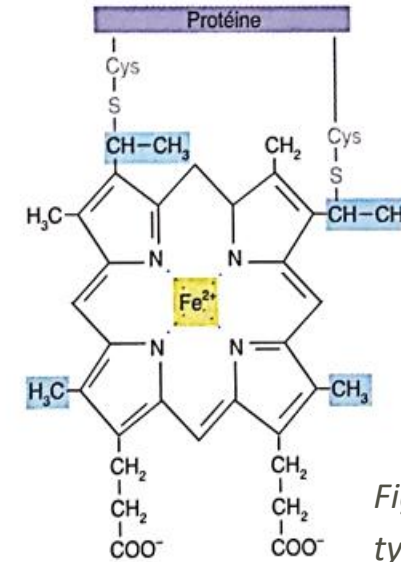
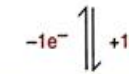
⇒ Liposoluble, capable d'accepter et de céder 2H^+ et 2e^-



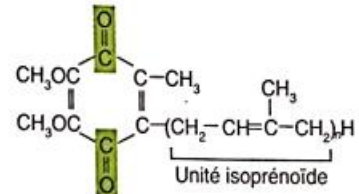
(a)



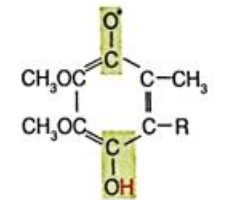
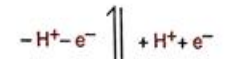
Forme oxydée de l'hème



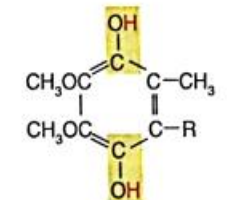
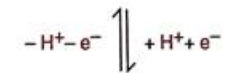
(b)



Forme oxydée de l'ubiquinone (état quinone)



Radical libre intermédiaire (état semiquinone)



Forme réduite de l'ubiquinone (état hydroquinone)

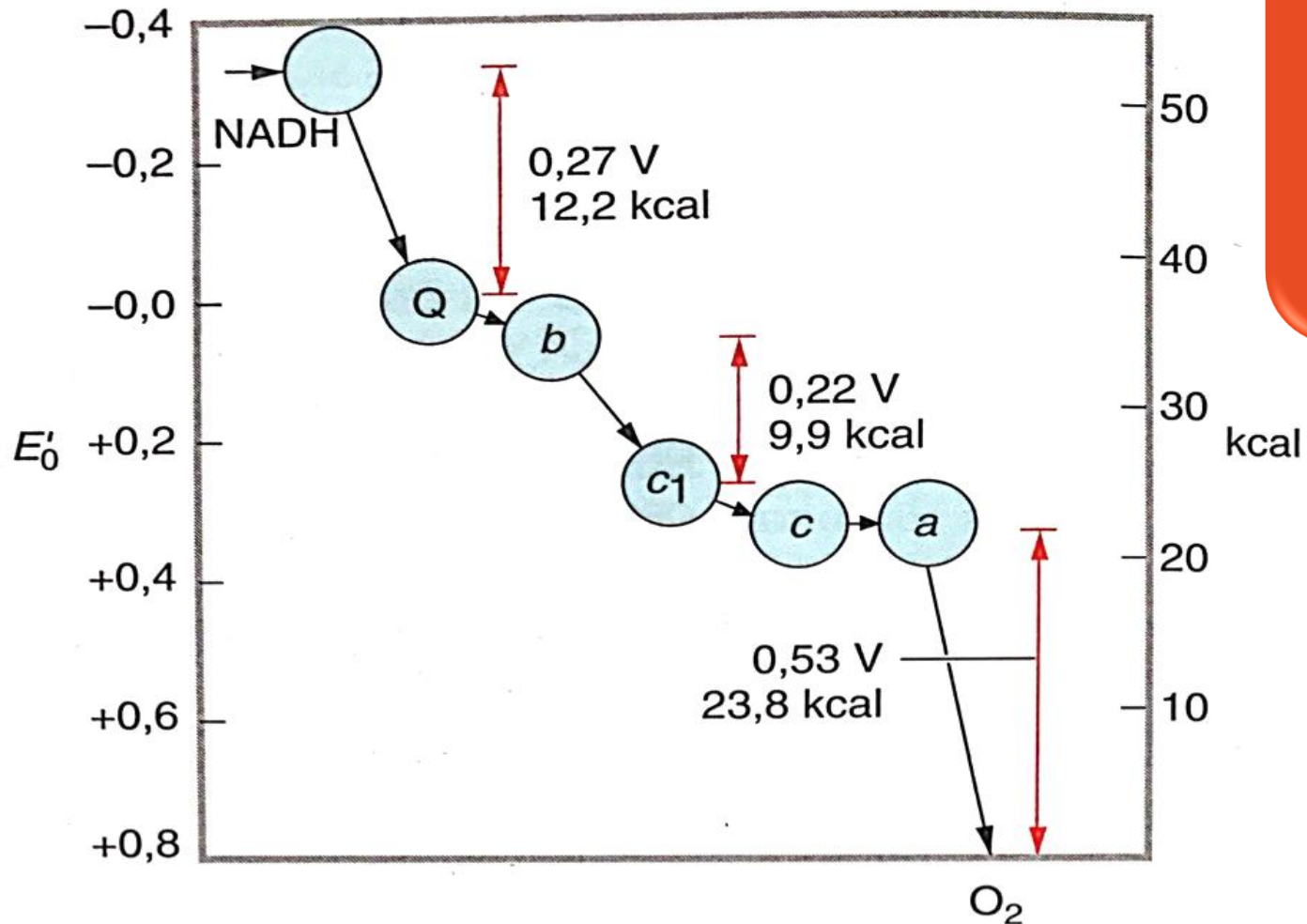
(c)

Figure 28 : Structure de 3 types de transporteurs d'électrons (D'après Karp, 3^e édition, p. 195)

Demi-réaction Redox	E° (V)
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	-0,414
$\text{NAD}^+ + \text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{NADH}$	-0,320
$\text{NADP}^+ + \text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{NADPH}$	-0,324
$\text{NADH déshydrogénase (FMN)} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{NADH déshydrogénase (FMNH}_2)$	-0,300
$\text{Ubiquinone} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{ubiquinol}$	0,045
$\text{Cytochrome } b (\text{Fe}^{3+}) + \text{e}^- \rightarrow \text{cytochrome } b (\text{Fe}^{2+})$	0,077
$\text{Cytochrome } c_1 (\text{Fe}^{3+}) + \text{e}^- \rightarrow \text{cytochrome } c_1 (\text{Fe}^{2+})$	0,220
$\text{Cytochrome } c (\text{Fe}^{3+}) + \text{e}^- \rightarrow \text{cytochrome } c (\text{Fe}^{2+})$	0,254
$\text{Cytochrome } a (\text{Fe}^{3+}) + \text{e}^- \rightarrow \text{cytochrome } a (\text{Fe}^{2+})$	0,290
$\text{Cytochrome } a_3 (\text{Fe}^{3+}) + \text{e}^- \rightarrow \text{cytochrome } a_3 (\text{Fe}^{2+})$	0,350
$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	0,817



Sont-ils disposés dans cet ordre croissant des potentiels redox dans la chaîne respiratoire?



Comment sont disposés les transporteurs de la chaîne redox ?

Hypothèse : selon l'ordre de potentiels redox croissants, ce qui impliquerait un transport exergonique des électrons de NADH vers O_2 . Comment le montrer ?

Figure 5.14 Disposition de plusieurs transporteurs dans la chaîne de transport d'électrons. Le graphique illustre le potentiel redox approximatif des transporteurs et la diminution d'énergie libre pendant le déplacement des paires d'électrons le long de la chaîne respiratoire jusqu'à l'oxygène moléculaire. Les nombreux centres fer-soufre ne sont pas représentés sur cette figure pour des raisons de simplicité. On verra plus loin dans ce chapitre que chacun des trois secteurs marqués par des flèches rouges produit assez d'énergie pour déplacer des protons à travers la membrane mitochondriale interne, ce qui procure d'autre part l'énergie nécessaire pour générer de l'ATP à partir d'ADP. (D'après A.L. Lehninger, Biochemistry, 2^e éd., 1975, Worth Publishers, New York.)

Figure 41 : Potentiel redox des transporteurs le long de la chaîne respiratoire D'après Karp, 3^e édition, p.196

PLAN DU COURS

I. La matière organique est oxydée partiellement dans le cytosol : glycolyse et fermentations

- A. Vue d'ensemble de la glycolyse
- B. Les trois étapes de la glycolyse : activation du substrat, oxydation, formation d'ATP
- C. Bilan énergétique de la glycolyse
- D. Les contrôles exercés sur les étapes les plus exergoniques de la glycolyse
- E. La glycolyse, un carrefour métabolique siège d'entrées de métabolites d'origine variée
- F. Les coenzymes sont régénérés par fermentation en conditions anaérobies ou aérobies

II. Le cycle de Krebs, voie de convergence du catabolisme

- A. En amont du cycle de Krebs : formation de l'acétyl-coenzyme A dans la matrice mitochondriale
- B. Le cycle de Krebs : oxydation totale de l'acétylCoa et l'obtention d'un pouvoir réducteur

III. Des transferts d'électrons exergoniques dans la chaîne respiratoire mitochondriale, une membrane hautement spécialisée

- A. Mise en évidence de transfert entre un donneur et un accepteur d'électrons : réduction d'O₂ et oxydation de NADH, H⁺
- B. Entrée dans la matrice mitochondriale des coenzymes réduits
- C. une série de transporteurs d'électrons dans la membrane mitochondriale
- D. présentation de la chaîne respiratoire mitochondriale
- E. Le bilan d'énergie et de matière du cycle de Krebs

IV. La matière organique peut être stockée ou utilisée pour des biosynthèses

- A. La MO peut être stockée sous forme de réserve ou exportée (exemple des glucides)
- B. La MO est à l'origine de la synthèse de nouvelles molécules

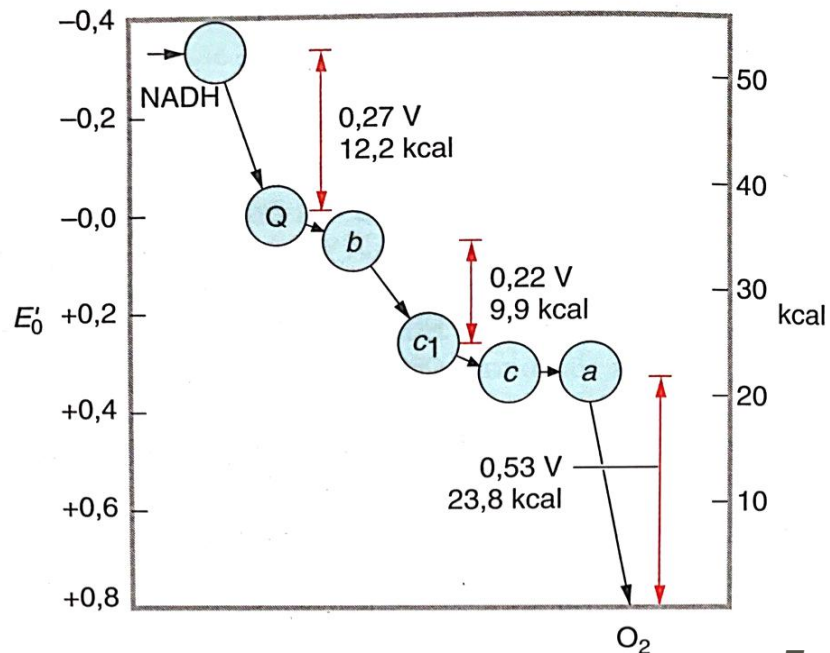
D. PRESENTATION DE LA CHAINE RESPIRATOIRE MITOCHONDRIALE

I. Détermination de la séquence des transporteurs d'électrons de la chaîne respiratoire



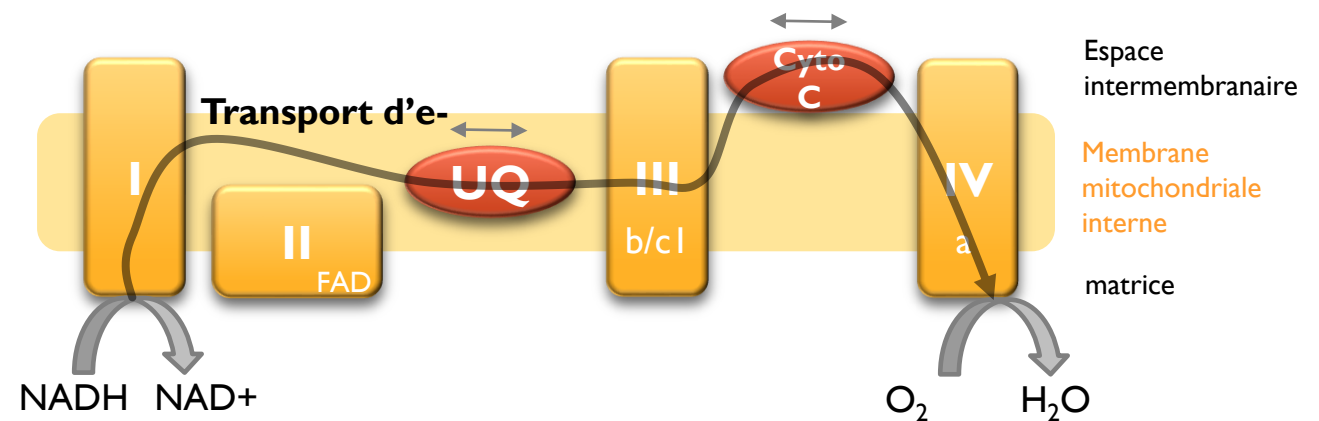
Hypothèse

- Transfert spontané d'e⁻ dans l'ordre des potentiel redox croissants.



Q : ubiquinone
b : cytochrome b
c1 : cytochrome c1

a : cytochrome a
c : cytochrome c



Transport hypothétique d'e⁻ au sein de la membrane mitochondriale d'après le potentiel redox standard

D. PRESENTATION DE LA CHAINE RESPIRATOIRE MITOCHONDRIALE

I. Détermination de la séquence des transporteurs d'électrons de la chaîne respiratoire



Hypothèse

Concentration
en dioxygène

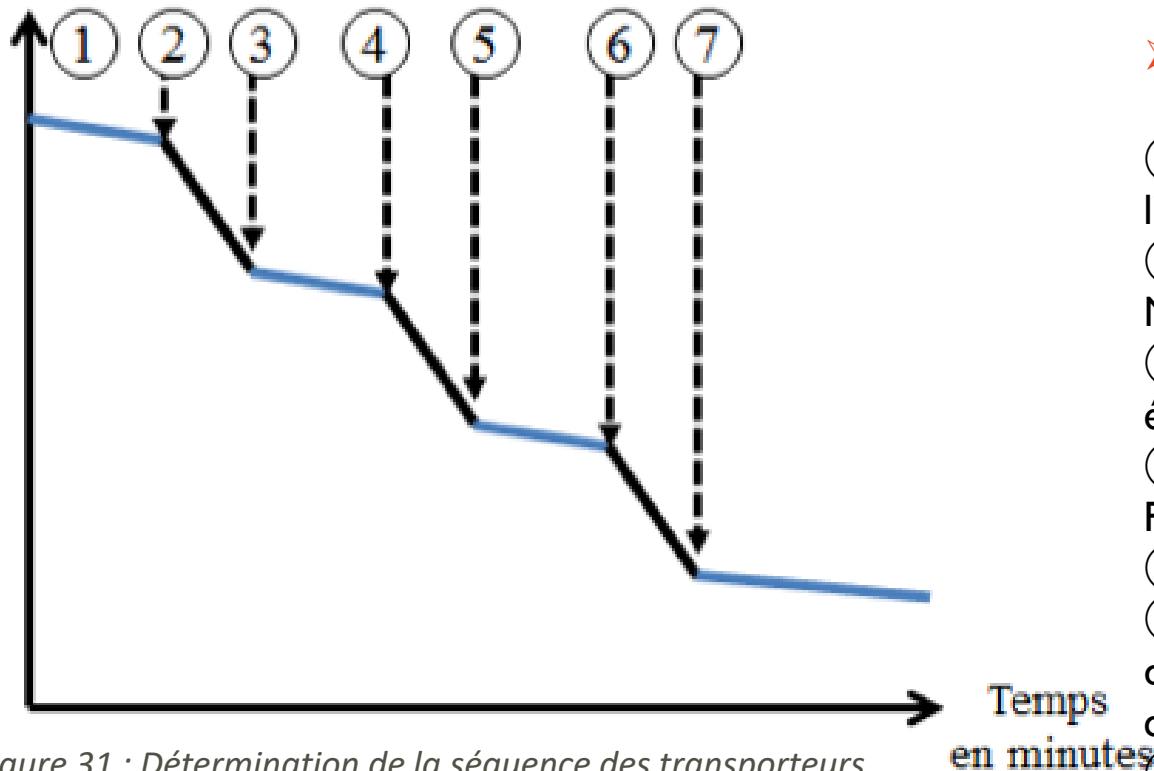


Figure 31 : Détermination de la séquence des transporteurs d'électrons de la chaîne respiratoire

- Mise en évidence de la séquence des transporteurs d'électrons a été par B. Chance.
 - Hypothèse : les électrons suivent un chemin bien précis entre le NADH,H⁺ et le dioxygène, régi par les règles d'oxydoréduction (règle du gamma),
 - Chance utilise **des inhibiteurs spécifiques** qui vont bloquer le transfert d'électrons en des sites spécifiques du trajet:
 - ① les mitochondries sont placées dans une solution tampon avec de l'ADP et du Pi en excès, la consommation du dioxygène est minimale.
 - ② addition de malate et d'ADP. L'oxydation du malate produit du NADH, H⁺.
 - ③ ajout de **roténone** (toxine végétale) qui bloque le transfert des électrons NADH,H⁺ au niveau du cytochrome c I.
 - ④ ajout de succinate et d'ADP. L'oxydation de succinate produit du FADH₂.
 - ⑤ ajout **d'antimycine A** (antibiotique) qui bloque le complexe b-c I
 - ⑥ addition d'ascorbate et de TMPD : le TMPD est un transporteur d'électrons réduit par l'ascorbate et qui transfère ses électrons au cytochrome c.
 - ⑦ ajout de **cyanure de potassium** (KCN), le KCN bloque la cytochrome oxydase a responsable de la réduction de O₂ en H₂O.

D. PRESENTATION DE LA CHAINE RESPIRATOIRE MITOCHONDRIALE

I. Détermination de la séquence des transporteurs d'électrons de la chaîne respiratoire

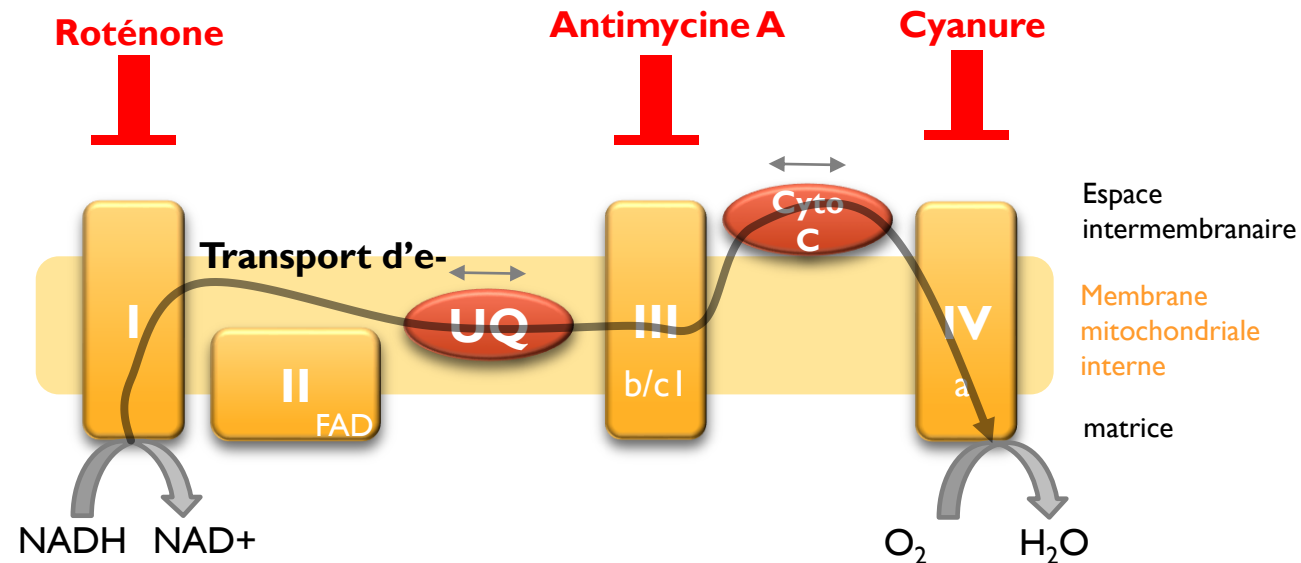


Validation expérimentale (exp. de B. Chance)

Objectif : valider l'hypothèse du déplacement d'e⁻ de transporteur en transporteur, selon les potentiels redox croissants (déplacement spontané).

Méthode : utilisation d'inhibiteurs spécifiques pour bloquer la chaîne de transport d'e⁻ en des points précis.

Transport hypothétique d'e⁻ au sein de la membrane mitochondriale d'après le potentiel redox standard



D. PRESENTATION DE LA CHAINE RESPIRATOIRE MITOCHONDRIALE

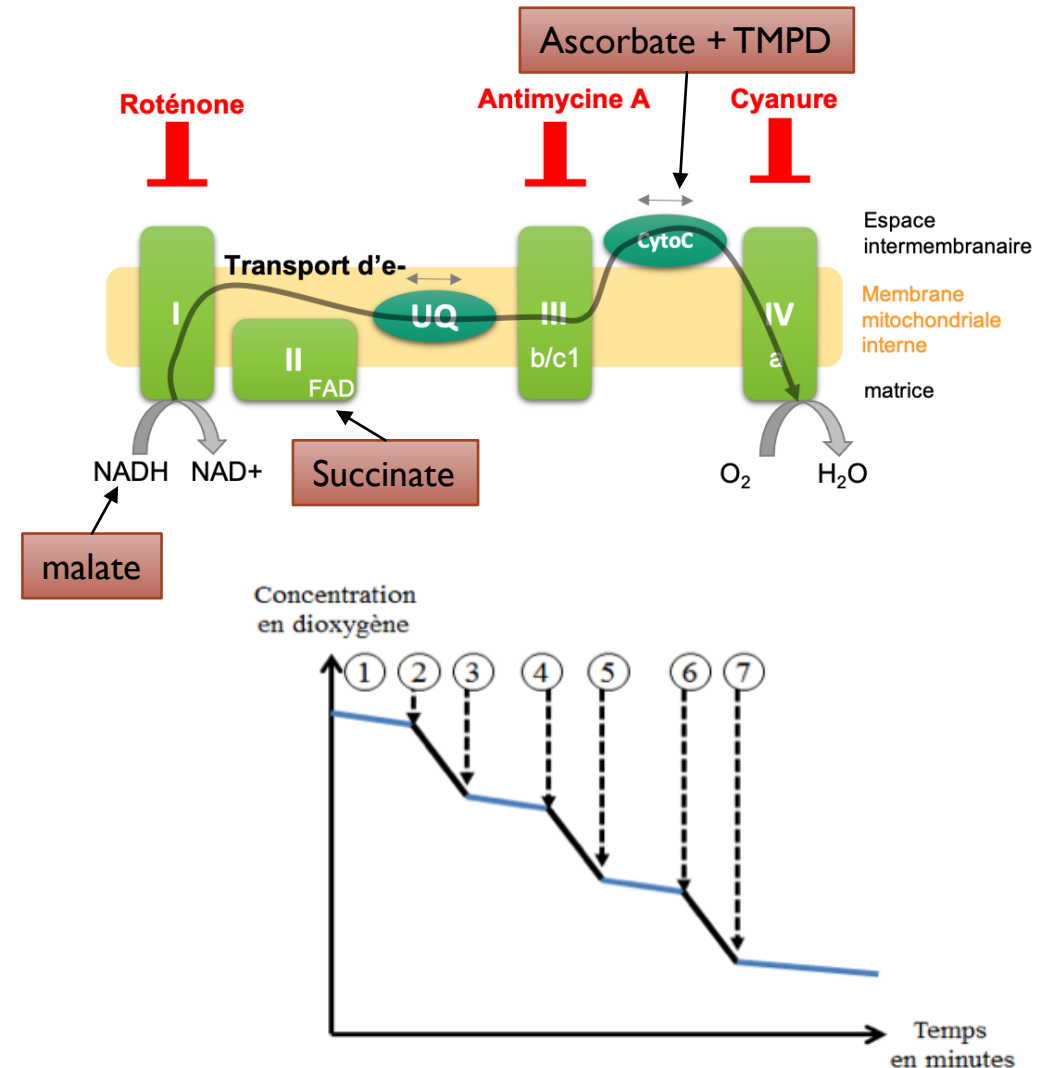
I. Détermination de la séquence des transporteurs d'électrons de la chaîne respiratoire

Validation expérimentale (exp. de B. Chance)

Protocole et résultats

Toute diminution de $[O_2]$ suggère qu'il est réduit en H_2O .

- ① Les mitochondries sont placées dans une solution tampon avec de l'ADP et du P_i en excès → La consommation du dioxygène est minimale.
- ② Ajout de malate et d'ADP → L'oxydation du malate produit du NADH (cf. cycle de Krebs).
- ③ Ajout de roténone qui bloque l'oxydation de NADH
- ④ Ajout de succinate et d'ADP → L'oxydation de succinate produit du $FADH_2$ (cf. cycle de Krebs).
- ⑤ Ajout d'antimycine A qui bloque le complexe b/c I
- ⑥ Ajout d'ascorbate et de TMPD (= transporteur d'e- réduit par l'ascorbate et capable de transférer ses électrons au cytochrome c).
- ⑦ Ajout de cyanure de potassium (KCN) qui inhibe complexe IV (cytochrome oxydase)



D. PRESENTATION DE LA CHAINE RESPIRATOIRE MITOCHONDRIALE

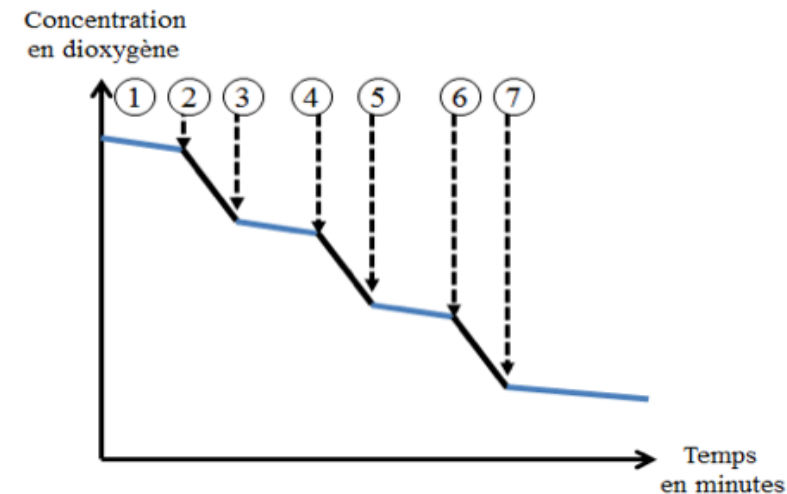
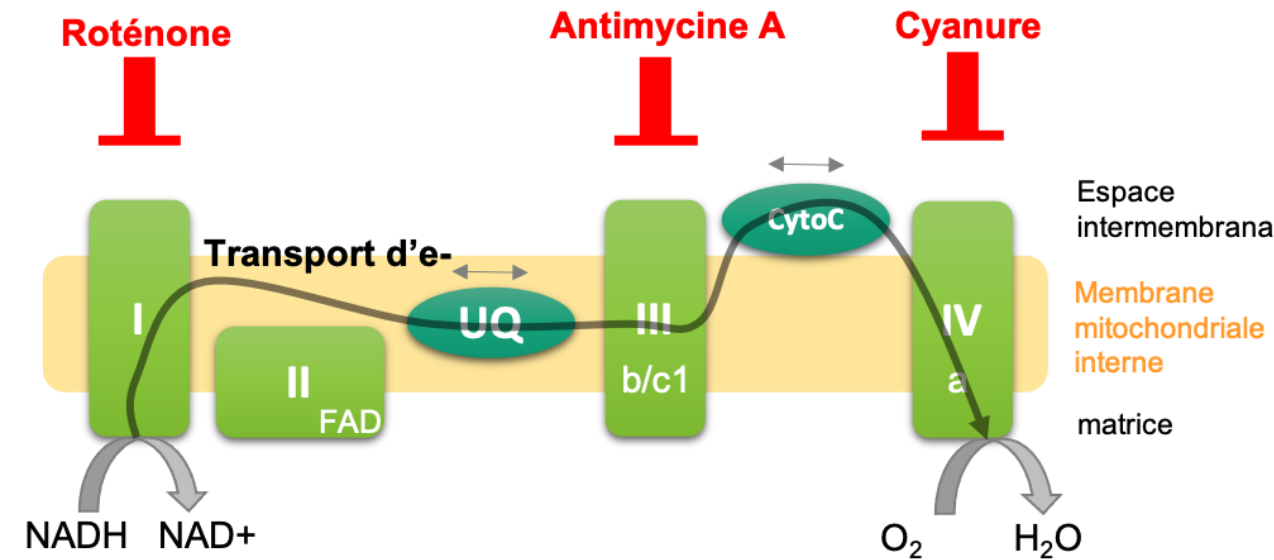
I. Détermination de la séquence des transporteurs d'électrons de la chaîne respiratoire



Validation expérimentale (exp. de B. Chance)

Conclusion

- Au sein de la **membrane interne** des mitochondries, il y a un **transfert d'e-** d'un composant à l'autre de **façon spontanée** (dans le sens des potentiels redox croissants).
 - Notion de **chaîne de transporteurs d'e-**
 - Notion de **flux d'H+**
- Il y a deux points d'entrée parallèle dans la chaîne redox :
 - ✓ Via le **NADH,H+** (produit par le cycle de Krebs)
 - ✓ Via le **FADH₂** (grâce à la succinate déshydrogénase, enzyme du cycle de Krebs intégrée au complexe II)



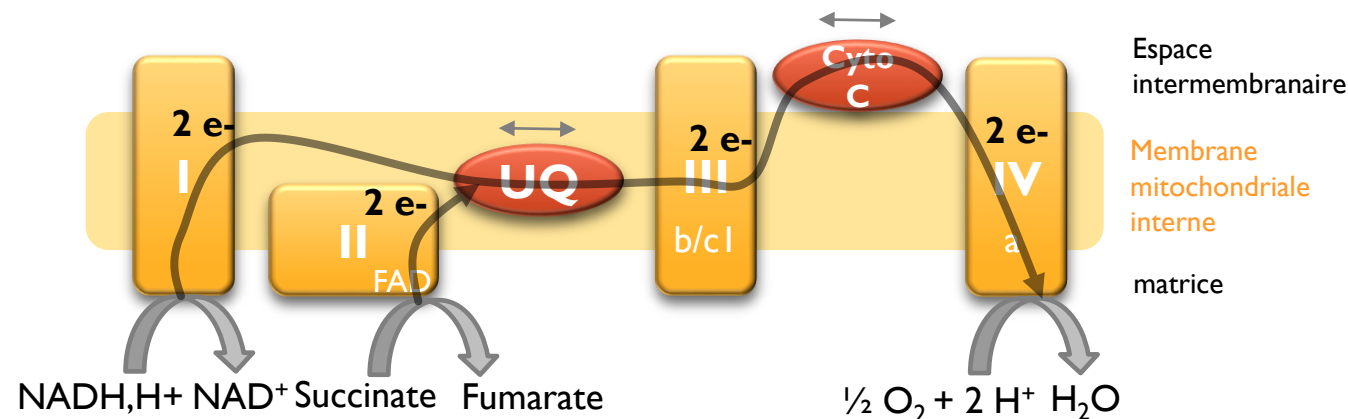
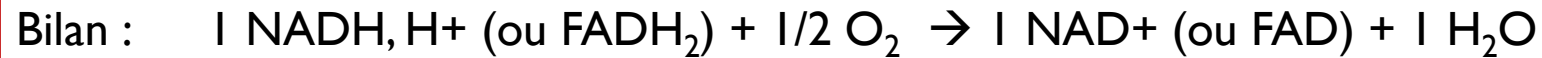
D. PRESENTATION DE LA CHAINE RESPIRATOIRE MITOCHONDRIALE

2. Bilan : organisation de la chaine respiratoire

- Deux points d'entrée des e⁻ : via l'oxydation de NADH (complexe I) ou via FADH₂ (complexe II).
- L'ubiquinone, mobile dans la membrane, permet de transférer les e⁻ des complexes I/II au complexe III.
- Le cytochrome C, mobile, permet de transférer les e⁻ du complexe III au complexe IV
- Le complexe IV (via cytochrome A) transfère les e⁻ à O₂ (accepteur final d'e⁻)
- Point de sortie de e⁻ : réduction de O₂ en H₂O



Equation bilan de la chaine mitochondriale ?

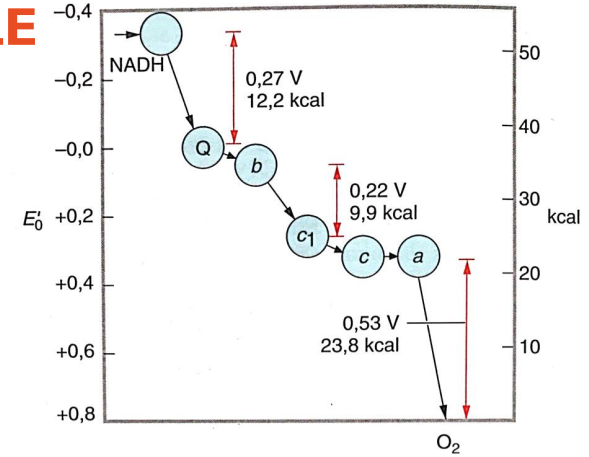


Quel est l'intérêt de ce transfert ? Quel rapport avec l'ATP ?

D. PRESENTATION DE LA CHAÎNE RESPIRATOIRE MITOCHONDRIALE

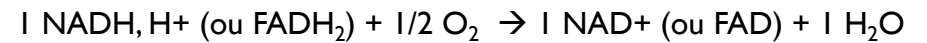
3. Encart sur le transfert de protons dans la chaîne respiratoire

- Au niveau des complexes I, III et IV, le transport d'e⁻ est couplé à la translocation de **10 H⁺** vers l'espace intermembranaire → **couplage chimio-osmotique**
 - Couplage est possible car **l'énergie libérée** par le transfert d'e⁻ est importante et que la **structure des complexes** (I,III,IV) permet un flux transmembranaire de H⁺
- De plus, la réduction d'O₂ en H₂O **consomme 2 H⁺**



Conséquence : mise en place d'un **gradient transmembranaire de [H⁺]**
 → Production d'**ATP** via l'ATP-synthase.

Chaîne de transfert d'e⁻

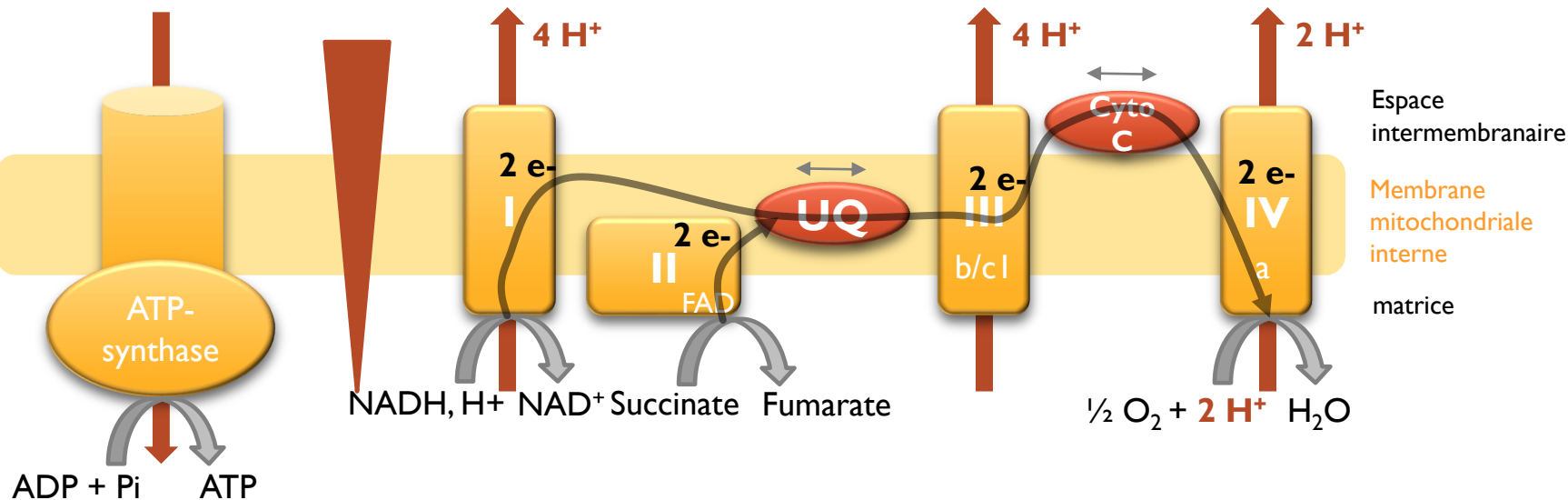


Gradient de H⁺

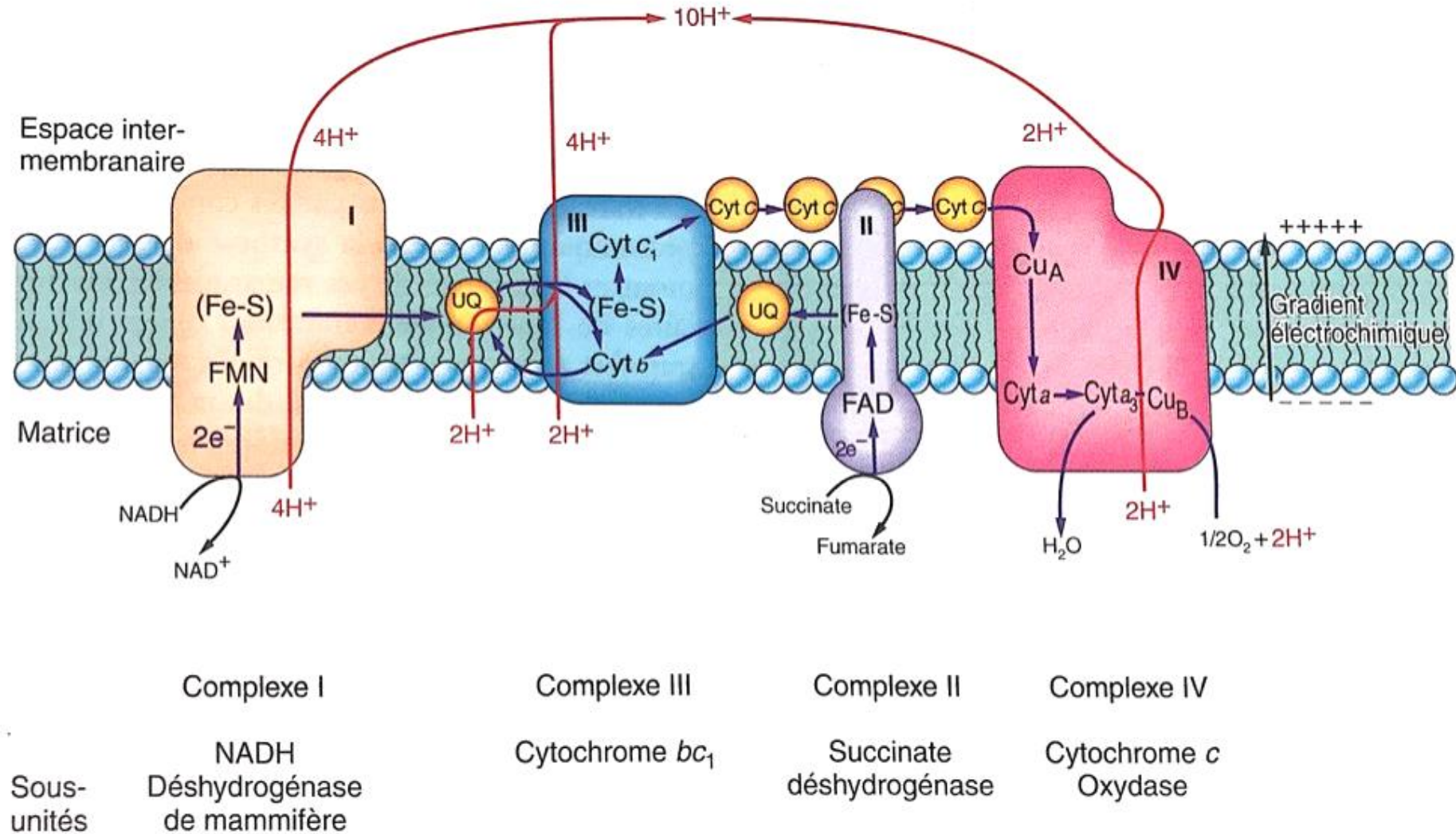
$$\Delta \text{H}^+ = 10$$

Production d'ATP

$$\sim 3 \text{ ATP}$$



3.2. BILAN : ORGANISATION DE LA CHAÎNE RESPIRATOIRE



D'après Karp, 3^e édition, p. 198.

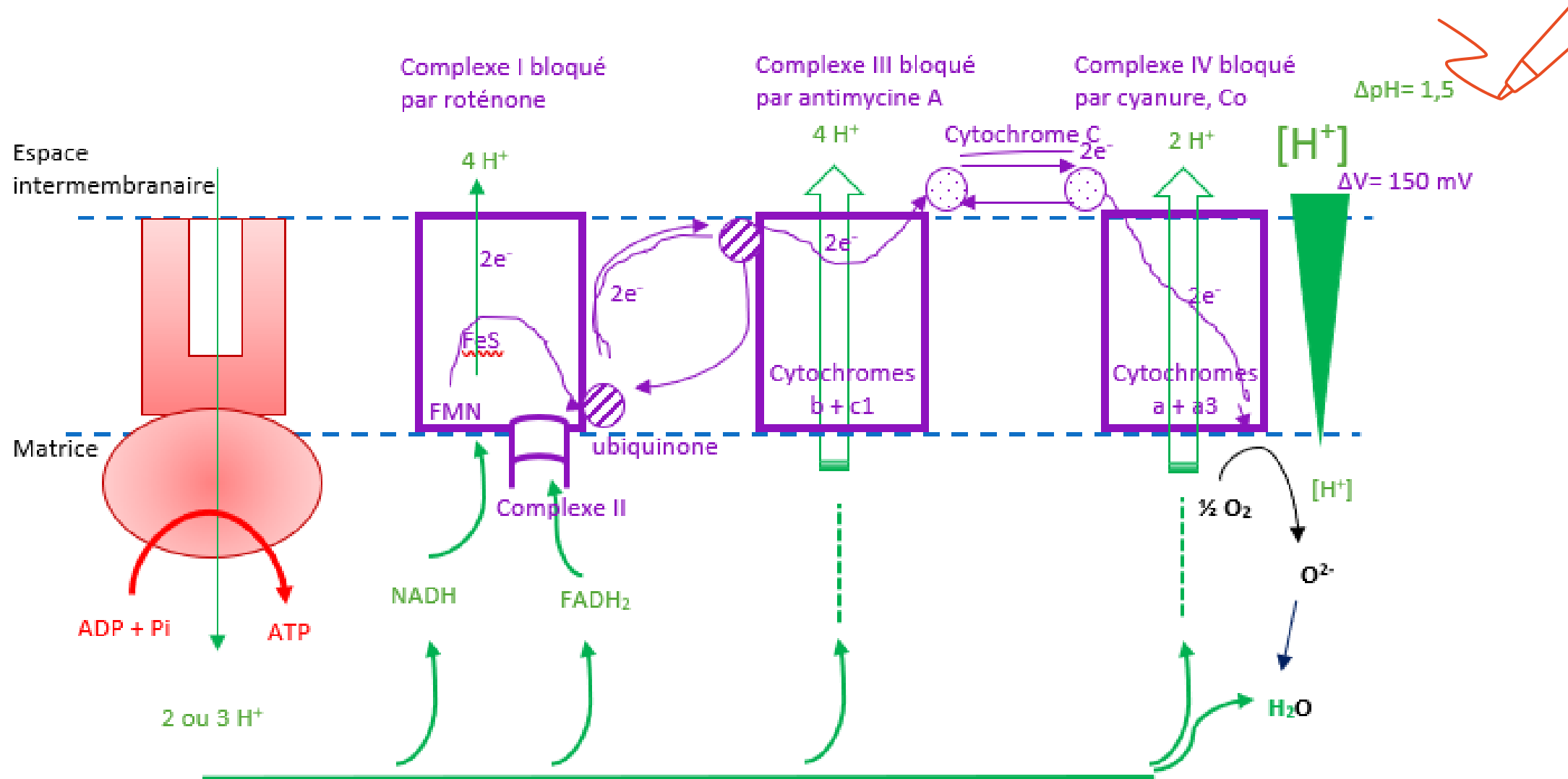
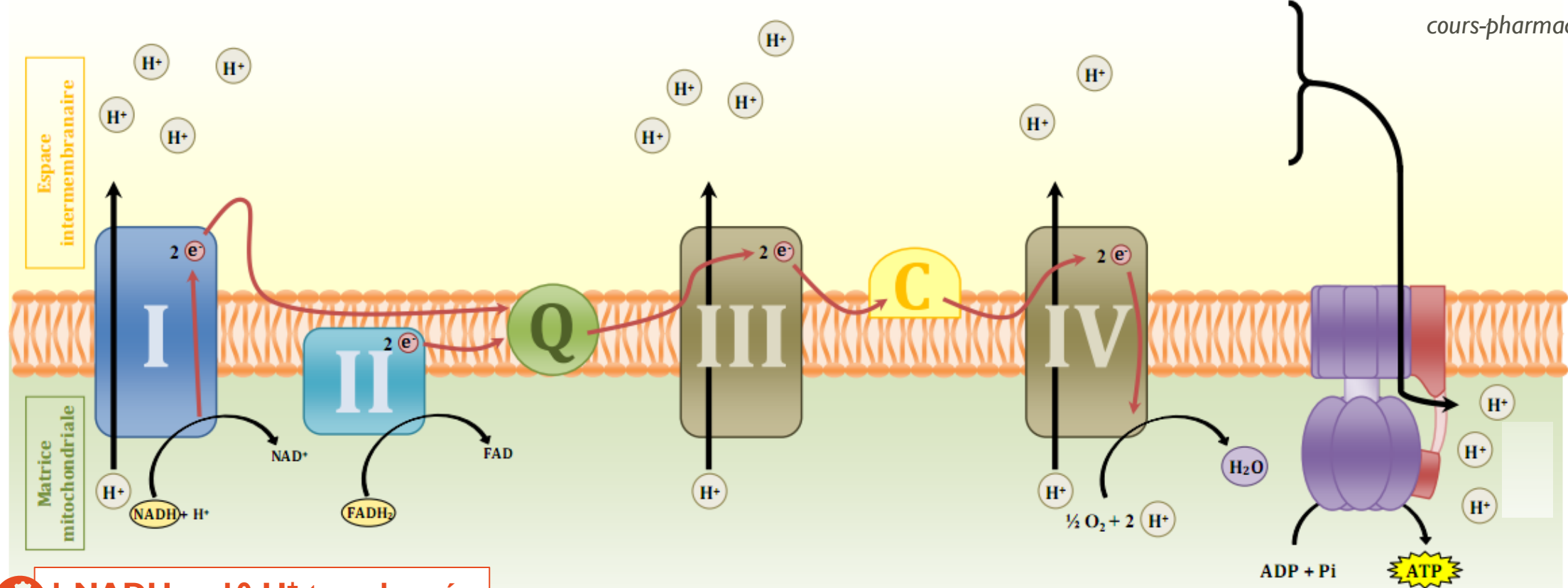


Figure 32 : Transport vectoriel des protons de la matrice vers l'espace intermembranaire et phosphorylation oxydative (S. Dalaine)



1 NADH → 10 H⁺ transloqués
1 FADH₂ → 6 H⁺ transloqués

Mécanismes de la chaîne respiratoire et de la sy

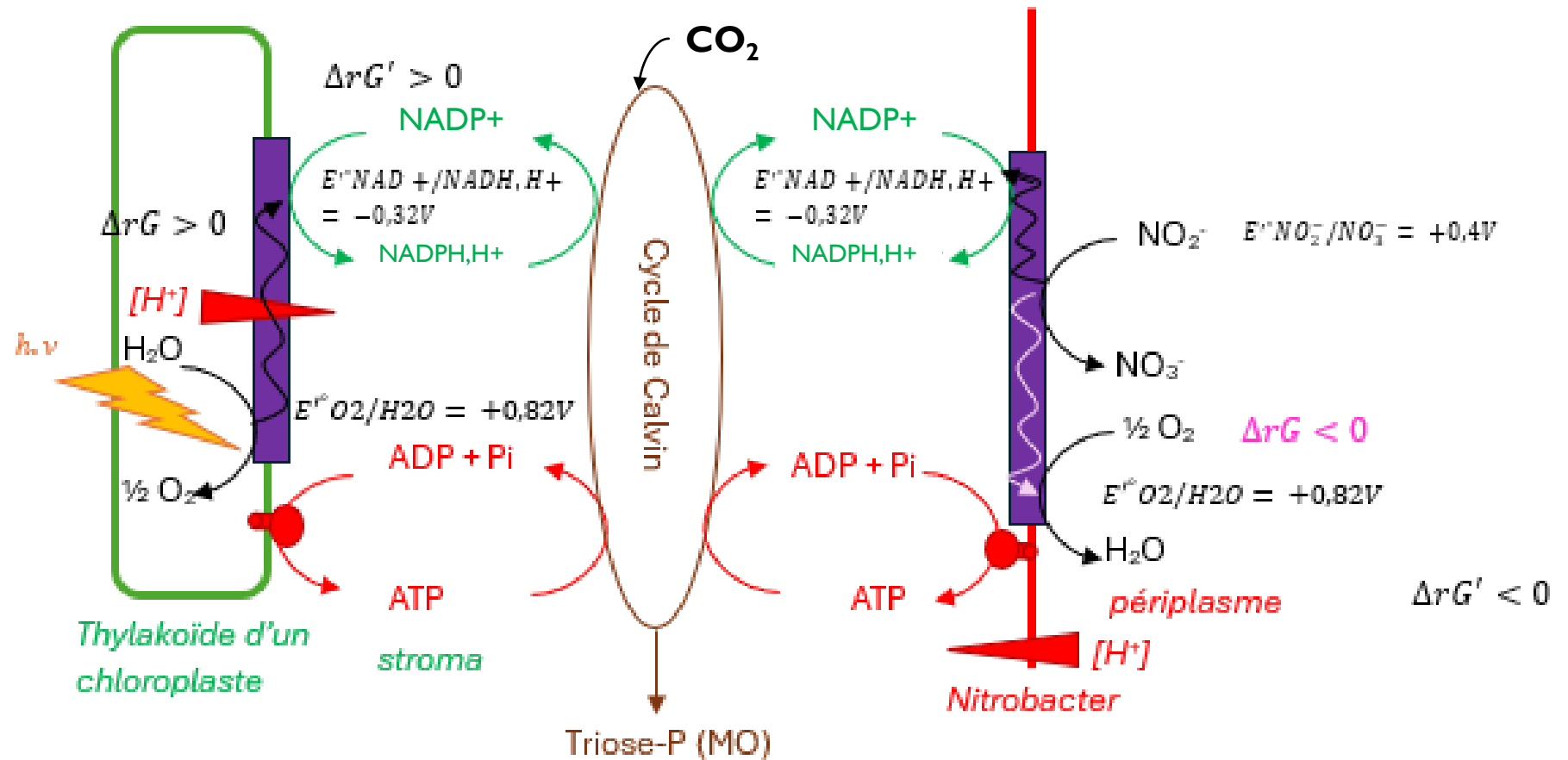
3 H⁺ qui diffusent → 1 ATP synthétisé

La chaîne respiratoire correspond à une chaîne de complexes protéiques présents au sein de la membrane interne de la mitochondrie et responsables de la production d'ATP à partir du NADH et du FADH₂ produits lors des différentes voies cataboliques de l'organisme.

Cette production d'énergie est permise grâce à la formation d'un gradient électrochimique de proton dans l'espace inter-membranaire de la mitochondrie, lui-même formé par l'énergie des électrons provenant du NADH et du FADH₂. Les électrons riches en énergie récupérés seront transportés successivement via les différents complexes :

- Le **complexe I** a une action **NADH coenzyme Q réductase**, récupérant les électrons du NADH et permet le transport de 4 protons de la matrice mitochondriale à l'espace inter-membranaire.
- Le **complexe II** a une action **Succinate coenzyme Q réductase**, récupérant les électrons du FADH₂ et permet le transport d'aucun proton.
- Le **complexe III** a une action **Coenzyme Q cytochrome C réductase**, et permet le transport de 4 protons de la matrice mitochondriale à l'espace inter-membranaire.
- Le **complexe IV** a une action **Cytochrome C oxydase**, et permet le transport de 2 protons de la matrice mitochondriale à l'espace inter-membranaire.
- Le **coenzyme Q** (ou **ubiquinone**) permet la transition entre le complexe I ou II et le complexe III.
- Le **cytochrome C** permet la transition entre le complexe III et le complexe IV.

Suite à la chaîne de complexe protéique, le dernier accepteur d'électrons est l'oxygène qui sera ainsi à l'origine de la formation de molécule d'eau. Le NADH permettra donc le transport de **10 protons** de la matrice mitochondriale à l'espace inter-membranaire, tandis que le FADH₂ de seulement **6**. Ceux-ci repasseront vers la matrice mitochondriale via une pompe à proton que l'on appelle également l'**ATP-synthétase**, et qui sera à l'origine de la formation d'ATP.



PHOTOLITHOAUTOTROPHIE des unicellulaires photosynthétiques, des algues

CHIMIO LITHOAUTOTROPHIE AEROBIE de Nitrobacter du sol

PLAN DU COURS

I. La matière organique est oxydée partiellement dans le cytosol : glycolyse et fermentations

- A. Vue d'ensemble de la glycolyse
- B. Les trois étapes de la glycolyse : activation du substrat, oxydation, formation d'ATP
- C. Bilan énergétique de la glycolyse
- D. Les contrôles exercés sur les étapes les plus exergoniques de la glycolyse
- E. La glycolyse, un carrefour métabolique siège d'entrées de métabolites d'origine variée
- F. Les coenzymes sont régénérés par fermentation en conditions anaérobies ou aérobies

II. Le cycle de Krebs, voie de convergence du catabolisme

- A. En amont du cycle de Krebs : formation de l'acétyl-coenzyme A dans la matrice mitochondriale
- B. Le cycle de Krebs : oxydation totale de l'acétylCoa et l'obtention d'un pouvoir réducteur

III. Des transferts d'électrons exergoniques dans la chaîne respiratoire mitochondriale, une membrane hautement spécialisée

- A. Mise en évidence de transfert entre un donneur et un accepteur d'électrons : réduction d'O₂ et oxydation de NADH, H⁺
- B. Entrée dans la matrice mitochondriale des coenzymes réduits
- C. une série de transporteurs d'électrons dans la membrane mitochondriale
- D. présentation de la chaîne respiratoire mitochondriale
- E. Le bilan d'énergie et de matière du cycle de Krebs

IV. La matière organique peut être stockée ou utilisée pour des biosynthèses

- A. La MO peut être stockée sous forme de réserve ou exportée (exemple des glucides)
- B. La MO est à l'origine de la synthèse de nouvelles molécules

E. LE BILAN D'ENERGIE ET DE MATIERE DU CYCLE DE KREBS



Glycolyse

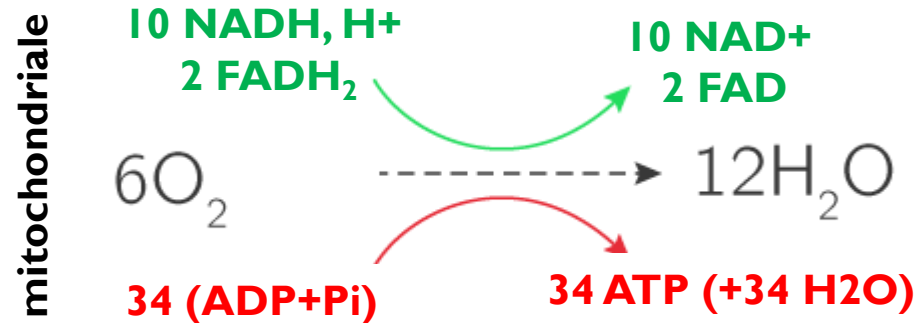


Cycle de Krebs



x2

Chaîne mitochondriale



RESPIRATION CELLULAIRE



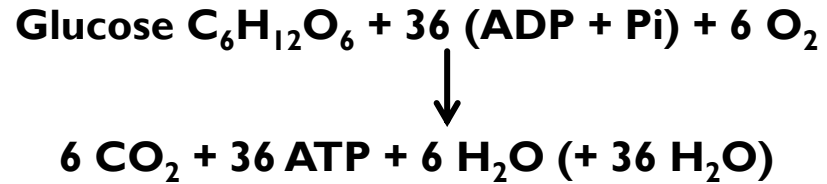
Remarque : Ce nombre théorique d'ATP n'est pas atteint, notamment parce que l'import des 2 NADH issus de la glycolyse dans la mitochondrie consomme de l'énergie (2 NADH convertis en 2 FADH₂ par la navette, d'où la perte de 2 ATP théoriques)

E. LE BILAN D'ENERGIE ET DE MATIERE DU CYCLE DE KREBS



Calcul du rendement

RESPIRATION
CELLULAIRE



Dans une molécule de glucose, la somme des énergies de liaisons des atomes est de $-2860 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ (conditions standard).

L'énergie de liaison entre le 3^{ème} phosphate et l'ADP dans l'ATP vaut $-30,5 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ (conditions standards)

La respiration cellulaire produit **36** ATP.

Le rendement énergétique maximal est donc de **38 % (41 % dans le foie, le cœur et les reins)**

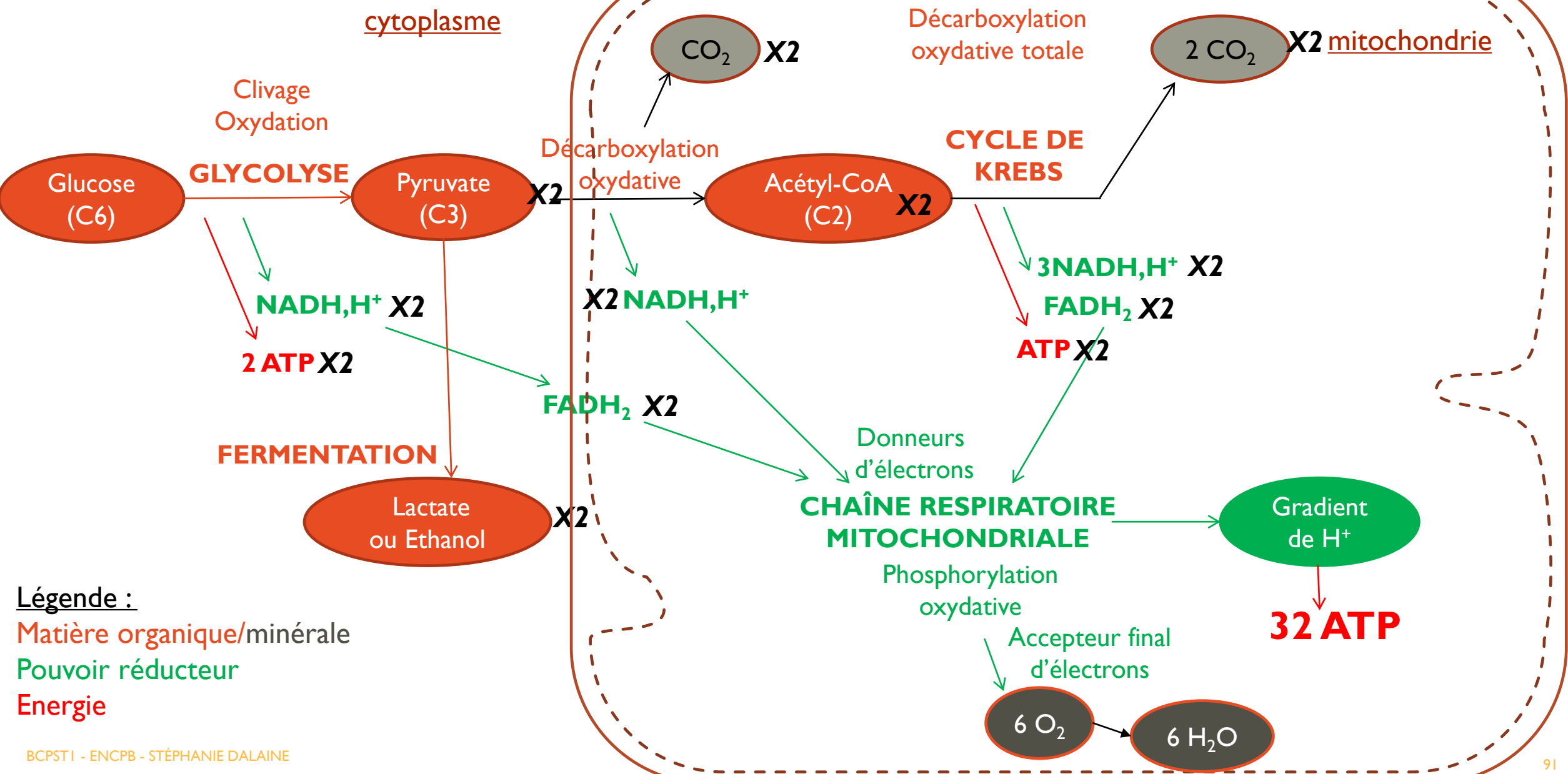
→ **Récupération d'environ 40 % de l'énergie chimique du glucose**

E. LE BILAN D'ENERGIE ET DE MATIERE DU CYCLE DE KREBS



Voie	ATP formé par transphosphorylation	Pouvoir réducteur formé	ATP produit après oxydation du pouvoir réducteur par la chaîne respiratoire (ATP syntase)
Glycolyse	- 2 ATP + 4 ATP = 2 ATP	+ 2 x NADH, H	6 ATP ou 4 ATP selon la navette
Décarboxylation oxydative du pyruvate		+ 2 x NADH, H	6 ATP
Cycle de Krebs	2 X 1 ATP	2X3 NADH,H+ 2X1 FADH2	18 ATP 4 ATP
BILAN	4 ATP		34 ATP ou 32 ATP

BILAN



Légende :

Matière organique/minérale

Pouvoir réducteur

Energie

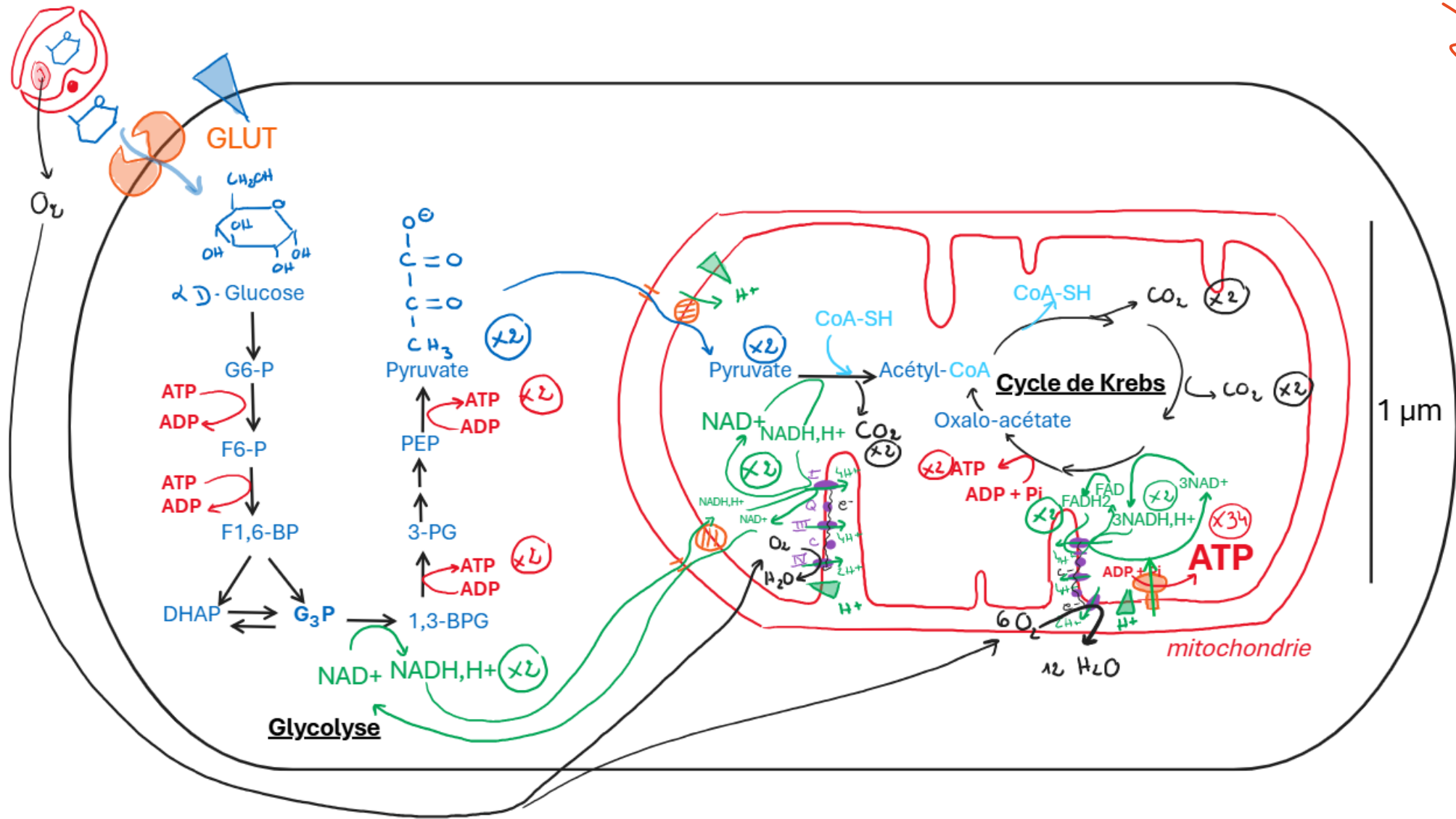
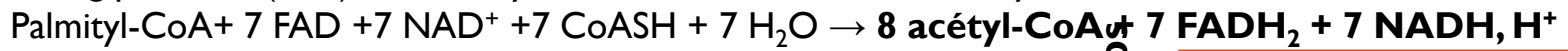


Schéma bilan sur la respiration cellulaire (S. Dalaine)

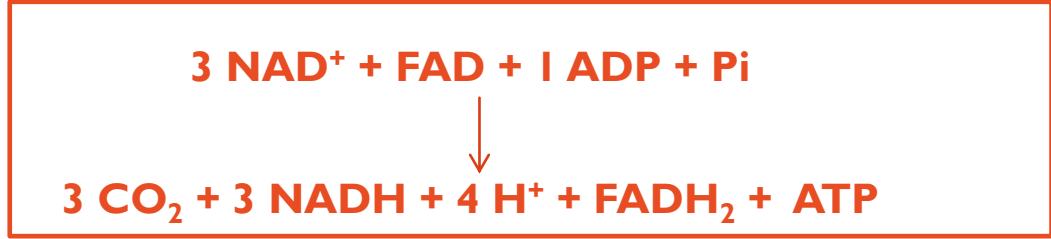


- matrice mitochondriale, à chaque tour d'hélice de Lynen
 ⇒ raccourcissement du squelette carboné deux atomes de carbone (acétyl-CoA) + réduction de 2 coenzymes

ex: ag palmitate (C16) → 8 acétyl-CoA avec 7 tours d'hélice de Lynen

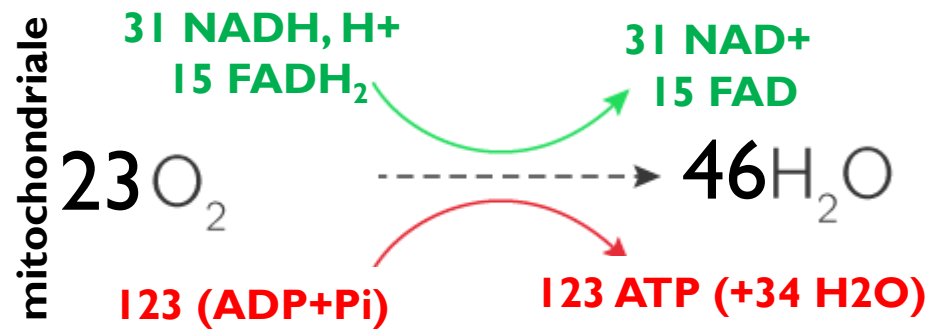


Cycle de Krebs

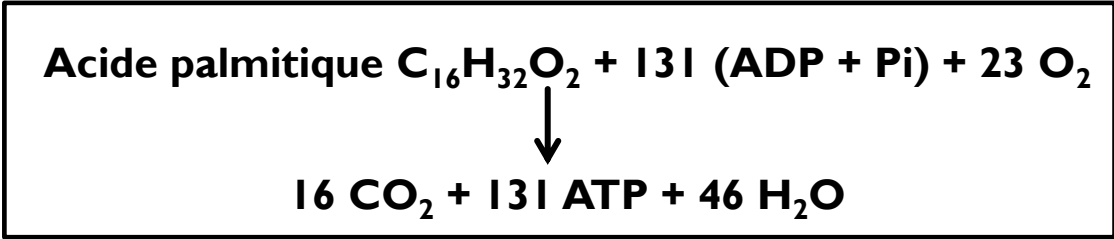


x8

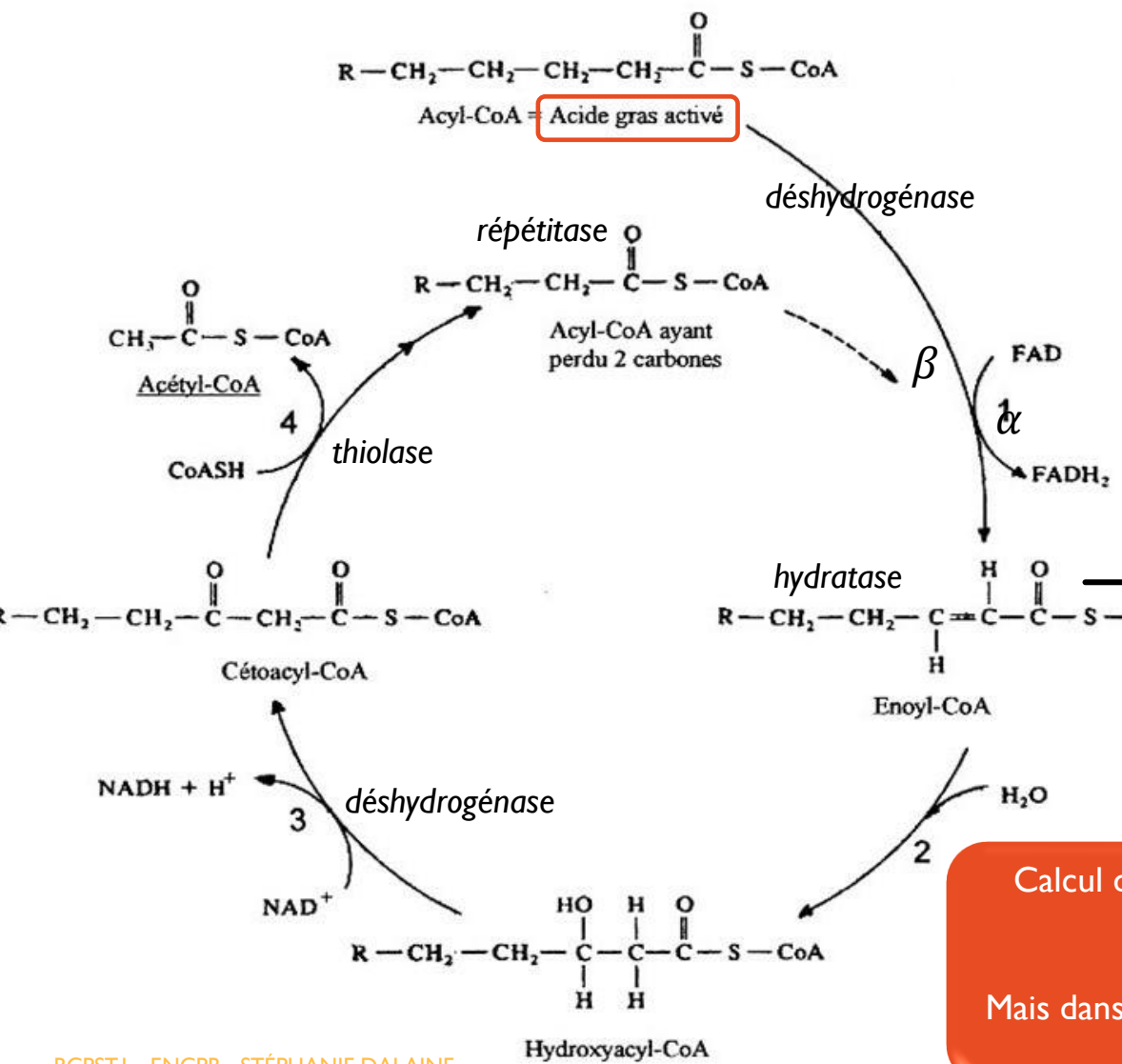
Chaîne mitochondriale



RESPIRATION CELLULAIRE



Calcul du rendement de l'oxydation d'une molécule d'acide palmitique (C16), d'énergie potentielle estimée à 9730 kJ.mol⁻¹:
 R = 131 * 30,5 / 9730 = 0,41
 Mais dans conditions physio du tissu adipeux, proche de 70%, car forte [ATP] >> [ADP] => enthalpie libre d'hydrolyse d'ATP proche de 50 kJ.mol⁻¹



PLAN DU COURS

I. La matière organique est oxydée partiellement dans le cytosol : glycolyse et fermentations

- A. Vue d'ensemble de la glycolyse
- B. Les trois étapes de la glycolyse : activation du substrat, oxydation, formation d'ATP
- C. Bilan énergétique de la glycolyse
- D. Les contrôles exercés sur les étapes les plus exergoniques de la glycolyse
- E. La glycolyse, un carrefour métabolique siège d'entrées de métabolites d'origine variée
- F. Les coenzymes sont régénérés par fermentation en conditions anaérobies ou aérobies

II. Le cycle de Krebs, voie de convergence du catabolisme

- A. En amont du cycle de Krebs : formation de l'acétyl-coenzyme A dans la matrice mitochondriale
- B. Le cycle de Krebs : oxydation totale de l'acétylCoa et l'obtention d'un pouvoir réducteur

III. Des transferts d'électrons exergoniques dans la chaîne respiratoire mitochondriale, une membrane hautement spécialisée

- A. Mise en évidence de transfert entre un donneur et un accepteur d'électrons : réduction d'O₂ et oxydation de NADH, H⁺
- B. Entrée dans la matrice mitochondriale des coenzymes réduits
- C. une série de transporteurs d'électrons dans la membrane mitochondriale
- D. présentation de la chaîne respiratoire mitochondriale
- E. Le bilan d'énergie et de matière du cycle de Krebs

IV. La matière organique peut être stockée ou utilisée pour des biosynthèses

- A. La MO peut être stockée sous forme de réserve ou exportée (exemple des glucides)
- B. La MO est à l'origine de la synthèse de nouvelles molécules

IV. LA MATIERE ORGANIQUE PEUT ETRE STOCKEE OU UTILISEE POUR DES BIOSYNTHESES

A. LA MO PEUT ETRE STOCKEE SOUS FORME DE RESERVE OU EXPORTEE (EXEMPLE DES GLUCIDES)

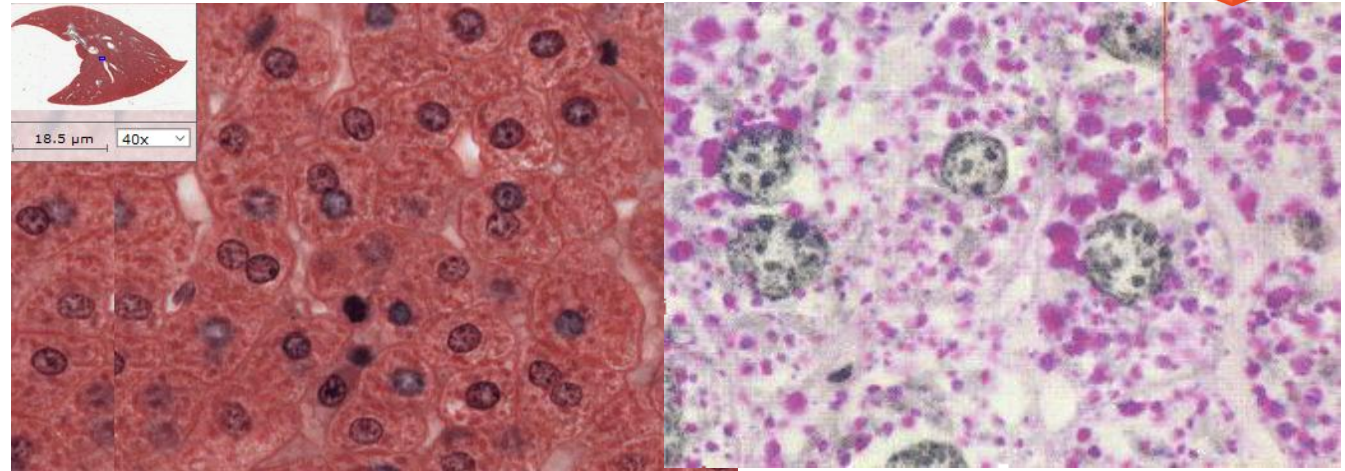
I. Stockage sous forme de glycogène dans les cellules animales

- Test au lugol → **rouge-orangé**



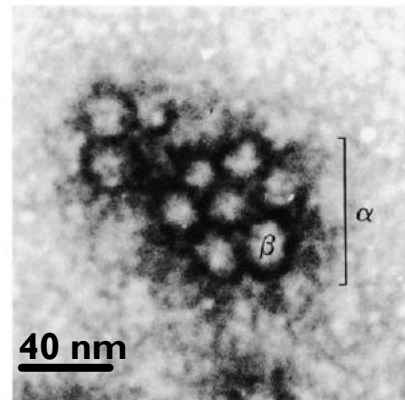
Coloration du glycogène par le lugol

- Le glycogène est produit par :
 - les animaux (foie, muscles)
 - les champignons
- Il se situe dans le cytoplasme des cellules, sous forme de **particules α et β** ($\varnothing \sim 20$ nm)

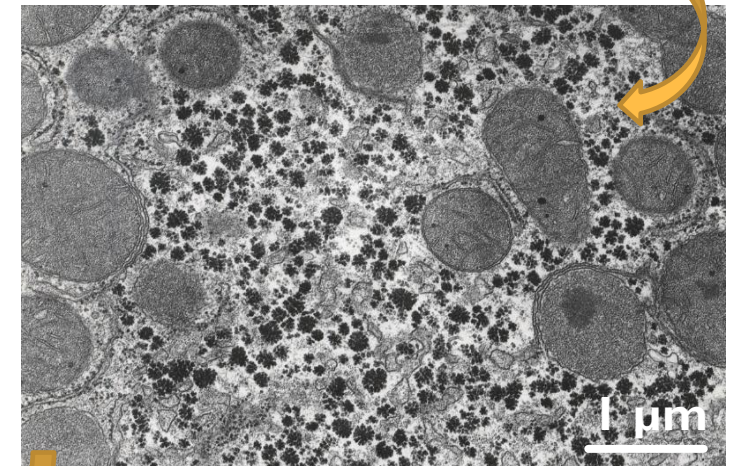


Coupe de foie avec glycogène coloré en rose (MO, x300)

Hépatocyte avec glycogène coloré en rose (MO, x300)



Particules de glycogènes (MET) (Voet)



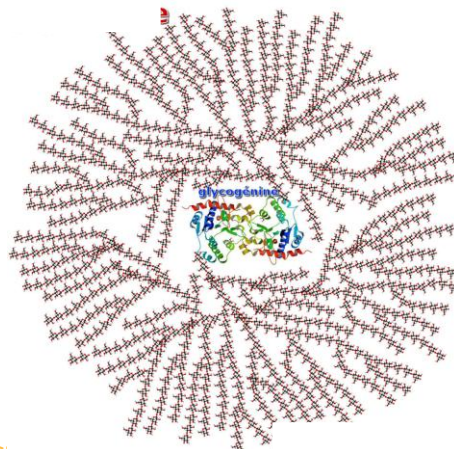
Grains de glycogène dans un hépatocyte (MET)

IV. LA MATIERE ORGANIQUE PEUT ETRE STOCKEE OU UTILISEE POUR DES BIOSYNTHESES

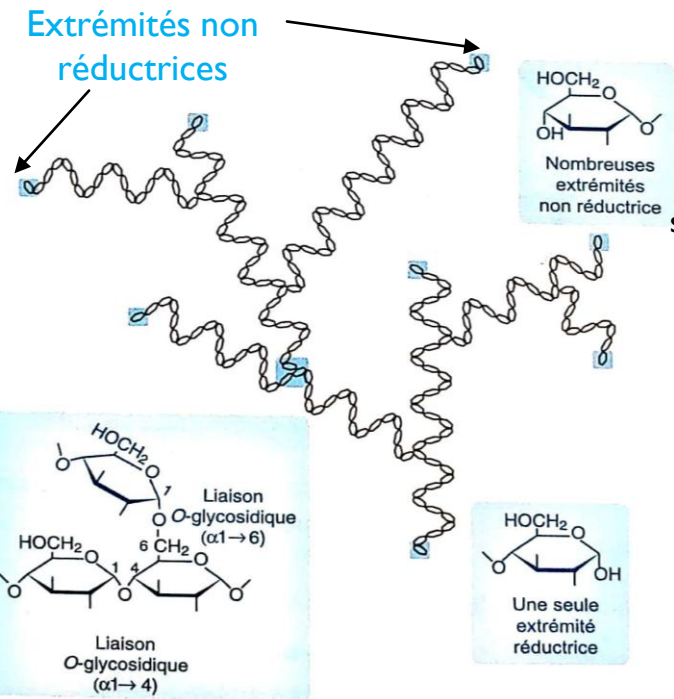
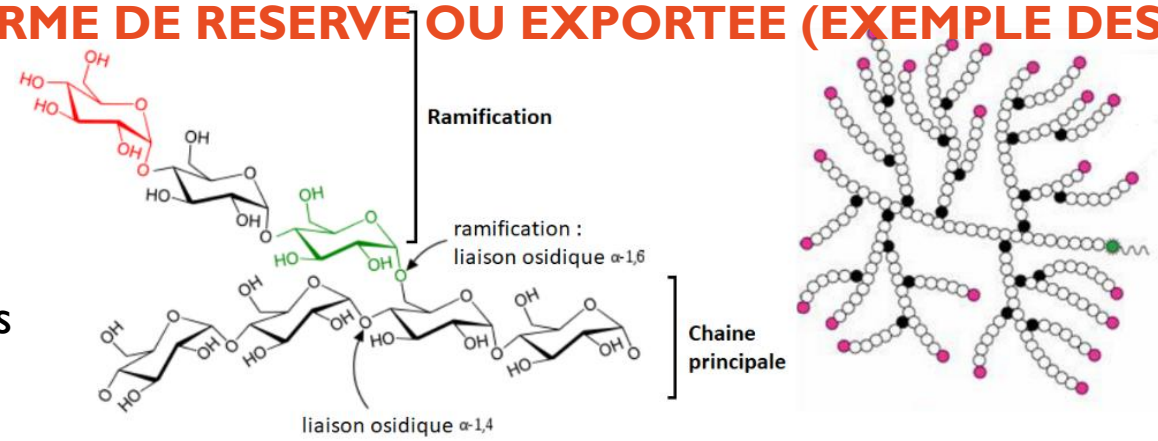
A. LA MO PEUT ETRE STOCKEE SOUS FORME DE RESERVE OU EXPORTEE (EXEMPLE DES GLUCIDES)

I. Stockage sous forme de glycogène dans les cellules animales

- Structure similaire à celle de l'amylopectine mais plus ramifiée
 - ✓ Monomères : α -D-glucopyranose
 - ✓ Types de liaisons osidiques :
 - $\alpha(1\rightarrow4)$
 - $\alpha(1\rightarrow6)$ tous les 10 résidus
 - ✓ Nb de résidus : $\sim 10^5$
 - ✓ Structure 3D : ramifiée, globulaire compacte



Grain de glycogène avec glycogénine au centre



Structure du glycogène (Peycru, 2004)

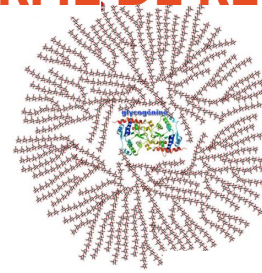
IV. LA MATIERE ORGANIQUE PEUT ETRE STOCKEE OU UTILISEE POUR DES BIOSYNTHESES

A. LA MO PEUT ETRE STOCKEE SOUS FORME DE RESERVE OU EXPORTEE (EXEMPLE DES GLUCIDES)

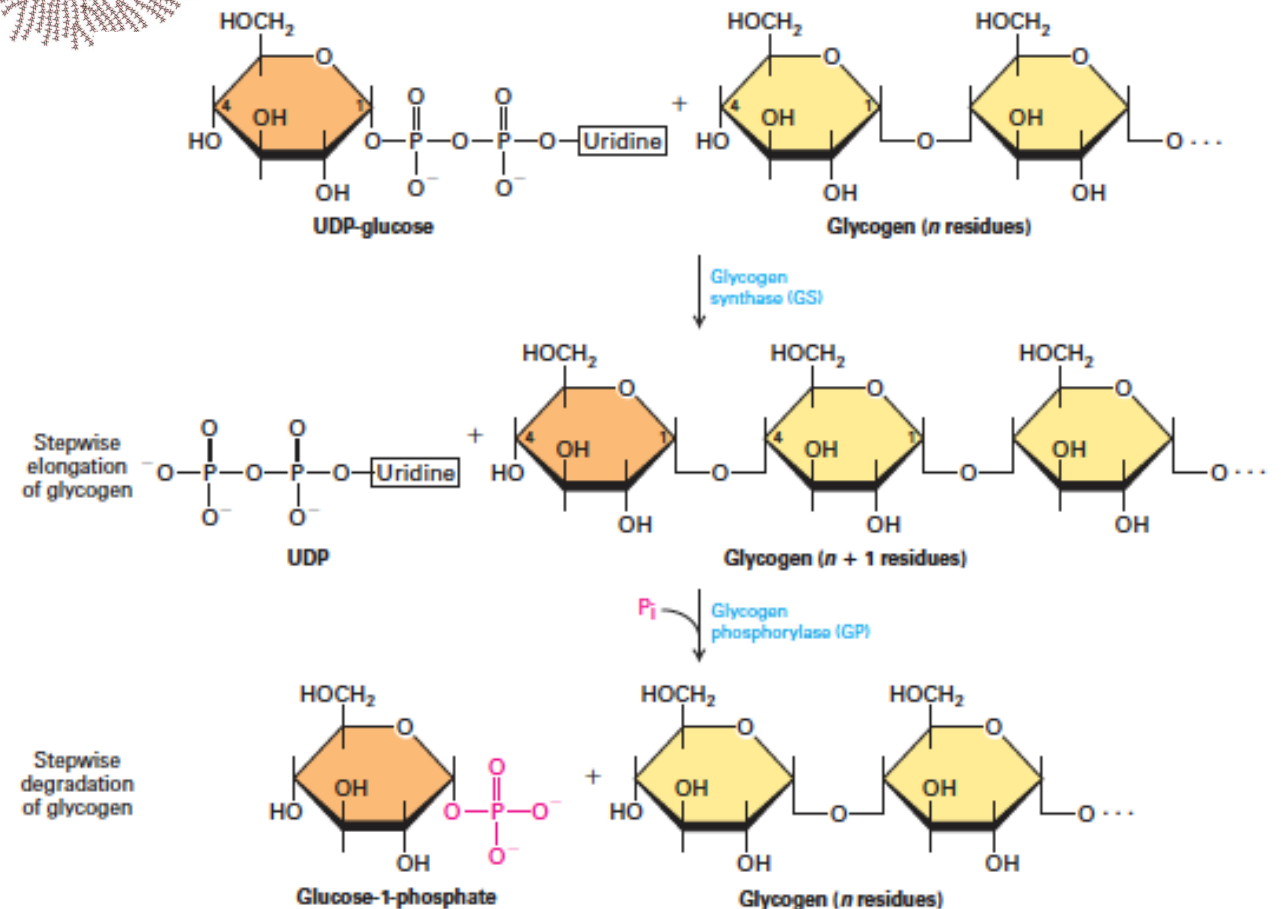


I. Stockage sous forme de glycogène dans les cellules animales

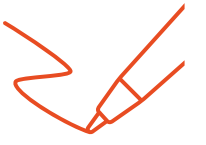
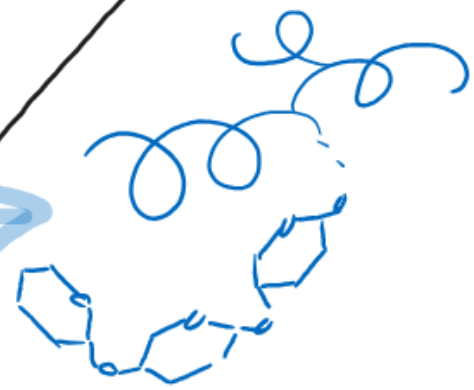
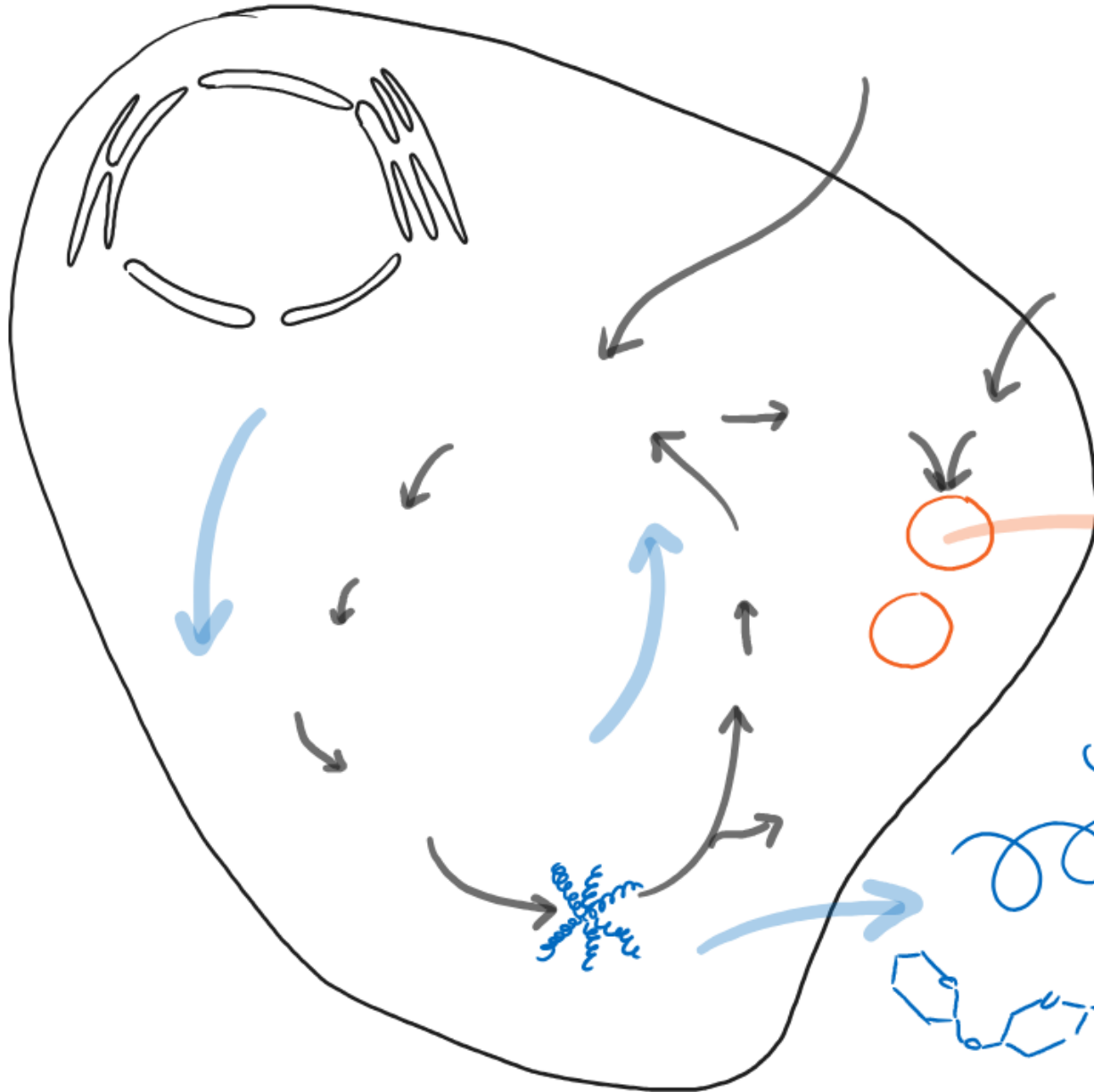
- Formation de réserves de glycogène suite à un repas.
- Les particules β contiennent en leur cœur de la **glycogénine** (prot) et sert d'amorce à la polymérisation par le **glycogène synthétase**.
- Remobilisation en cas de besoin de glucose (effort physique, jeûne...)
- Hydrolyse par une **phosphorylase** qui libère du glucose-1-P
 - ✓ Dans cellules musculaires, glucose-1-P directement utilisé dans la glycolyse
 - ✓ Dans hépatocytes, glucose-1-P converti en Glucose-6-P puis déphosphorylé → libération glucose dans sang



Grain de glycogène avec glycogénine au centre



Synthèse et hydrolyse du glycogène



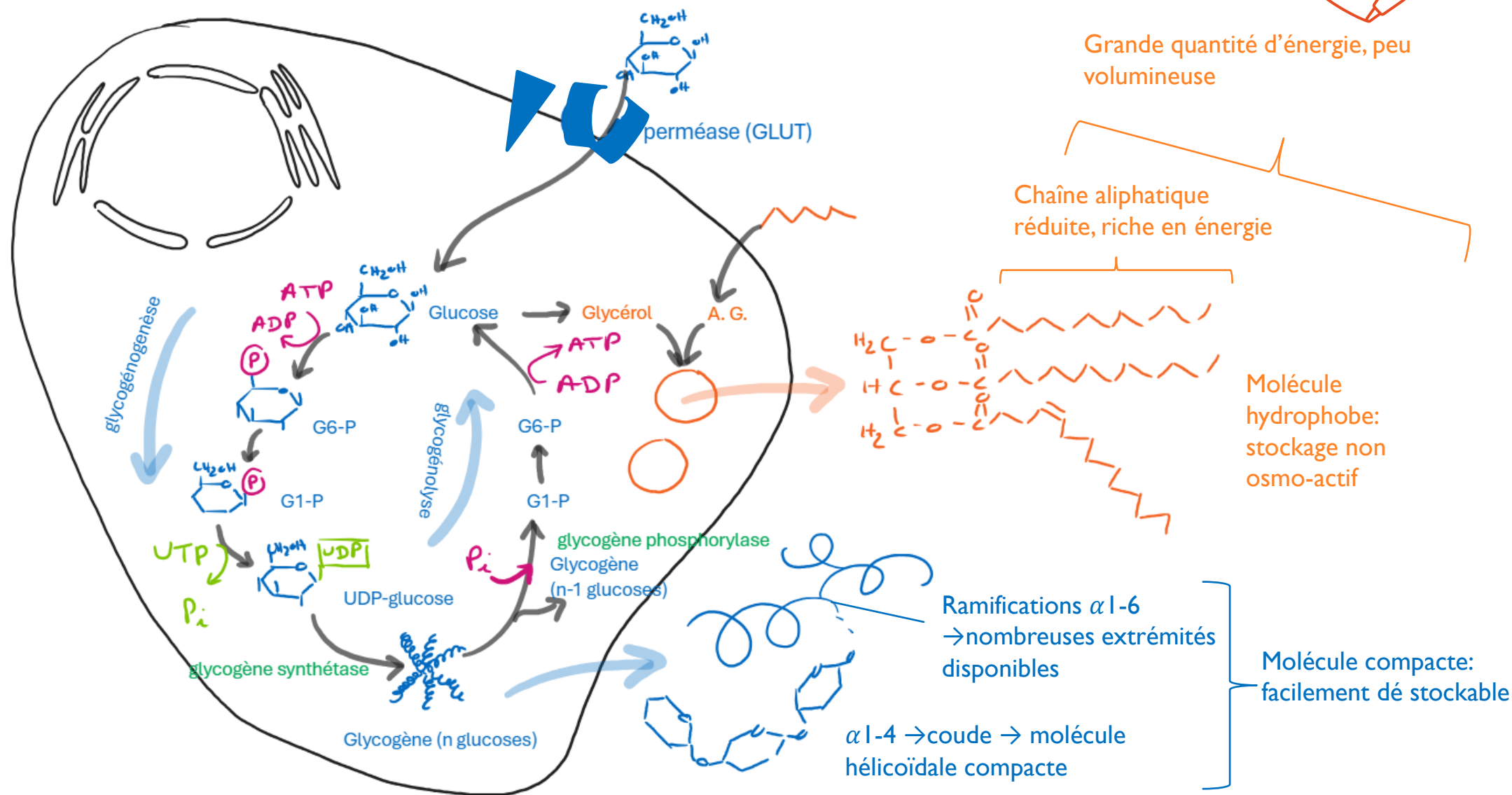


Figure 35: le stockage de la matière organique chez les cellules animales, exemple d'un hépatocyte

IV. LA MATIERE ORGANIQUE PEUT ETRE STOCKEE OU UTILISEE POUR DES BIOSYNTHESES

A. LA MO PEUT ETRE STOCKEE SOUS FORME DE RESERVE OU EXPORTEE (EXEMPLE DES GLUCIDES)



2. Stockage sous forme d'amidon dans les cellules végétales chlorophylliennes

- Accumulation de réserves nutritives par **synthèse** d'amidon, puis remobilisation par **hydrolyse**

	Synthèse	Hydrolyse
Organe de réserve	Pendant la bonne saison (été)	A la mauvaise saison (hiver)
Graine	Pendant la formation de la graine	Pendant la germination
Chloroplaste	Le jour, quand la photosynthèse a lieu	La nuit, transfert des sucres vers les autres organes (sous forme de saccharose via la sève élaborée)

Synthèse de l'amidon par l'amidon synthase ou la glucosyl-transférase.

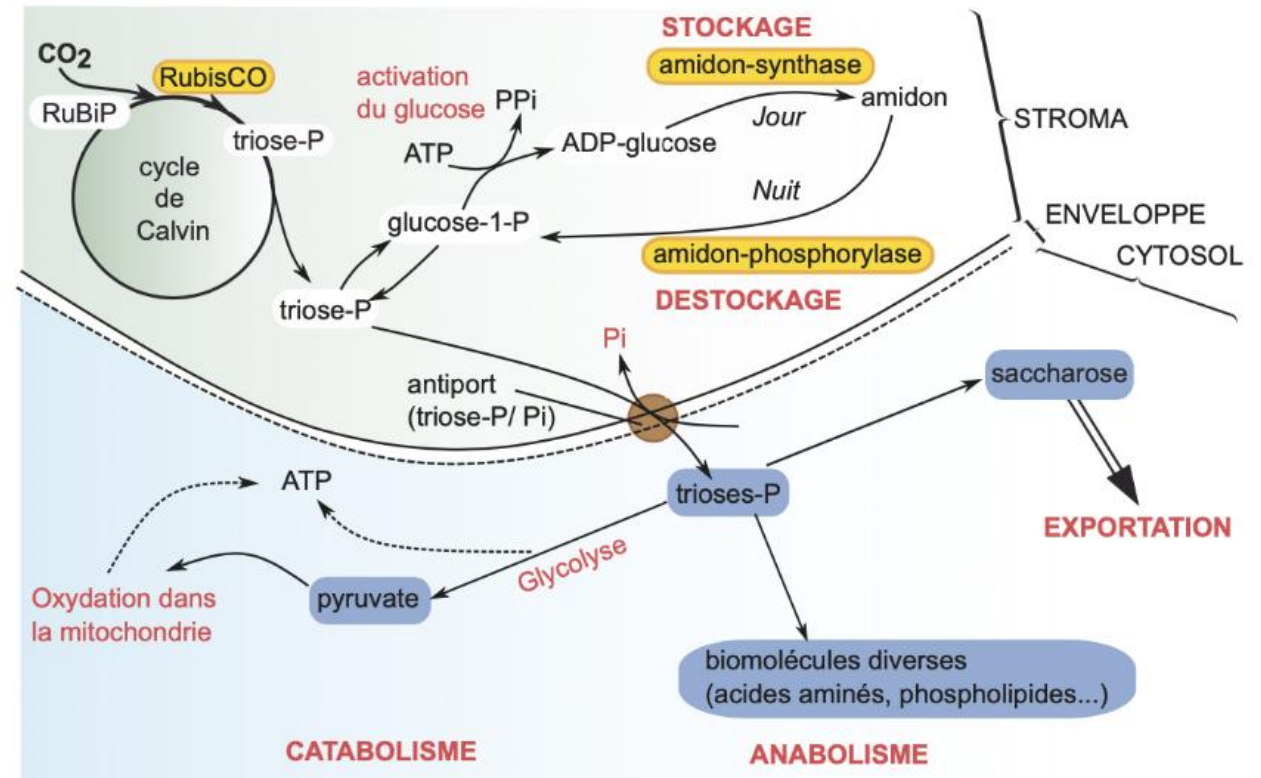


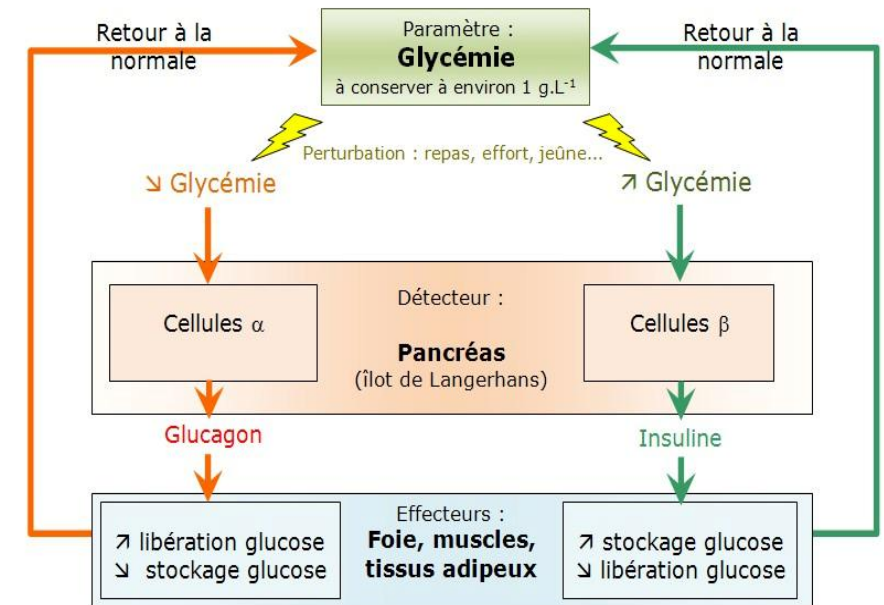
Figure 35 : Devenirs des trioses-phosphate produits au cours de la photosynthèse. (in Dunod)

IV. LA MATIERE ORGANIQUE PEUT ETRE STOCKEE OU UTILISEE POUR DES BIOSYNTHESES

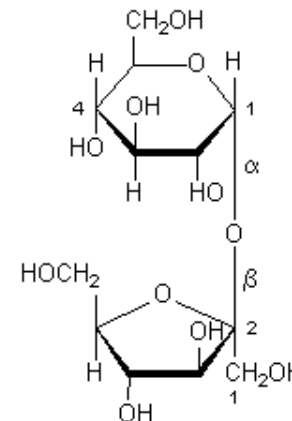
A. LA MO PEUT ETRE STOCKEE SOUS FORME DE RESERVE OU EXPORTEE (EXEMPLE DES GLUCIDES)

3. Exportation de la matière organique depuis les organes de stockage sous différentes formes

- Chez les mammifères, glucose = forme circulante d'énergie :
 - petite molécule hydrophile
 - peu consommée par les hématies
 - En cas de baisse de la glycémie → sécrétion de glucagon par pancréas → déstockage de glucose par foie
- Dans la cellule végétale chlorophyllienne = trioses-phosphate transportés vers le cytosol via **un antiport triose-P/Pi**.
 - consommés par cellule
 - ✓ au cours de la synthèse d'autres biomolécules (voie anabolique)
 - ✓ catabolisme permettant ainsi la formation d'ATP
 - ✓ être convertis en saccharose
 - ⇒ exportés hors de la cellule via sève élaborée



<https://www.svt-biologiepremiere.bacdefrancais.net/>



Le saccharose (α-D-glucopyranosyl-(1 → 2)-β-D-fructofuranoside), un dioside non réducteur

PLAN DU COURS

I. La matière organique est oxydée partiellement dans le cytosol : glycolyse et fermentations

- A. Vue d'ensemble de la glycolyse
- B. Les trois étapes de la glycolyse : activation du substrat, oxydation, formation d'ATP
- C. Bilan énergétique de la glycolyse
- D. Les contrôles exercés sur les étapes les plus exergoniques de la glycolyse
- E. La glycolyse, un carrefour métabolique siège d'entrées de métabolites d'origine variée
- F. Les coenzymes sont régénérés par fermentation en conditions anaérobies ou aérobies

II. Le cycle de Krebs, voie de convergence du catabolisme

- A. En amont du cycle de Krebs : formation de l'acétyl-coenzyme A dans la matrice mitochondriale
- B. Le cycle de Krebs : oxydation totale de l'acétylCoa et l'obtention d'un pouvoir réducteur

III. Des transferts d'électrons exergoniques dans la chaîne respiratoire mitochondriale, une membrane hautement spécialisée

- A. Mise en évidence de transfert entre un donneur et un accepteur d'électrons : réduction d'O₂ et oxydation de NADH, H⁺
- B. Entrée dans la matrice mitochondriale des coenzymes réduits
- C. une série de transporteurs d'électrons dans la membrane mitochondriale
- D. présentation de la chaîne respiratoire mitochondriale
- E. Le bilan d'énergie et de matière du cycle de Krebs

IV. La matière organique peut être stockée ou utilisée pour des biosynthèses

- A. La MO peut être stockée sous forme de réserve ou exportée (exemple des glucides)
- B. La MO est à l'origine de la synthèse de nouvelles molécules

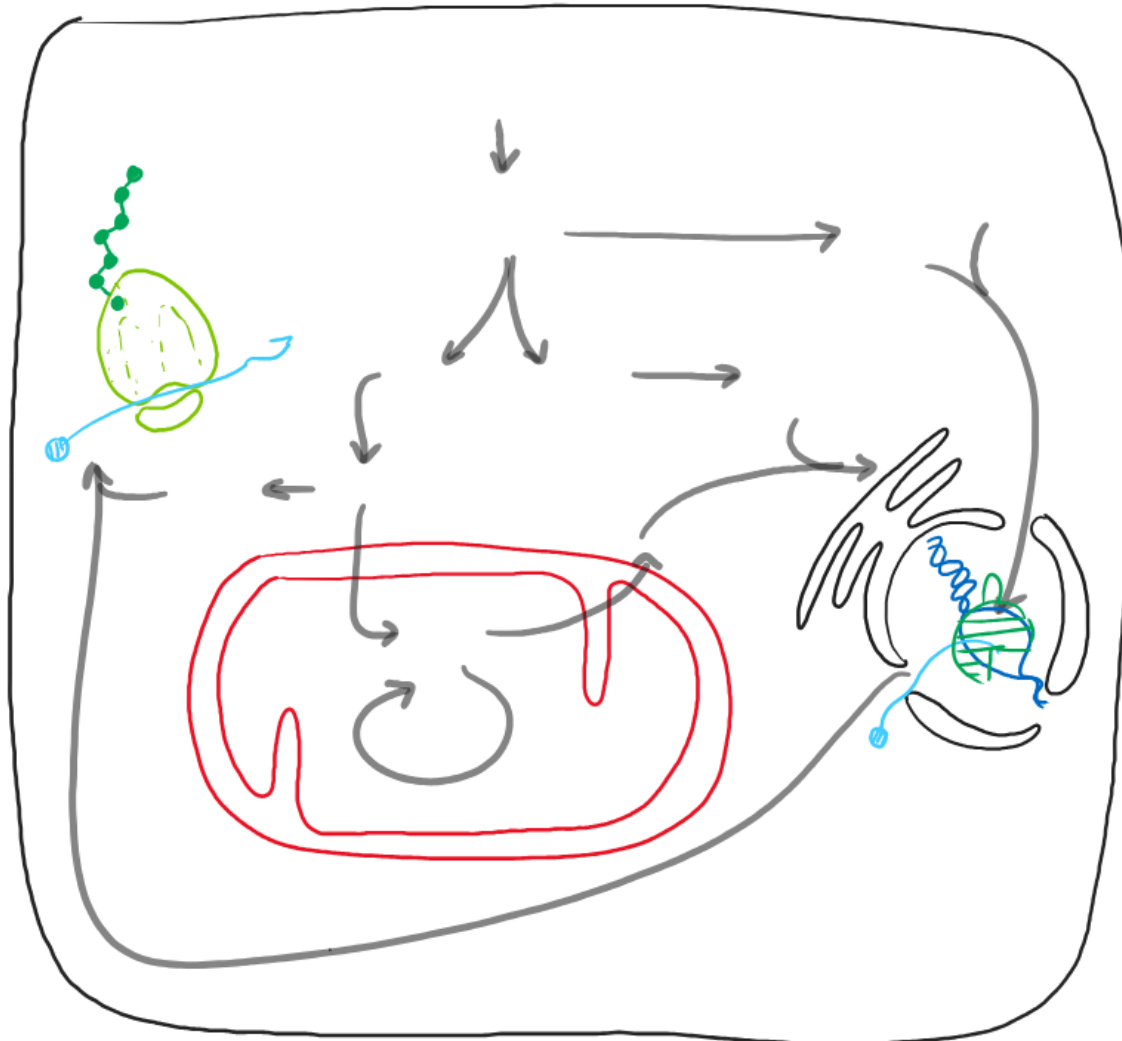
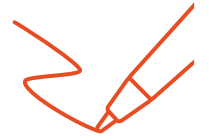
B. LA MO EST À L'ORIGINE DE LA SYNTHÈSE DE NOUVELLES MOLECULES

I. les biosynthèses reposent sur la compartimentation cellulaire

	Localisation de la biosynthèse	Molécules élémentaires	Coût énergétique de la biosynthèse	Rôle des biomolécules synthétisées
Acides nucléiques	Noyau, organites semi-autonomes	dNTP, rNTP	ATP	Informationnel, Catalytique
Protéines	Ribosomes libres dans le cytosol ou liés au REG, appareil de Golgi	Acides aminés	ATP, GTP	Structural, Métabolique, informationnel, catalytique Interactions avec le milieu
Molécules fibreuses des MEC	Réseau endomembranaire, membrane plasmique et milieu extracellulaire	Acides aminés UDP-glucose	ATP, GTP	Structural Interactions avec le milieu
Phospholipides membranaires	Réticulum endoplasmique lisse	Acétyl-CoA, Glycérol-phosphate	CTP	Structural Interactions avec le milieu

B. LA MO EST À L'ORIGINE DE LA SYNTHÈSE DE NOUVELLES MOLECULES

2. Des interconversions sont possibles entre familles de molécules



Panorama des voies
d'anabolisme dans une cellule
eucaryote



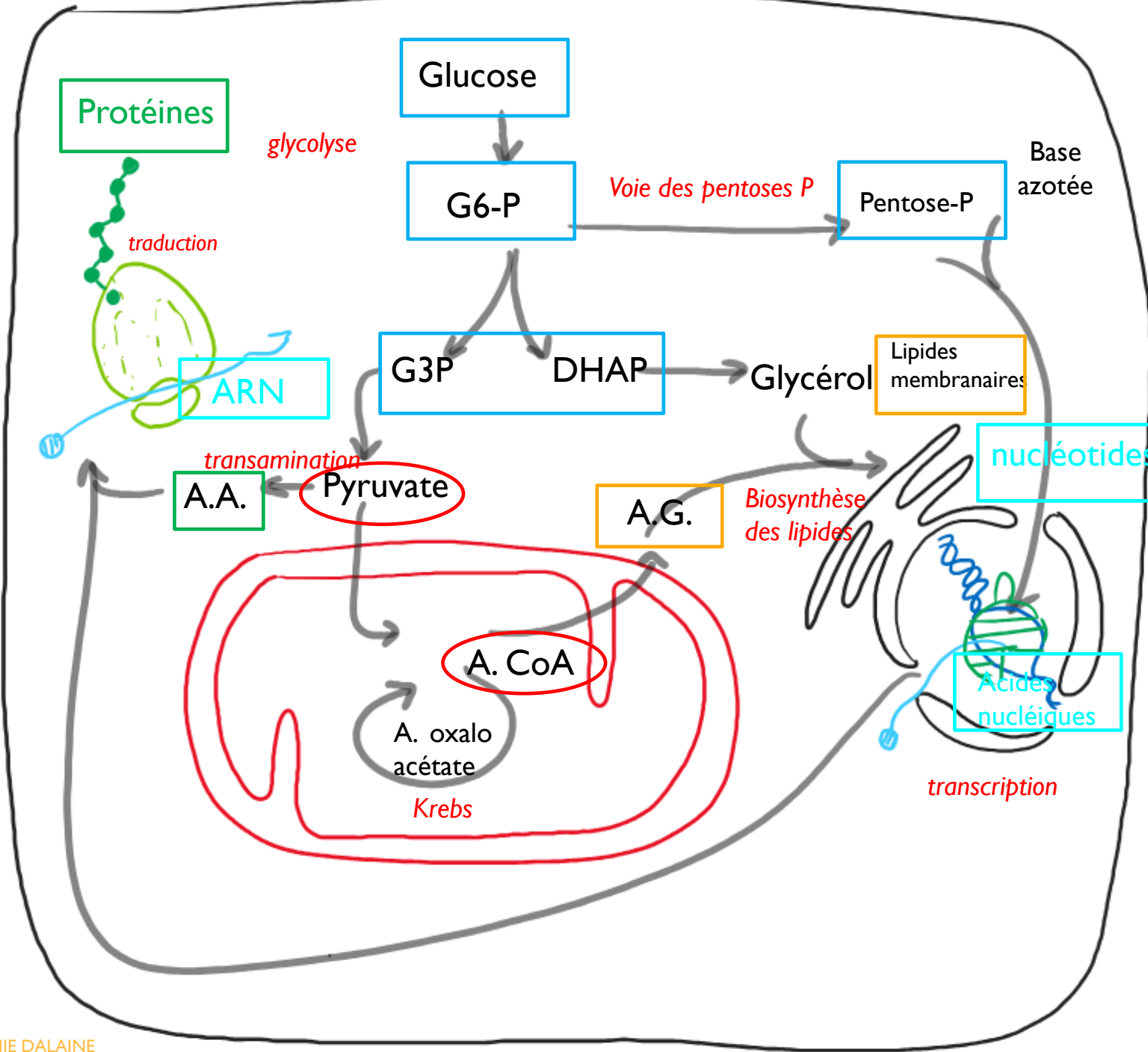
Petites molécules intermédiaires: carrefours métaboliques

Glucides

Protides

Nucléotides et acides nucléiques

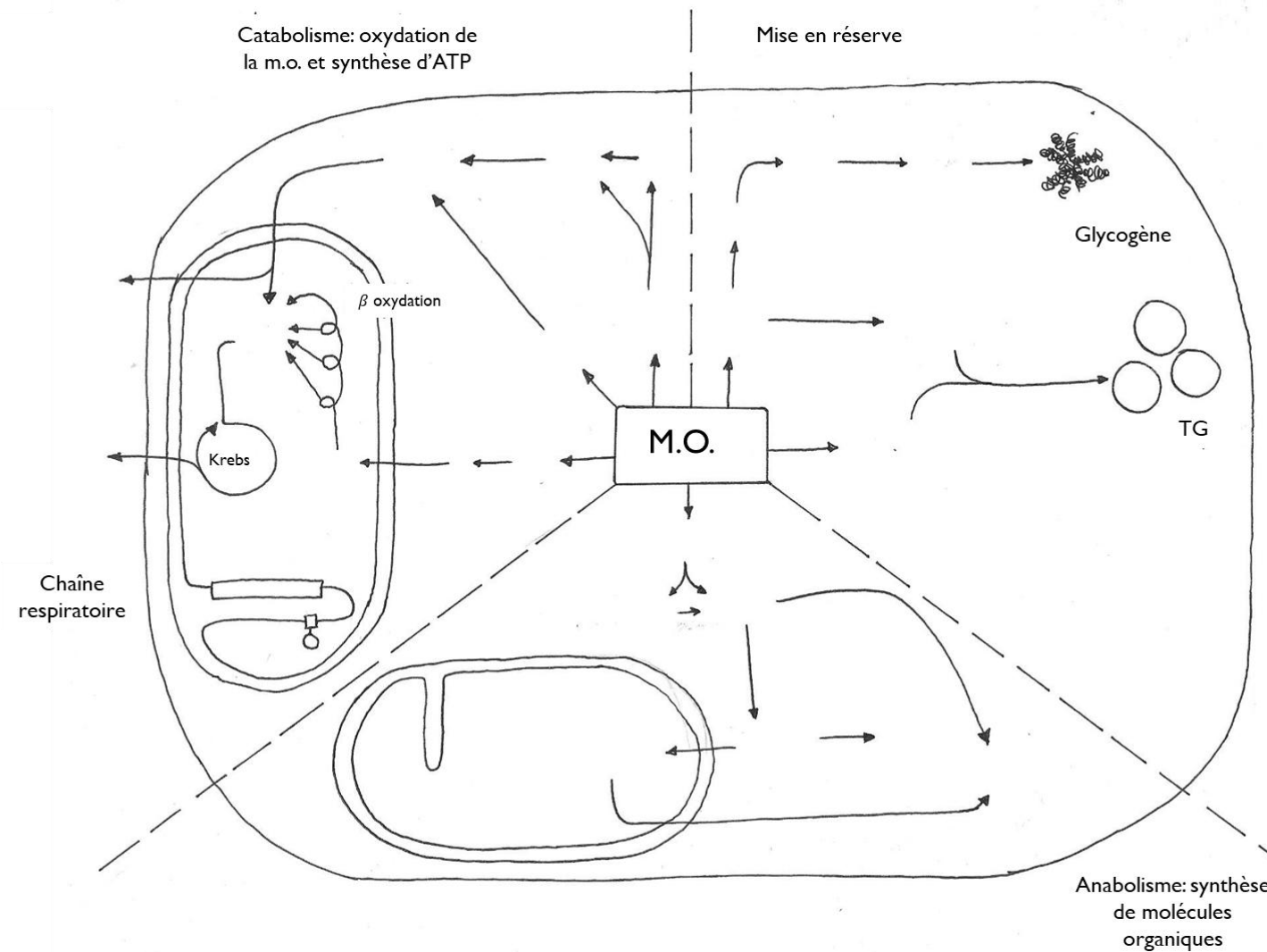
Lipides



Panorama des voies d'anabolisme dans une cellule eucaryote

B. LA MO EST À L'ORIGINE DE LA SYNTHÈSE DE NOUVELLES MOLECULES

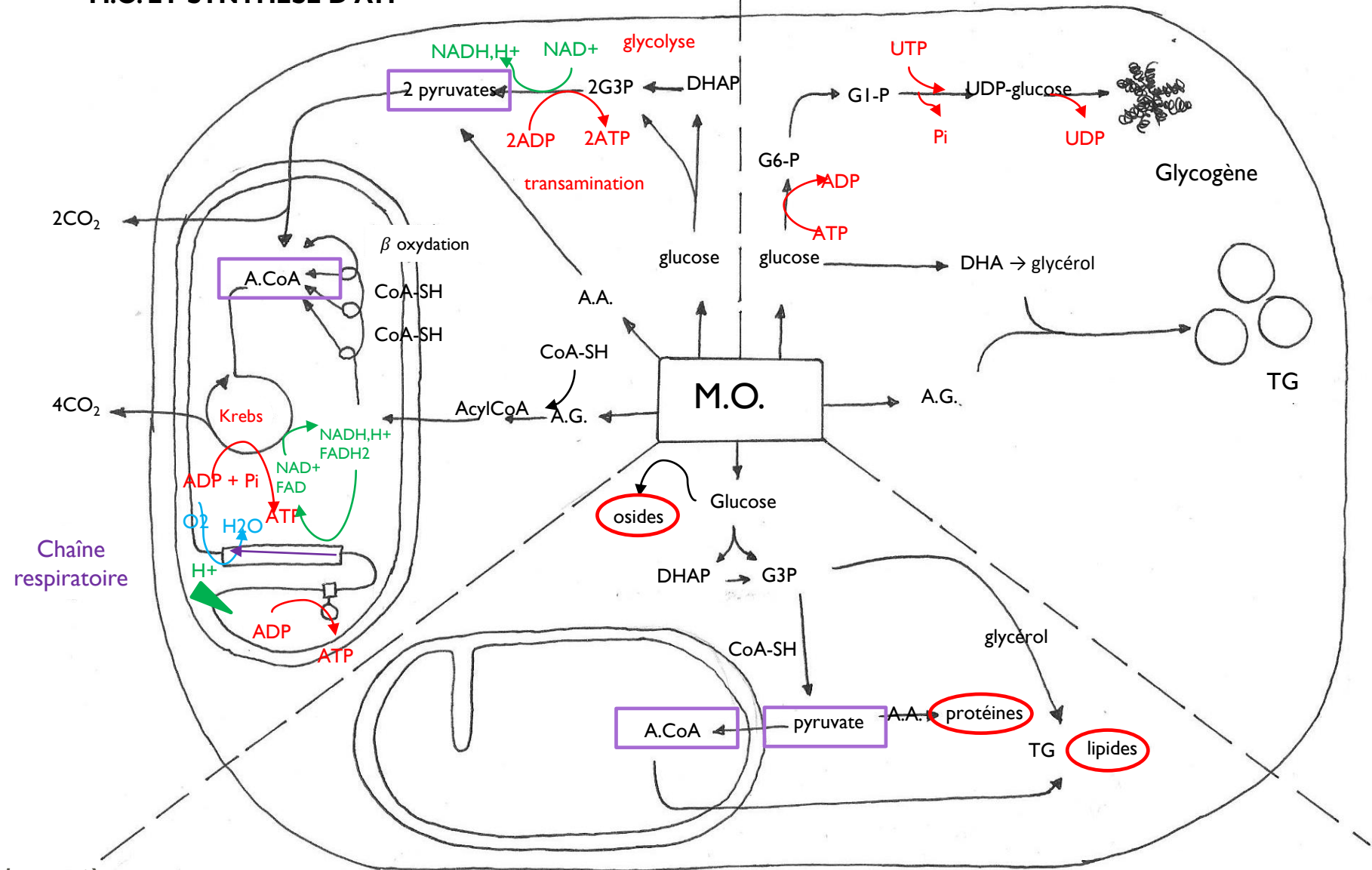
3. Les interconversions reposent sur l'existence de carrefour métabolique (exemple de l'Acétyl coenzyme A)



Le devenir de la matière organique (M. Quertigniez)

CATABOLISME: OXYDATION DE LA M.O. ET SYNTHÈSE D'ATP

MISE EN RÉSERVE



Le devenir de la matière organique (M. Quertigniez)

ANABOLISME: SYNTHÈSE DE MOLÉCULES ORGANIQUES

SUJETS D'ORAUX

- Les mitochondries dans les cellules
- Le catabolisme oxydatif
- La respiration, de l'échelle cellulaire à celle de l'organisme
- Le glucose dans la cellule animale
- Origine et devenir du glucose chez les Animaux
- Origine et devenir de la matière organique dans les cellules hétérotrophes
- D'un aliment à l'ATP
- L'hétérotrophie des organismes animaux
- Les aliments, source de matière et d'énergie de l'animal
- Les oses dans un végétal vert : origines et devenirs
- Le stockage de la matière organique (2025) - Les réserves organiques au sein du vivant (2025)
- Stockage et déstockage de la matière organique chez les végétaux
- Stockage et déstockage de la matière organique chez les êtres vivants
- Le carbone, de l'atmosphère à un organe de réserve chez les végétaux

