



# Métabolisme glucidique- Glycolyse



Florence Roucher-Boulez

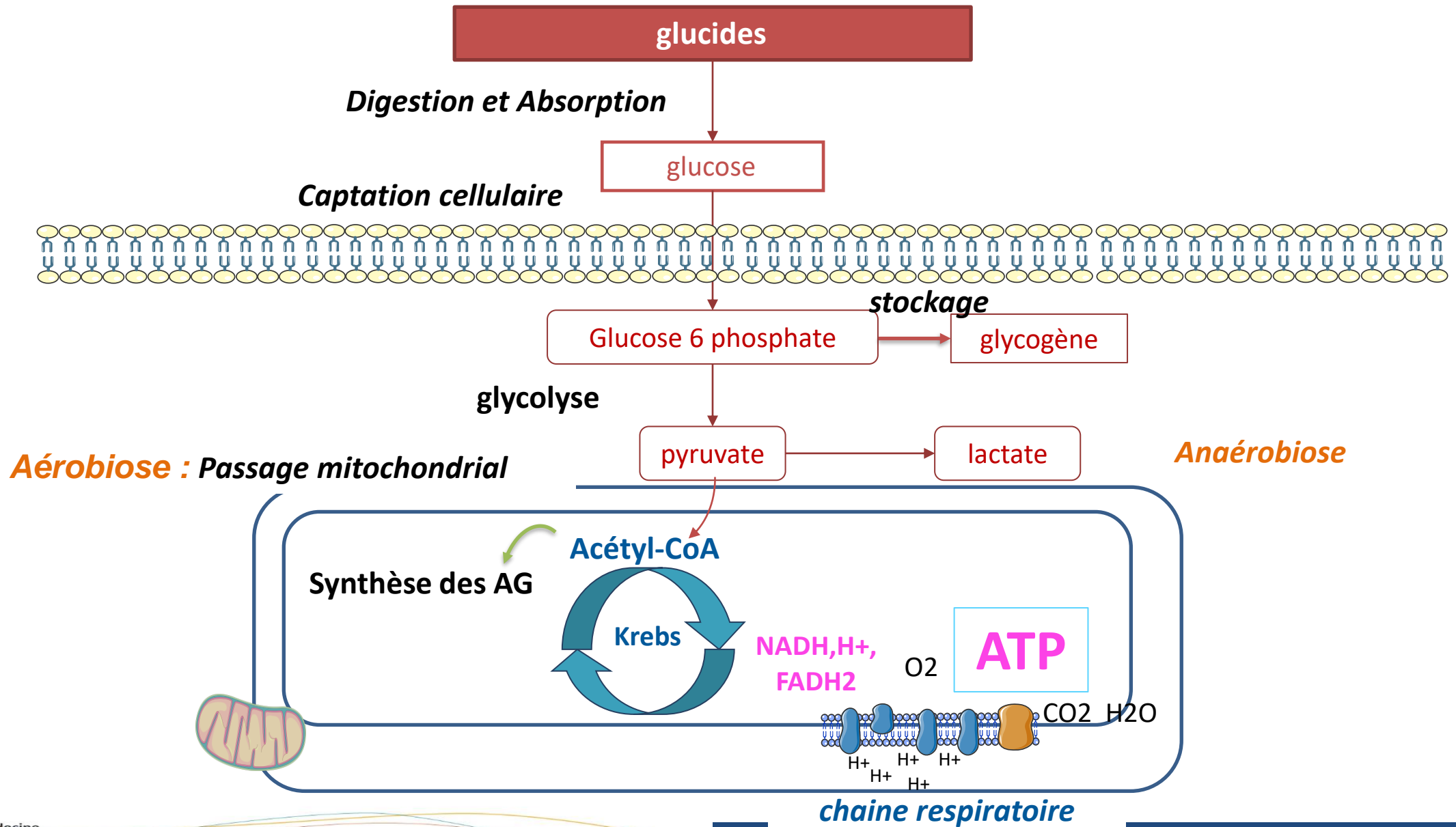
Biochimie BM  
2020-2021

- **Principes généraux du fonctionnement de la voie:**
  - 1 molécule de glucose donne 2 molécules de pyruvate**
- **Les molécules et étapes importantes**
- **Relation avec les autres voies / néoglucogenèse**
- **Les régulations**

- I- Généralités
- II- Digestion absorption
- III- Captation cellulaire
- IV- La glycolyse
  - 1. Les réactions de formation du fructose 1,6 bisP
  - 2. Formation de trioses phosphates
  - 3. Formation du pyruvate et d'un 2ème ATP
  - 4. Entrée des hexoses dans la glycolyse
- V- Devenir du pyruvate

- **I- Généralités**
- II- Digestion absorption
- III- Captation cellulaire
- IV- La glycolyse
  - 1. Les réactions de formation du fructose 1,6 bisP
  - 2. Formation de trioses phosphates
  - 3. Formation du pyruvate et d'un 2ème ATP
  - 4. Entrée des hexoses dans la glycolyse
- V- Devenir du pyruvate

# I- Généralités



- **Stockage en glycogène**

- **La Glycolyse**

- Conversion du glucose en pyruvate

- Si aérobiose:

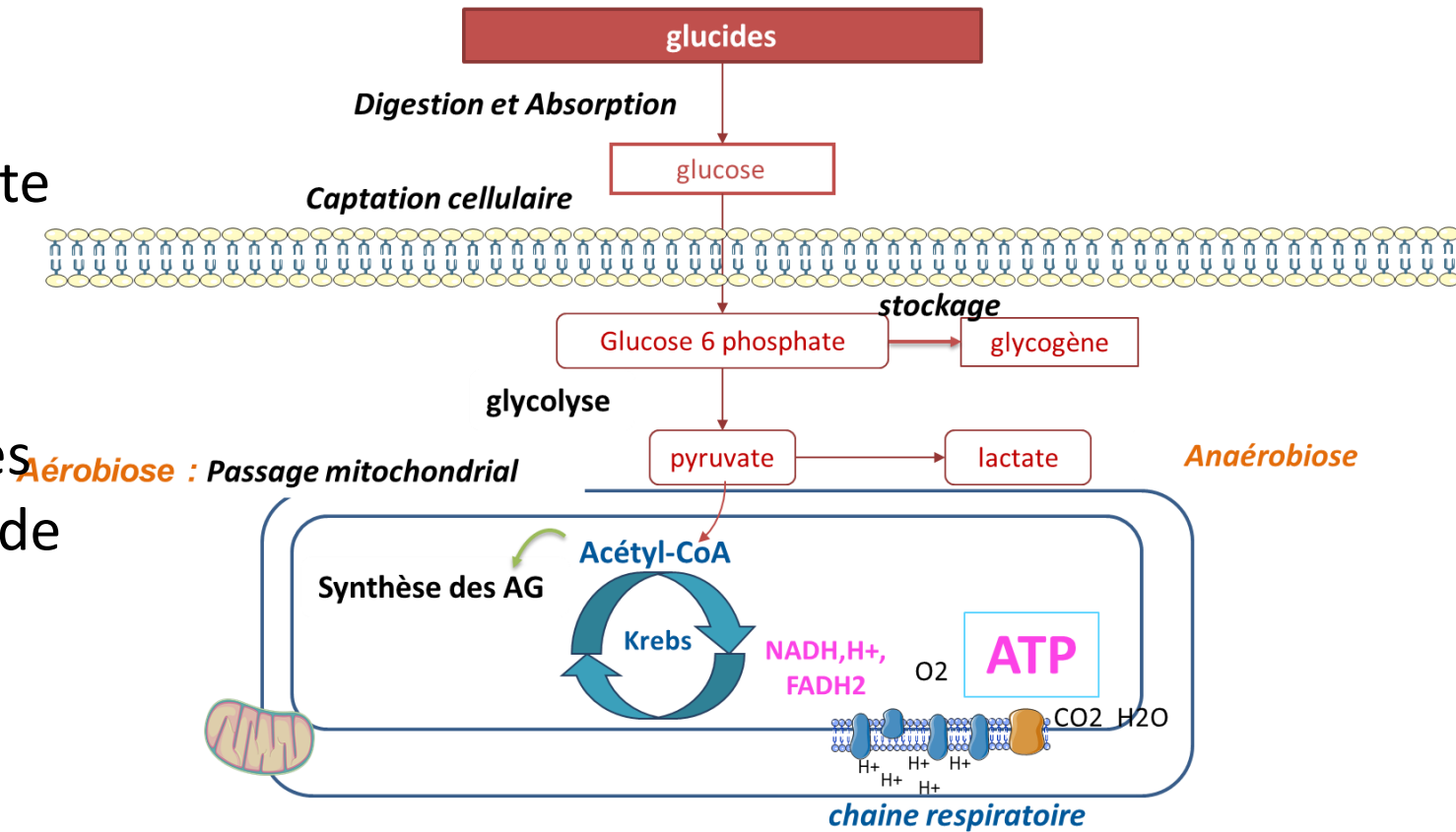
- Passage mitochondrial

- Cycle de Krebs = cycle des acides tricarboxyliques = cycle de l'acide citrique

- Chaine respiratoire

- En anaérobiose

- Formation de lactate



- I- Généralités
- **II- Digestion absorption**
- III- Captation cellulaire
- IV- La glycolyse
  - 1. Les réactions de formation du fructose 1,6 bisP
  - 2. Formation de trioses phosphates
  - 3. Formation du pyruvate et d'un 2ème ATP
  - 4. Oxydation du NADH cytosolique – les navettes
  - 5. Entrée des hexoses dans la glycolyse
- V- Devenir du pyruvate

- **Les glucides alimentaires**
  - #250g /j soit la  $\frac{1}{2}$  de la ration énergétique
  - Sous forme de :
    - Polysaccharides (**amidon** (végétal)  $\approx 1/2$ , glycogène (animal))
    - Disaccharides (**saccharose**  $\approx 1/3$ , **lactose**, maltose)
    - **Oses simples (glucose, fructose, galactose)**
    - Cellulose non assimilable par l'homme

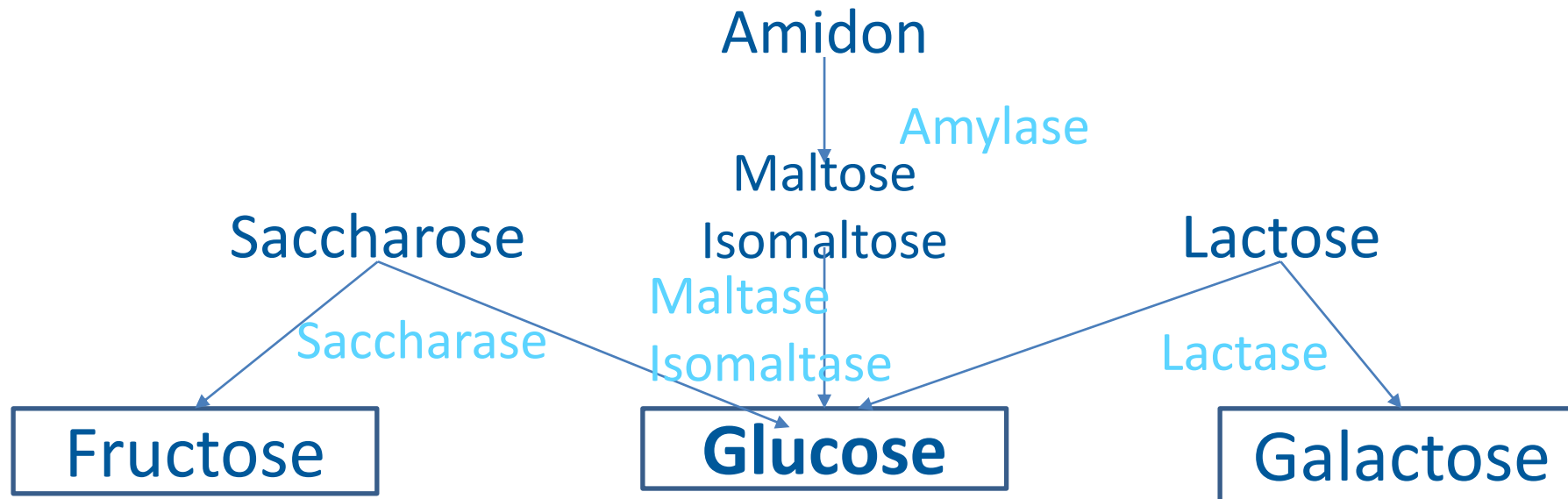
**Seuls les oses simples peuvent pénétrer dans une cellule !**



- **Hydrolyse par les enzymes**

- $\alpha$ -amylases salivaires et **pancréatiques** : hydrolyse des liaisons  $\alpha$ 1-4
- Dans la lumière intestinale et au niveau de la bordure en brosse des entérocytes

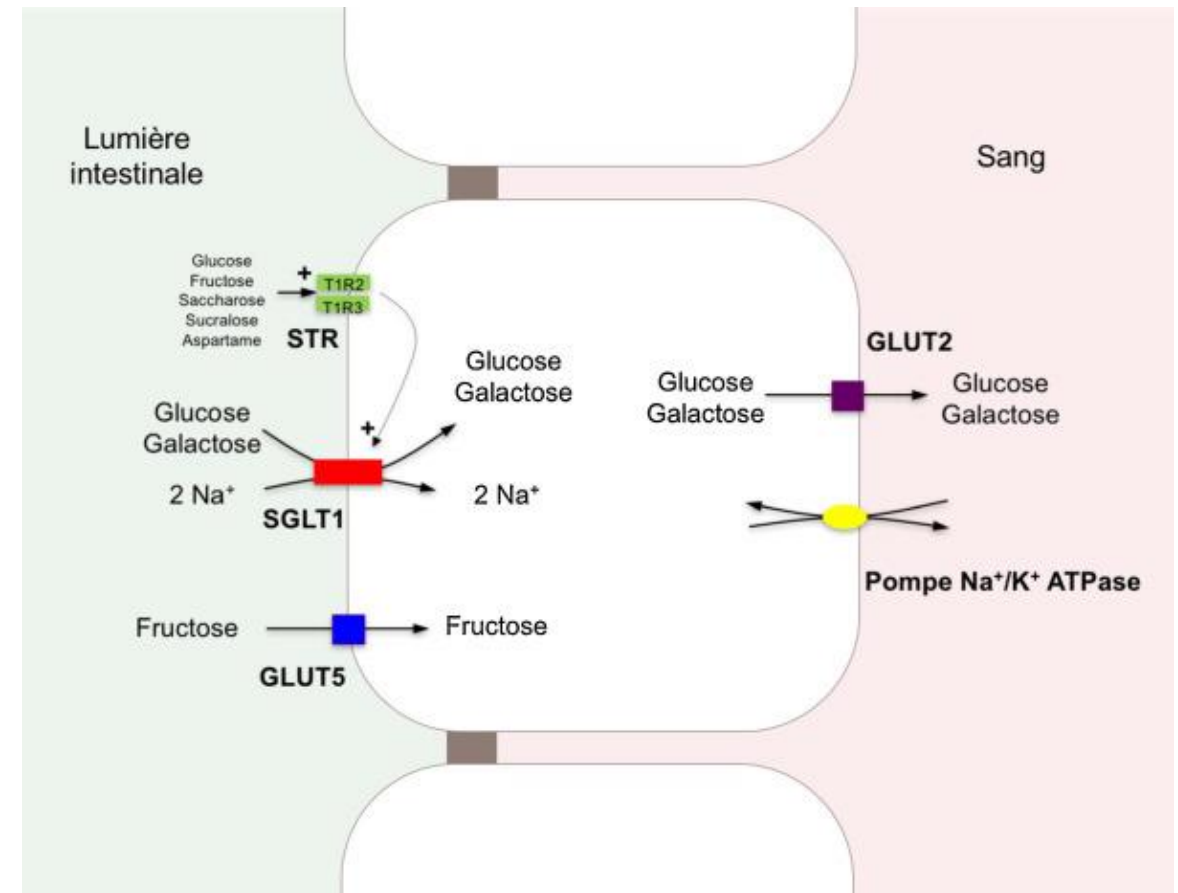
Disaccharidases intestinales:



- **Glucides = molécules très polaires et très hydrophiles**
- Nécessité d'un transporteur pour passer la double couche lipidique de l'entérocyte vers la circulation générale ( actif=besoin d'énergie ou passif)

## Au niveau de l'entérocyte :

- Pour le Glucose
  - **SGLT1 Sodium Glucose Transporter** forte affinité pour le glucose (transport actif contre un gradient de concentration)
  - **GLUT 2 (glucose transporter)** : faible affinité pour le glucose (transport facilité dans le sens du gradient)
- **Fructose:**  
Transport passif par **Glut5** et 2
- **Galactose:** comme le glucose



- I- Généralités
- II- Digestion absorption
- **III- Captation cellulaire**
- IV- La glycolyse
  - 1. Les réactions de formation du fructose 1,6 bisP
  - 2. Formation de trioses phosphates
  - 3. Formation du pyruvate et d'un 2ème ATP
  - 4. Oxydation du NADH cytosolique – les navettes
  - 5. Entrée des hexoses dans la glycolyse
- V- Devenir du pyruvate

- **Transporté dans le sang sous forme libre**
- **En période alimentaire**
  - Augmentation de la glycémie → **insuline**
  - Foie premier tissu traversé par le sang portal (capte 30-40%)
  - Reste réparti aux autres tissus
  - stocké en glycogène (foie et muscle) ou dégradé en pyruvate par la glycolyse
- **En situation de jeûne**
  - Glucose de la néoglucogenèse
  - Sous l'influence de la sécrétion de **glucagon**
- **Nutriment énergétique fondamental**
  - Indispensable aux cellules anaérobies glucodépendantes : GR
  - Principale source du cerveau

- **Les transporteurs**

- Les GLUT : glycoprotéines transmembranaire
- Codés par différents gènes
- Expression variable selon le type cellulaire
- Km pour le glucose  $\neq$

- Les transporteurs:

- **GLUT-1** surtout **GR**, forte affinité pour le glucose

$K_m \approx 1 \text{ mM}$

- **GLUT-2** foie et pancréas, rein, **insulino-indépendant** mais faible affinité pour le glucose (transport bidirectionnel)  
transport fructose et galactose

$K_m \approx 15-20 \text{ mM} \gg \text{glycémie}$

- **GLUT-3** : essentiellement cerveau

$K_m \approx 1 \text{ mM}$

- **GLUT-4**: muscles, tissu adipeux, tissus **insulino-dépendants**  
synthèse et affinité régulées par insuline

$K_m \approx 5 \text{ mM}$



- I- Généralités
- II- Digestion absorption
- III- Captation cellulaire
- **IV- La glycolyse**
  - **1. Les réactions de formation du fructose 1,6 bisP**
  - **2. Formation de trioses phosphates**
  - **3. Formation du pyruvate et d'un 2ème ATP**
  - **4. Entrée des hexoses dans la glycolyse**
- V- Devenir du pyruvate



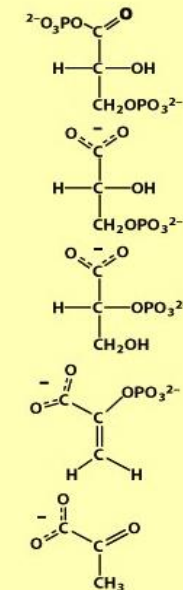
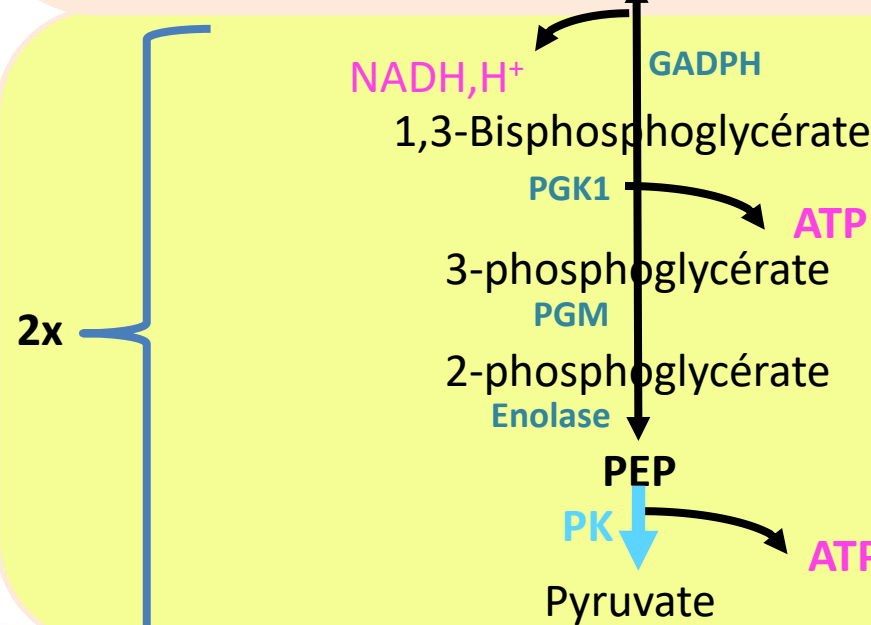
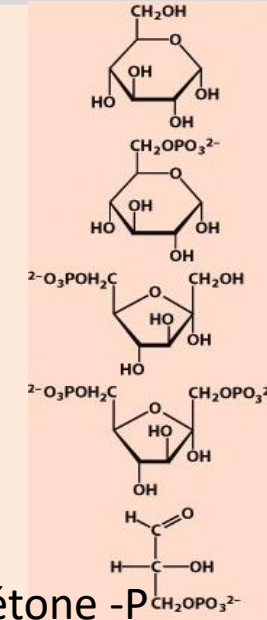
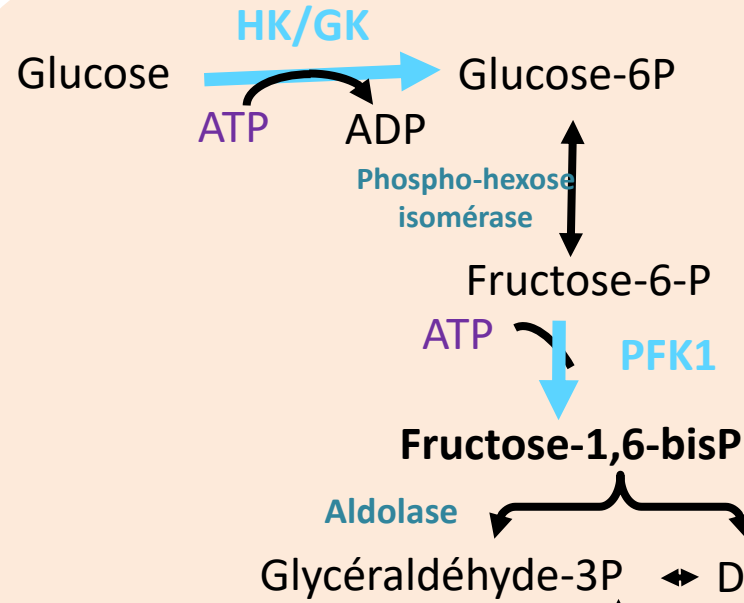
## = voie de Embden-Meyerhoff = voie des Trioses phosphate

- Utilisation du glucose: 1 glc (6C) → 2 pyruvate (3C)
- Dans tous les tissus Lieu: cytosol
- **Les étapes**
  - **1ère partie (6 C)** : activation par phosphorylation du glucose jusqu'à formation du fructose-1,6-bisphosphate **consomme 2ATP**
  - **2ème partie (3C)** : formation des trioses phosphate jusqu'au pyruvate (fournit **2ATP** par molécule de pyruvate **x2** soit 4 par glucose)
  - **3 réactions irréversibles**

# La glycolyse

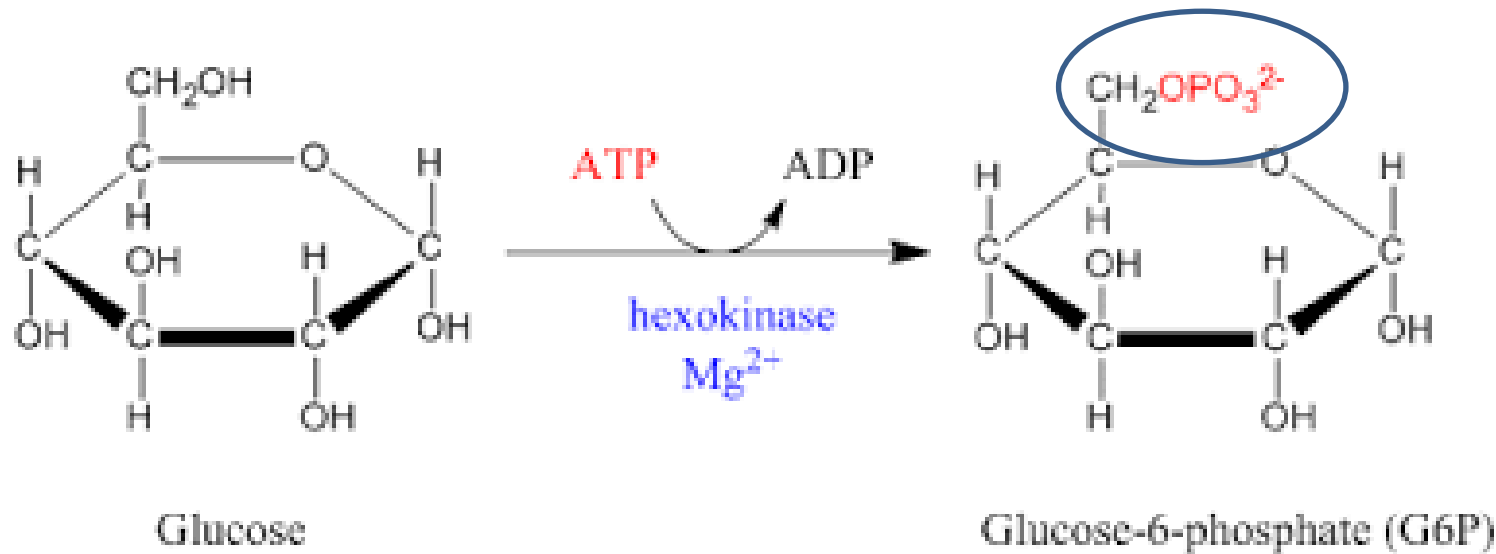
I/ Généralités  
II/ Digestion absorption  
III/ Captation cellulaire

IV/ La glycolyse  
V/ Devenir du pyruvate

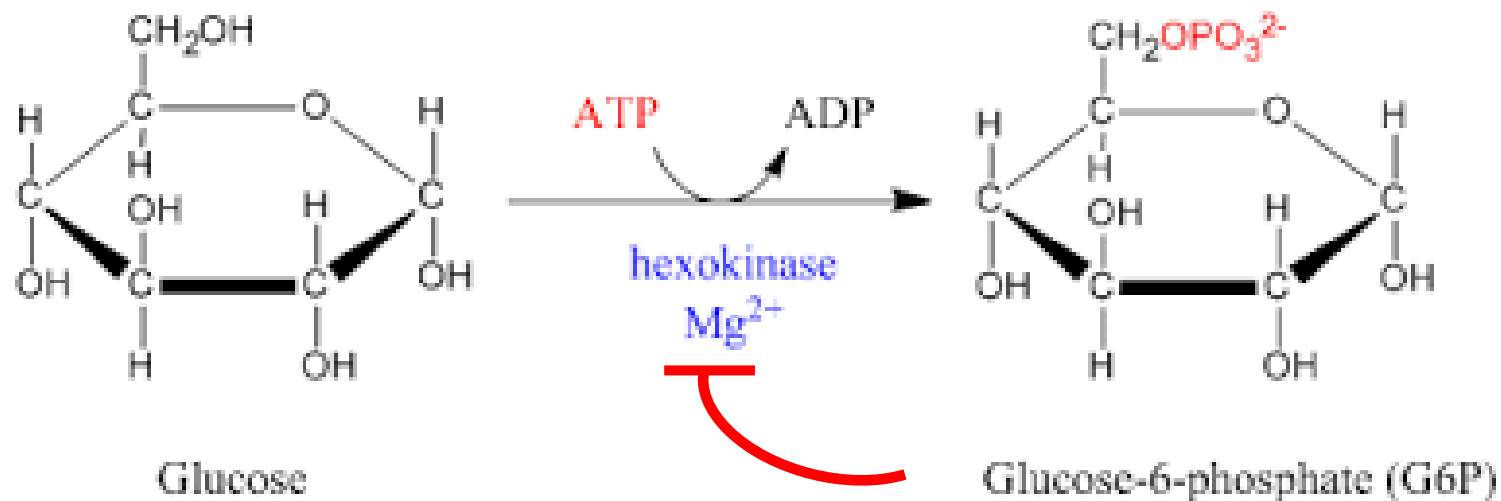


- I- Généralités
- II- Digestion absorption
- III- Captation cellulaire
- **IV- La glycolyse**
  - **1. Les réactions de formation du fructose 1,6 bisP**
  - 2. Formation de trioses phosphates
  - 3. Formation du pyruvate et d'un 2ème ATP
  - 4. Entrée des hexoses dans la glycolyse
- V- Devenir du pyruvate

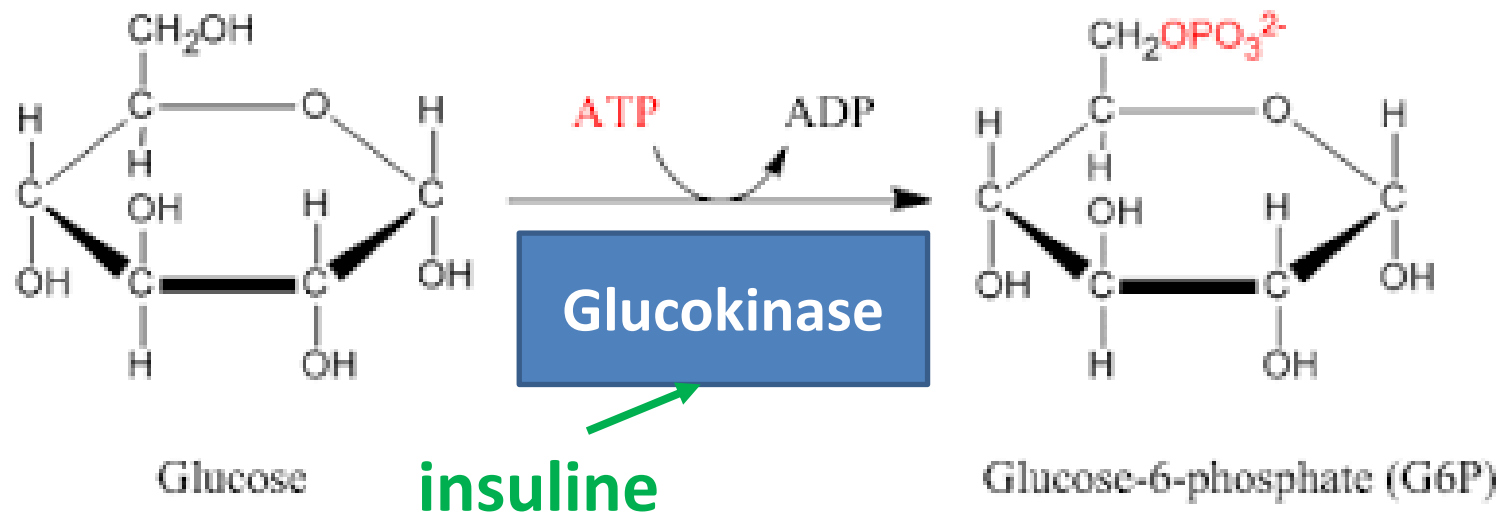
- 1ere étape: phosphorylation du glucose au glucose-6-phosphate :
  - Réaction **irréversible**



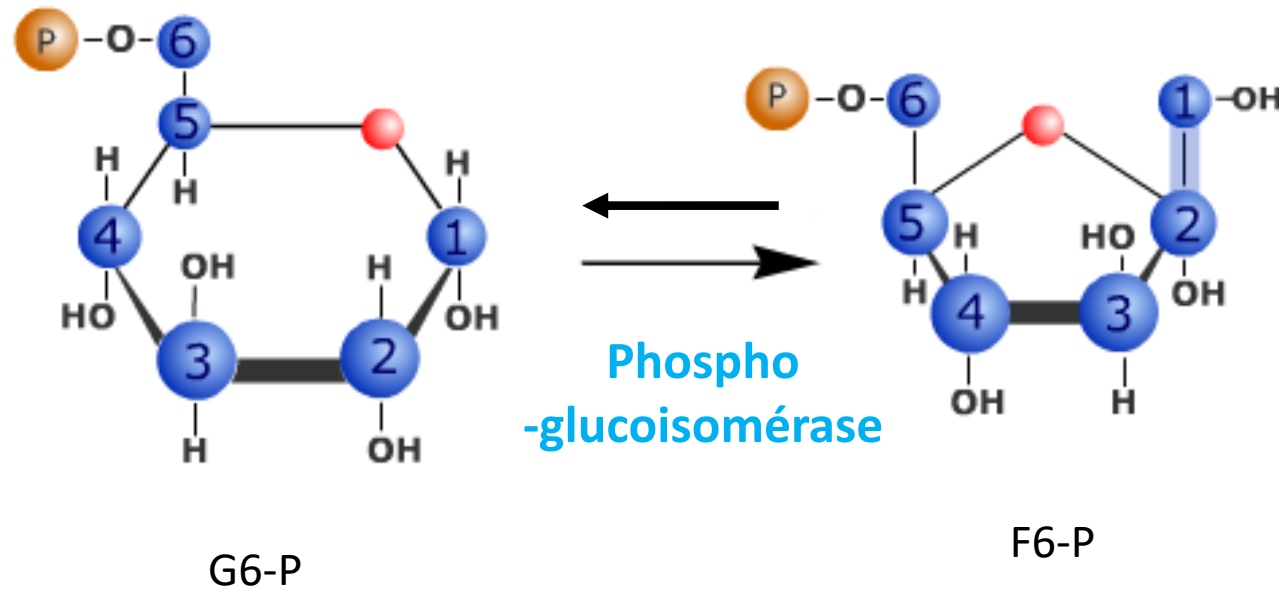
- Présente dans les tissus extra-hépatiques
- Très grande affinité pour le glucose
  - Km faible = activité max à de faibles [Glc]sg
- Rôle = répondre au besoin énergétique des cellules
- Phosphoryle aussi le Galactose et Fructose
- Enzyme **allostérique** inhibée par le glucose-6-phosphate, nécessite du Mg<sup>2+</sup>



- Présente dans le foie et le pancréas
  - Affinité plus faible pour le glucose
  - Km élevé = activité optimale pour  $[Glc]_{sg} > 5\text{mmol/l}$
- Rôle : élimine le glucose de la circulation sanguine en période postprandiale
- Activité inductible (insuline)
- Spécifique du glucose
- Pas inhibée par le Glc6P



- 2<sup>ème</sup> étape: isomérisation

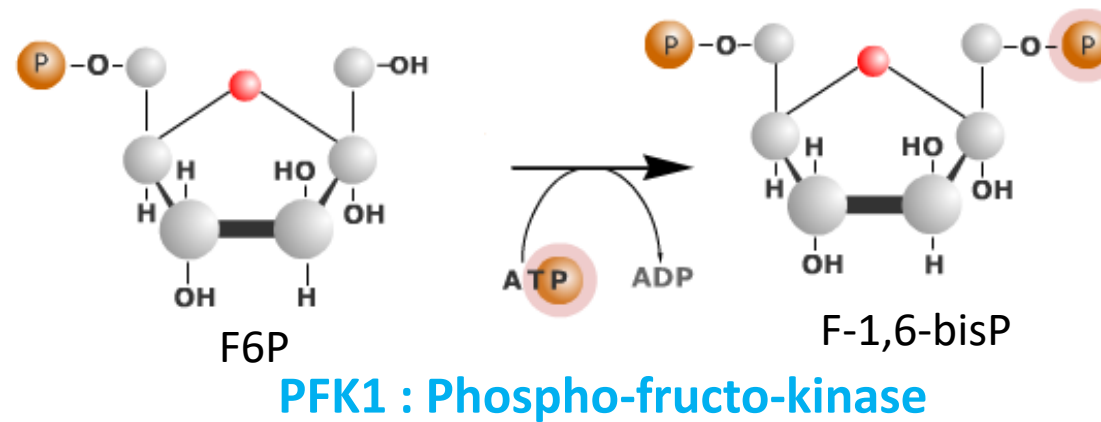


**CONVERSION ALDOSE EN CETOSE**

**Pyranose → furanose**

- 3ème étape: nouvelle phosphorylation

- Irréversible
- Consommation d'ATP

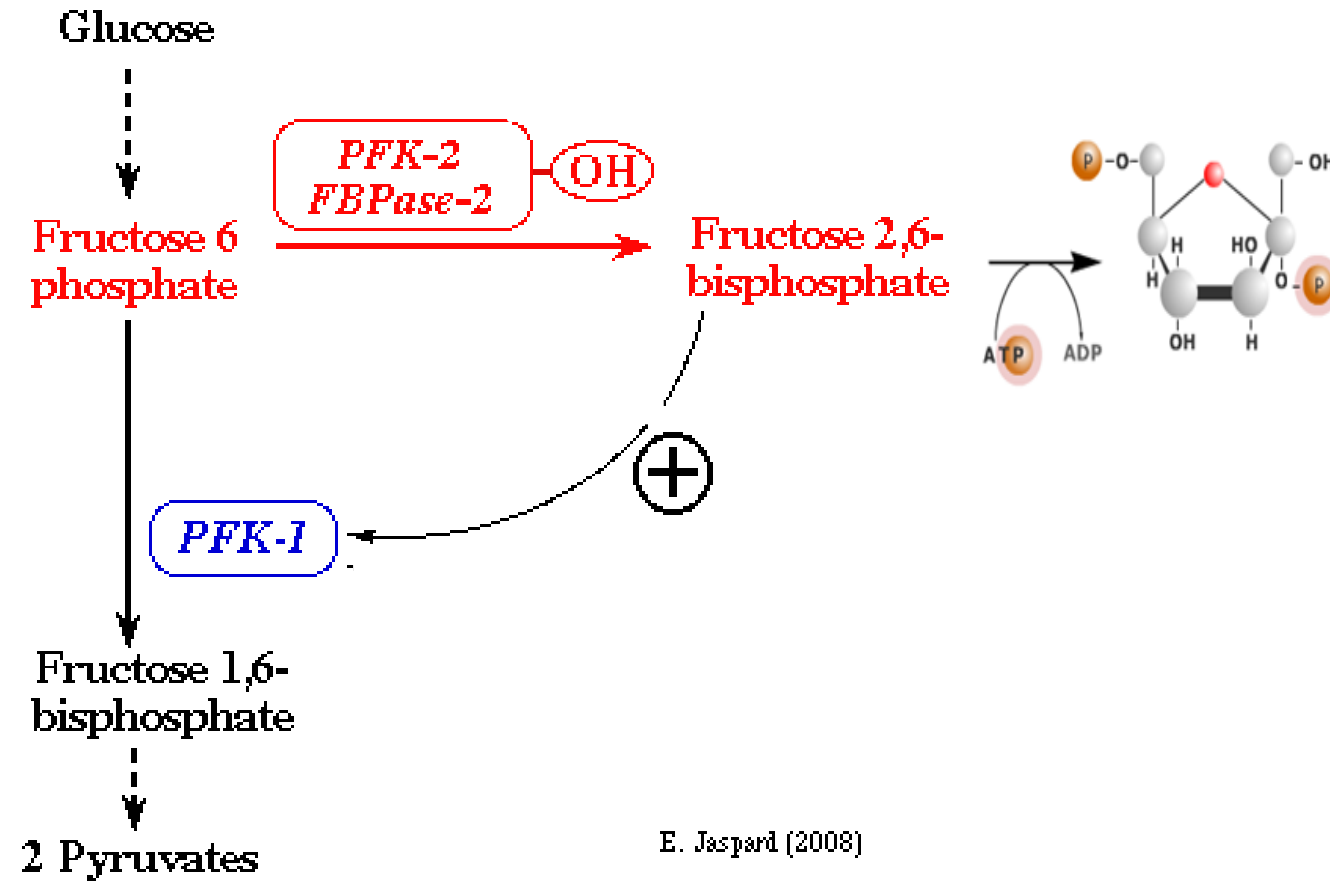


**Formation d'un composé phosphate riche en énergie**



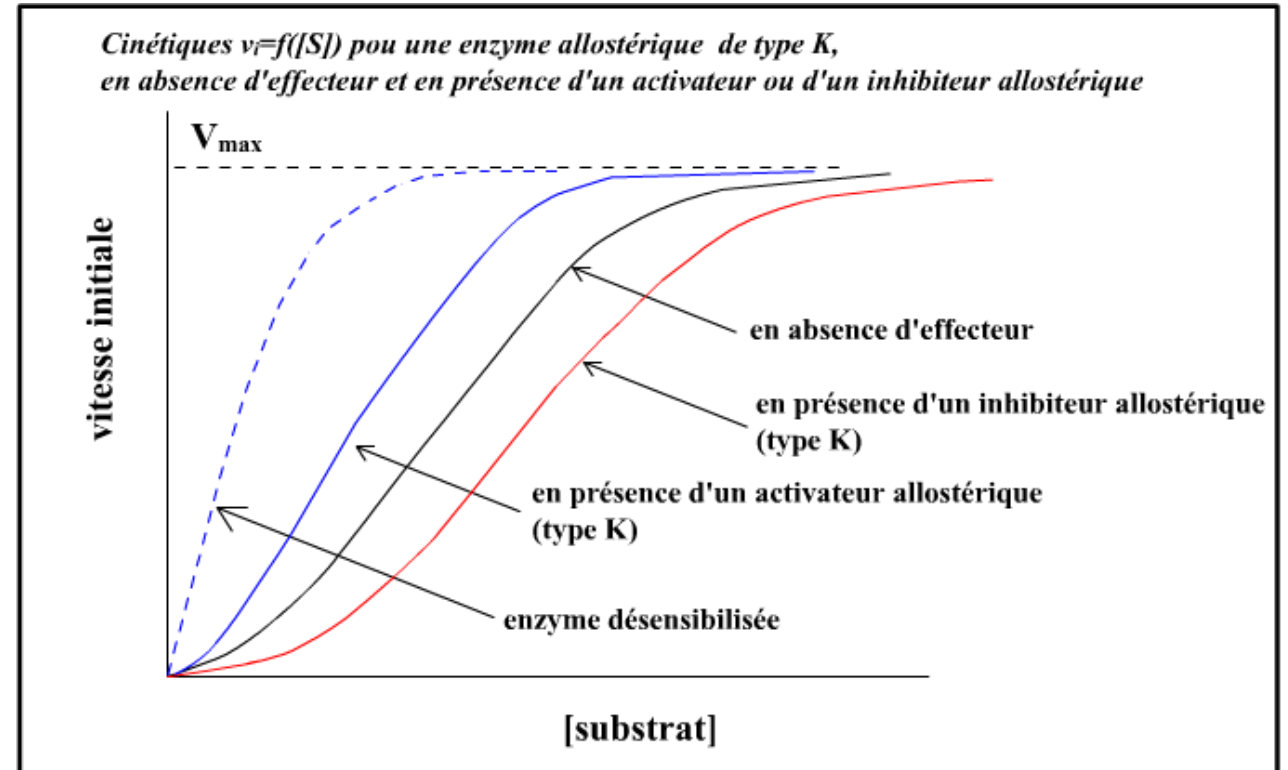
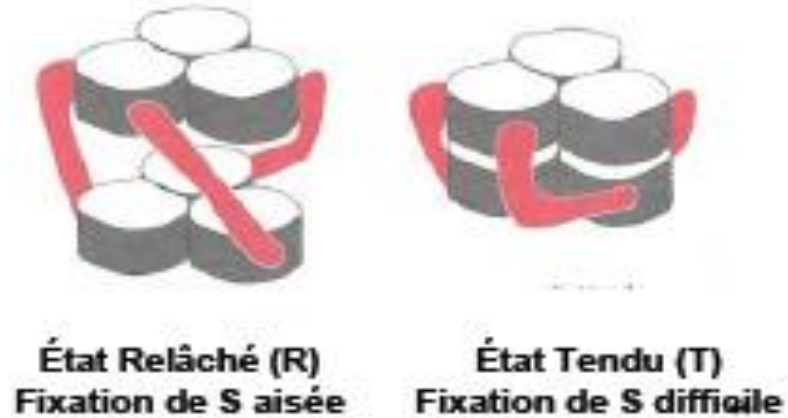
- Réaction exergonique **irréversible**
- Etape limitante +++++
- enzyme **allostérique**
- Site de régulation +++
  - Inhibé par forte concentration **ATP**
  - inhibé par le **citrate**
  - activé par le **fructose 2-6 bisphosphate** produit par **PFK2**

- Régulation par le F2,6 bisP

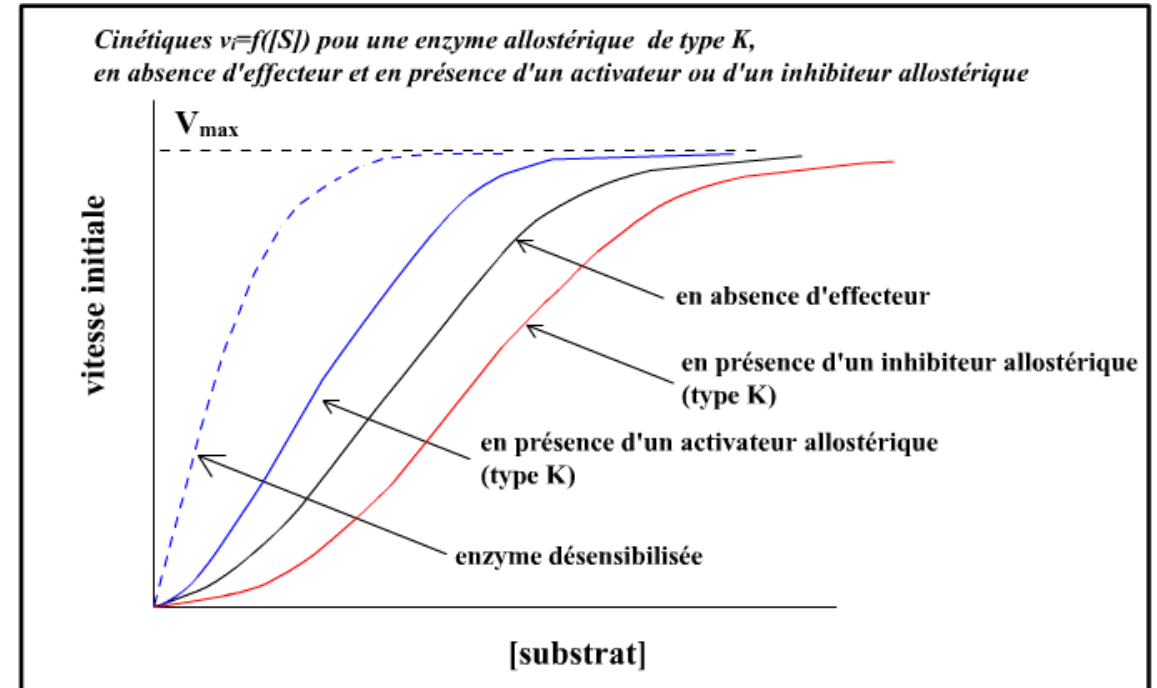
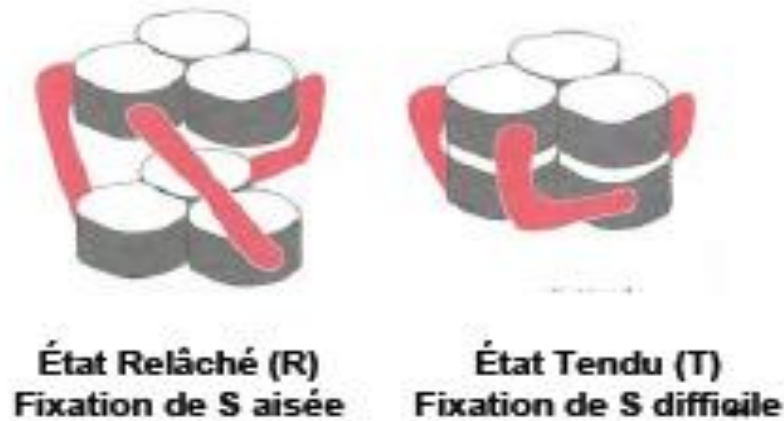


≠ di et bis

- Si F2,6bisP  $\uparrow$ : pour une même [substrat=F6P], la vitesse de réaction augmente

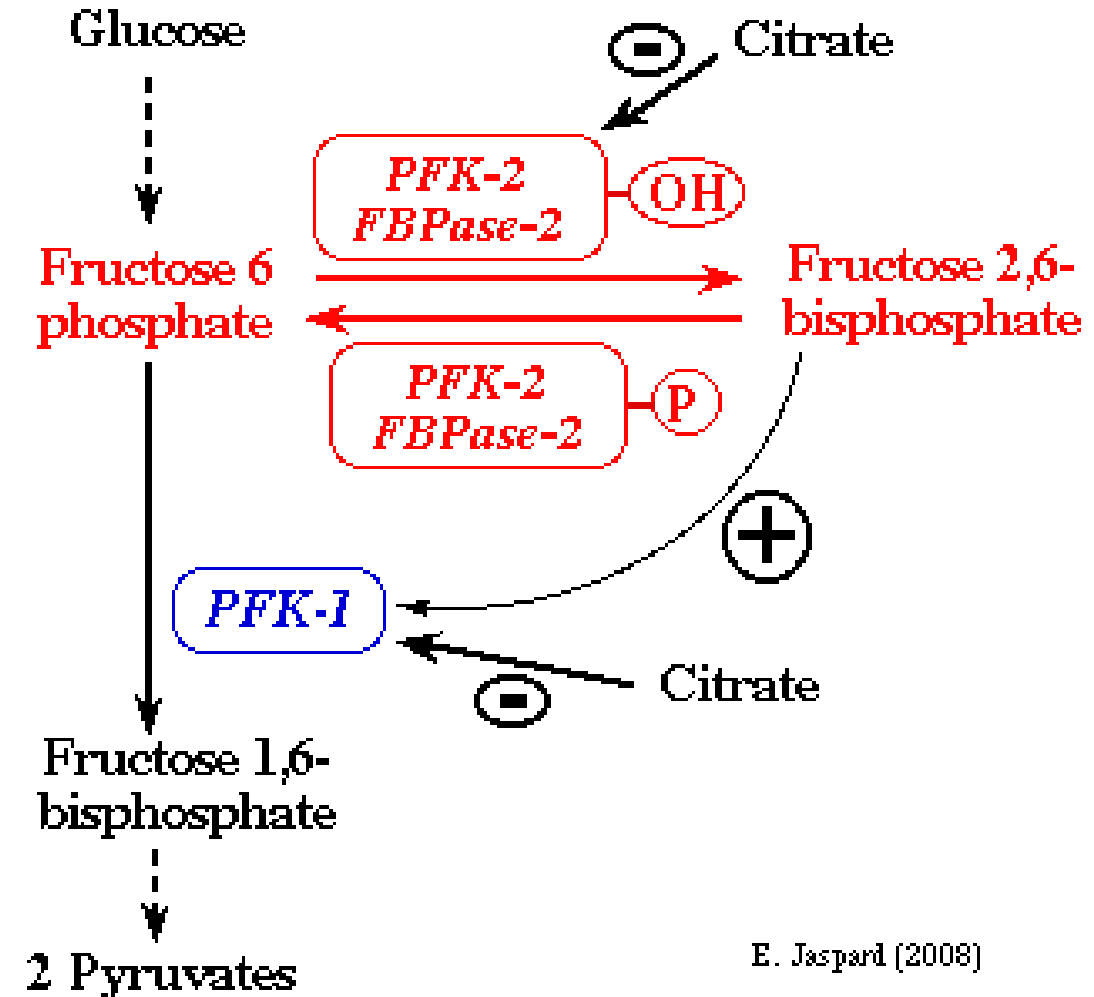


- Si ATP  $\uparrow$  : pour une même [substrat=F6P], la vitesse de réaction diminue



- inhibition par le **citrate** en augmentant l'effet de l'ATP
- **pH** inhibe aussi en augmentant l'effet de l'ATP

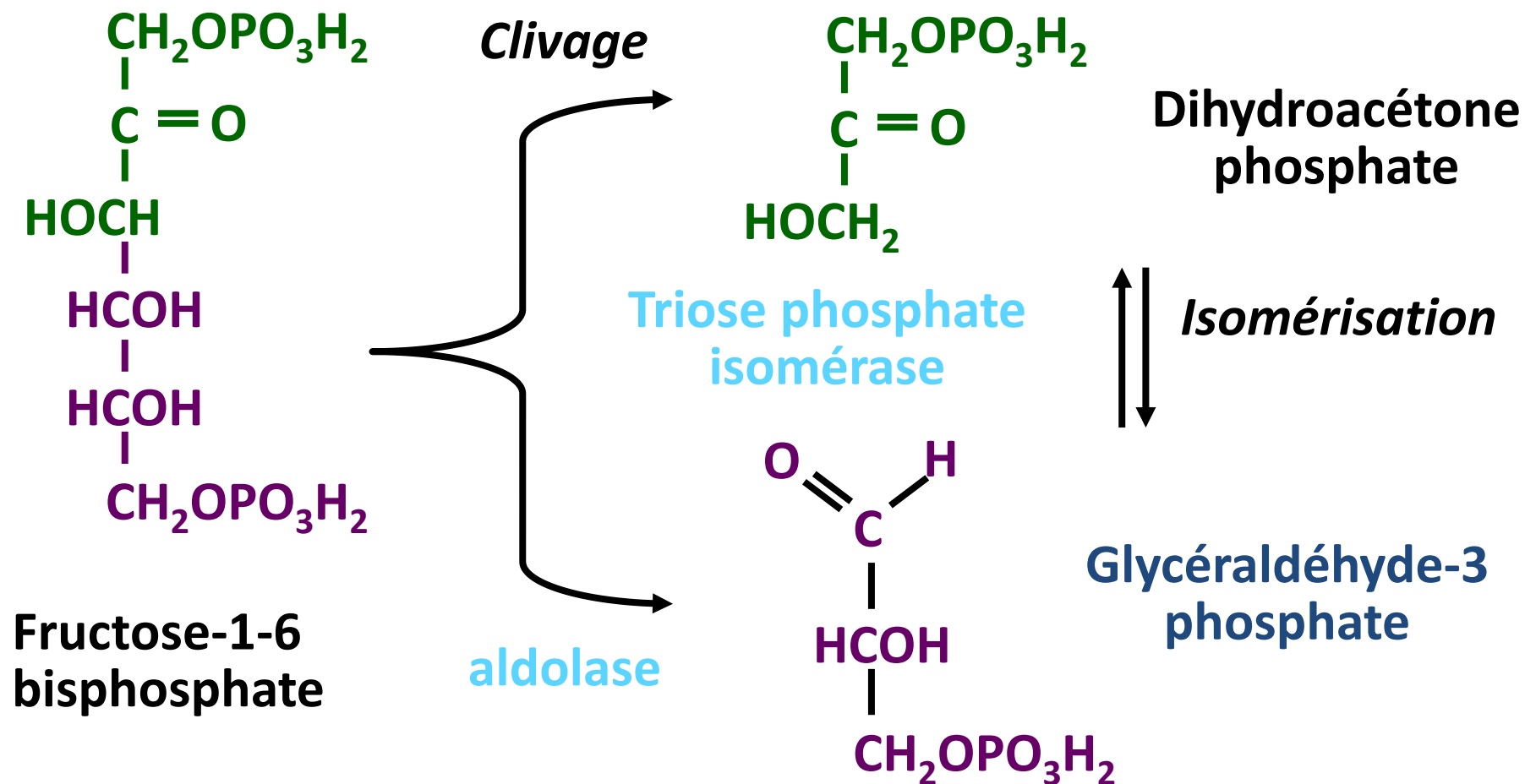
- Régulation de la PFK2
- Double activité enzymatique = bifonctionnelle
  - F6 P → F2,6 bisP
  - F2,6 bisP → F6 P
- Fonction état de phosphorylation de l'enzyme
  - Non phosphorylée : activité **kinase (action de l'insuline)**
  - phosphorylée : activité de **phosphatase (action glucagon)**
- Permet de réguler la qtité de F2,6 bisP
- Foie++: permet modulation glycolyse en fonction de la glycémie



E. Jaspard (2008)

- I- Généralités
- II- Digestion absorption
- III- Captation cellulaire
- **IV- La glycolyse**
  - 1. Les réactions de formation du fructose 1,6 bisP
  - **2. Formation de trioses phosphates**
  - 3. Formation du pyruvate et d'un 2ème ATP
  - 4. Oxydation du NADH cytosolique – les navettes
  - 5. Entrée des hexoses dans la glycolyse
- V- Devenir du pyruvate

### Formation du Glycéraldéhyde-3-phosphate



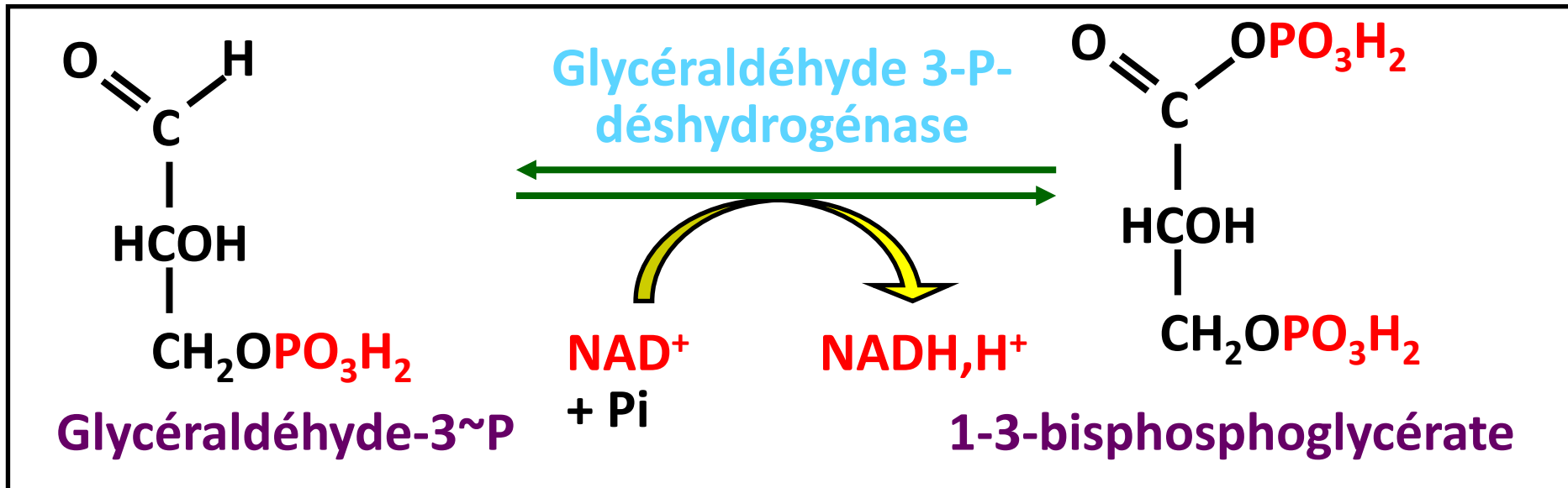
- Seul le glycéraldéhyde-3-P poursuit la glycolyse
- Isomérase permet l'interconversion (réversible) des 2 trioses
- Réaction déplacée vers le glycéraldéhyde-3-P, car consommé dans la réaction suivante
- Bilan des premières étapes:
  - 1 glc  $\rightarrow$  2 mol de 3 P glycéraldéhyde
  - aucune énergie extraite
  - consommation de 2 ATP

Mise en place de la voie pour deuxième phase (production d'énergie)



## Phosphorylation de l'ADP est couplée à l'oxydation du glycéraldéhyde 3-P

- Réaction d'oxydo-réduction



Formation d'un composé phosphate riche en énergie :

**Acyl phosphate** ( $\Delta G^{\circ} = -10,3$ ) : anhydride d'acide phosphorique et d'acide carboxylique

## RAPPEL

**ATP** principal transporteur du groupement phosphoryle  
**autres composés** possédant un potentiel élevé de transfert du groupe phosphoryle

	$\Delta G^{\circ}$ (kcal/mol)
<b>Phospho-énol-pyruvate</b>	- 14,8
<b>Carbamoyl phosphate</b>	- 12,3
<b>Acétyl-phosphate</b>	- 10,3
<b>Créatine phosphate</b>	- 10,3
<b>Pyrophosphate</b>	- 8,0
<b>ATP en ADP</b>	- 7,3
<b>Glucose-1-phosphate</b>	- 5,0
<b>Glucose-6-phosphate</b>	- 3,3
<b>Glucose-3-phosphate</b>	- 2,2

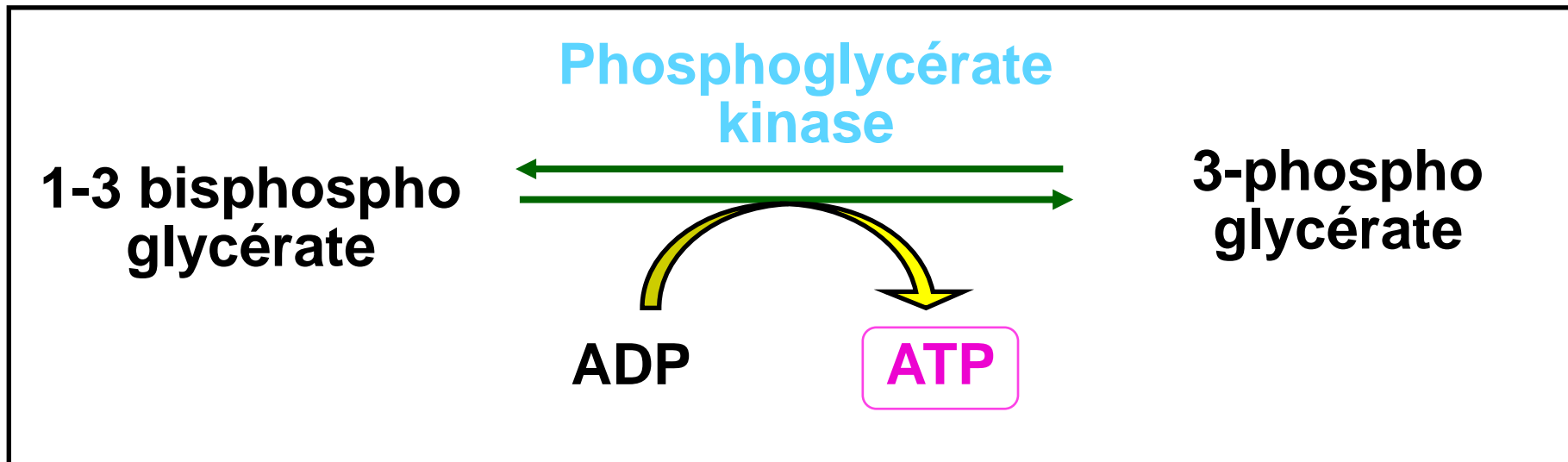
## Conservation de l'énergie

- Réaction d'oxydo-réduction

Formation d'un composé phosphate riche en énergie :

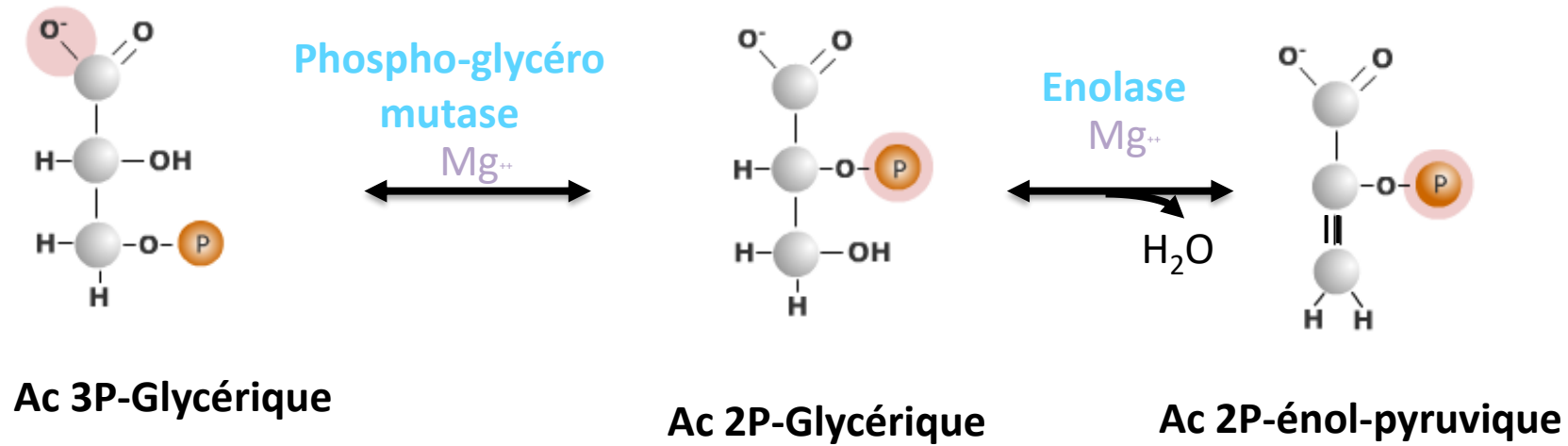
**Acyl phosphate** ( $\Delta G^{\circ} = -10,3$ ) :  
anhydride d'acide phosphorique et d'acide carboxylique

- Formation d'ATP



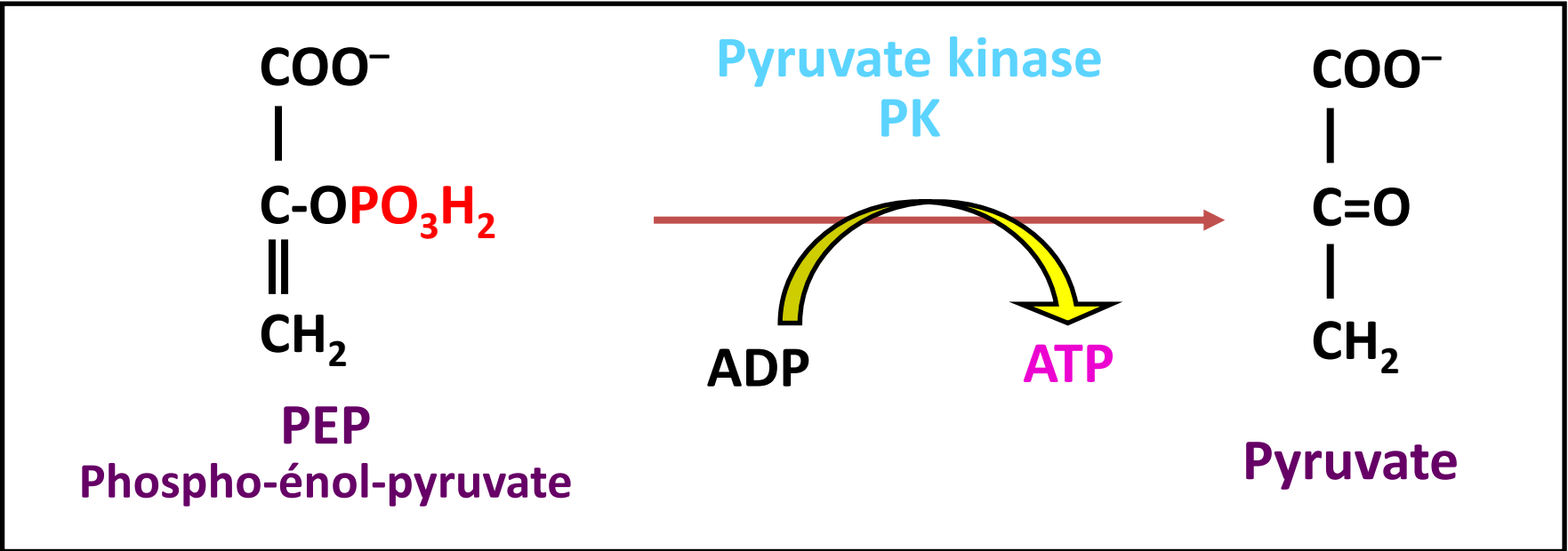
- I- Généralités
- II- Digestion absorption
- III- Captation cellulaire
- IV- La glycolyse
  - 1. Les réactions de formation du fructose 1,6 bisP
  - 2. Formation de trioses phosphates
  - **3. Formation du pyruvate et d'un 2ème ATP**
  - 4. Entrée des hexoses dans la glycolyse
- V- Devenir du pyruvate

- 2 étapes réversibles



La déshydratation augmente le potentiel de transfert du groupe Phosphoryle

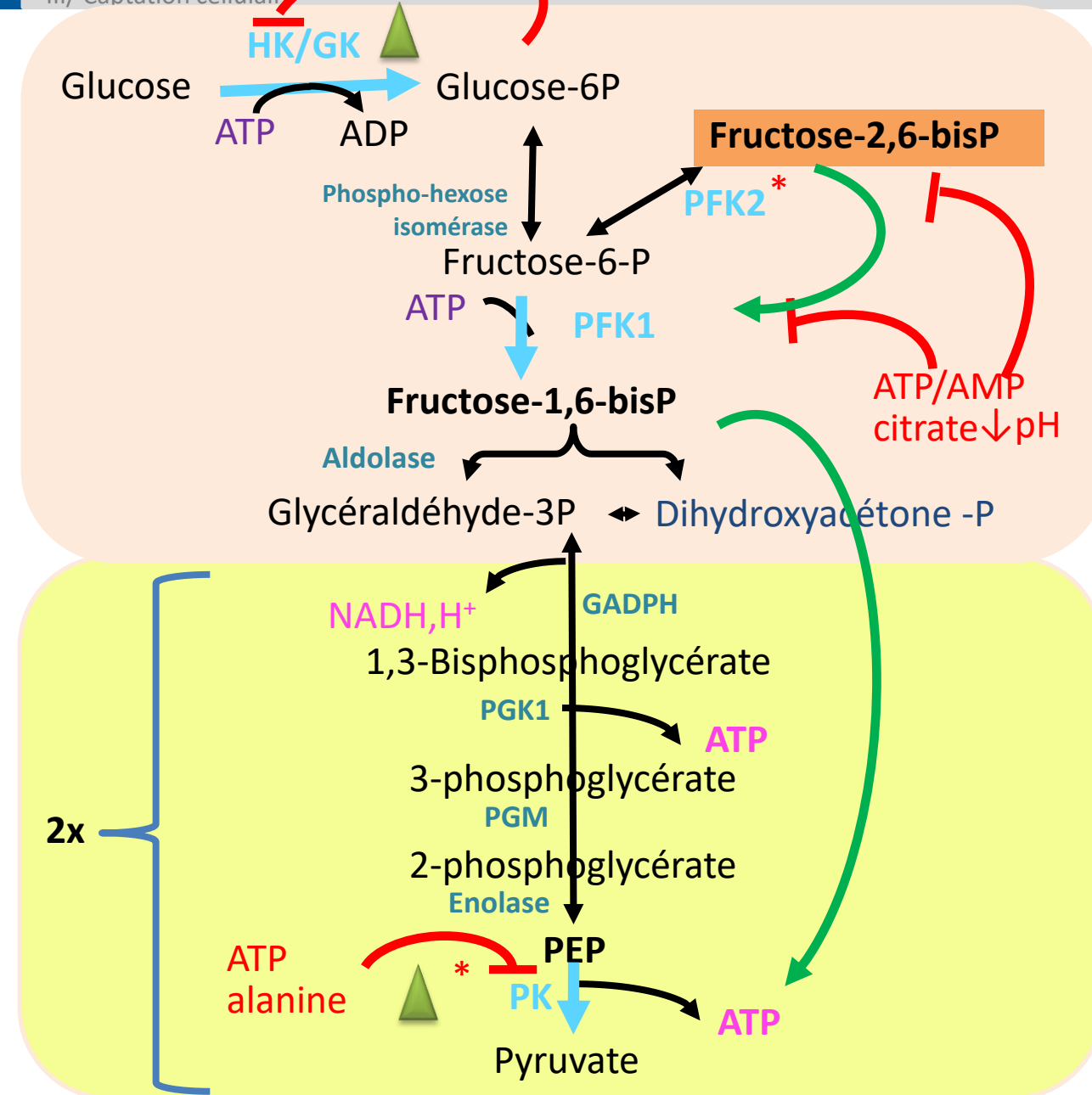
- 1 étape irréversible



# Régulation de la PK

I/ Généralités  
II/ Digestion absorption  
III/ Captation cellulaire  
IV/ La glycolyse  
V/ Devenir du pyruvate

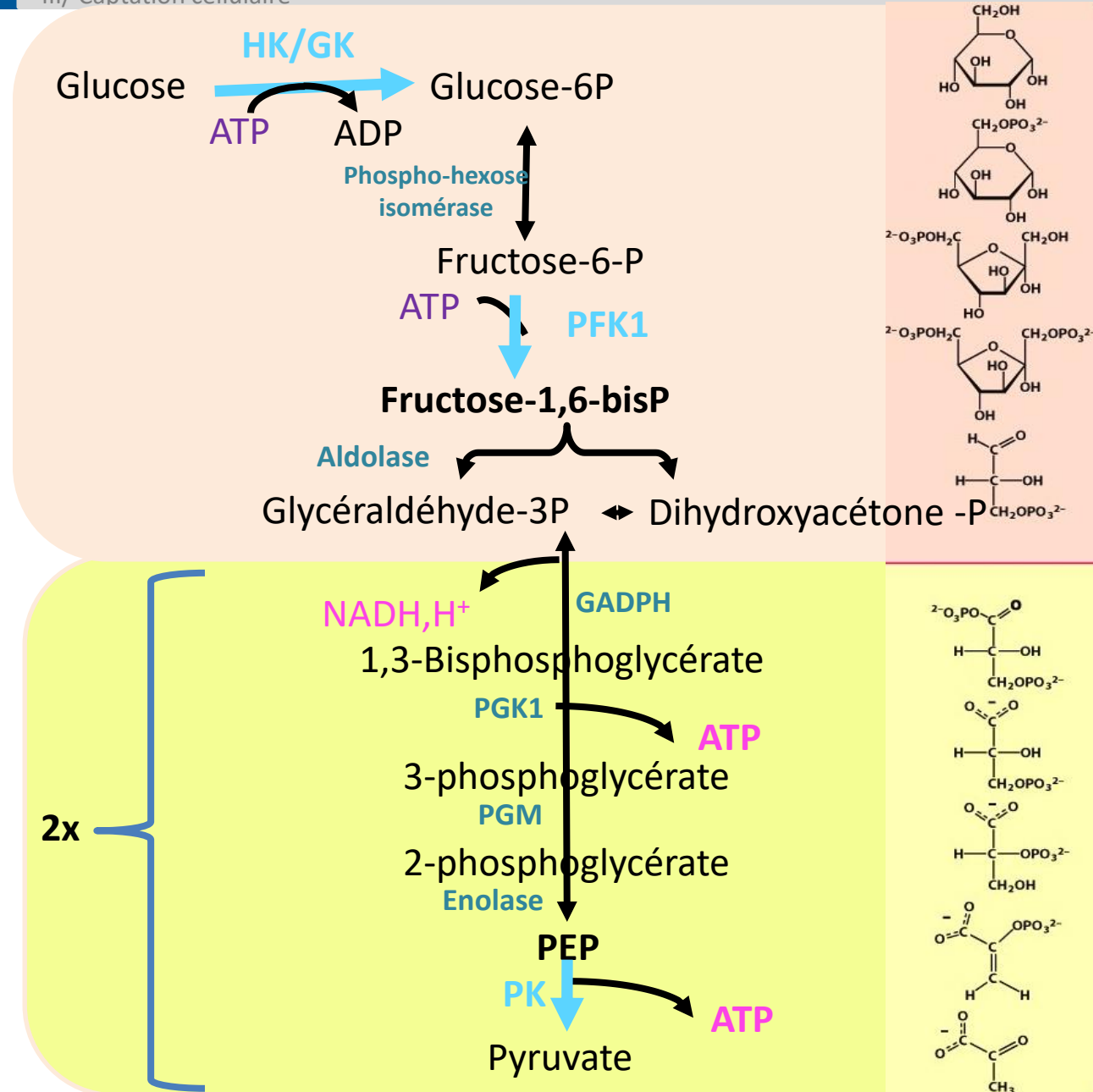
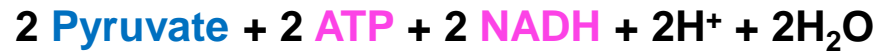
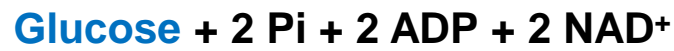
- **Régulation allostérique**
  - Inhibée par **ATP**
  - Inhibée par **alanine**
  - Activée par le **F1,6bisP**
- **Régulation par phosphorylation**
  - Inactivation si **phosphorylée**
  - Rôle du **Glucagon**, **Insuline**
- **Enzyme inductible**



# Bilan

I/ Généralités  
 II/ Digestion absorption  
 III/ Captation cellulaire

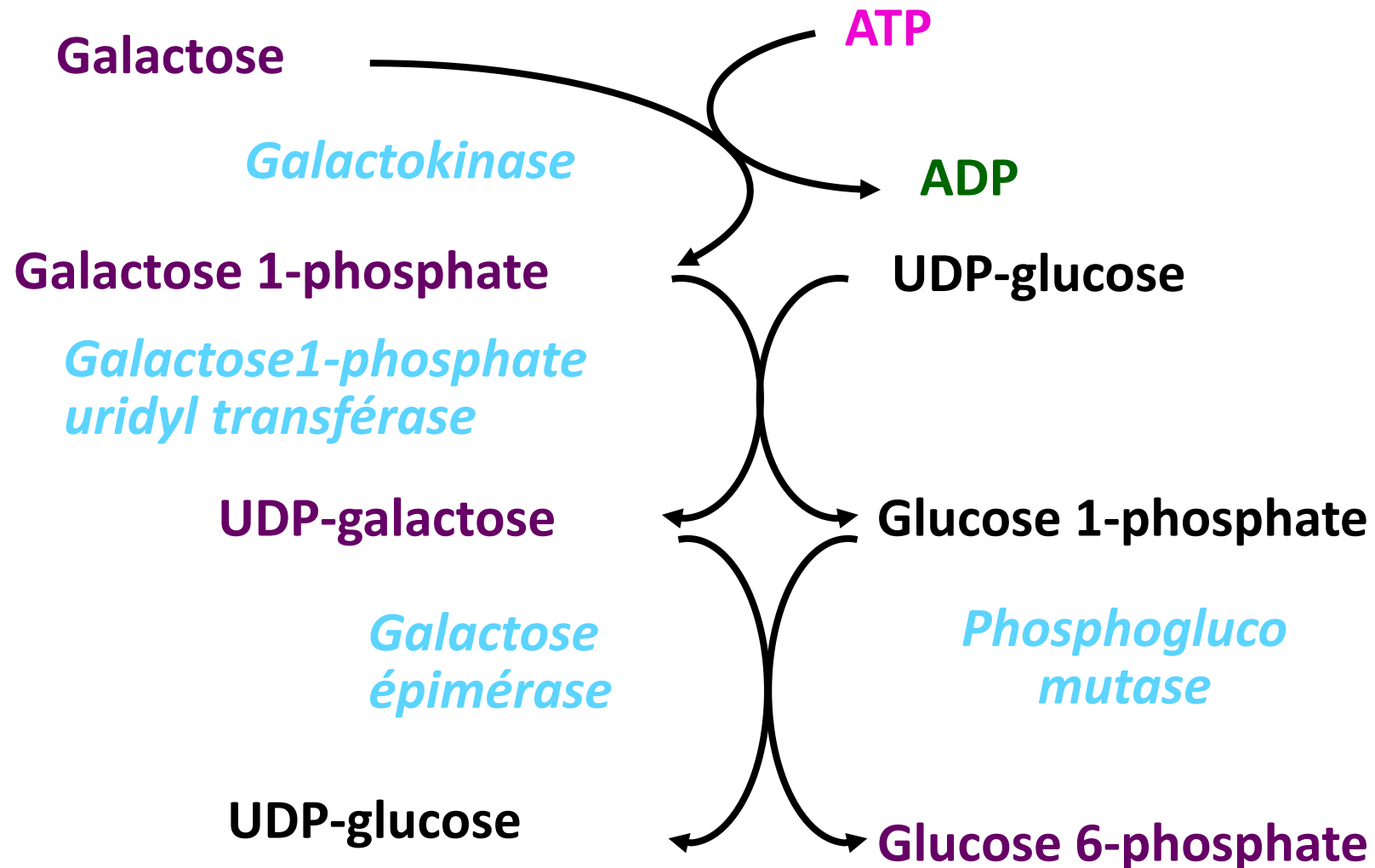
IV/ La glycolyse  
 V/ Devenir du pyruvate





- I- Généralités
- II- Digestion absorption
- III- Captation cellulaire
- IV- La glycolyse
  - 1. Les réactions de formation du fructose 1,6 bisP
  - 2. Formation de trioses phosphates
  - 3. Formation du pyruvate et d'un 2ème ATP
  - **4. Entrée des hexoses dans la glycolyse**
- V- Devenir du pyruvate

## Entrée du Galactose dans la Glycolyse (4 étapes)



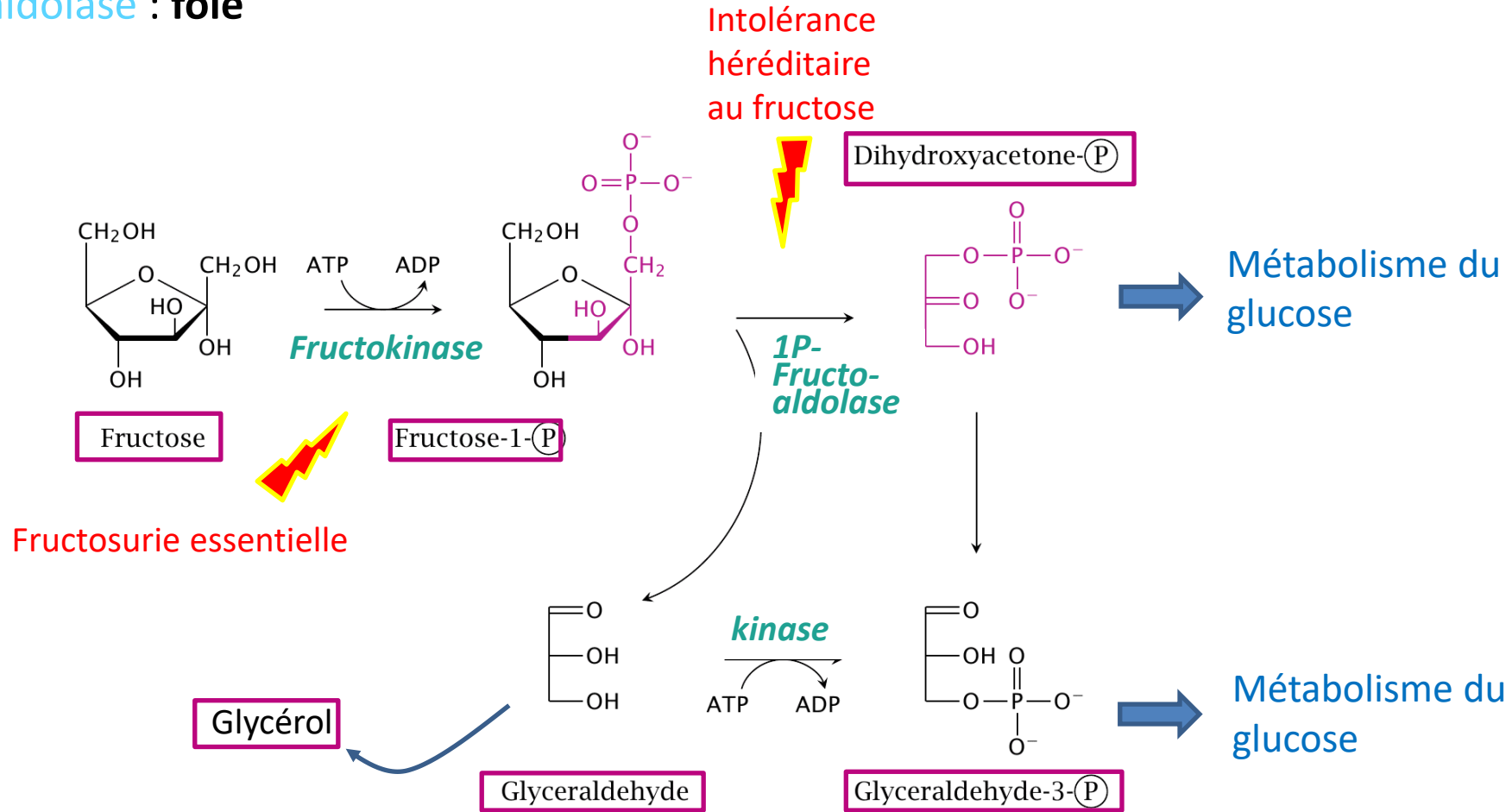
# 5.b.Transformation du fructose

I/ Généralités  
II/ Digestion absorption  
III/ Captation cellulaire

IV/ La glycolyse  
V/ Devenir du pyruvate

Fructokinase : **F1-P**

1P-Fructo-aldolase : **foie**



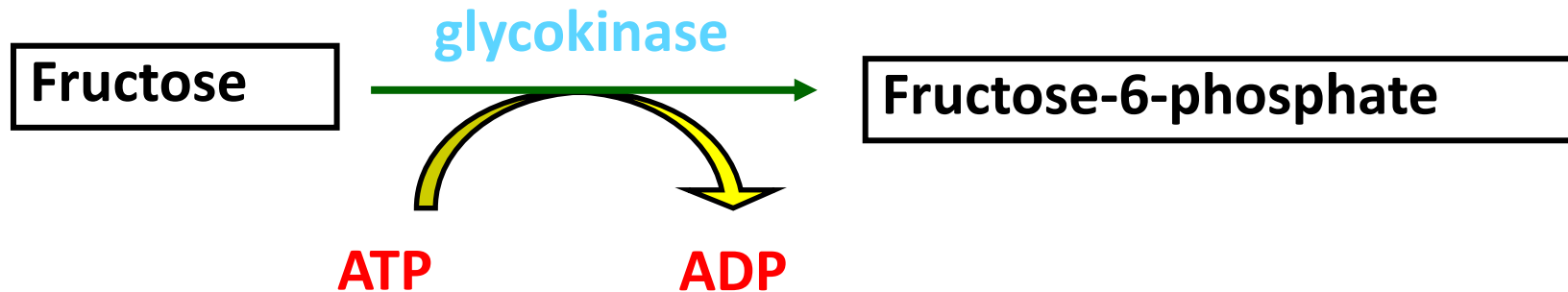
### Voie mineure

Saccharose (sucre de table)  $\longrightarrow$  Fructose + Glucose

Hexokinase : affinité 20 fois plus grande pour le glucose

Peu de fructose utilisé par le foie et le muscle car captation préférentielle du glucose

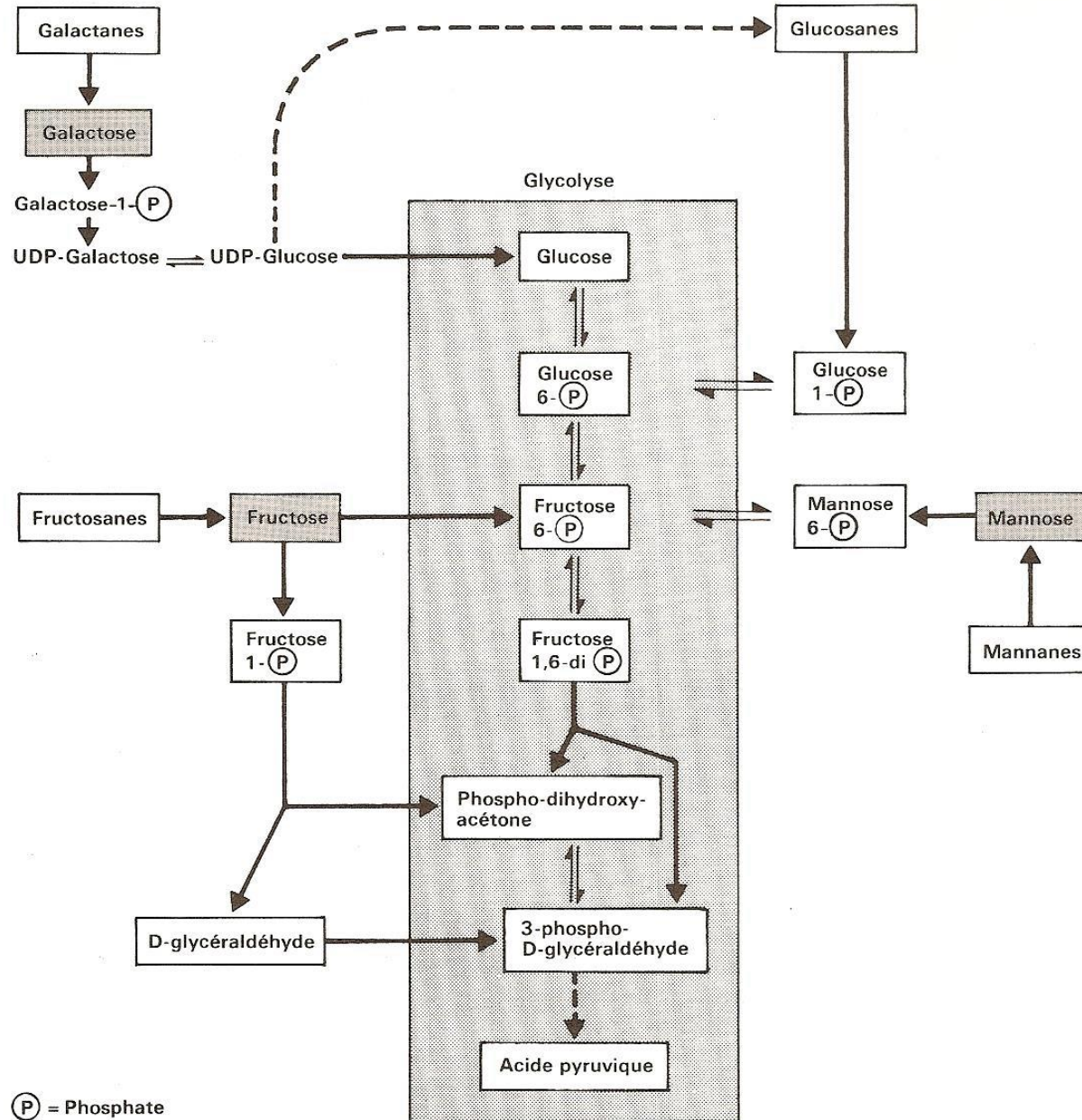
Donc le tissu adipeux reçoit plus de fructose



# Entrées des hexoses dans la glycolyse

I/ Généralités  
II/ Digestion absorption  
III/ Captation cellulaire

IV/ La glycolyse  
V/ Devenir du pyruvate

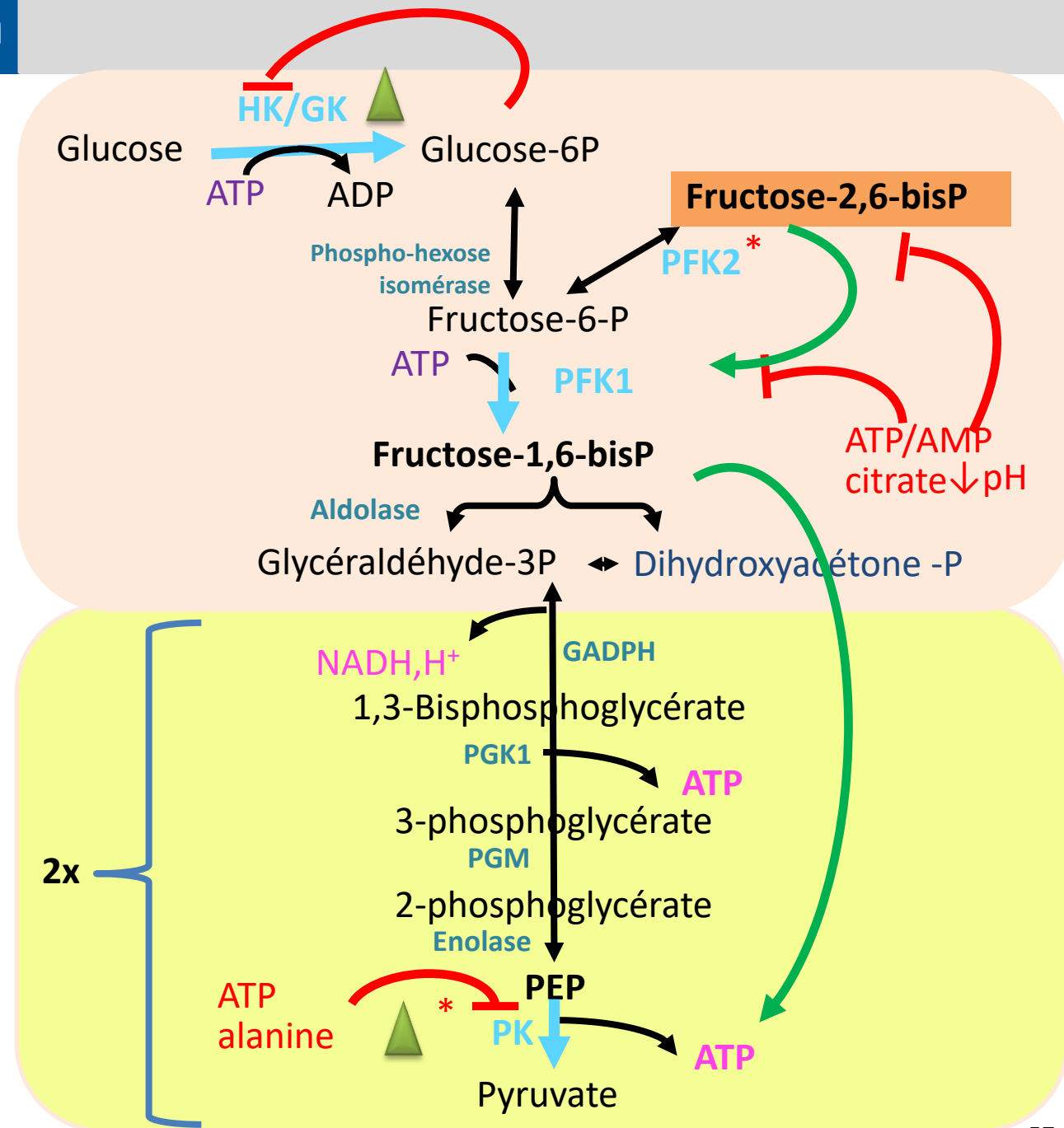


## 3 réactions irréversibles

Régulation allostérique

▲ inductible

\* (de)phosphorylation



## HEXOKINASE

inhibée par glucose 6 P

si phosphofructokinase inactive → fructose 6P augm donc aussi le glc 6P (équilibre):  
donc inhibition de PFK entraîne inhibition hexokinase!

**MAIS: GLUCOKINASE** hépatique pas inhibée par glc6P; elle intervient quand le glc est abondant (Km 50 fois plus élevé que l'hexokinase). ( et sa transcription est stimulée par l'insuline)

-> Fournit un glc6P destiné à la synthèse du glycogène voie des pentoses

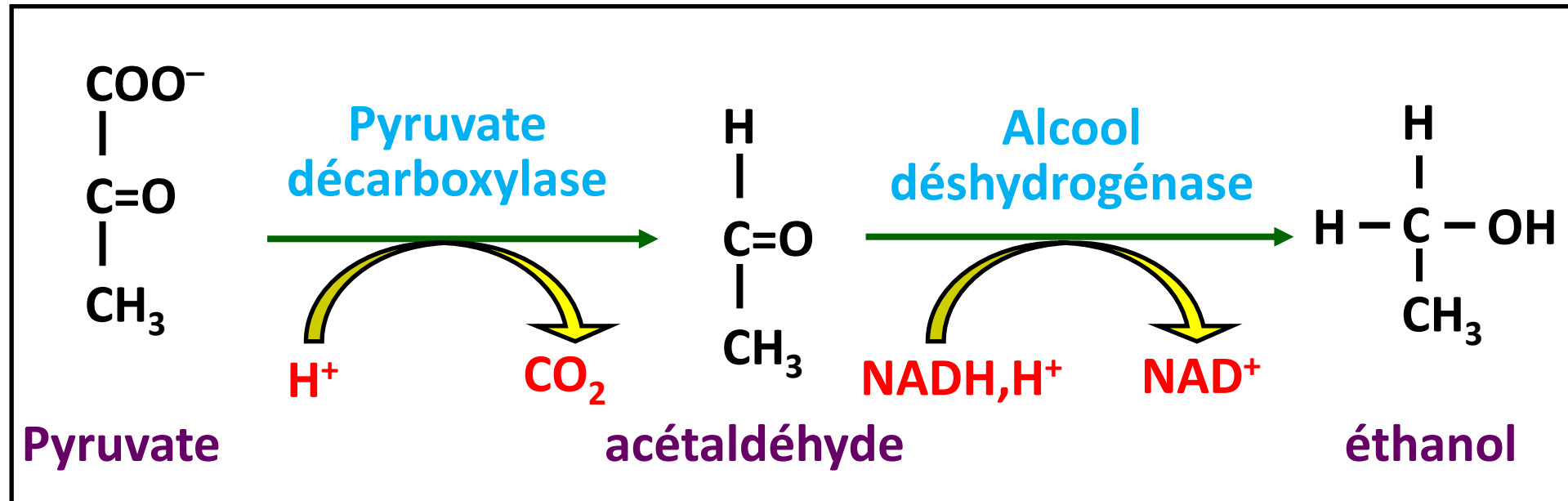
Nom	Localisation	KM	Commentaires
<b>Glucokinase</b>	<b>Cellules <math>\beta</math> des îlots de Langerhans Hépatocytes</b>	<b>5-10 mM</b>	<b>G6P parallèle glycémie Non rétroinhibé par G6P</b>
<b>Hexokinase</b>	<b>Ubiquitaire</b>	<b>0,1 mM</b>	<b>Débit constant (<math>V_{max}</math>) d'approvisionnement même à glycémie basse Rétroinhibé par G6P</b>

- Si le KM est élevé ( $\gg$  concentration physiologique), l'enzyme n'est jamais saturée et la vitesse s'adapte aux variations de [S] (travail en ordre 1)
- Si le KM est faible ( $<$  concentration physiologique), l'enzyme est proche de sa vitesse maximum et en absence de variation de concentration ou d'activité de E, le débit de production de P est constant. (travail en ordre 0)



- I- Généralités
- II- Digestion absorption
- III- Captation cellulaire
- IV- La glycolyse
  - 1. Les réactions de formation du fructose 1,6 bisP
  - 2. Formation de trioses phosphates
  - 3. Formation du pyruvate et d'un 2ème ATP
  - 4. Entrée des hexoses dans la glycolyse
- **V- Devenir du pyruvate**

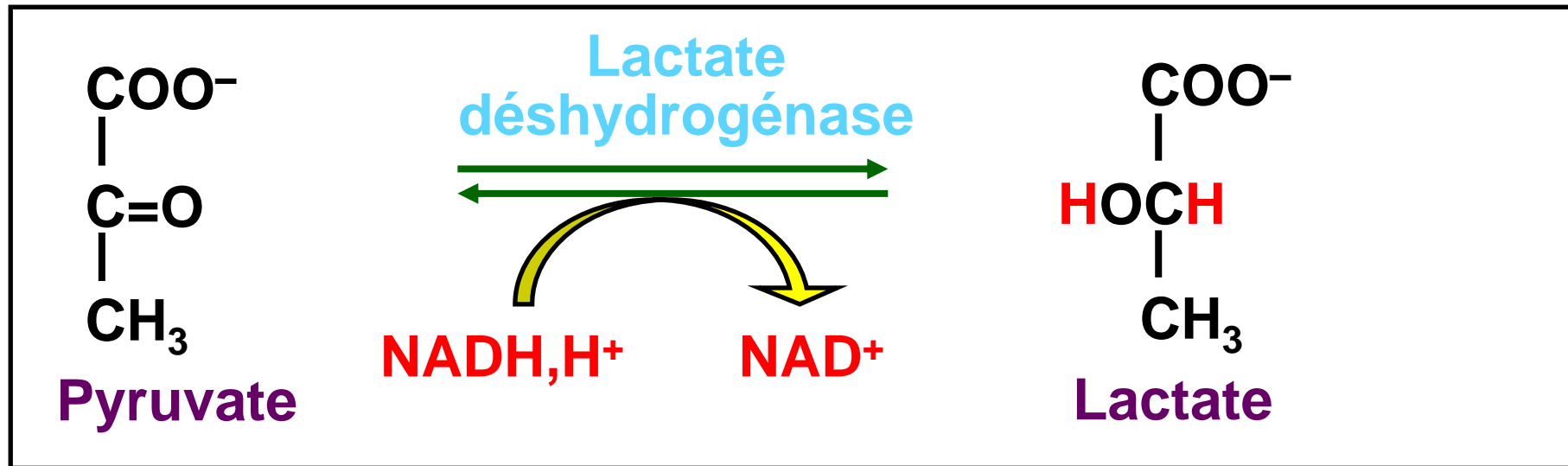
- Fermentation alcoolique Pas chez l'homme !



Fermentation du glucose en éthanol  
Processus anaérobie (levures- microorganismes)



- En anérobiose (absence d'O<sub>2</sub>)



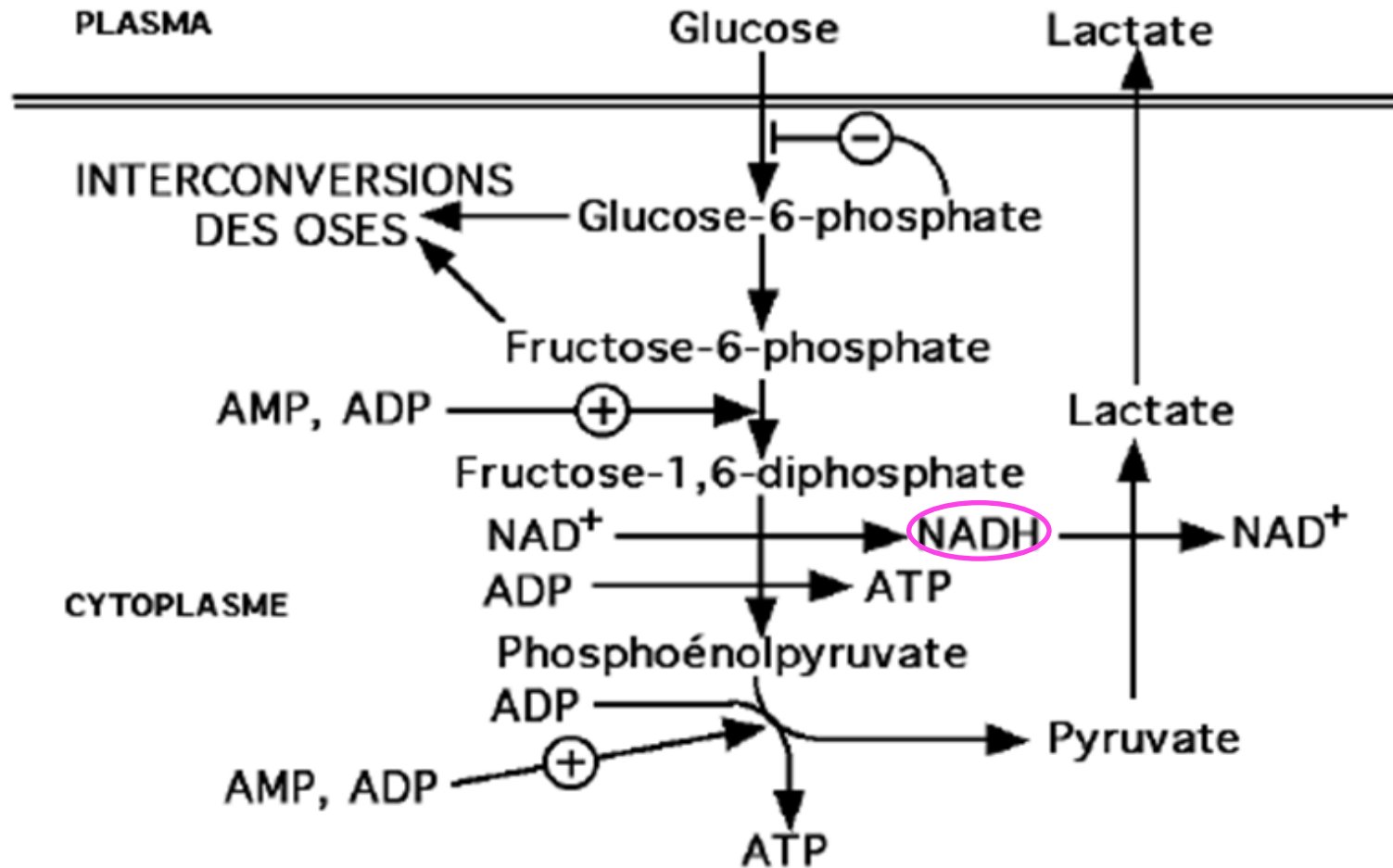
## Processus anaérobique

- levures et microorganismes
- organismes supérieurs

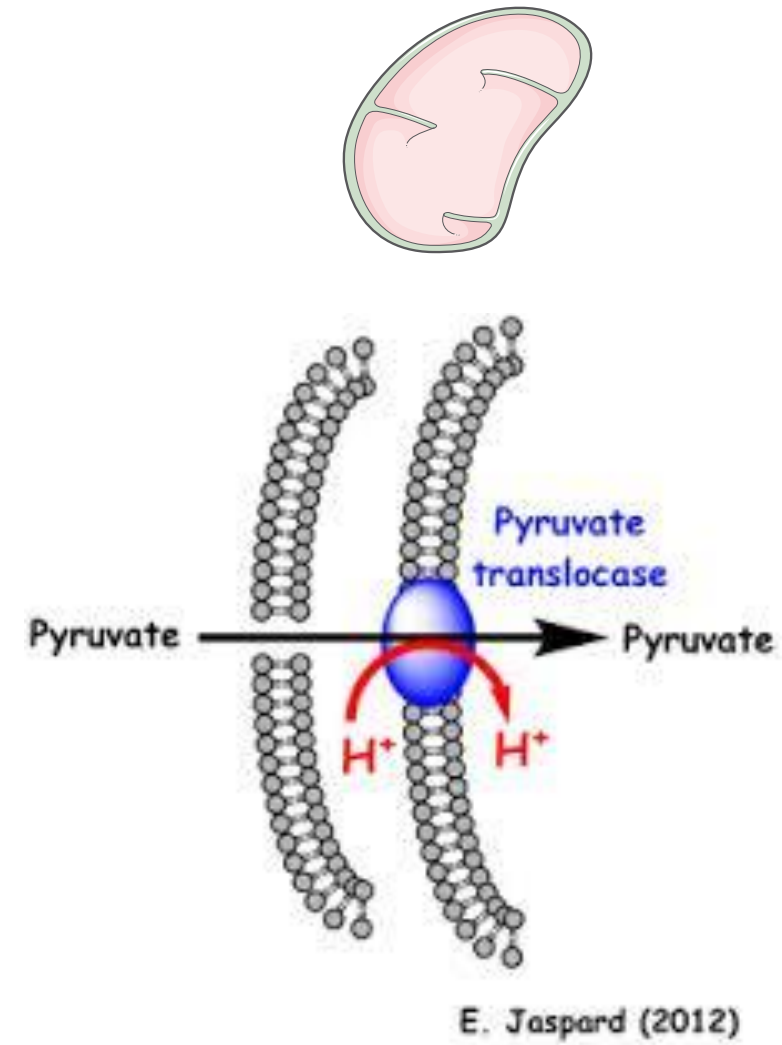
(manque d'O<sub>2</sub> : effort, anesthésie,...), voie obligatoire dans **GR**



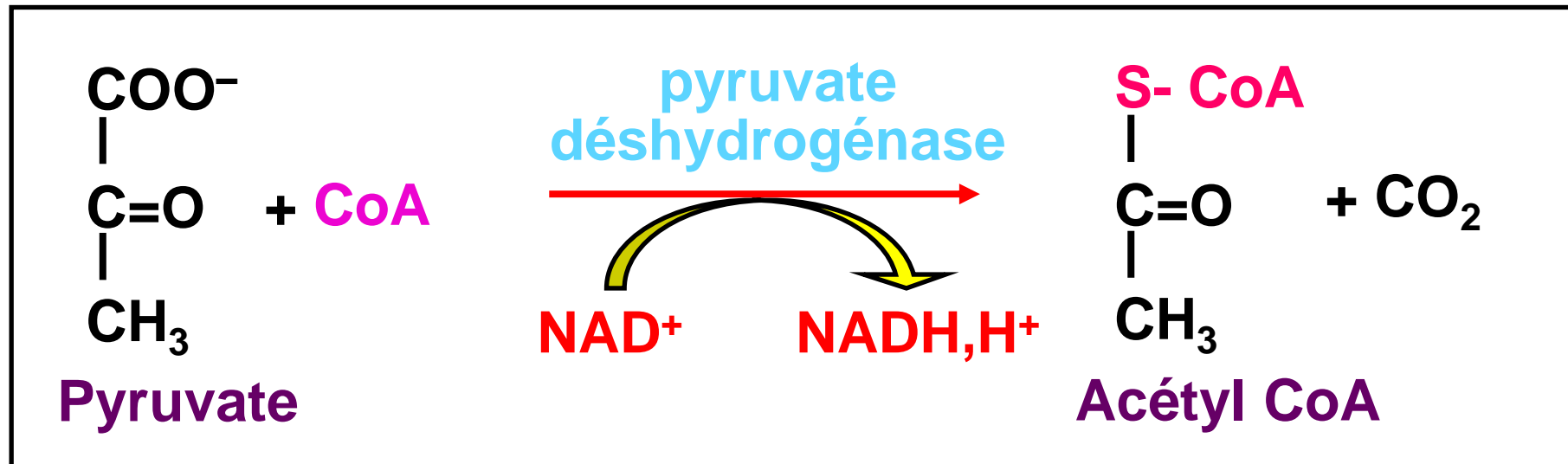
Permet la régénération du NAD<sup>+</sup> (voir étape Glycéraldéhyde-3- phosphate Déshydrogénase)



- **En aérobiose ( présence d'O<sub>2</sub>)**
    - Passage dans la mitochondrie
- Transport par une translocase couplé au passage d'un proton

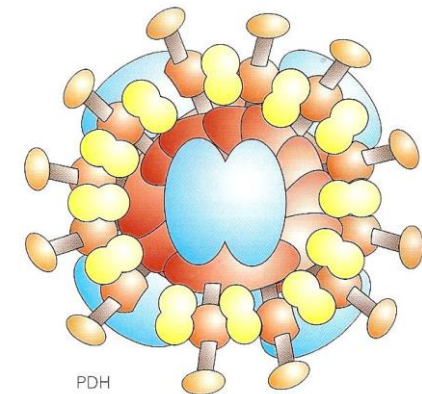
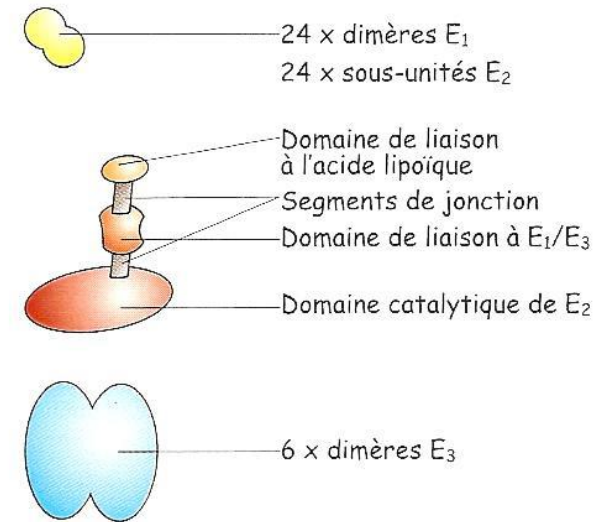


- **En aérobiose ( présence d'O<sub>2</sub>)**
  - Passage dans la mitochondrie
  - Décarboxylation oxydative → Acétyl CoA

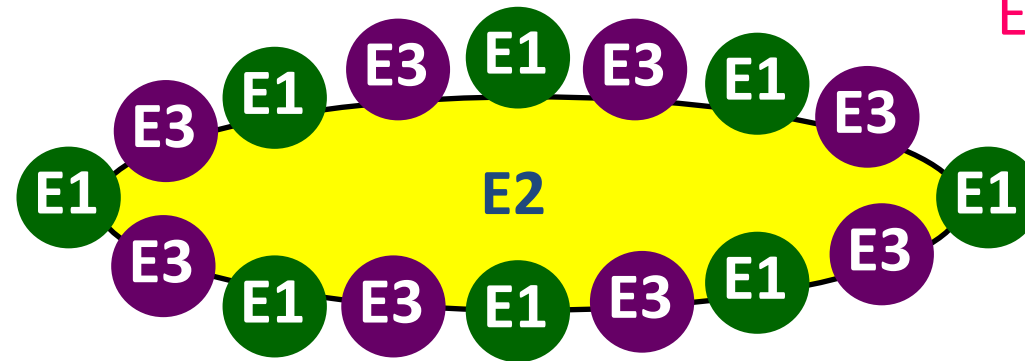


- **Étape irréversible**
- → Cycle de Krebs : **ATP**

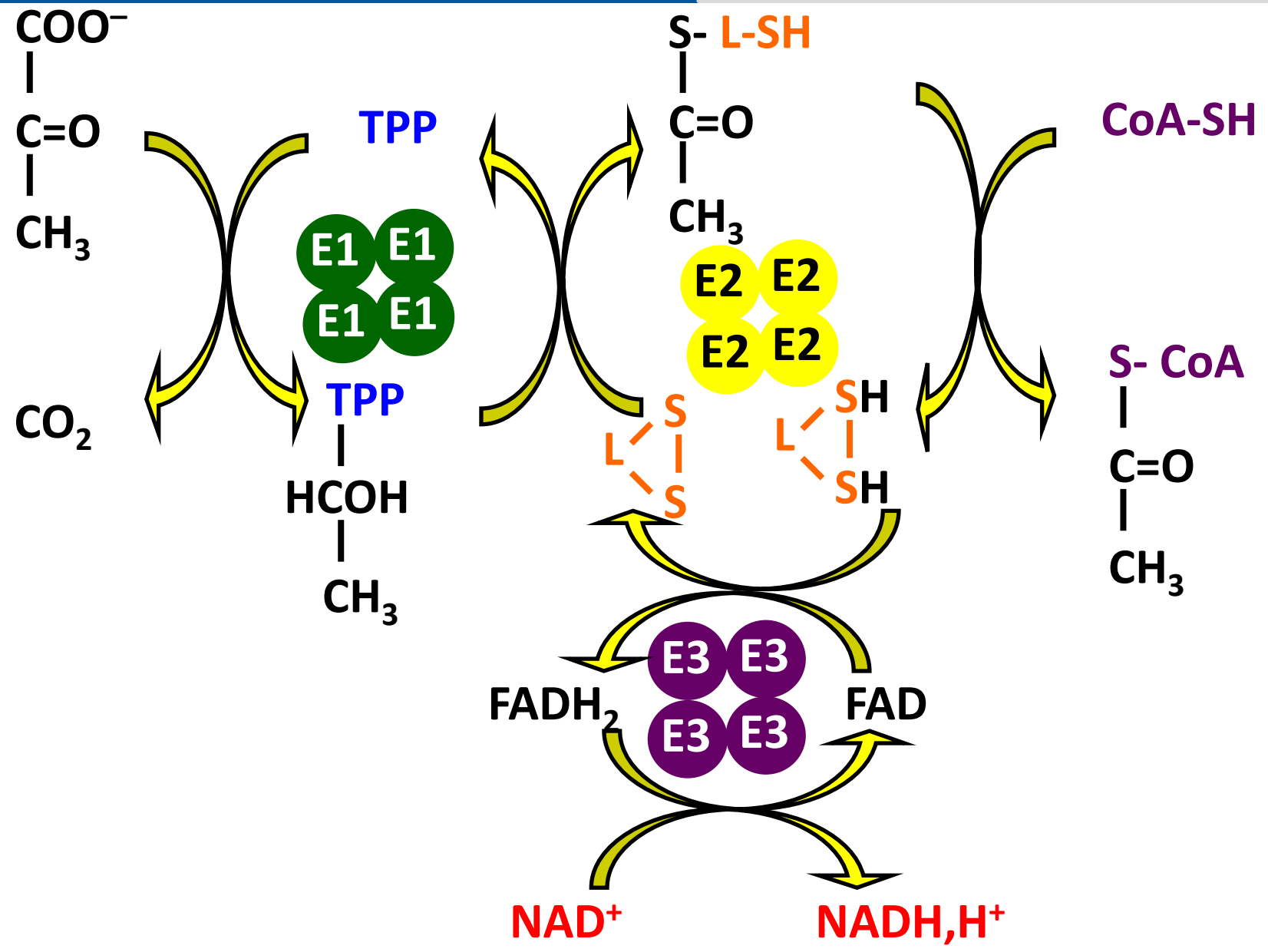
- **Matrice mitochondriale**
- **Complexe multienzymatique**
- **3 enzymes comportant de nombreuses sous unités (>60)**
  - E1: La pyruvate deshydrogenase (24)
  - E2: dihydrolipoyl transacétylase (24) au centre
  - E3: dihydrolipoate deshydrogénase (12)
- **nécessitant 5 coenzymes**
  - 4 sont des formes actives de la vitamine B
    - TPP thiamine pyrophosphate (B1)
    - FAD (B2)
    - CoA (B5)
    - NAD+ ( B3)



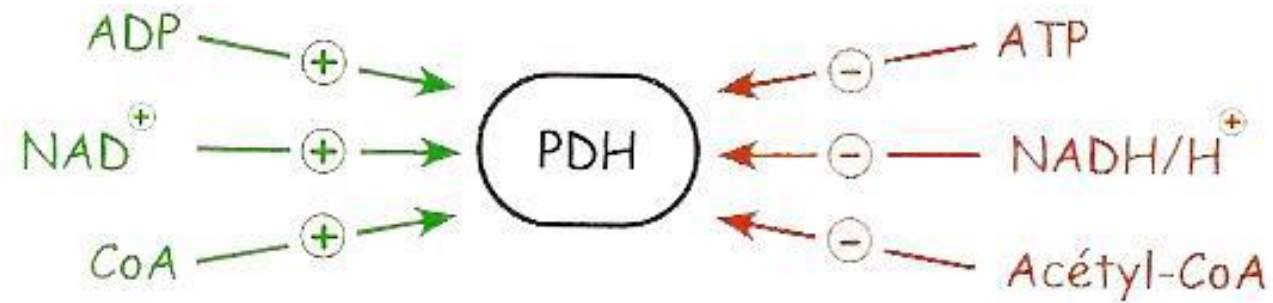
<i>Enzyme</i>	<i>Nbr de chaînes</i>	<i>Groupe prosthétique</i>	<i>Réaction catalysée</i>
<b>E1</b> Pyruvate déshydrogénase	24	Thiamine pyrophosphate	<b>Décarboxylation oxydative</b>
<b>E2</b> dihydrolipoyl transacétylase	24	Lipoamide	Transfert de l'acétyl au CoA
<b>E3</b> dihydrolipoyl	12	FAD	<b>Régénération de la forme oxydée de la lipoamide</b> Eq red captés FAD cédés au NAD







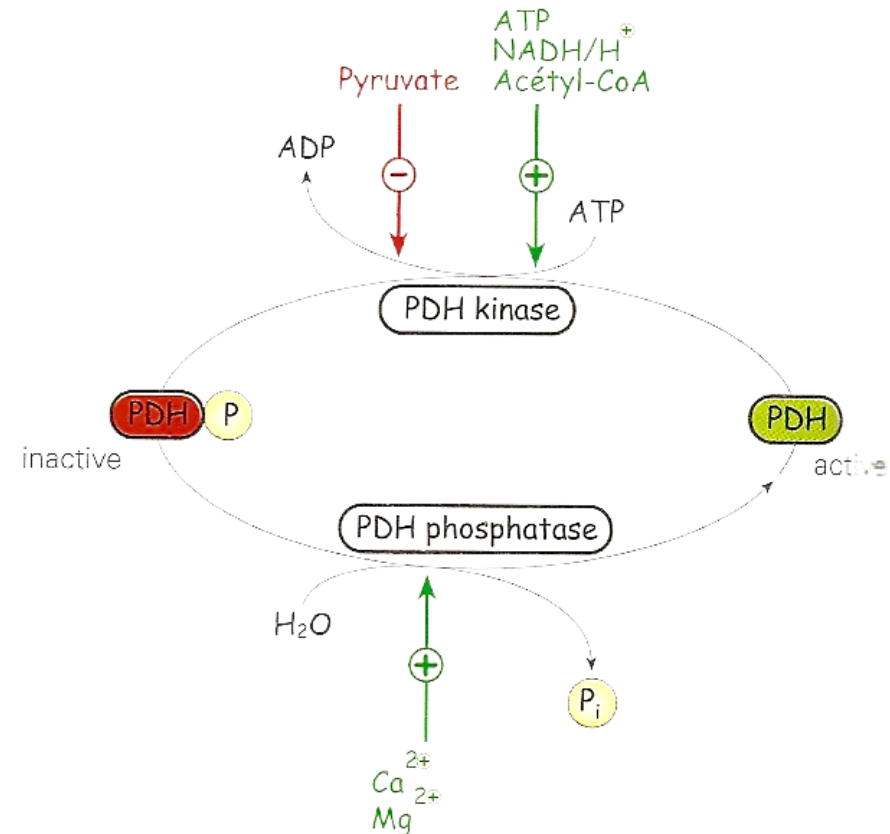
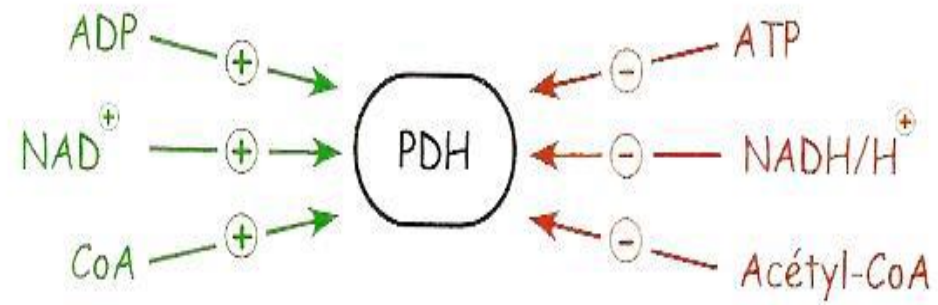
- Régulation de la PDH
  - Allostérique



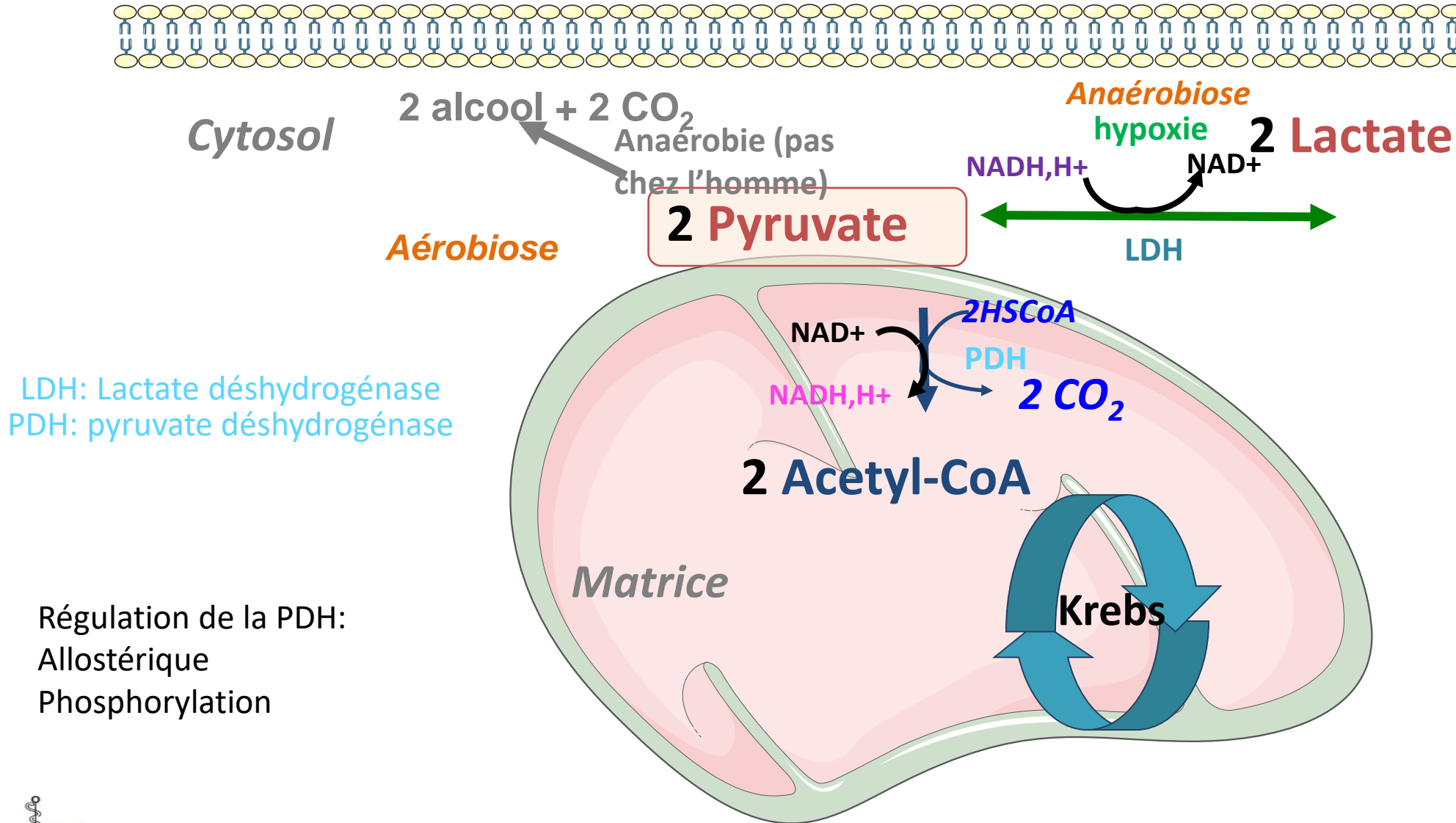
## • Régulation de la PDH

- Allostérique
- Phosphorylation

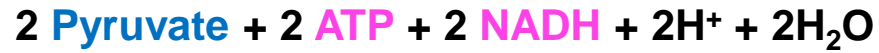
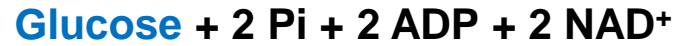
**Insuline** active une phosphatase qui va déphosphoryler la PDH la rendant active



# V- Devenir du pyruvate ?



# Take home messages

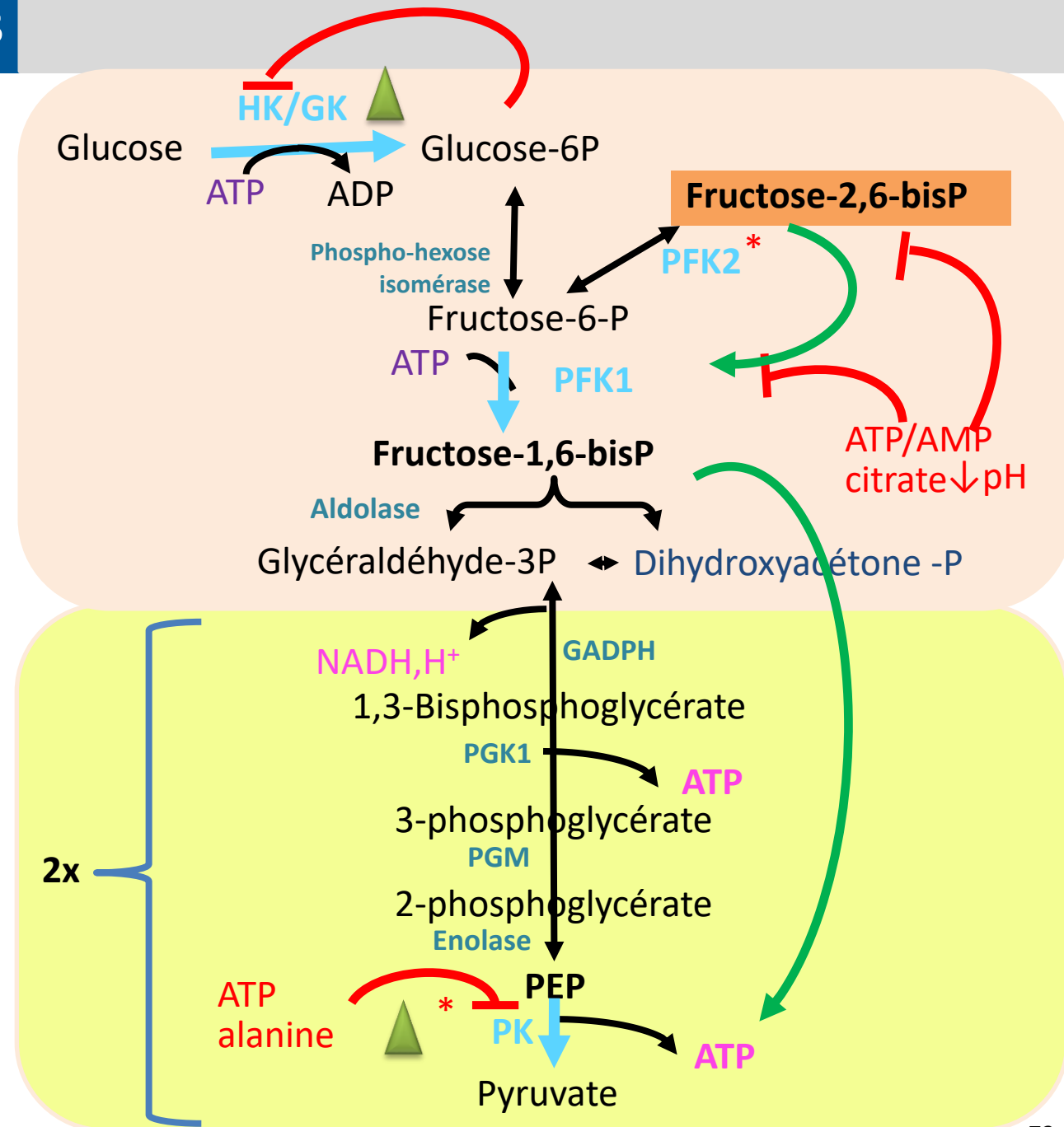


## 3 réactions irréversibles

Régulation allostérique

▲ inductible

\* (de)phosphorylation



- <https://www.youtube.com/watch?v=EfGlznwfu9U>

