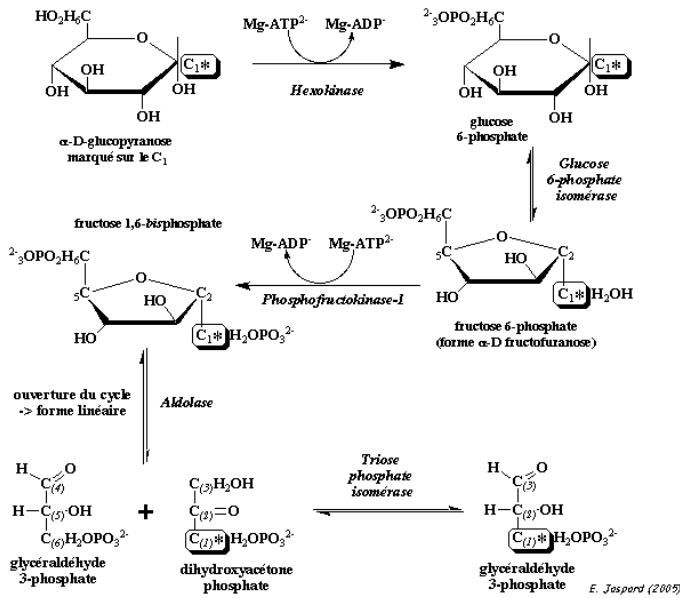


## La glycolyse chez les végétaux

1. Etapes de la glycolyse
  - a. Etapes de la glycolyse du glucose aux 2 trioses (le tronçon hexoses)
  - b. Etapes de la glycolyse du glyceraldéhyde 3-phosphate au pyruvate (tronçon trioses)
2. Régulation de la glycolyse
  - a. Rappel sur 2 étapes irréversibles qui régulent la glycolyse
  - b. Effecteurs et effet particulier de l'adénosine 5'-triphosphate ou ATP
3. Les co-enzymes de la glycolyse
  - a. L'adénosine 5'-triphosphate ou ATP
  - b. La la nicotinamide adénine dinucléotide ou NAD<sup>+</sup>
4. Particularité de la glycolyse chez les végétaux
  - a. Localisation cellulaire
  - b. Enzymes supplémentaires

### 1. Etapes de la glycolyse



Les chiffres entre parenthèses indiquent le numéro des carbones du fructose 1,6-bisphosphate.

### a. Etapes de la glycolyse du glucose aux 2 trioses (le tronçon hexoses)

1. Les réactions sont décrites telles qu'elles se déroulent dans la cellule :

- les réactions catalysées par les kinases sont **irréversibles**.
- les autres réactions se déroulent au voisinage de l'équilibre.

2. L'ATP est utilisé dans la cellule sous forme de **complexe entre Mg<sup>2+</sup> et ATP<sup>4-</sup>**.

- La charge globale est donc de 2 charges négatives.
- De la même manière, la charge globale de l'ADP est de 1 charge négative.

3. Aldolase : voir le détail du **mécanisme catalytique**

4. "Morale" du tronçon hexoses :

- il y a un investissement énergétique initial de 2 molécules d'ATP par molécule de glucose. Ceci peut sembler paradoxal pour une voie métabolique qui génère de l'énergie sous forme d'ATP.
- mais cette "mise initiale" est rentable. En effet, les deux carbones à l'extrémité de la chaîne du glucose (C1 et C6) sont phosphorylés, ainsi, les 2 trioses le sont également.

### b. Etapes de la glycolyse du glyceraldéhyde 3-phosphate au pyruvate (tronçon trioses)

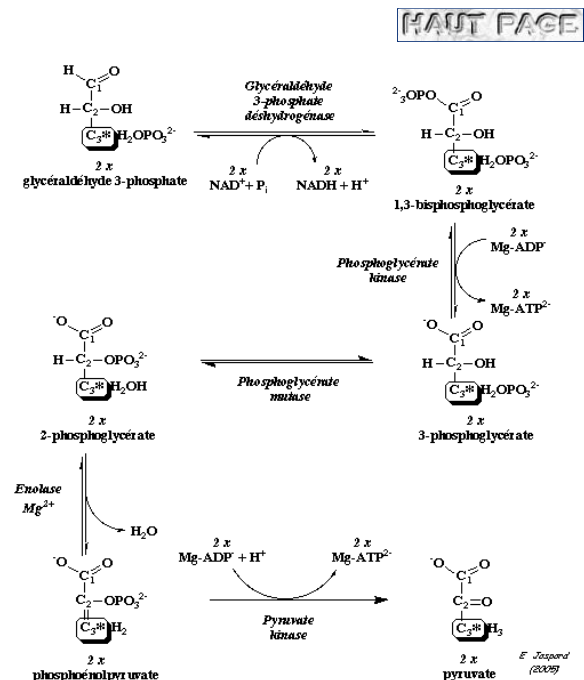
1. La suite de la glycolyse (le tronçon triose) implique le glyceraldéhyde-3-phosphate (formé directement ou formé à partir de la dihydroxyacétone-phosphate) :

- cependant, dans la cellule la proportion de triose-phosphate sous forme de dihydroxyacétone-phosphate est de ... 95% !
- cela souligne le rôle capital de la triose-phosphate isomérase qui doit fournir en glyceraldéhyde-3-phosphate la voie de la glycolyse.
- or, la triose-phosphate isomérase est l'une des rares enzymes dont la vitesse de catalyse est si élevée qu'elle n'a pour limite que la vitesse de diffusion (voir le **cours d'enzymologie** qui a trait aux paramètres cinétiques).

2. Les 2 trioses-phosphate issus du tronçon hexoses étant phosphorylés, chaque molécule de glyceraldéhyde-3-phosphate va permettre la formation de 2 molécules d'ATP.

3. Chez les animaux, il n'y a qu'une **réaction d'oxydo-réduction** dans la glycolyse (catalysée par la glyceraldéhyde 3-phosphate déshydrogénase).

En revanche **chez les plantes**, il y en a une **seconde**.



**Bilan de la glycolyse**



1er tronçon jusqu'à la formation des 2 trioses : 2 moles d'ATP consommées par mole de glucose.

2ème tronçon jusqu'au pyruvate : 4 moles d'ATP et 2 moles de (NADH + H+) formées par mole de glucose.

Caractéristiques des réactions et des enzymes de la glycolyse

Le bilan énergétique de la glycolyse est donc une synthèse NETTE de 2 molécules d'ATP par molécule de glucose.

Cela peut sembler "dérisoire" en regard de la synthèse d'ATP après la réoxydation des nucléotides réduits par la chaîne respiratoire.

Mais pour les organismes ANaérobies, c'est absolument essentiel ! Il s'agit de la fermentation.

HAUT PAGE

**2. Régulation de la glycolyse**

Rappel sur 2 étapes irréversibles qui régulent la glycolyse

Réactions catalysées par des enzymes à régulation allostérique :

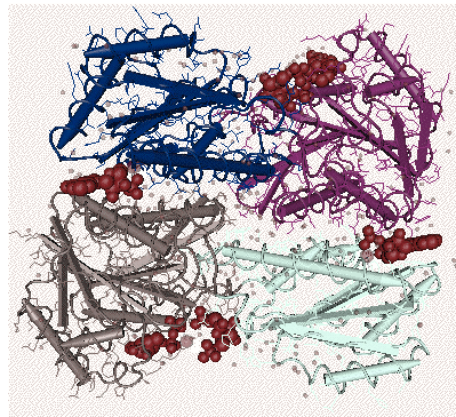
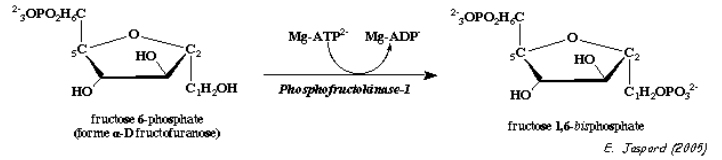
- la phosphofructokinase-1 (PFK-1 - E.C. 2.7.1.11)
- la pyruvate kinase (PK - E.C. 2.7.1.40)

La modulation de l'activité de ces enzymes est un moyen de contrôler le flux global de la glycolyse.

a. la phosphofructokinase-1 de *Escherichia coli* est un homotétramère (4 sous-unités identiques : bleue, rose, verte et marron sans la figure ci-contre) de 320 acides aminés.

L'activité de cette enzyme est régulée par la concentration de :

- ces substrats : ATP et fructose 6-phosphate
- de nombreux effecteurs liés à la production d'énergie (ATP) par la phosphorylation oxydative : le phosphoénolpyruvate, le phosphate inorganique, l'ADP, l'AMP et l'ATP lui-même, le citrate, le NADH.

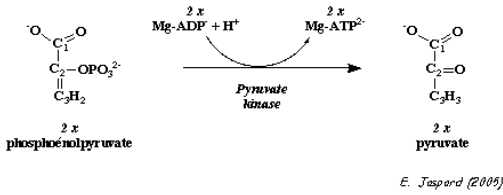


Structure de la phosphofructokinase dans l'état conformationnel R (*Escherichia coli*)

Y. Shirakihara & P. R. Evans (1988)

rouge : fructose-1,6-bisphosphate et ADP / orange : molécules de solvant

b. la pyruvate kinase



Effecteurs et effet particulier de l'adénosine 5'-triphosphate ou ATP

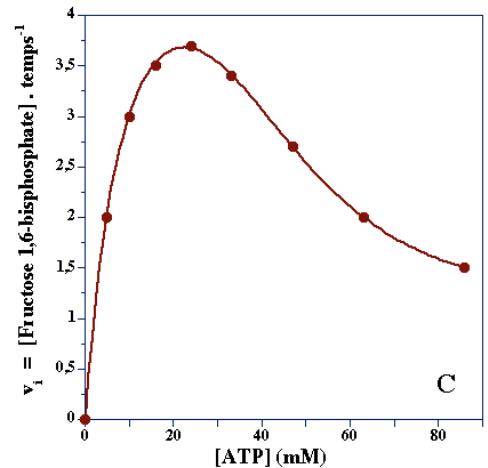
- la PFK est activée par l'ADP et l'AMP.
- la PFK est activée puis inhibée au fur et à mesure que la concentration d'ATP augmente.
- ainsi la PFK est plus active quand la cellule est dans un niveau de basse énergie et moins active dans le cas contraire.

L'ATP est donc un cas particulier : c'est l'un des deux substrats de la PFK mais c'est aussi un effecteur.

En effet la PFK-1 possède :

- un site de fixation de l'ATP en tant que substrat (effet homotrope)
- un site de fixation en tant qu'effecteur (effet hétérotrope)

Enfin, la pyruvate kinase (dernière étape de la glycolyse) est inactivée par de fortes concentrations en ATP.



HAUT PAGE

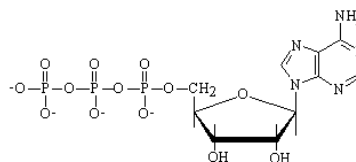
**3. Les co-enzymes de la glycolyse : ATP et NAD<sup>+</sup>**

a. L'adénosine 5'-triphosphate ou ATP

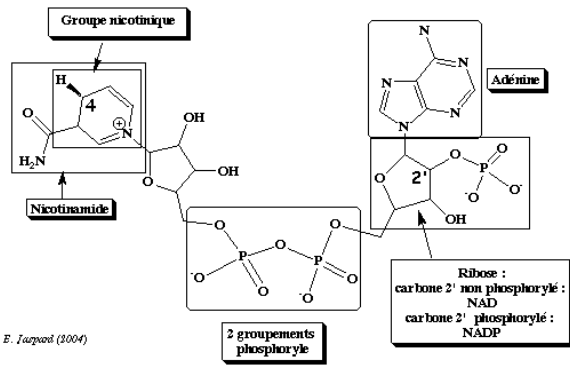
L'ATP est un triphosphate de nucléoside dans lequel :

- une liaison ester phosphate relie le phosphate α à l'oxygène 5' du ribose
- une liaison phosphoanhydride relie les phosphates α et β et β et γ

Voir hydrolyse de l'ATP.



Source : "The Metabolic Pathways of Biochemistry"



**b. La la nicotinamide adénine dinucléotide ou NAD<sup>+</sup>**

Dans un très grand nombre de réactions d'oxydo-réduction qui ont lieu dans la cellule, les électrons sont transférés par des coenzymes. Dans le cas de la glycolyse, il s'agit de la nicotinamide adénine dinucléotide ou NAD<sup>+</sup>.

- ce coenzyme contient de la nicotinamide qui est l'amide de l'acide nicotinique
- il contient une liaison phosphoanhydride qui relie deux nucléotides : l'adénosine monophosphate, qui provient de l'ATP, et le ribonucléotide de nicotinamide appelé nicotinamide mononucléotide

Dans la structure du NADP<sup>+</sup> et du NADPH, un groupe phosphorylé supplémentaire substitue l'hydrogène de l'hydroxyle situé en position 2' du ribose lié à l'adénine.

Lors des **réactions de réduction**, le groupe nicotinamide de ces coenzymes capte un ion hydrure H<sup>-</sup> selon un mécanisme qui un exemple remarquable de la très haute **stéréospécificité** des réactions catalysées par les enzymes appelées **déshydrogénases**.

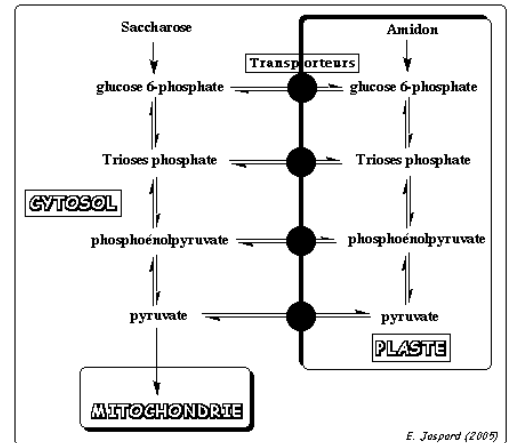
HAUT PAGE

**4. Particularité de la glycolyse chez les végétaux**

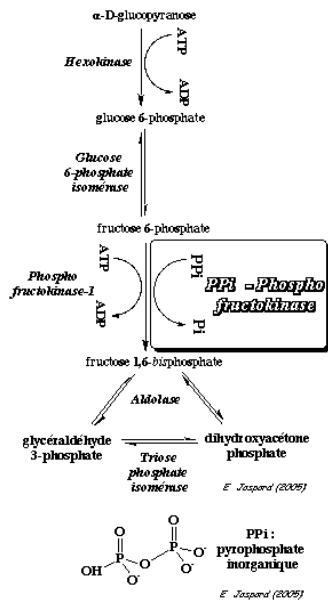
**a. Localisation cellulaire**

La glycolyse chez les végétaux présente des particularités qui assurent une plus grande flexibilité du métabolisme (adaptation à l'environnement).

La glycolyse a lieu dans 2 compartiments cellulaires : le cytosol **et les plastes**. Les métabolites passent d'un compartiment à l'autre via des **transporteurs** membranaires.



**b. Enzymes supplémentaires**

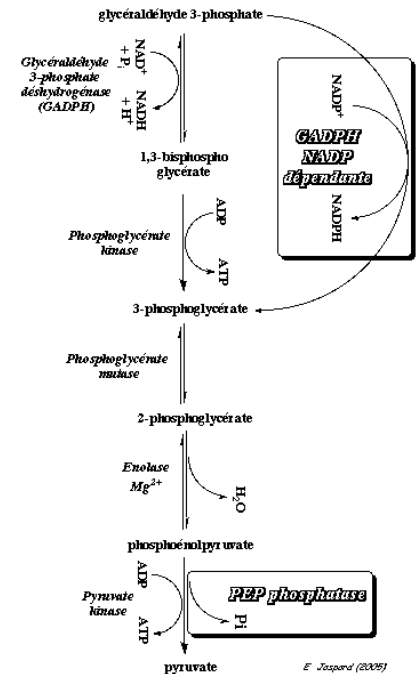


**Tronçon hexoses (Figure de gauche) :**

- la **pyrophosphate inorganique (PPi) - phosphofruktokinase** catalyse la conversion du fructose 6-phosphate en fructose 1,6-bisphosphate. Elle duplique donc l'action de la phosphofruktokinase-1.

**Tronçon trioses (Figure de droite) :**

- la **glyceraldéhyde 3-phosphate déshydrogénase (GAPDH) NADP dépendante** catalyse la conversion directe du glyceraldéhyde 3-phosphate en 3-phosphoglycérate. Elle pourrait jouer un rôle dans le cas d'une carence en phosphate inorganique (Pi).
- la **phosphoenolpyruvate (PEP) - phosphatase** catalyse la conversion du phospho - énoypyruvate en pyruvate. Elle duplique donc l'action de la pyruvate kinase. Elle pourrait jouer un rôle dans le cas d'une carence en phosphate.



HAUT PAGE