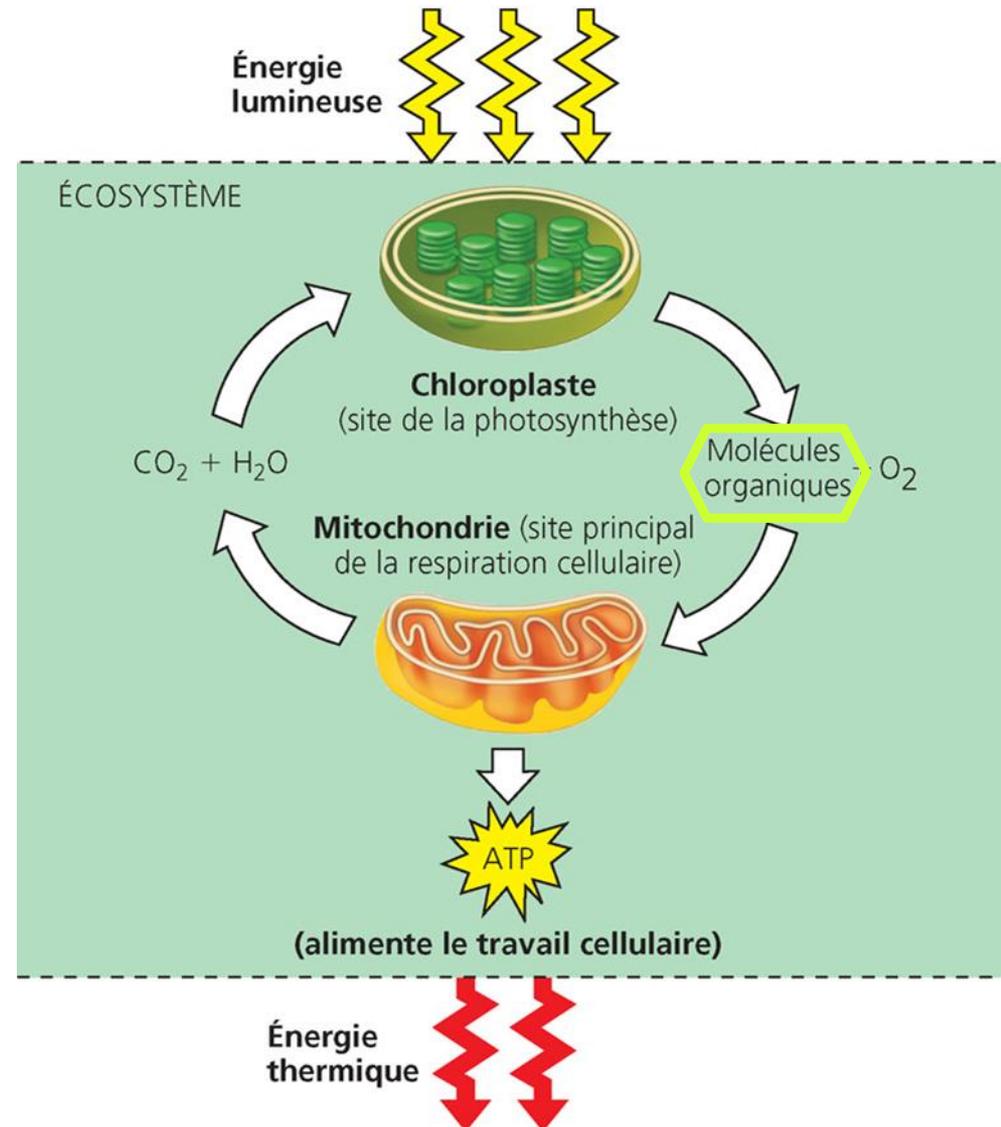


# MÉTABOLISME ÉNERGÉTIQUE

ANABOLISME DES  
**GLUCIDES**  
(photosynthèse)

CATABOLISME DES  
**GLUCIDES** (etc.)  
(respiration, fermentation)



[1a, p. 169], [1b, p. 183]

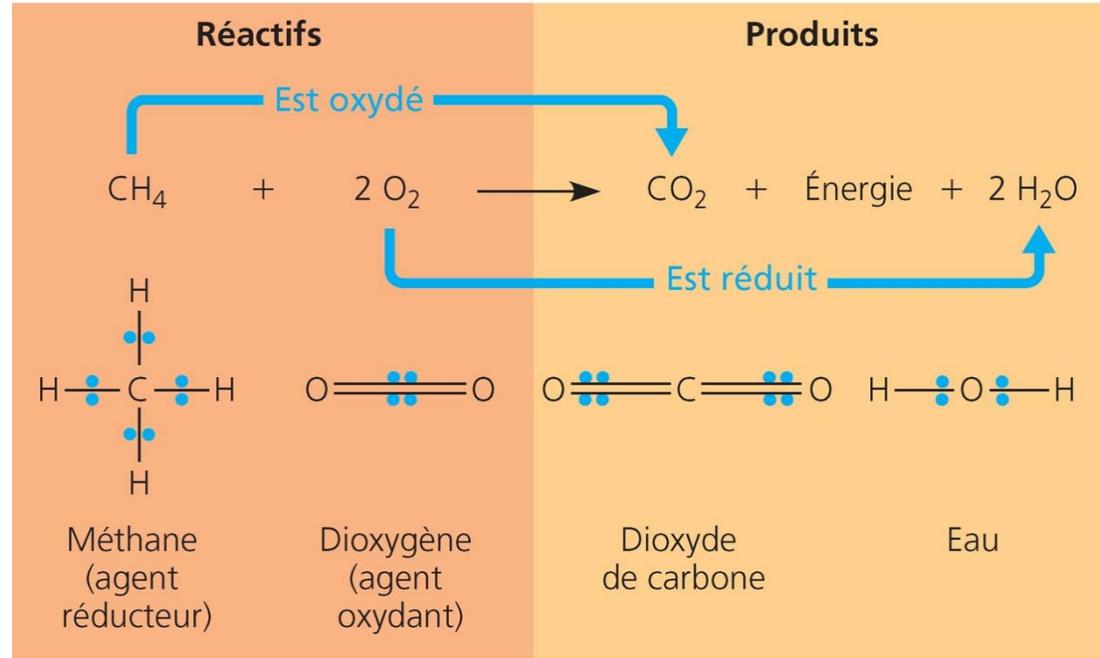
Figure 9.2 Flux de l'énergie et recyclage chimique dans les écosystèmes.

# Quelques notions incontournables

 Oxydo-réduction

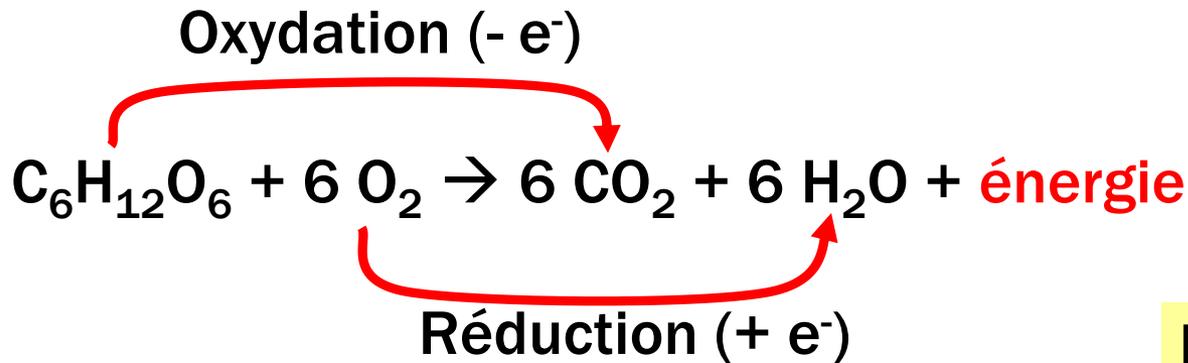
 Transport d'électrons

# Oxydo-réduction



▲ Figure 9.3 Un exemple de réaction d'oxydoréduction: la combustion du méthane.

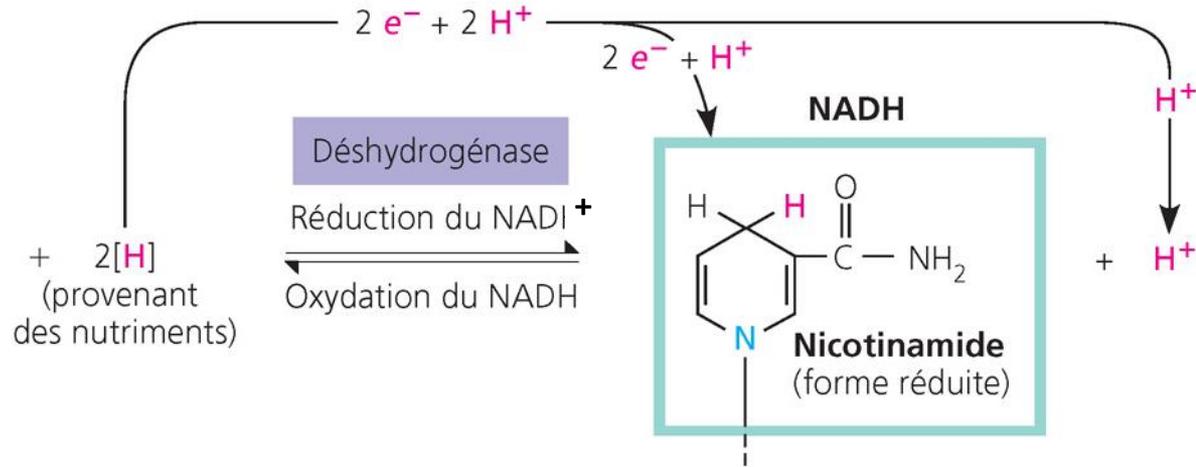
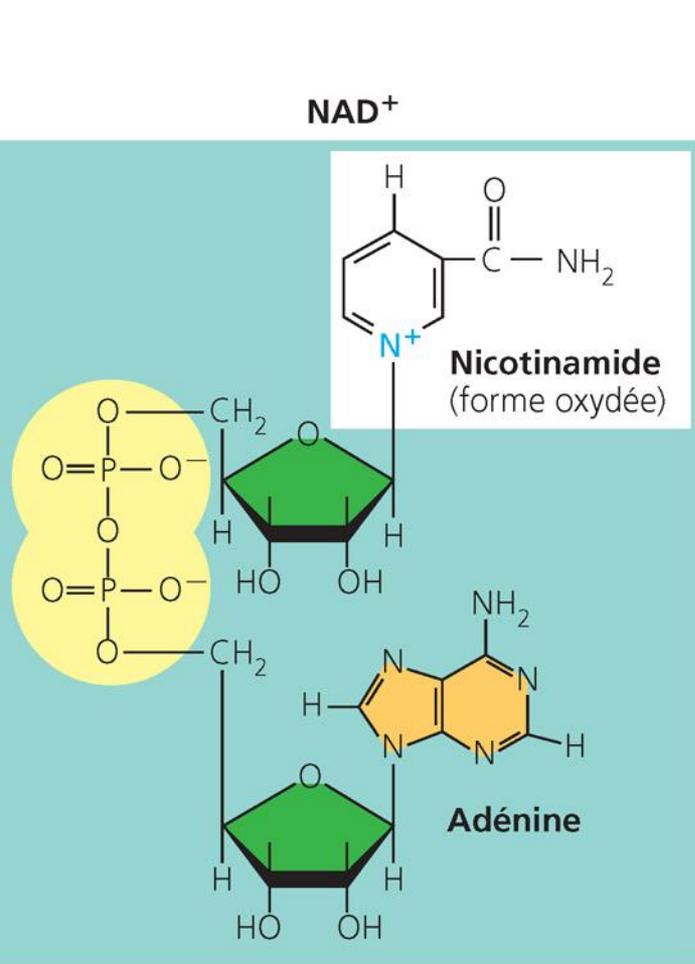
**Autre exemple :**  
**la respiration cellulaire**



[1a, p. 171 ou 1b, p. 185]



# Transporteur d'e<sup>-</sup> : l'exemple du NAD<sup>+</sup>



Le NAD<sup>+</sup> est-il sous sa forme oxydée ou réduite?

(Le NAD<sup>+</sup> est-il un agent oxydant ou réducteur?)

[1a, p. 172 ou 1b, p. 186]

▲ Figure 9.4 Le NAD<sup>+</sup>: un transporteur d'électrons.

# Dans le Catabolisme des glucides :

## Transporteurs d'e<sup>-</sup>

**Tableau 2** Contributions respectives des principales coenzymes impliquées dans le métabolisme énergétique (Notes de cours, module 2, p. 5)

Coenzymes	Processus	Rôles
<b>FAD</b>	<b>Respiration cellulaire</b>	FAD (forme oxydée) / FADH <sub>2</sub> (forme réduite) Transporteur d'électrons (e <sup>-</sup> ) dans des réactions d'oxydo-réduction : accepte 2 électrons (2 atomes d'H), puis les cède à une molécule située <u>près du sommet</u> de la chaîne de transport d' e <sup>-</sup> .
<b>NAD<sup>+</sup></b>	<b>Respiration cellulaire, Fermentation</b>	NAD <sup>+</sup> (forme oxydée) / NADH + H <sup>+</sup> (forme réduite) Transporteur d'électrons (e <sup>-</sup> ) dans des réactions d'oxydo-réduction : accepte 2 e <sup>-</sup> (1 atome d'H + 1 e <sup>-</sup> ), puis les cède à une molécule... R <sup>n</sup> : située <u>au sommet</u> de la chaîne de transport d' e <sup>-</sup> . / F <sup>n</sup> : qui les accepte.
<b>CoA</b>	<b>Respiration cellulaire</b>	Activation et transfert d'un acétyl (2C, dérivé d'un pyruvate ou acide gras ou acide aminé) au cycle du citrate (ou cycle de Krebs).
<b>NADP<sup>+</sup></b>	Photosynthèse	NADP <sup>+</sup> (forme oxydée) / NADPH + H <sup>+</sup> (forme réduite) Transporteur d'électrons (e <sup>-</sup> ) dans des réactions d'oxydo-réduction : accepte 2 e <sup>-</sup> (1 atome d'H + 1 e <sup>-</sup> ) obtenus par les rx photochimiques, puis les cède pour réduire un réactif du <u>cycle de Calvin</u> en un glucide (le PGAL).

# MÉTABOLISME ÉNERGÉTIQUE

## La dégradation du glucose : vue d'ensemble (les 2 voies possibles)

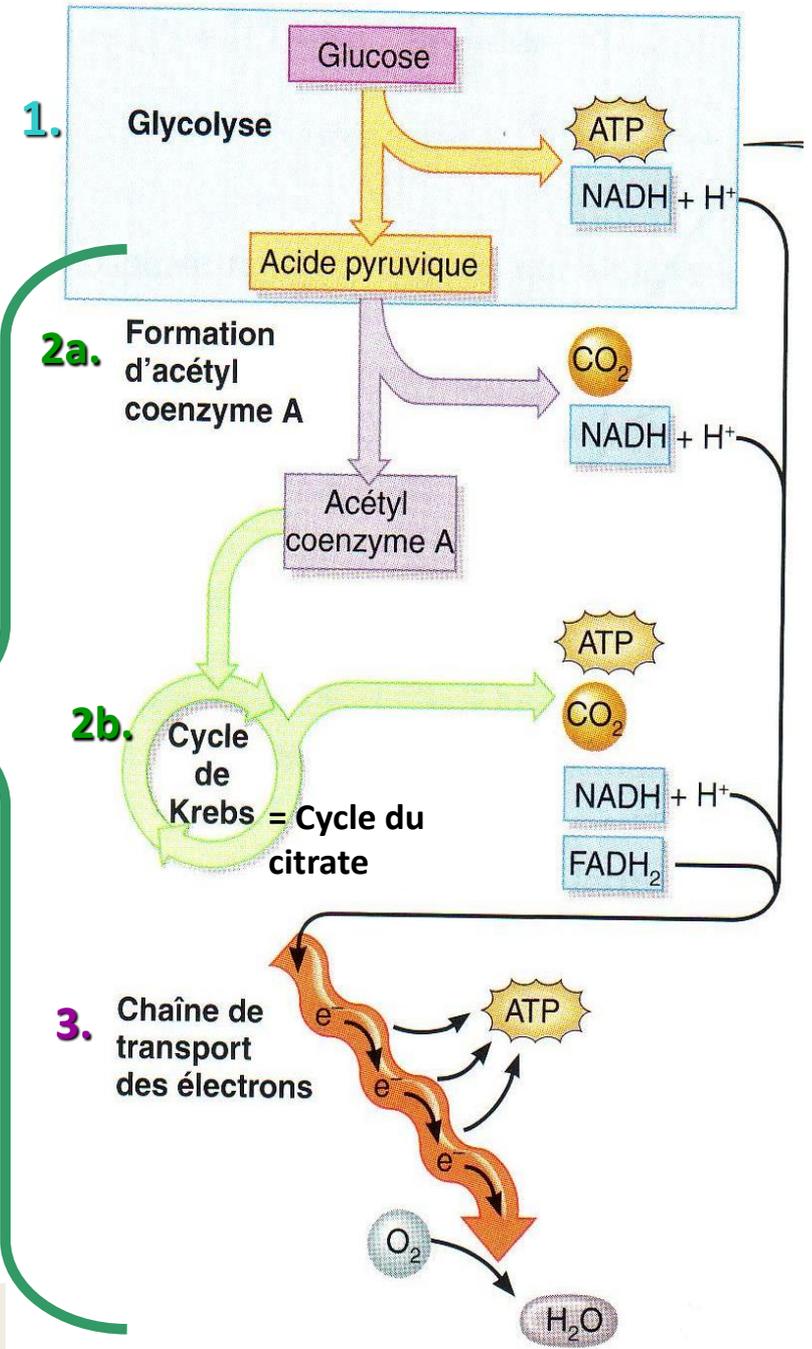
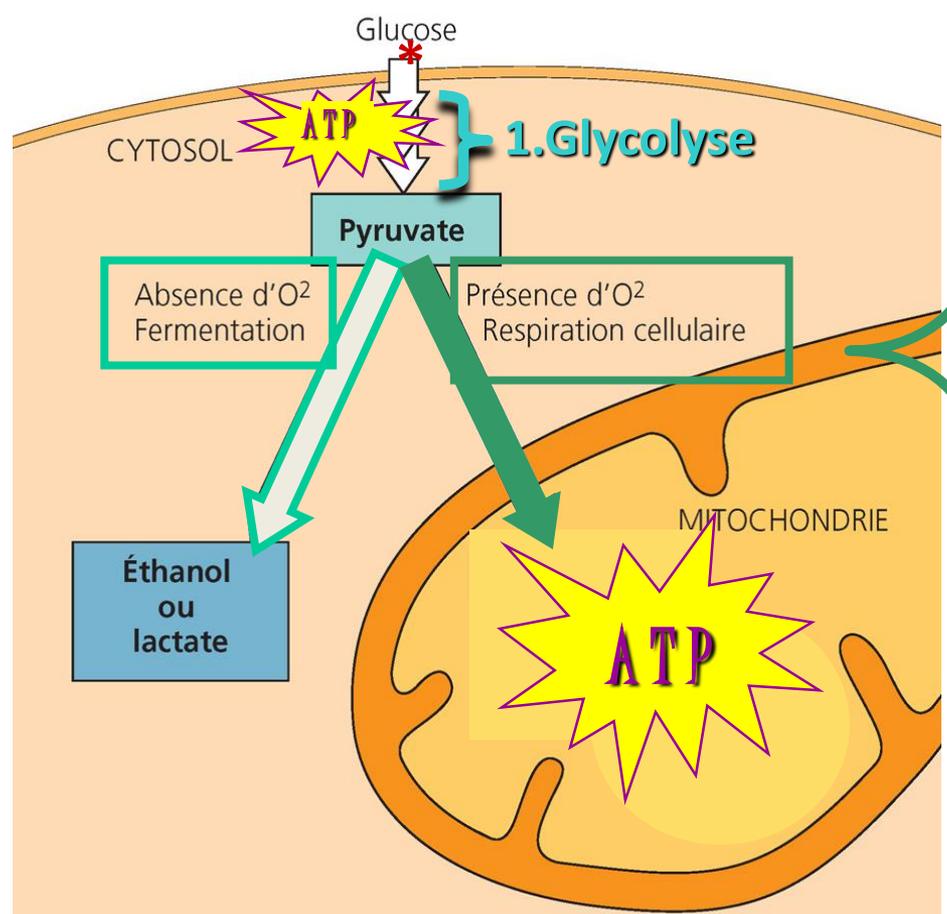
**Fermentation**

**Respiration cellulaire**

Même point de départ : 1 Glucose subit la **Glycolyse** → 2 Pyruvates

Ensuite, c'est la croisée des chemins...

# Le Glucose face à 2 destins...



**\* Le glucose entre d'abord dans la cellule via des perméases situées sur la membrane plasmique.**

# MÉTABOLISME ÉNERGÉTIQUE

## La dégradation du glucose : vue d'ensemble (les 2 voies possibles)

### Fermentation

- Accepteur final d'e<sup>-</sup> est une molécule organique x (donc possible en absence d'O<sub>2</sub>)
- Se déroule **entièrement dans le cytoplasme**
- Production d'ATP (efficacité E) **faible** (2 mol ATP/mol glucose)

### Respiration cellulaire

- R<sup>n</sup> cellulaire aérobie : accepteur final d'e<sup>-</sup> est l'O<sub>2</sub> (essentiel) ;  
R<sup>n</sup> cellulaire anaérobie (chez certaines bactéries) : accepteur final d'e<sup>-</sup> est une molécule inorganique autre que l'O<sub>2</sub> (ex.: NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, CO<sub>2</sub> ou Fe<sup>3+</sup>, qui est alors essentielle –à la place de l'O<sub>2</sub>).
- Se déroule en partie **dans le cytoplasme et en partie dans les mitochondries**
- Production d'ATP (efficacité E) **élevée** (jusqu'à 32 mol ATP/mol glucose)

# MÉTABOLISME ÉNERGÉTIQUE :

## la voie de la FERMENTATION

2 étapes :

**1) Glycolyse** : chaîne de rx chimiques (10 étapes), chacune catalysée par une enzyme.

Identique pour toutes les cellules.

But : produire de l'ATP à partir de nutriments.

**2) Conversion du pyruvate** : 1 ou qq rx chimiques, chacune catalysée par une enzyme.

Rx et produit final variables selon les enzymes que possède la cellule.

But : permettre la poursuite de la glycolyse en régénérant le  $\text{NAD}^+$ .

# ① La glycolyse

[1a, pp. 176-177] ou [1b p. 190] (fig. 9.9)

1 mol de GLUCOSE (6C)

→ 2 mol PYRUVATE (3C + 3C)

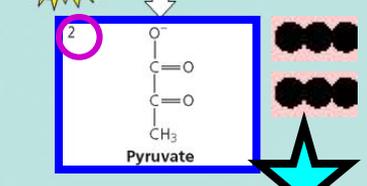
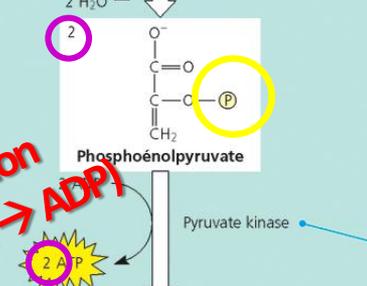
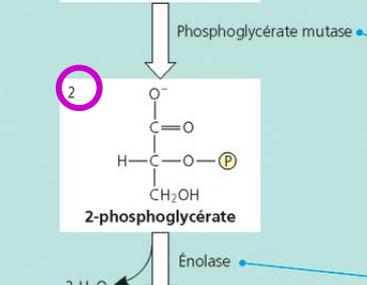
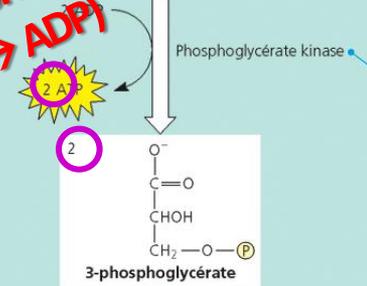
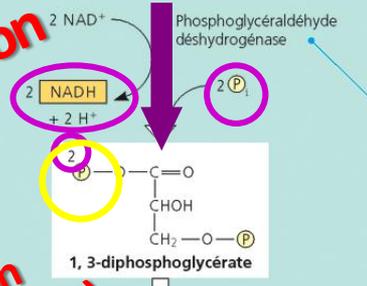
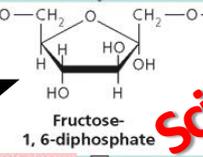
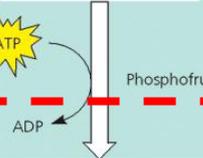
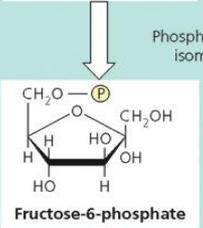
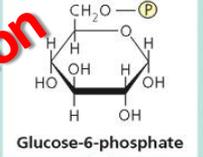
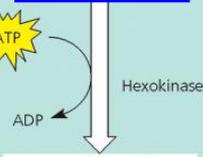
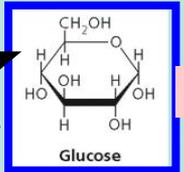
**Activation**

**Phosphorylation**  
( $P_i$ : substrat → ADP)

**Scission**  
**x2 !!!**

**Phosphorylation**  
( $P_i$ : substrat → ADP)

**Oxydation**



Hexokinase

Phosphoglucose isomérase

Phosphofruktokinase

Aldolase

Triose phosphate isomérase

Phosphoglyceraldéhyde déshydrogénase

Phosphoglycérate kinase

Phosphoglycérate mutase

Énolase

Pyruvate kinase



# ① La glycolyse

[1a, pp. 176-177] ou [1b p. 190] (fig. 9.9)

## 1 mol de GLUCOSE (6C)

**Activation (investissement d'E)**

→ 1 mol de FRUCTOSE 1-6, DIPHOSPHATE (irréversible)

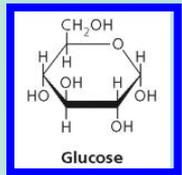
**Scission du glucide →**

2 mol de PGAL (3C + 3C)

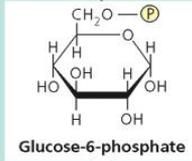
**Oxydation → (libération d'E)**

2 mol PYRUVATE (3C + 3C)

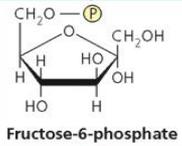
**Quelques-unes des enzymes impliquées... (Enzymes cytoplasmiques)**



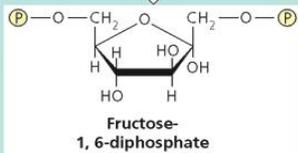
Hexokinase



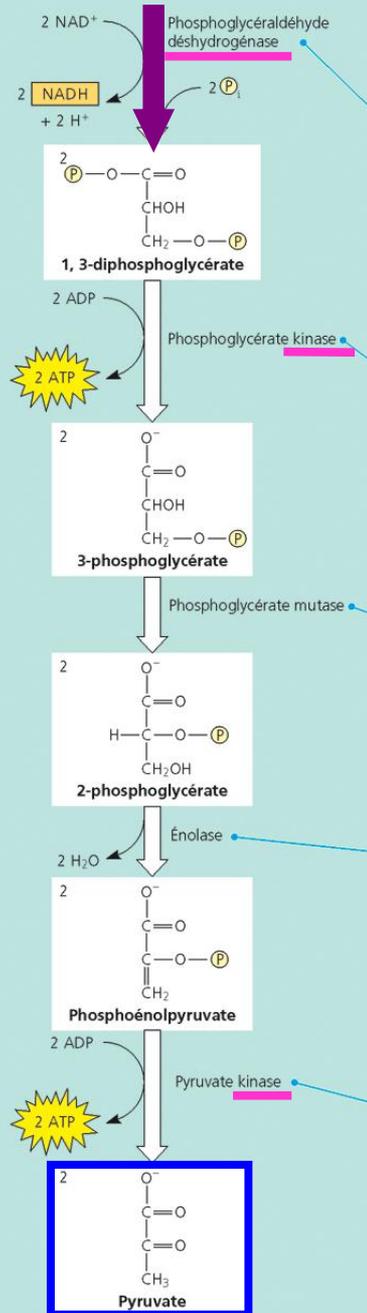
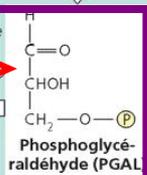
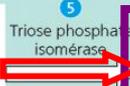
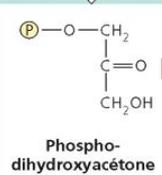
Phosphoglucose isomérase



Phosphofruktokinase



Aldolase



# ① Glycolyse : un bilan

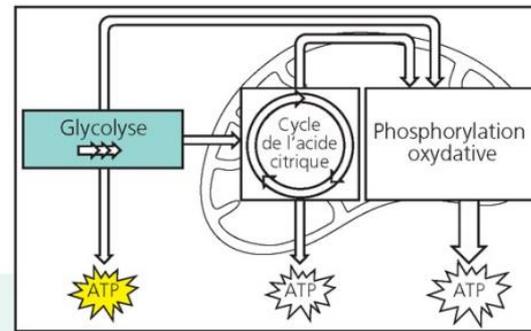
Bilan énergétique net de la glycolyse :

**2 mol ATP / mol glucose**

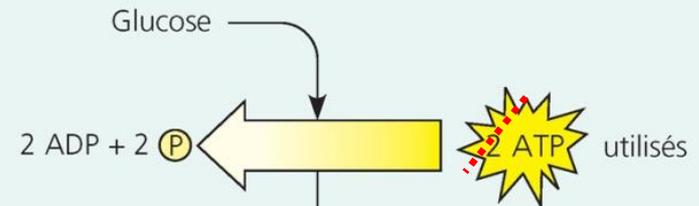
Dans le cadre de la **fermentation**, le pyruvate et le  $\text{NADH} + \text{H}^+$  seront utilisés dans l'étape suivante (conversion du pyruvate), sans fournir d'énergie.

Dans le cadre de la **respiration cellulaire**, les molécules de pyruvate et de  $\text{NADH} + \text{H}^+$  fourniront aussi de l'énergie lors des étapes suivant la glycolyse (à suivre!...).

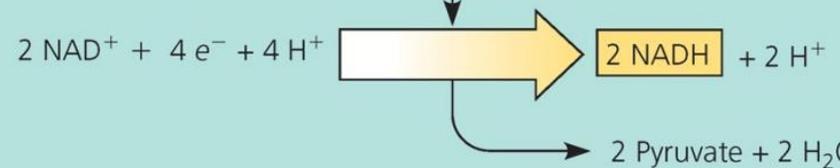
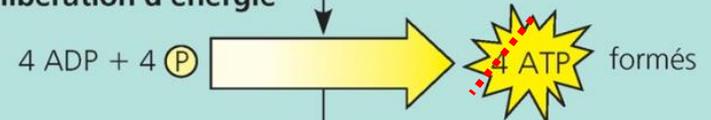
[1a, p. 175] ou [1b, p. 189] (Fig. 9.8)



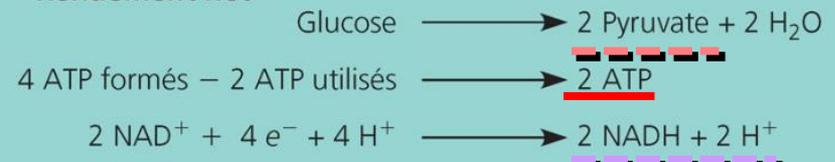
Phase d'investissement d'énergie



Phase de libération d'énergie



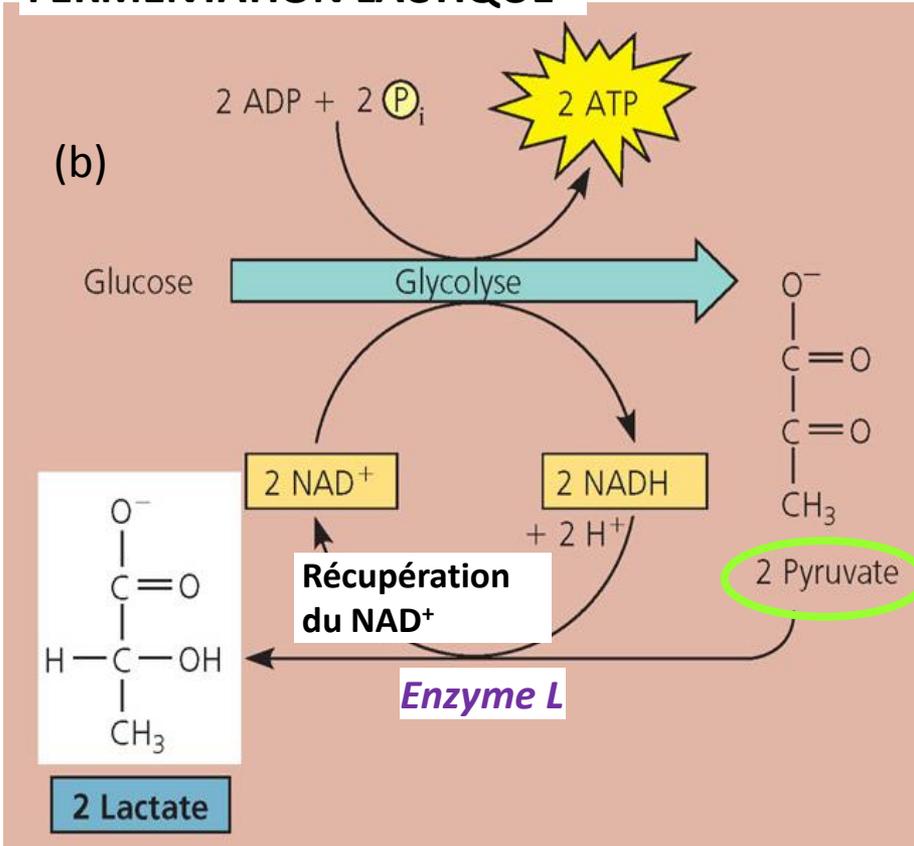
Rendement net



▲ Figure 9.8 Rendement énergétique de la glycolyse.

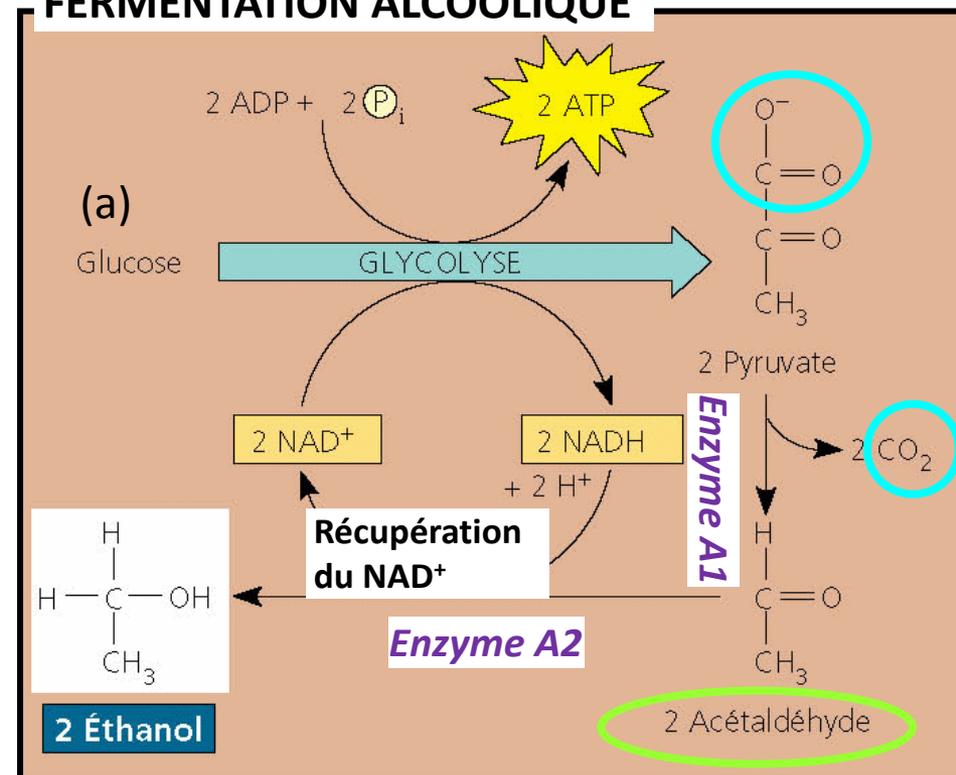
# ② Conversion du pyruvate = « Fin » de la fermentation

## FERMENTATION LACTIQUE



[1a, p. 185] ou [1b, p. 199] (fig. 9.17)

## FERMENTATION ALCOOLIQUE



- Q: Pourquoi la cellule doit-elle effectuer une conversion du pyruvate?  
 Q : Qu'est-ce qui détermine le type de fermentation que fait la cellule?  
 Q : Quel est l'accepteur final dans la fermentation lactique? Alcoolique?

# MÉTABOLISME ÉNERGÉTIQUE :

## la voie de la RESPIRATION CELLULAIRE

(vue d'ensemble)

### 3 étapes :

1) **Glycolyse** : Oxydation\* du glucose (6C) en **pyruvate (3C)**.

Produit aussi de l'**ATP** et du \*NADH + H<sup>+</sup>

2) a. Oxydation\* du **pyruvate** en **acétyl-CoA**

et b. **Cycle du citrate (ou cycle de Krebs)** :

Libère du **CO<sub>2</sub>** et produit de l'**ATP**, du \*NADH + H<sup>+</sup> et du \*FADH<sub>2</sub>

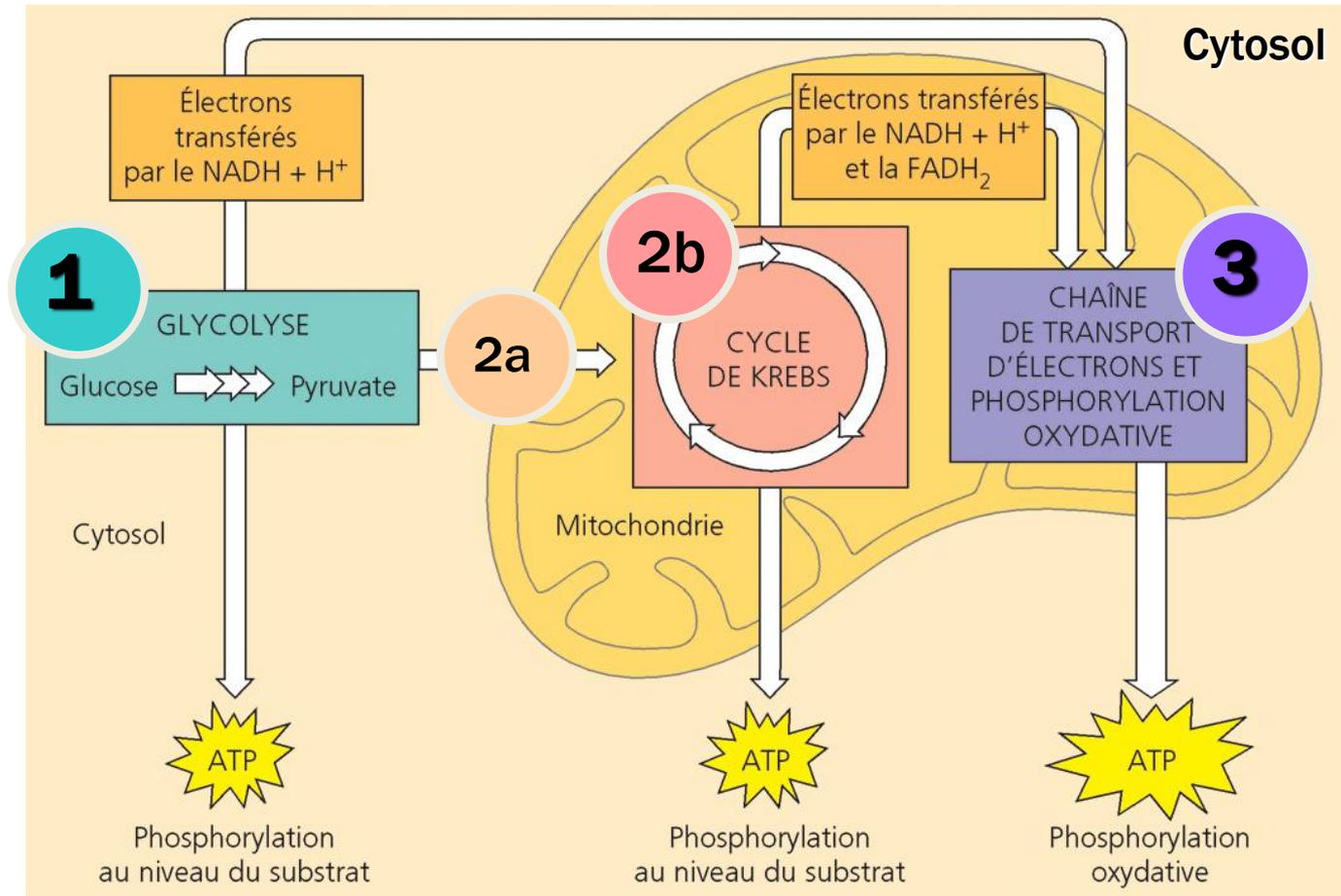
3) **Chaîne de transport d'e<sup>-</sup> et Phosphorylation oxydative** :

Consomme de l'**O<sub>2</sub> (R<sup>n</sup> aérobie)**, libère de l'**H<sub>2</sub>O** et produit de l'**ATP**  
(à partir des e<sup>-</sup> riches en énergie livrés par les \*transporteurs qui ont oxydé les nutriments)

# MÉTABOLISME ÉNERGÉTIQUE :

## la voie de la RESPIRATION CELLULAIRE

(vue d'ensemble)



[1a, p. 175]  
ou  
[1b, p. 190]  
(Fig. 9.6)

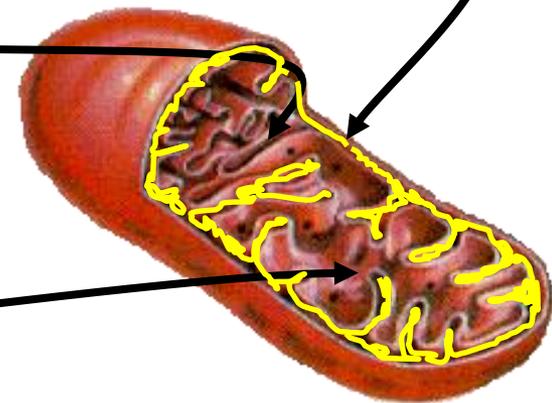
# ANATOMIE DE LA MITOCHONDRIE

- **Double mb** (chacune est une double couche de phospholipides & de protéines  $\approx$  *mb cellulaire*)
- **Espace intermembranaire** entre ces deux mb

Mb externe lisse

Mb interne repliée : crêtes

Matrice mitochondriale



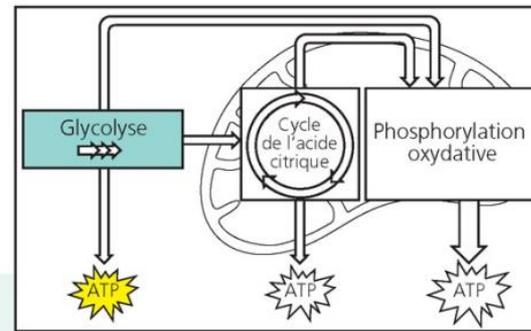
# ① Glycolyse : un bilan (rappel)

Bilan énergétique net de la glycolyse :

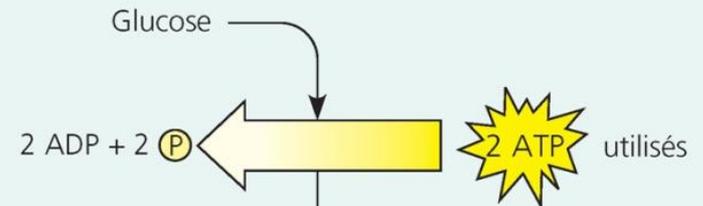
**2 mol ATP / mol glucose**

Dans le cadre de la **respiration cellulaire**, les molécules de pyruvate et de NADH + H<sup>+</sup> fourniront aussi de l'énergie lors des étapes suivant la glycolyse (à suivre!...).

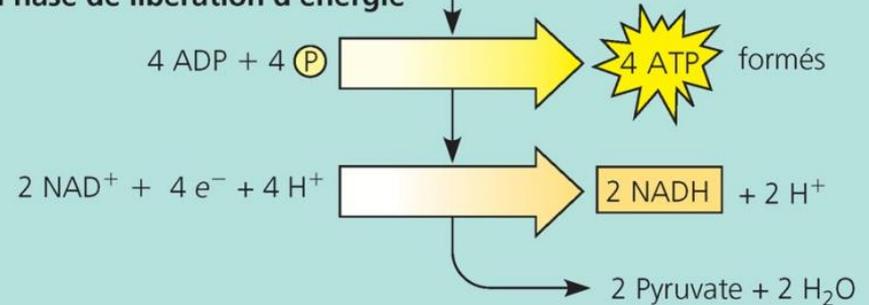
[1a, p. 175] ou [1b, p. 189] (Fig. 9.8)



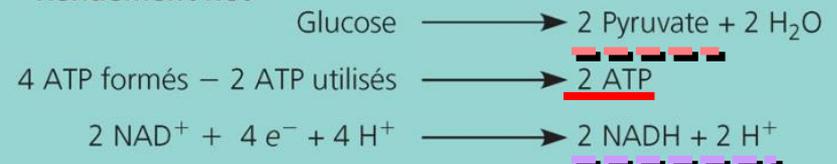
Phase d'investissement d'énergie



Phase de libération d'énergie



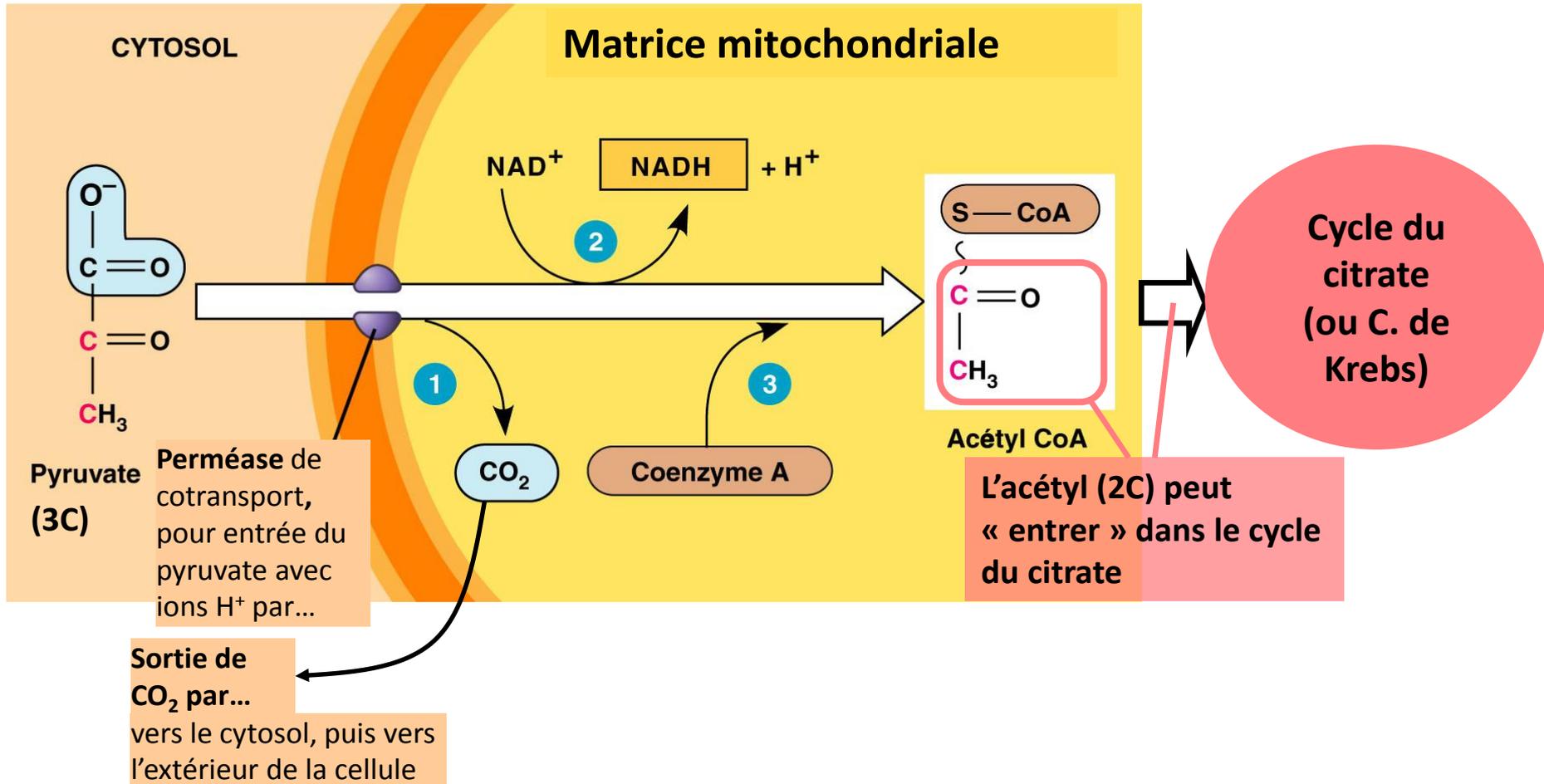
Rendement net



▲ Figure 9.8 Rendement énergétique de la glycolyse.

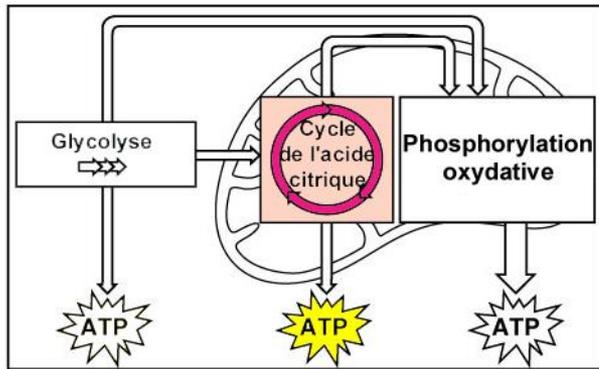
2a

# Oxydation du pyruvate → acétyl-CoA



2b

# Cycle de l'acide citrique



Rendement par mol d'acétyl-CoA

1 mol ATP

3 mol NADH + (3 mol) H<sup>+</sup> \*

1 mol FADH<sub>2</sub> \*

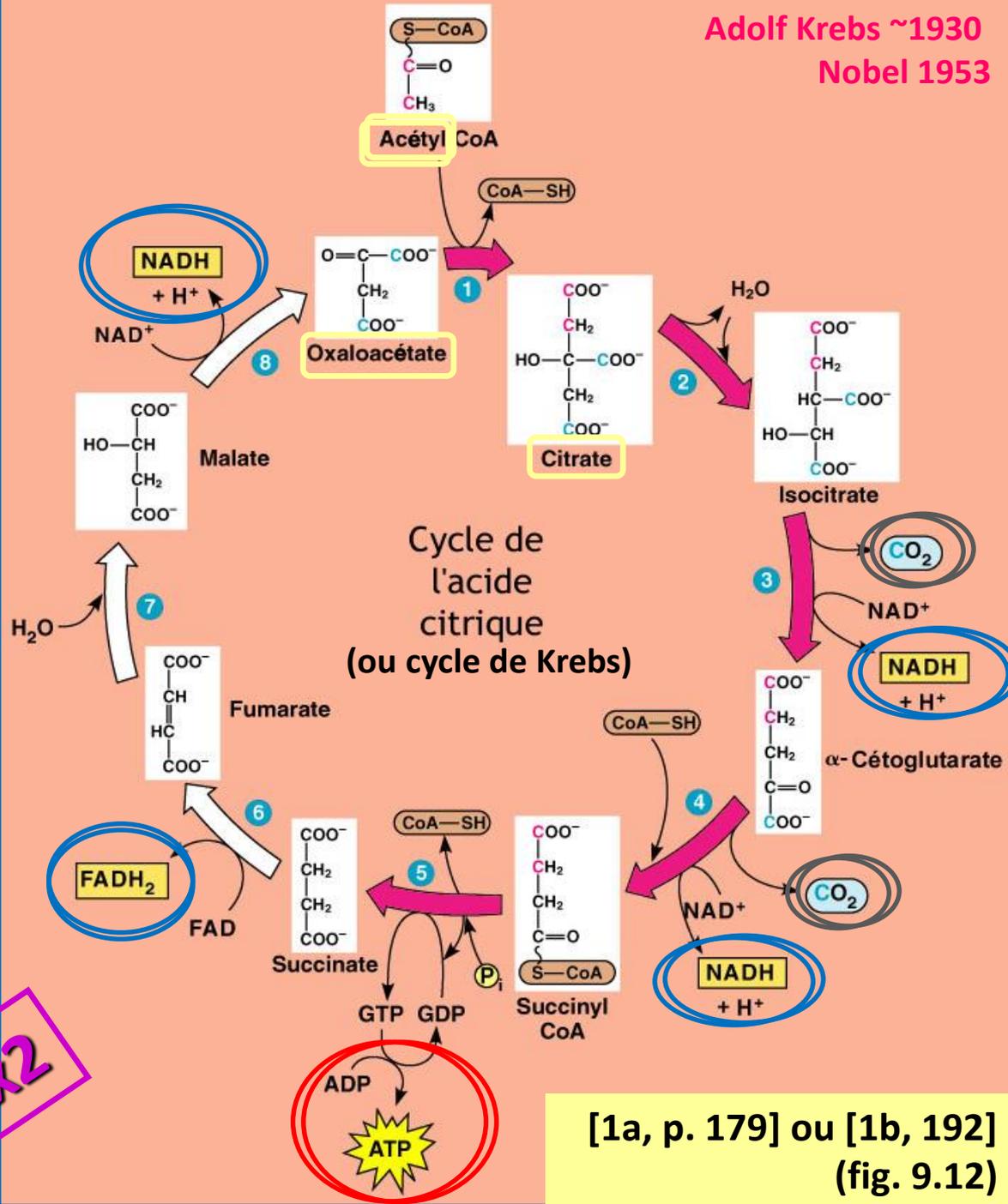
2 mol CO<sub>2</sub> libérés

Pour chaque mol de Glucose

2 mol de pyruvate obtenues,  
donc 2 tours de cycle !!!

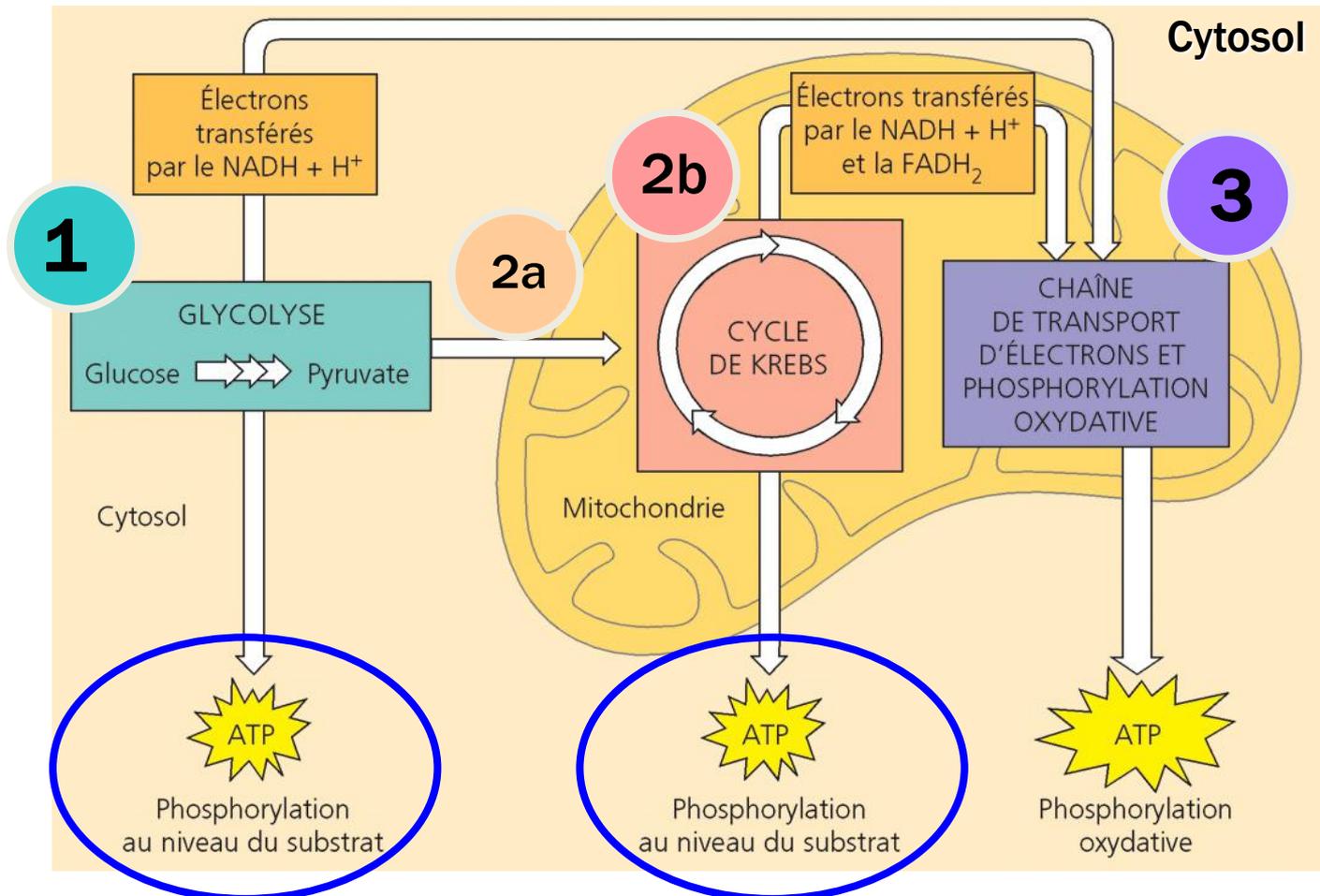
x2

Adolf Krebs ~1930  
Nobel 1953



[1a, p. 179] ou [1b, 192]  
(fig. 9.12)

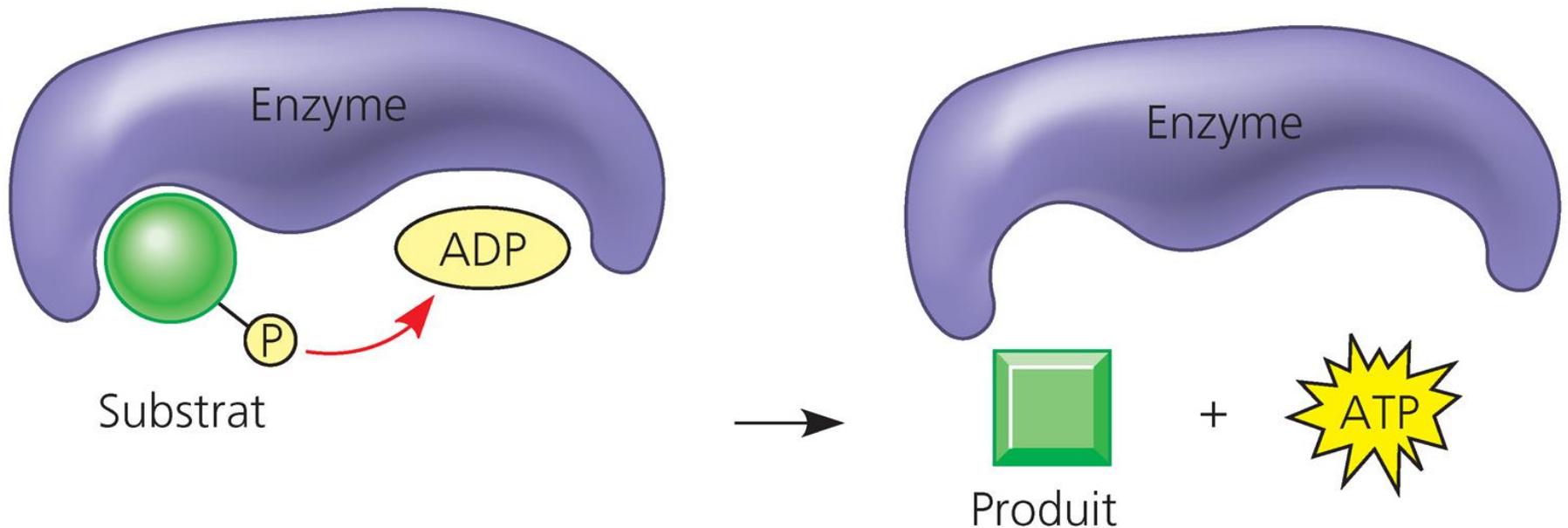
# Étapes 1 et 2 de la respiration cellulaire aérobie : production d'ATP par phosphorylation au niveau du substrat



[1a, p. 175]  
ou  
[1b, p. 190]  
(Fig. 9.6)

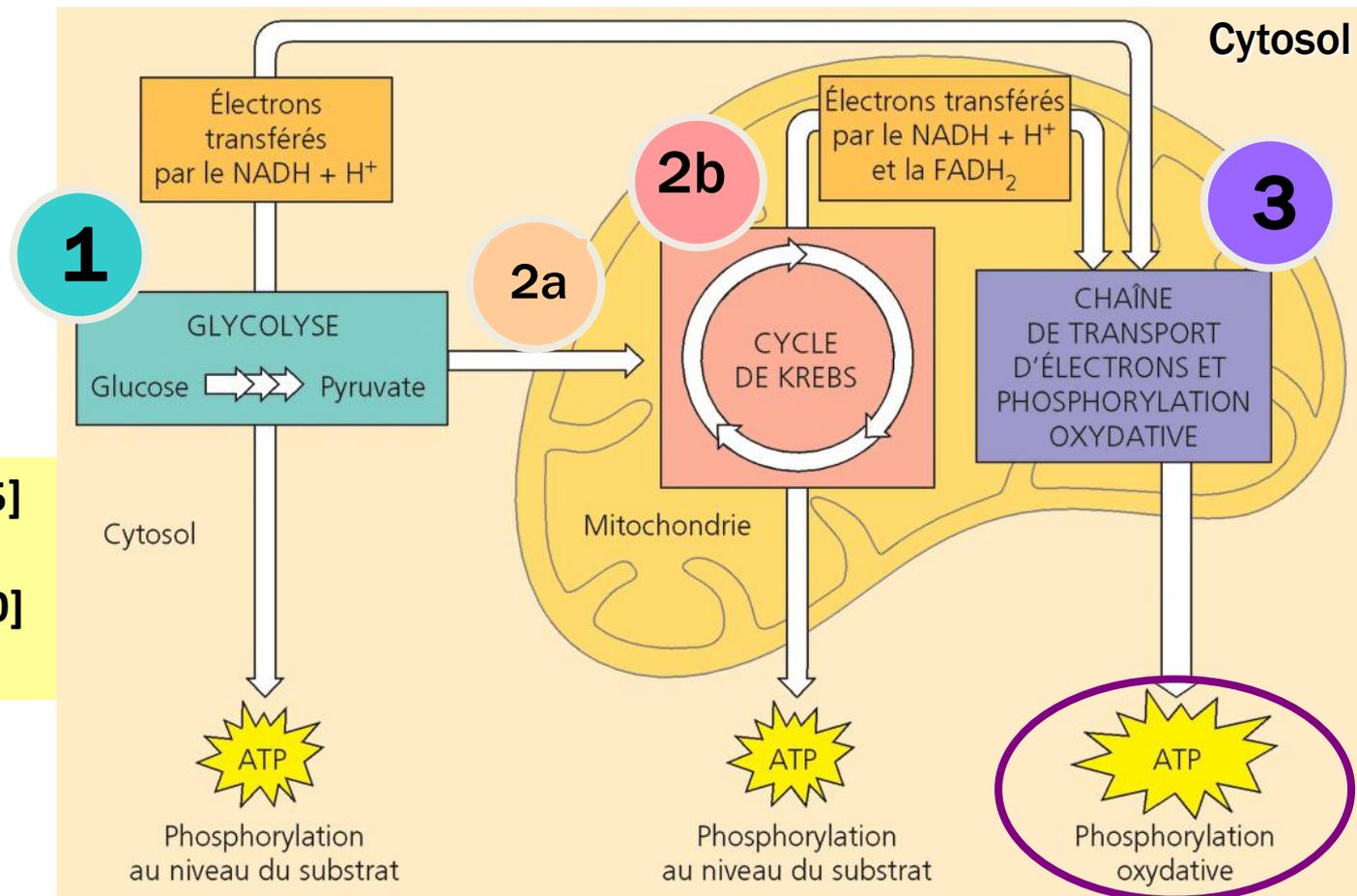
# Production d'ATP par phosphorylation au niveau du substrat

**Substrat phosphaté** → *transfert d'un  $P_i$  à un ADP* → **Produit non phosphaté** + **ATP**



▲ Figure 9.7 Phosphorylation au niveau du substrat.

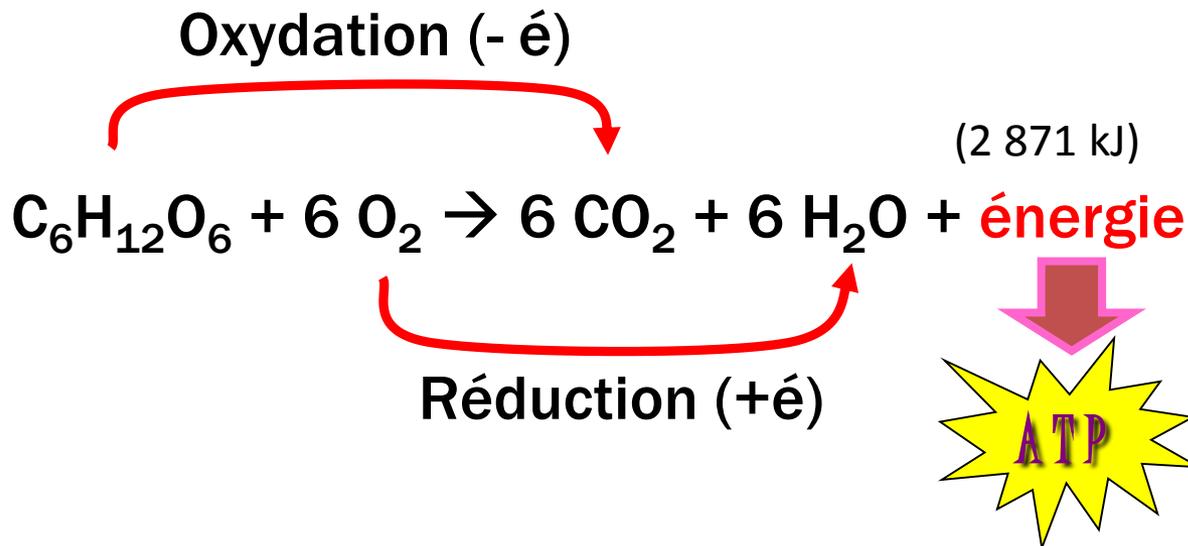
# Étape 3 de la respiration cellulaire aérobie : production d'ATP par phosphorylation oxydative



[1a, p. 175]  
ou  
[1b, p. 190]  
(Fig. 9.6)

# Oxydoréduction (rappel)

- Équation de la respiration cellulaire : oxydoréduction
- Implique des transfert d'électrons
- O<sub>2</sub> accepteur final de tous les électrons
- Électron qui s'approche et rejoint O<sub>2</sub> → libère son énergie



L'O<sub>2</sub> a une très forte électronégativité



Attire très fortement les électrons!!!

(30,5 kJ)

# Chaîne de transport d'e<sup>-</sup>

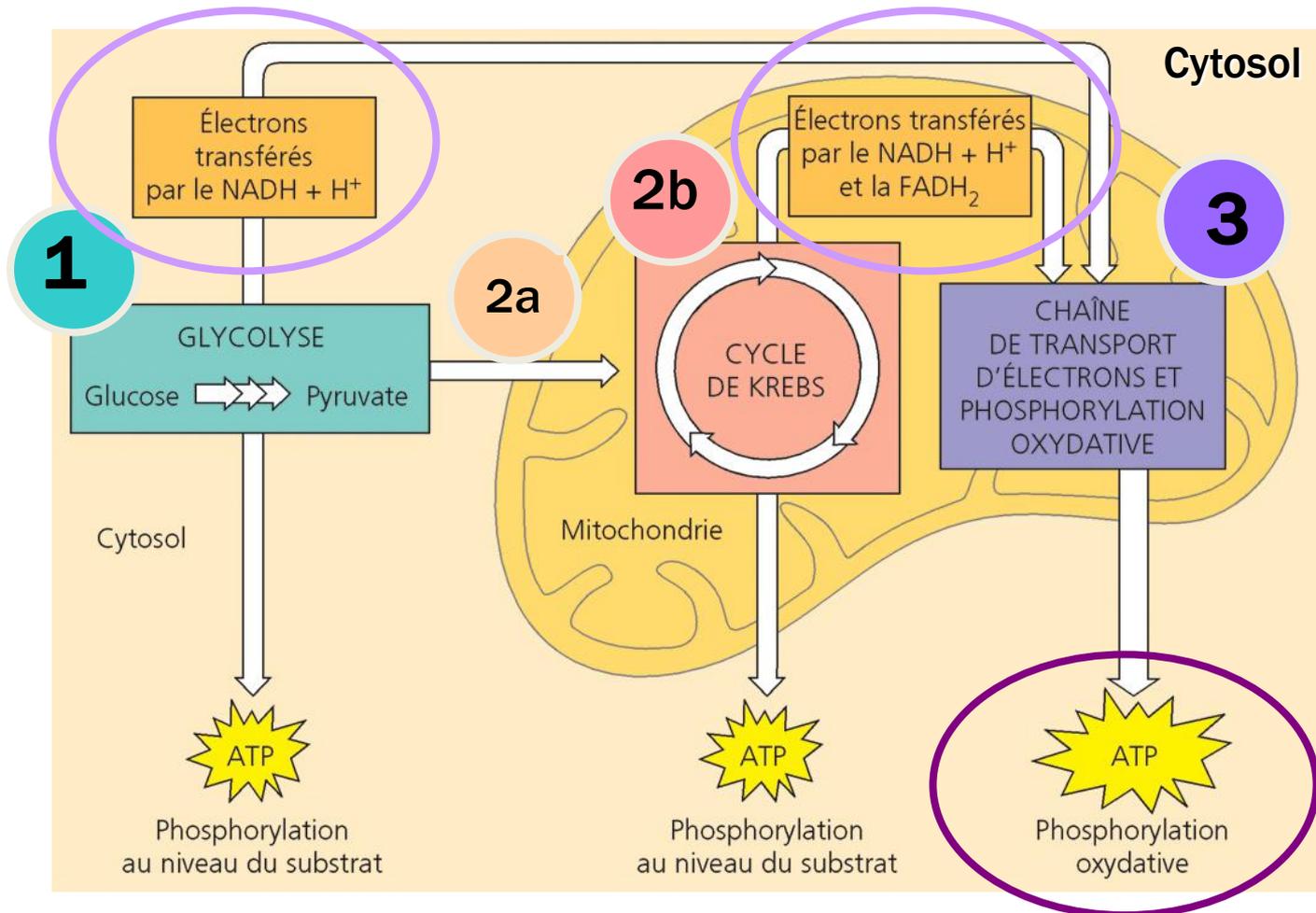
- L'oxydation du glucose doit se faire étape par étape, sinon...



- Chacune de ces étapes est catalysée par une **enzyme** spécifique!



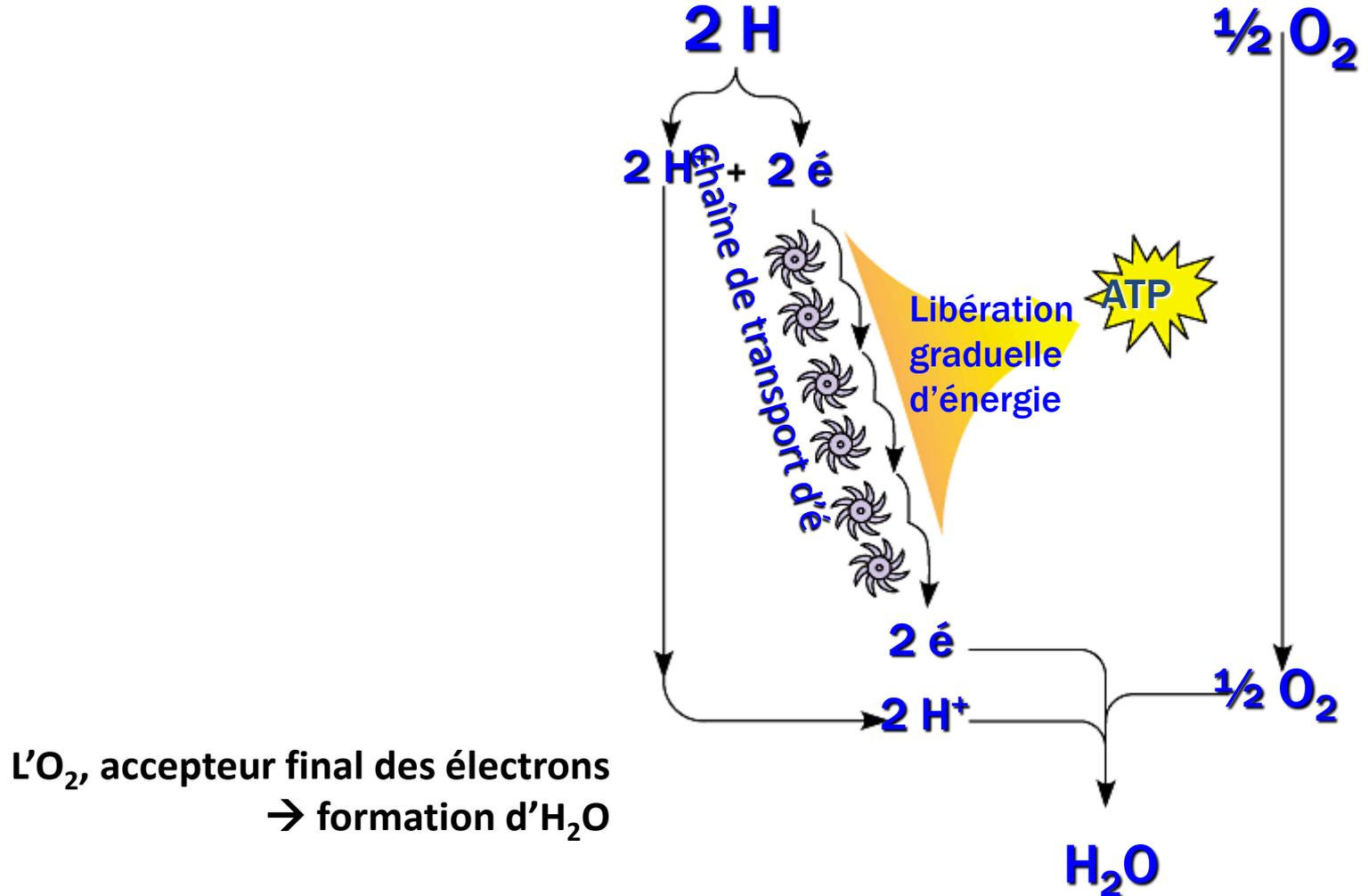
# Rappel : origine des électrons riches en énergie participant à la phosphorylation oxydative



[1a, p. 175]  
ou  
[1b, p. 190]  
(Fig. 9.6)

# Chaîne de transport d'e<sup>-</sup>

Provenance des électrons riches en énergie :  
*NADH + H<sup>+</sup>* et *FADH<sub>2</sub>*



L'O<sub>2</sub>, accepteur final des électrons  
→ formation d'H<sub>2</sub>O

# Chaîne de transport d'électrons...

- Les  $\text{NADH} + \text{H}^+$  et  $\text{FADH}_2$  cèdent leurs  $e^-$  à des **chaînes de transport d'électrons** logées dans la **mb interne des mitochondrie**

- Le  $\text{NADH} + \text{H}^+$  au sommet de la chaîne
- Le  $\text{FADH}_2$  un peu plus BAS

**Le  $\text{NADH} + \text{H}^+$  a donc un meilleur rendement énergétique :**

**$1 \text{ NADH} + \text{H}^+ \rightarrow 2,5 \text{ ATP}$**  (3 ATP dans [1a])

**$1 \text{ FADH}_2 \rightarrow 1,5 \text{ ATP}$**  (2 ATP dans [1a])

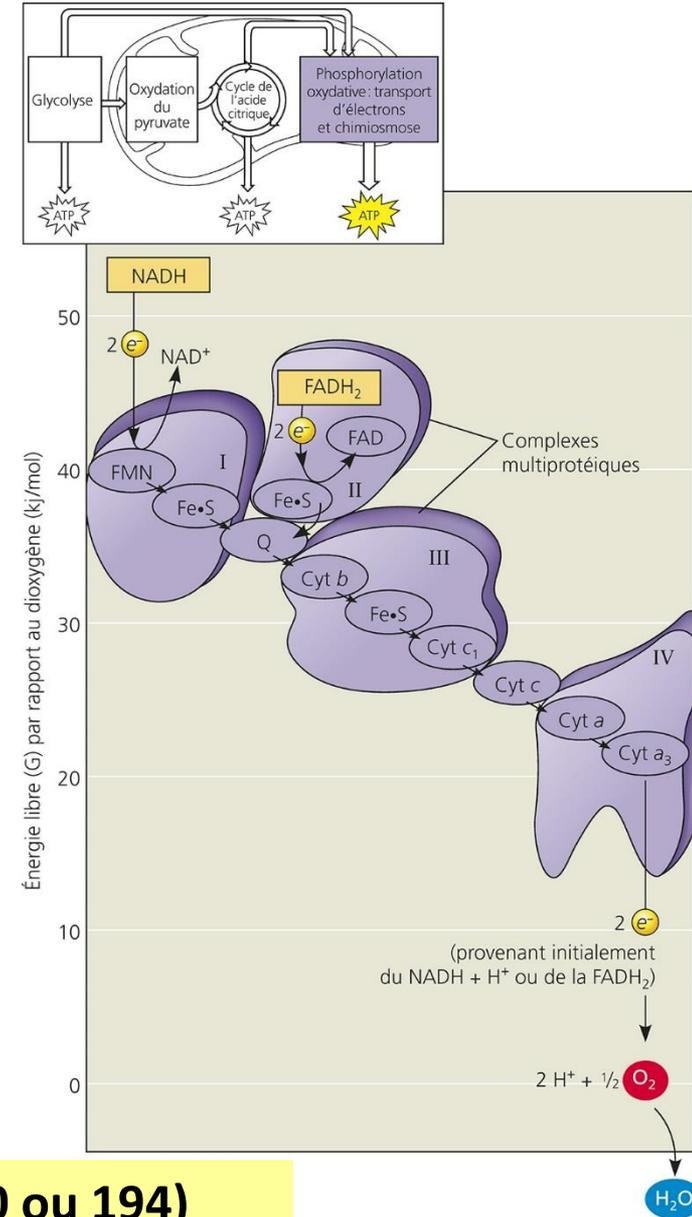
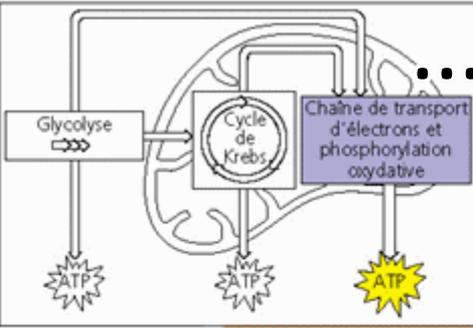


Figure 9.13 (p. 180 ou 194)

# ... et Phosphorylation oxydative



3

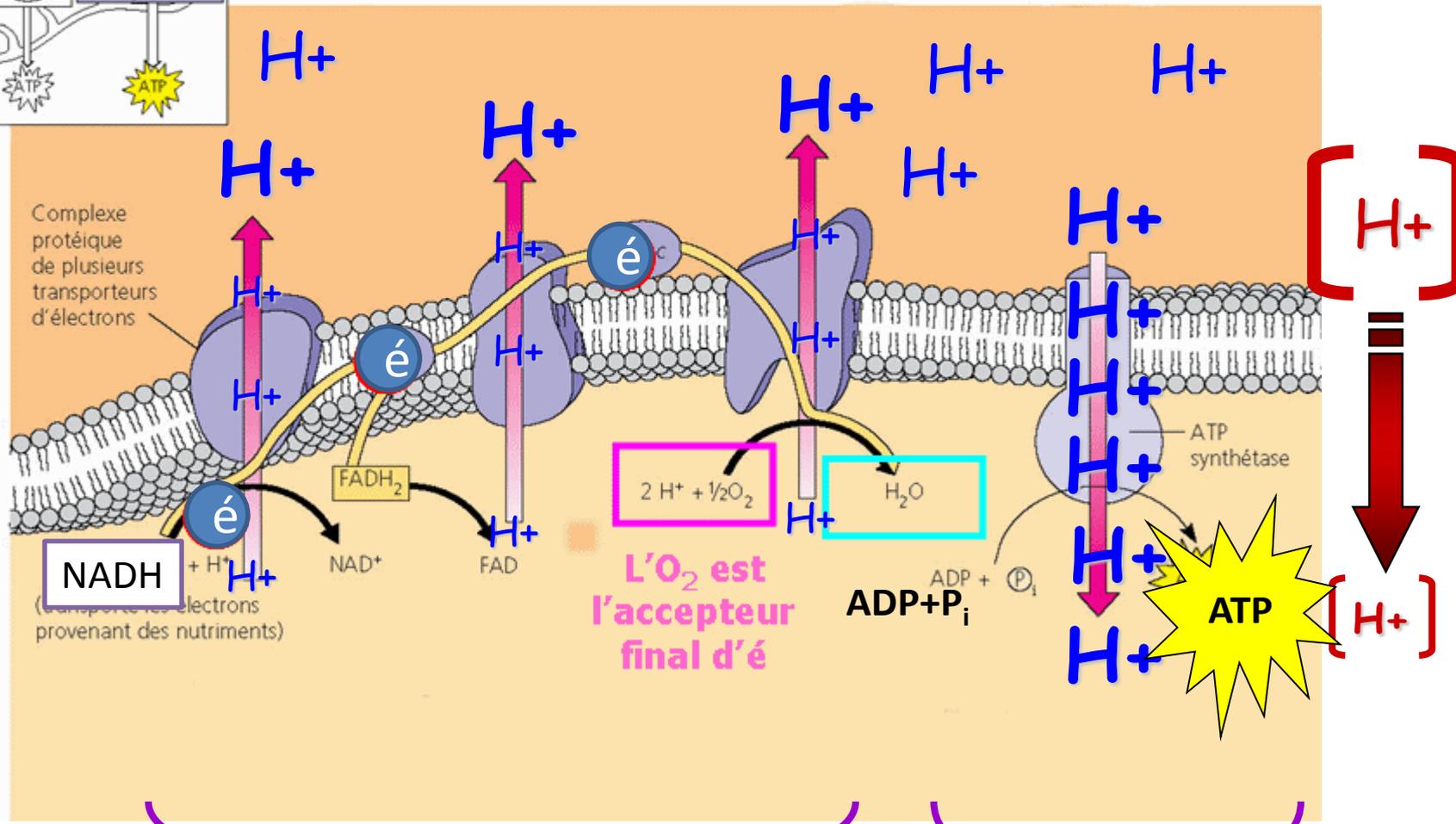


Figure 9.15 (p. 182 ou 196)

Chaîne de transport d'électrons

Phosphorylation oxydative par Chimiosmose

# L'ATP syn(thé)tase

- Convertit  $\text{ADP} + \text{P}_i \rightarrow \text{ATP}$
- 90% de la production totale d'ATP par la  $\zeta$
- Alimentée par la **force protonmotrice** des  $\text{H}^+$ , qui diffusent selon leur gradient de concentration
- **Chimiosmose\*** : couplage transport d' $e^-$  / production d'ATP, via un gradient de  $\text{H}^+$

(\* Peter Mitchell, 1961 ; Nobel de chimie 1978)

Les  $\text{H}^+$  proviennent des réducteurs d' $e^-$  :  $\text{NADH} + \text{H}^+$  et  $\text{FADH}_2$

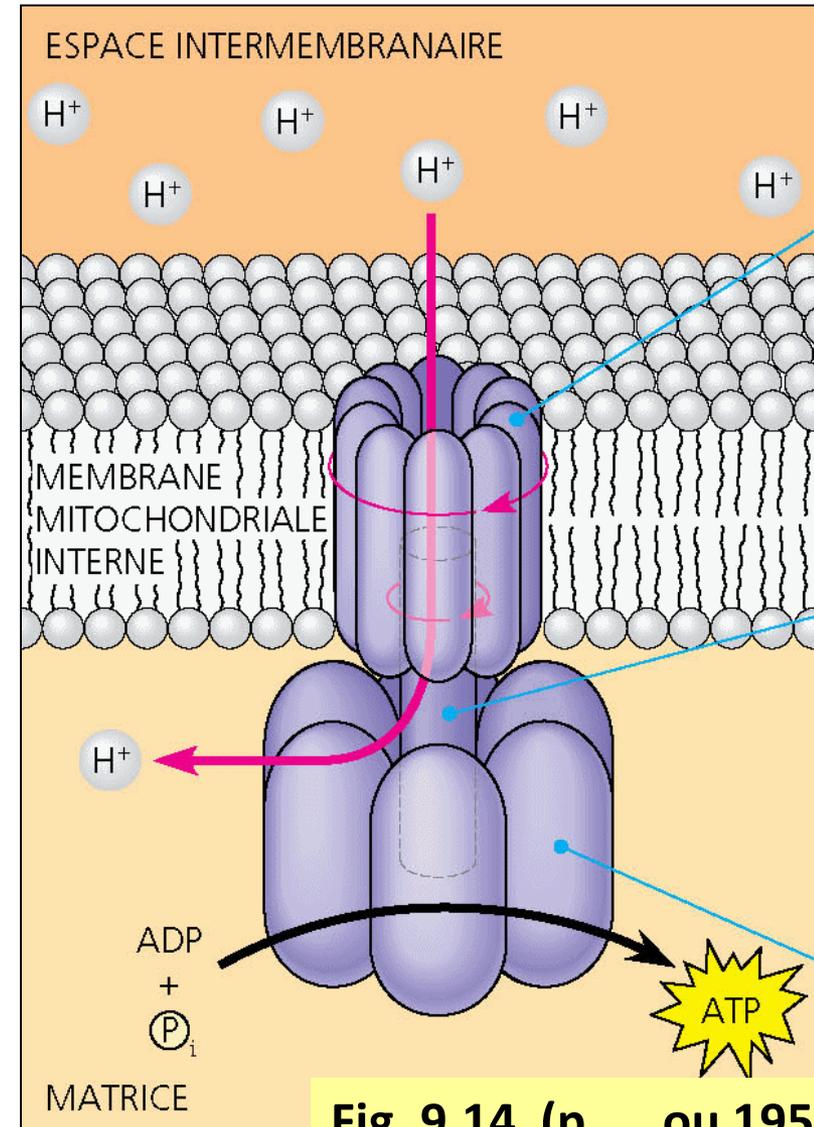
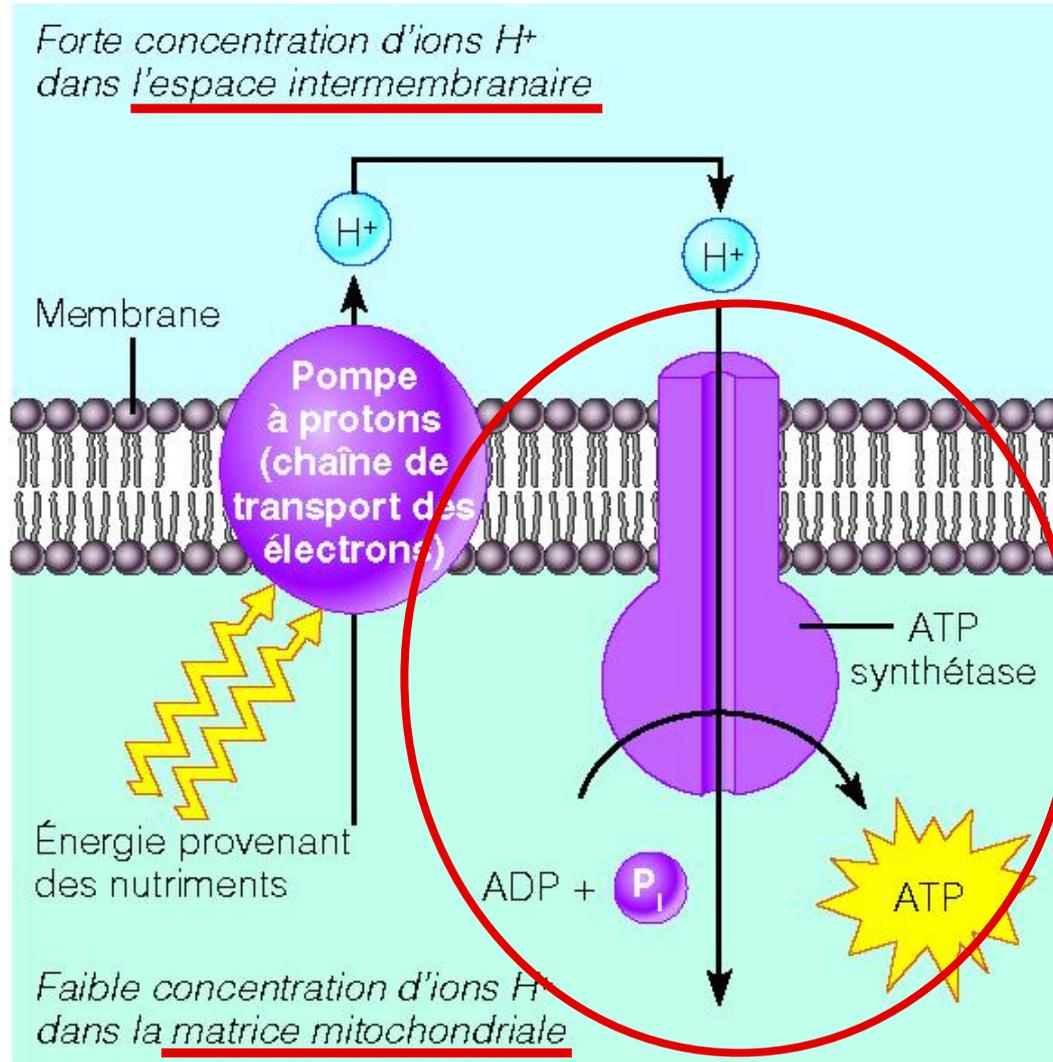


Fig. 9.14 (p. ... ou 195)

# Production d'ATP par phosphorylation oxydative



Énergie libérée par les  $e^-$  dans la chaîne vers l'accepteur final : l' $O_2$



Transport actif d'ions  $H^+$  vers l'espace intermembranaire



Accumulation d'ions  $H^+$  (création d'un gradient  $\approx$  eau dans un réservoir)

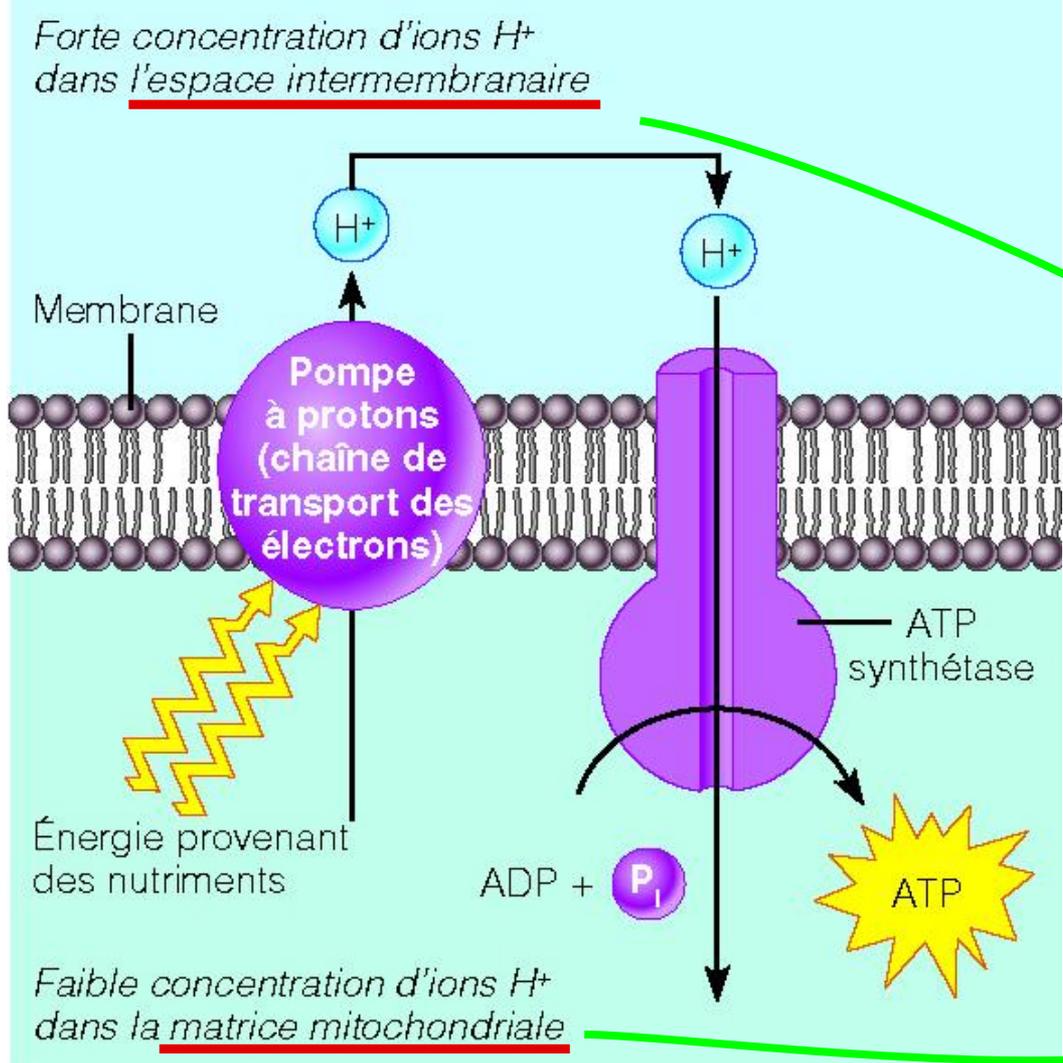


Transport d'ions  $H^+$  dans l'ATP synthase ( $\approx$  eau dans une turbine)

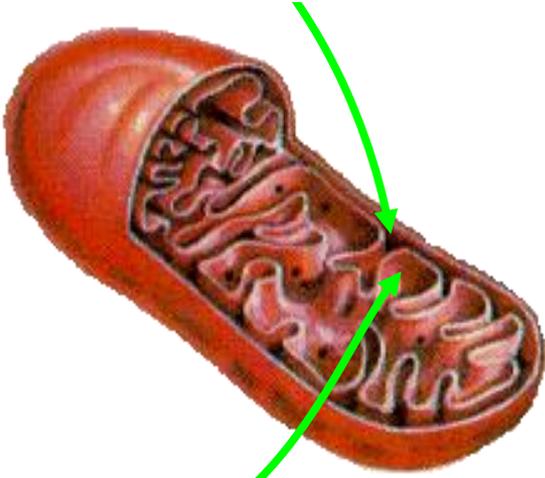


Avec cette énergie :  
 $ADP + P_i + E \rightarrow ATP$

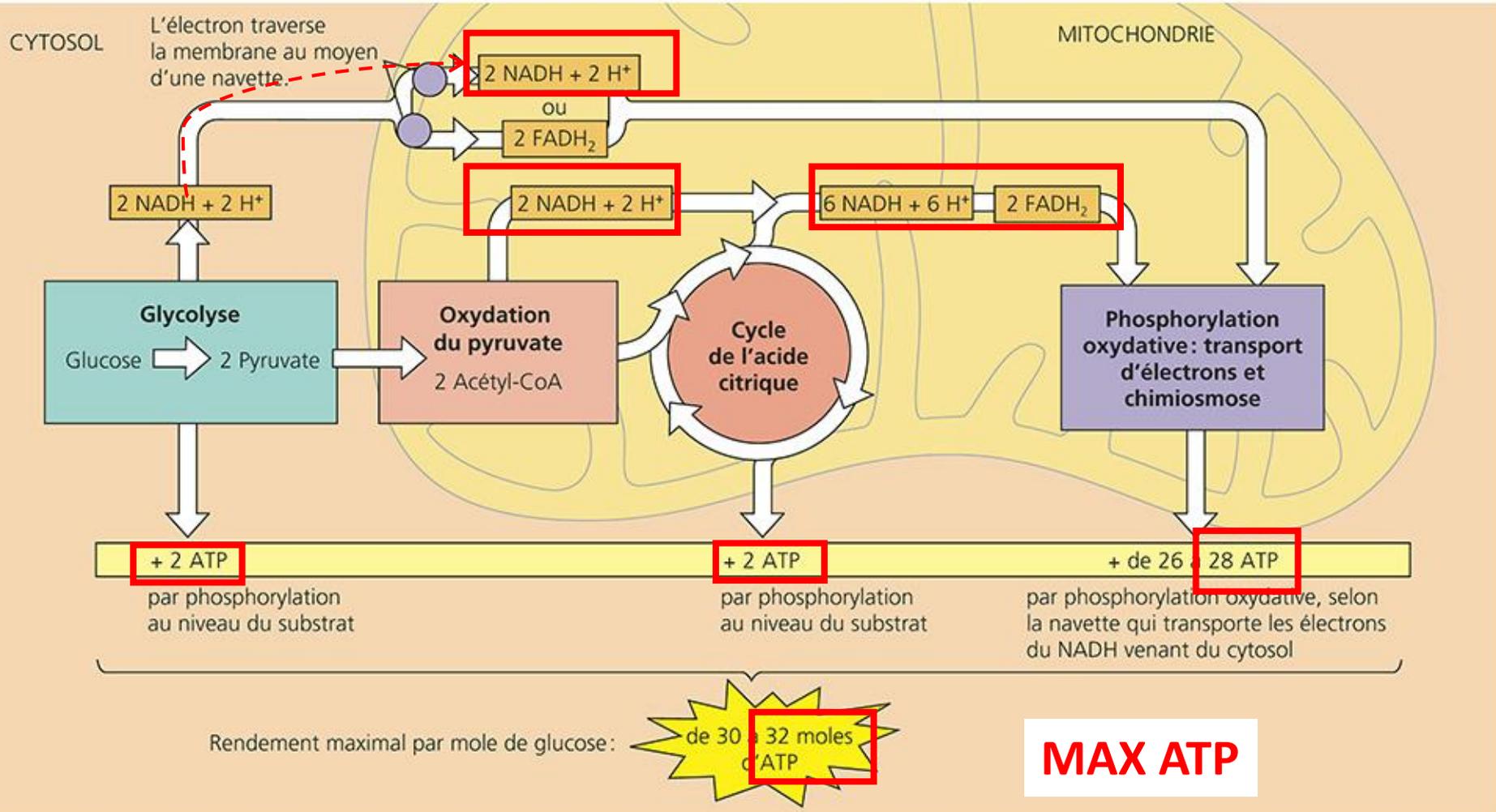
# La mitochondrie : forme/fonction...



- Les crêtes de la mb interne ↑ la surface de cette mb, permettant...
- La double mb permet la chimiosmose en rendant possible l'établissement...



# Bilan énergétique de la respiration cellulaire



- NADH → **2,5** mol d'ATP/mol NADH + H<sup>+</sup>
- FADH<sub>2</sub> → **1,5** mol d'ATP/mol FADH<sub>2</sub>

Figure 9.16,  
p. 183 ou 197

# EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DE LA RESPIRATION CELLULAIRE AÉROBIE

L'Équation (rappel) :



- Environ 40% de l'énergie emmagasinée dans le glucose est convertie en ATP (très efficace)
- La balance de l'énergie se perd sous forme de chaleur (thermorégulation, transpiration)

# CATABOLISME ÉNERGÉTIQUE AÉROBIE

\* **Combustibles = glucose *ou* autres**

\* **Sites d'entrée divers**

\* **Pouvoir faire des calculs de bilans énergétiques (ATP) :**

-pour un (ou +) **pyruvate**

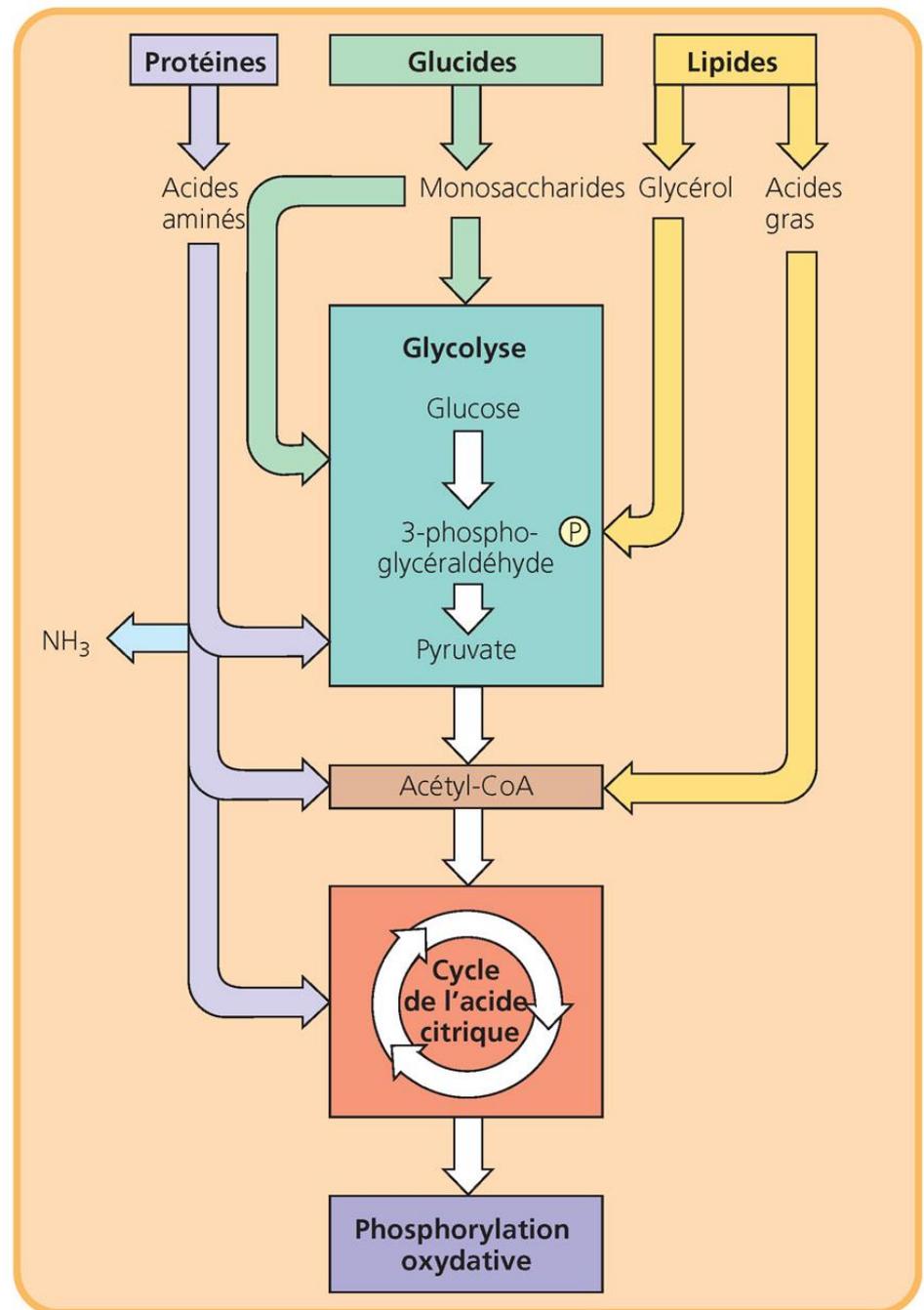
-pour un (ou +) **glucose**

-pour un (ou +) **acétyl**

-pour un (ou +) **acide gras**

= **1 acétyl pour chaque 2C**

-**par catabolisme aérobie (respiration) ou anaérobie (fermentation)**



# Le catabolisme des glucides : au cœur du métabolisme animal

## ① Glycolyse

## ② a- Formation de l'Acétyl-CoA

## b- Cycle de Krebs

## ③ Chaîne de transport d'e<sup>-</sup> & phosphorylation oxydative

