

LA BIOÉNERGÉTIQUE

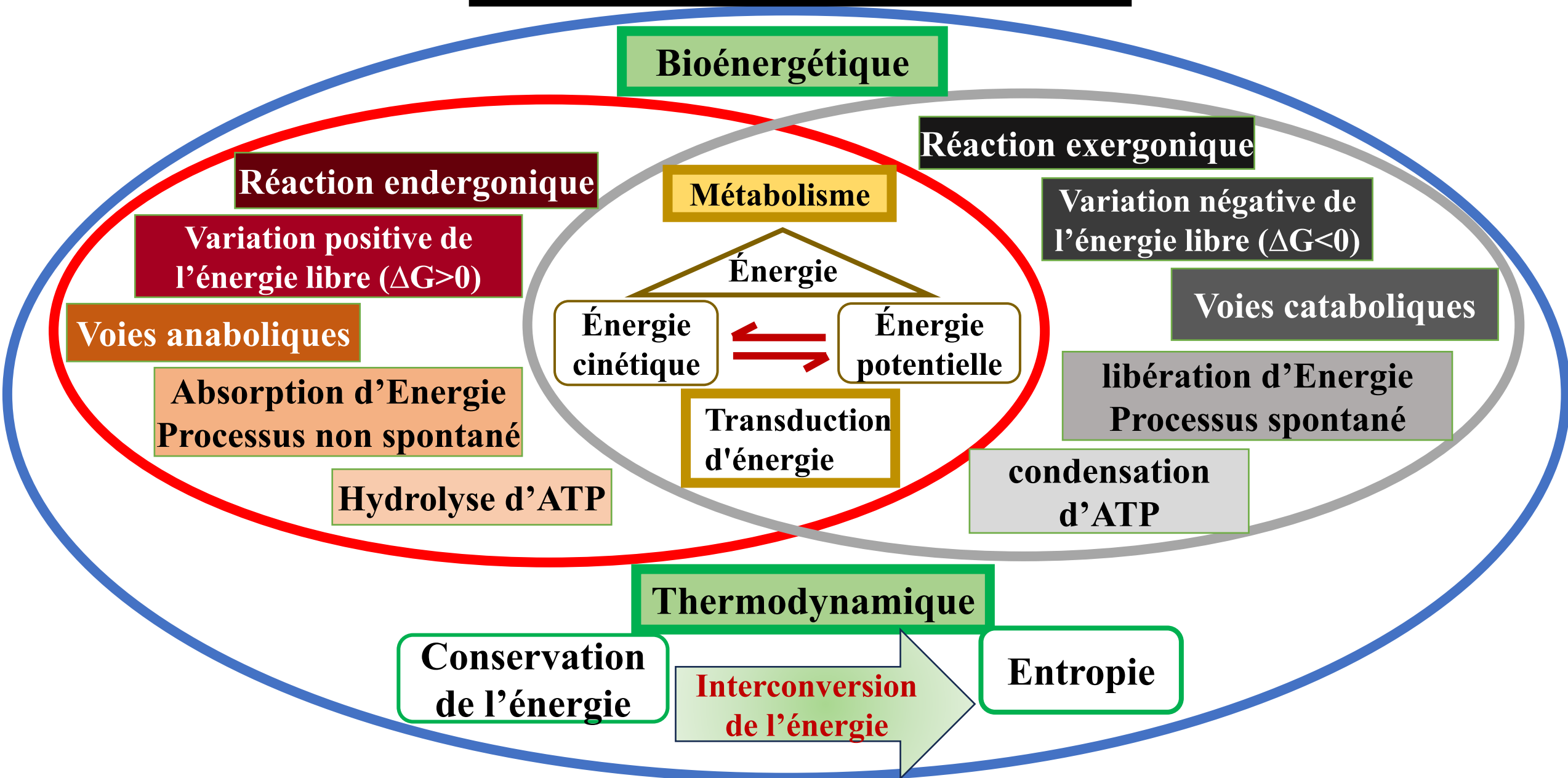
L'Énergie Et Les Réactions Chimiques Dans Un Organisme Vivant + La Respiration Cellulaire

Cours de Cytophysiologie, destiné aux étudiants de : Première Année Docteur en Médecine Vétérinaire

Élaboré par : Dr. Allaoui Assia

Maitre de conférences A – Maitrise des facteurs de la reproduction chez les Herbivores

Cellule vivante= système ouvert



Concepts clés

- Les organismes vivants obéissent aux lois universelles de :

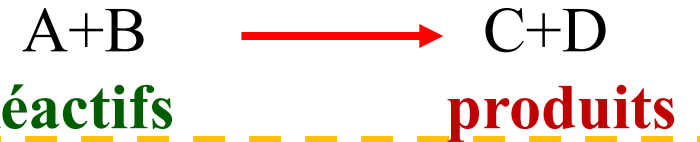
- La **conservation** de l'énergie

- La **conversion** de l'énergie

Bioénergétique = Thermodynamique
biochimique

- Changement chimique

Voies métaboliques



- Le soleil et la source fondamentale d'énergie pour la plupart des organismes vivants:

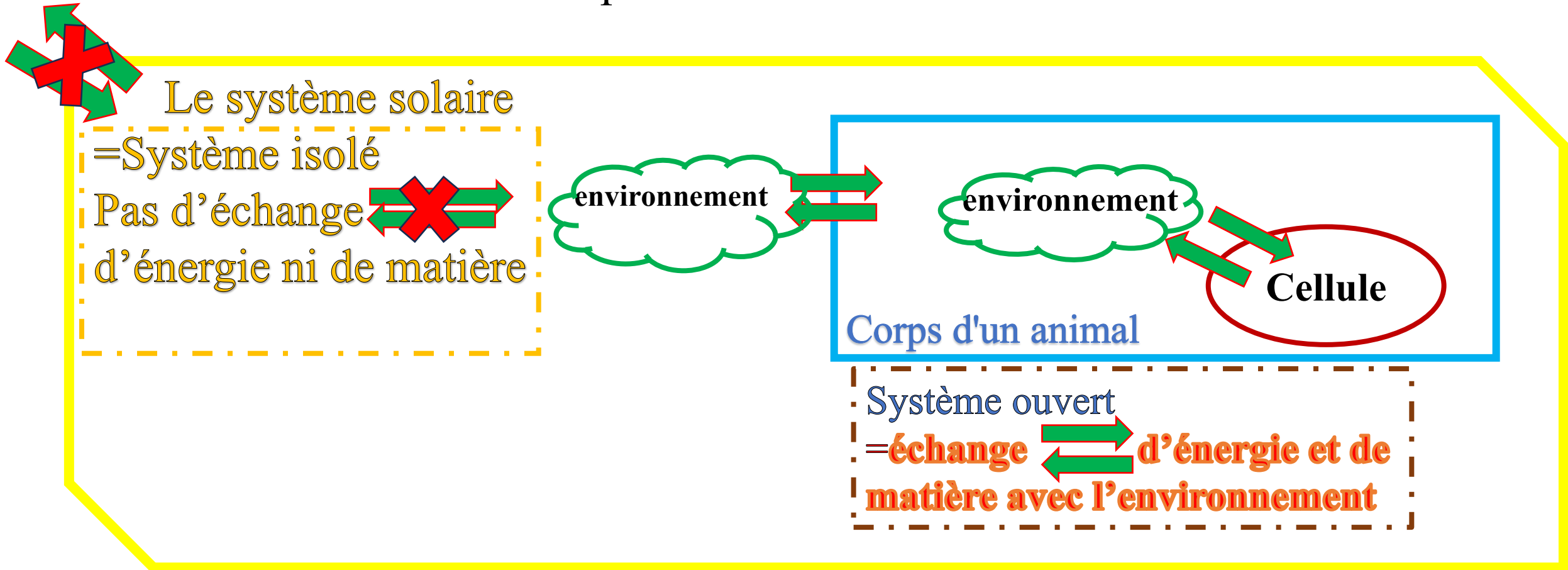
- Les organismes autotrophes photosynthétiques (plantes) tirent leur énergie du rayonnement solaire pour transformer le CO₂ atmosphérique en O₂ et en **composés organiques**.

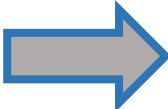
- Les Êtres Hétérotrophes (Homme et Animaux) utilisent ces composés (principalement les hydrates de carbone) comme source d'énergie.

Concepts clés

Systeme

≡ Une combinaison de composantes fonctionnant ensemble.



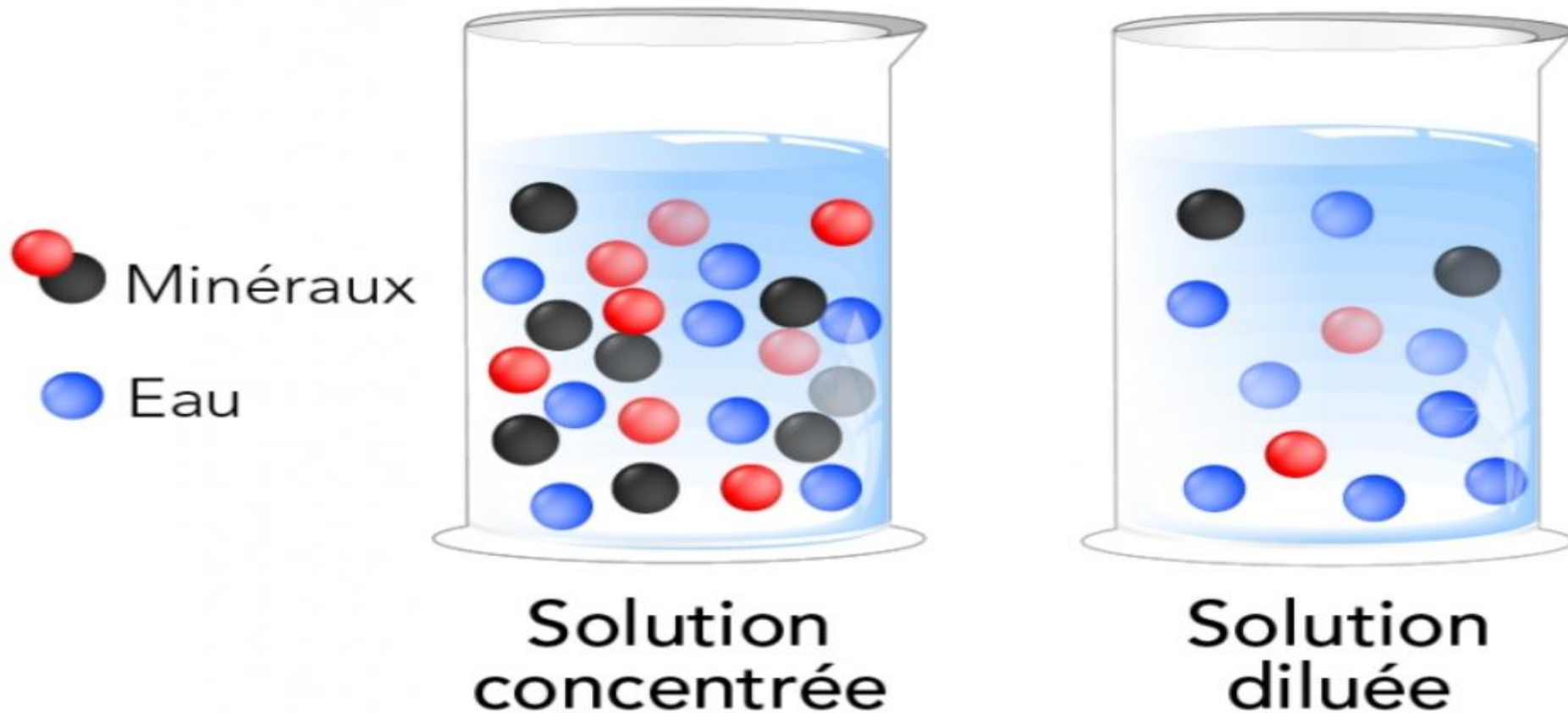
 Un **métabolite** est une substance organique formée au cours du métabolisme ou qui y participe.

- **Le glycogène est un métabolite de réserve,**
- **Le glucose est un métabolite central du métabolisme.**
- **L'ATP est un métabolite énergétique central.**

- **Le NaCl n'est pas un métabolite**

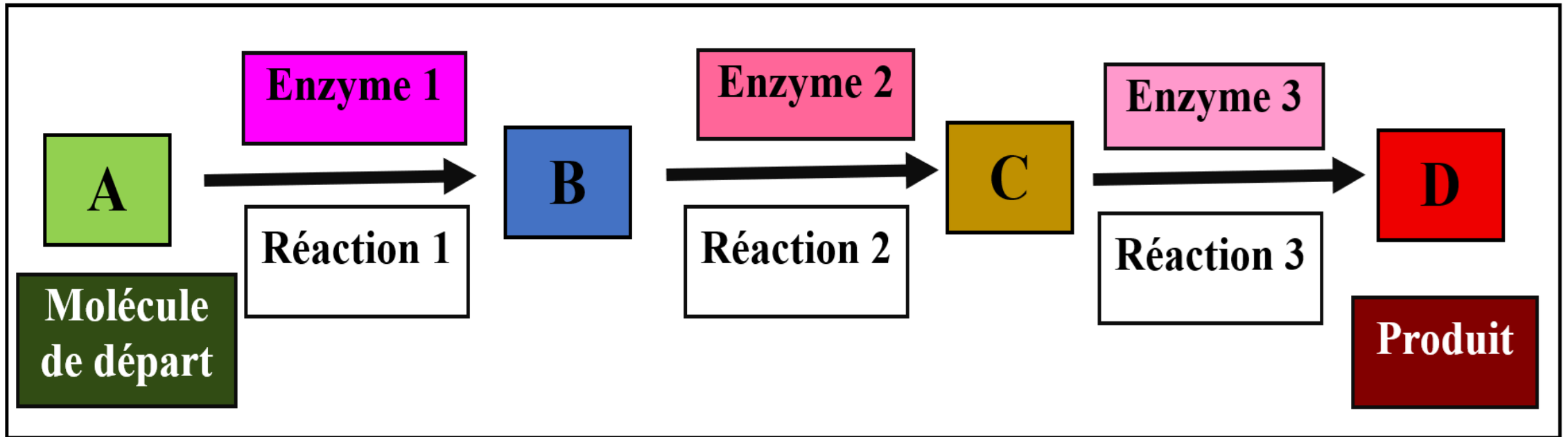
 Le **métabolite** est une molécule **organique** qui est **synthétisée, transformée ou dégradée** par des **réactions enzymatiques** du métabolisme.

Un **soluté** est une substance qui peut se dissoudre dans un **solvant**.
Les substances qui ont cette propriété sont dites « solubles »



Métabolisme (du grec *metabolê* « changement »)

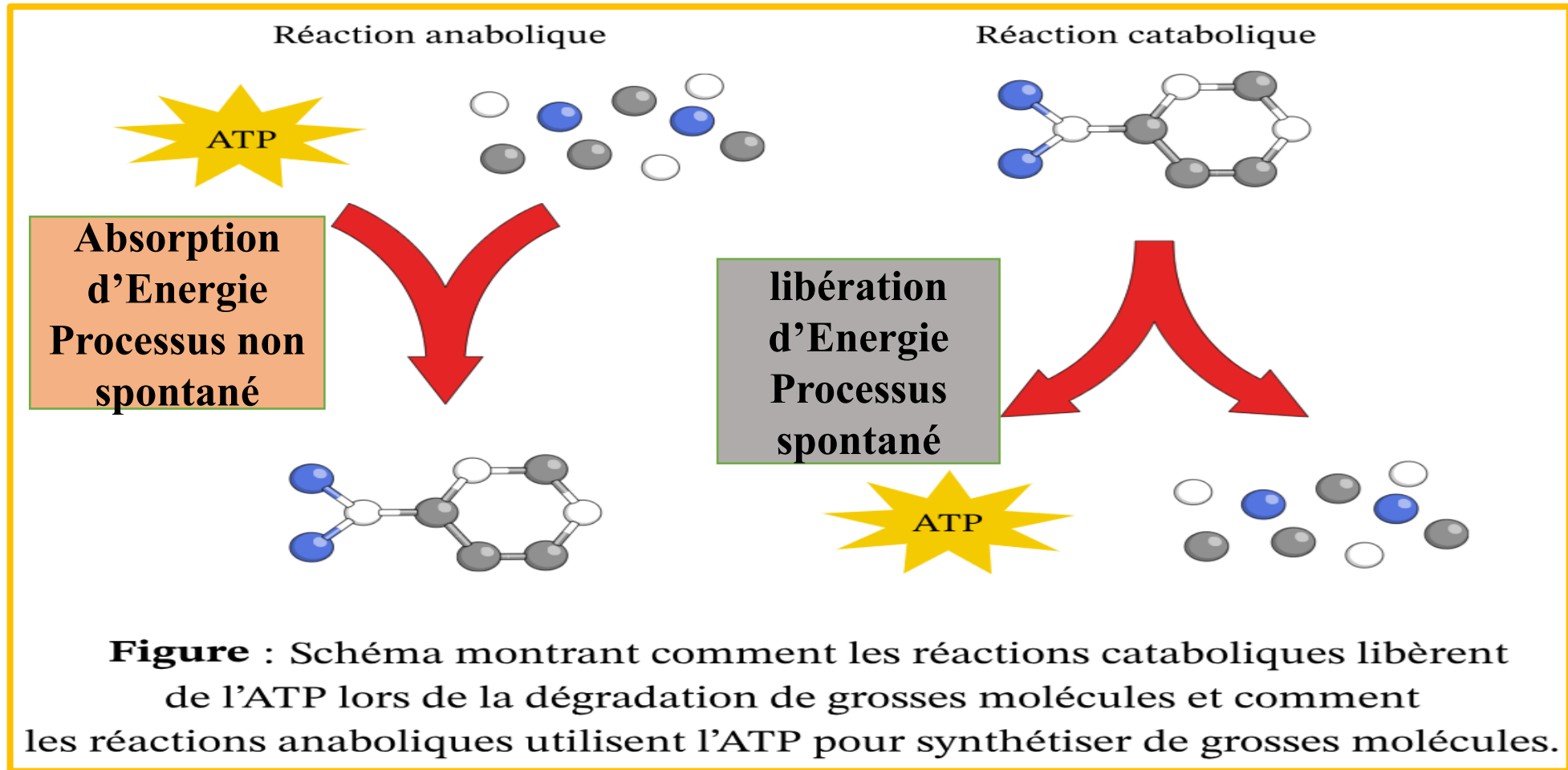
 Ensemble des réactions biochimiques d'un organisme



Métabolisme $\equiv$ voies anaboliques $+$ voies cataboliques

gérer
les ressources
énergétiques
et matérielles
de la cellule

Réactions endergoniques | **Réactions exergoniques!**



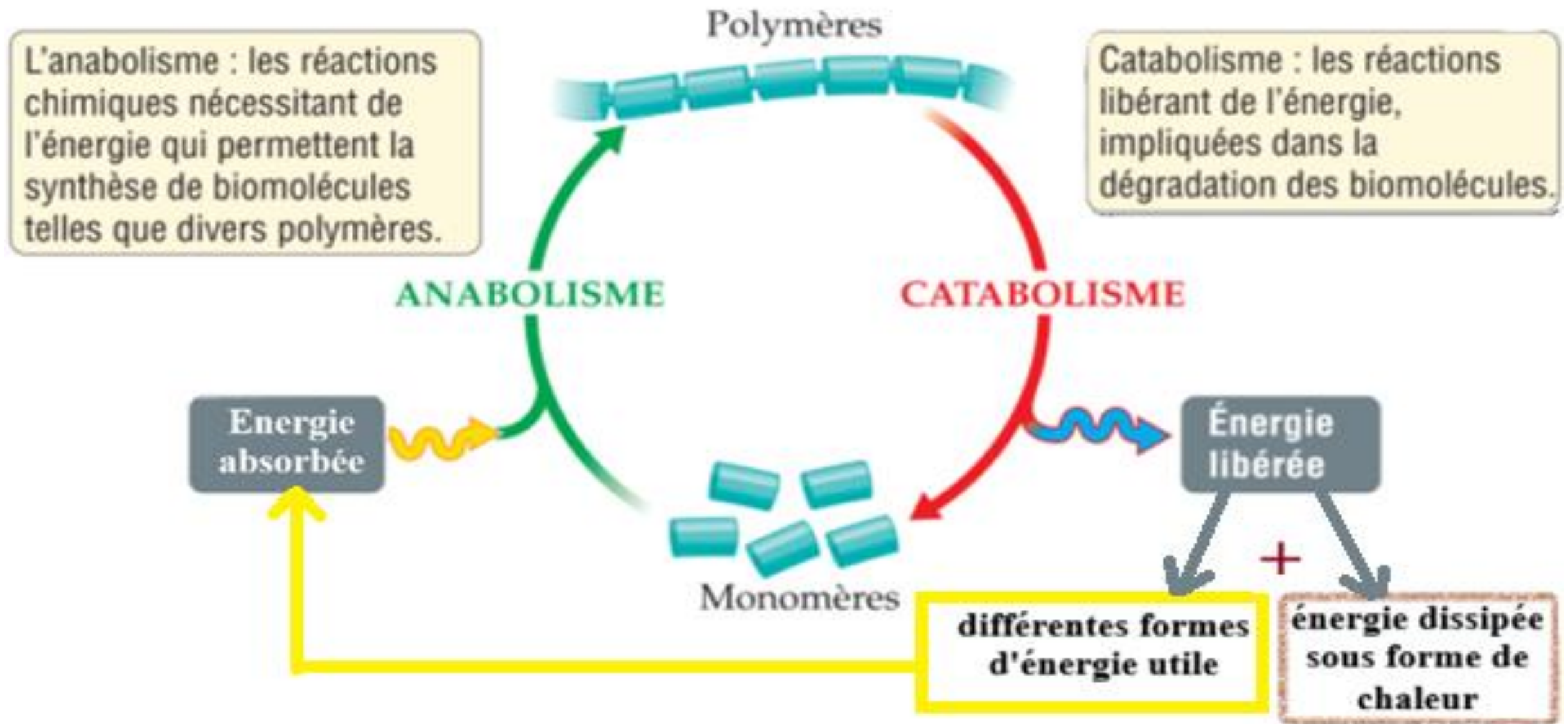
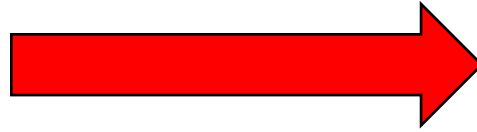


Figure : Représentation schématique de la relation entre les voies cataboliques et anaboliques du métabolisme. Comme indiqué ici, une grande partie de l'énergie libérée par les réactions cataboliques est dissipée sous forme de chaleur.

Voies cataboliques



Ensemble des réactions métaboliques qui dégradent les molécules en unités plus petites.

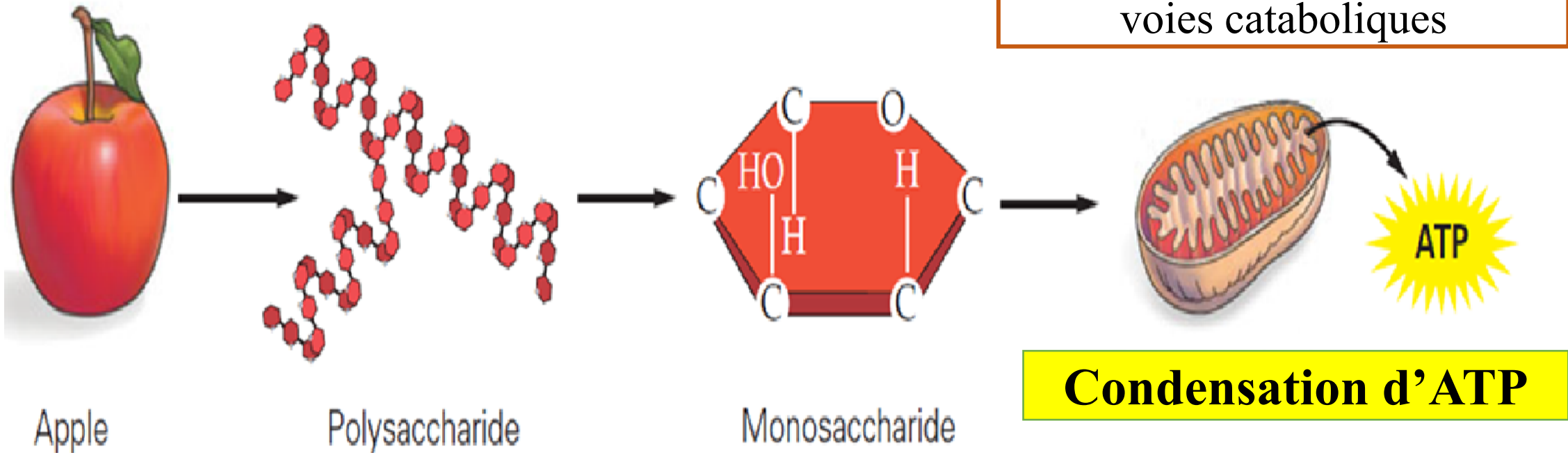


Réactions exergoniques



Le catabolisme libère de l'ATP

La respiration cellulaire est une des principales voies cataboliques



Condensation d'ATP

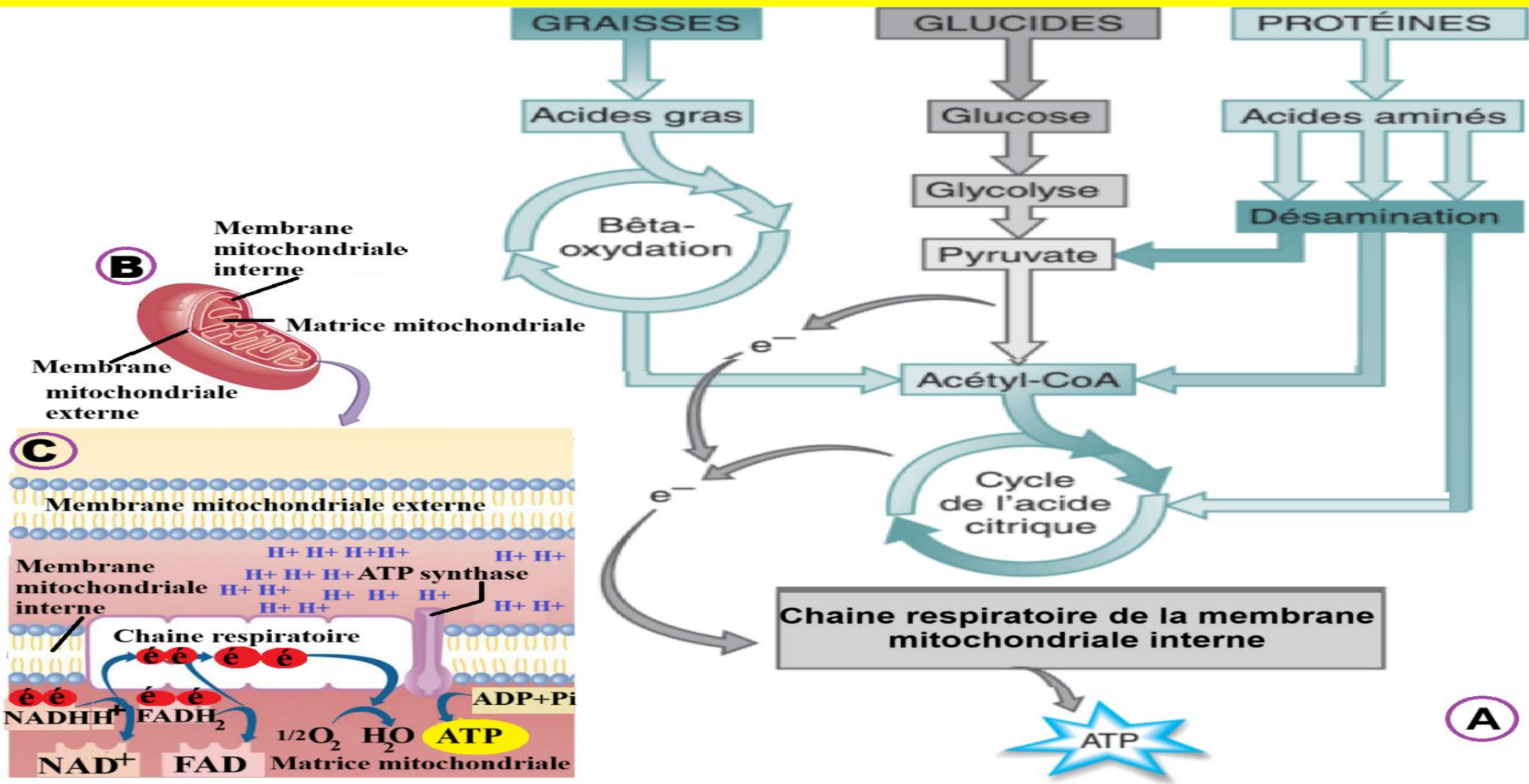
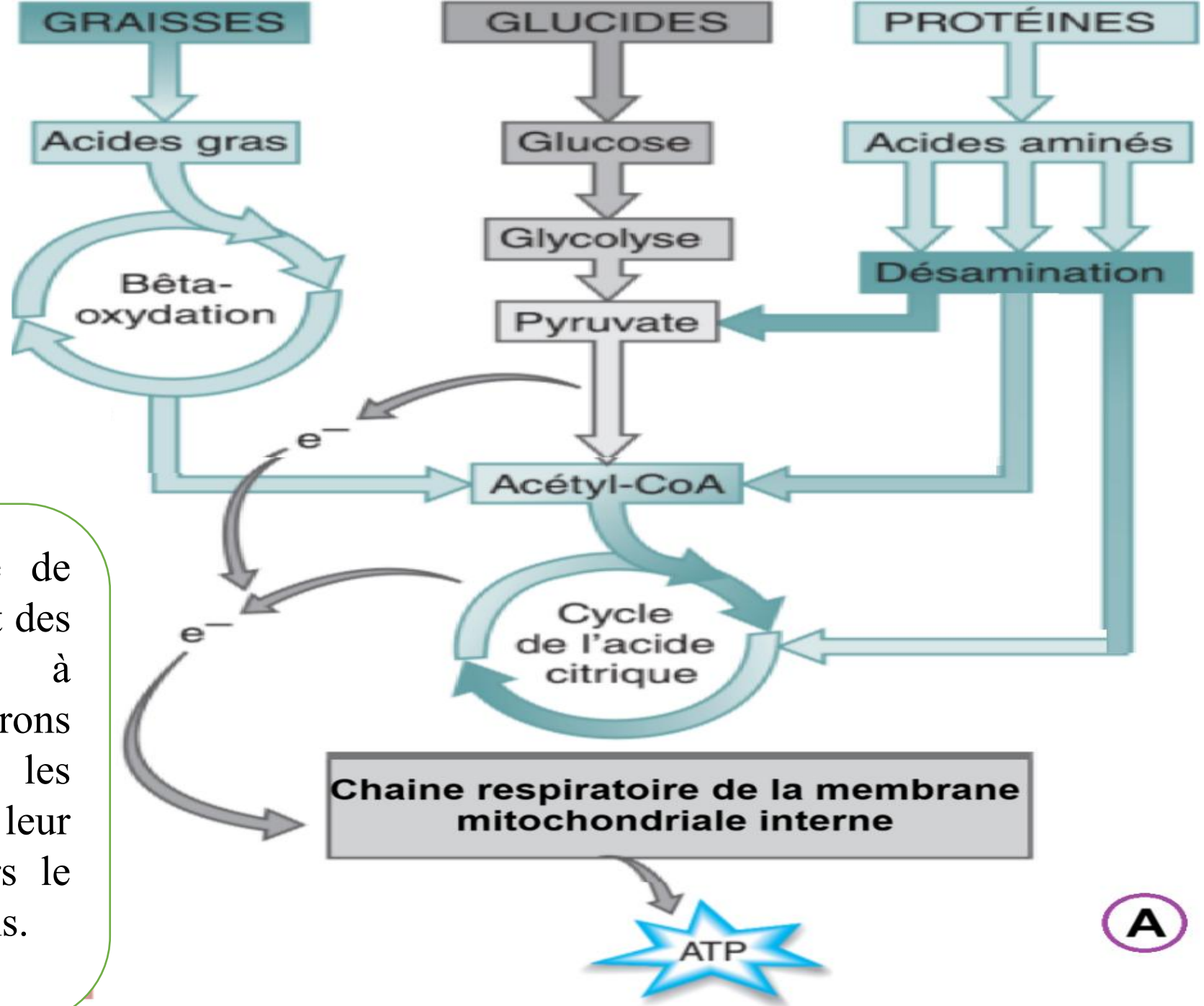


Figure : Métabolisme aérobie des macronutriments

Les glucides, les lipides et les protéines peuvent servir de **combustibles** pour la respiration cellulaire.

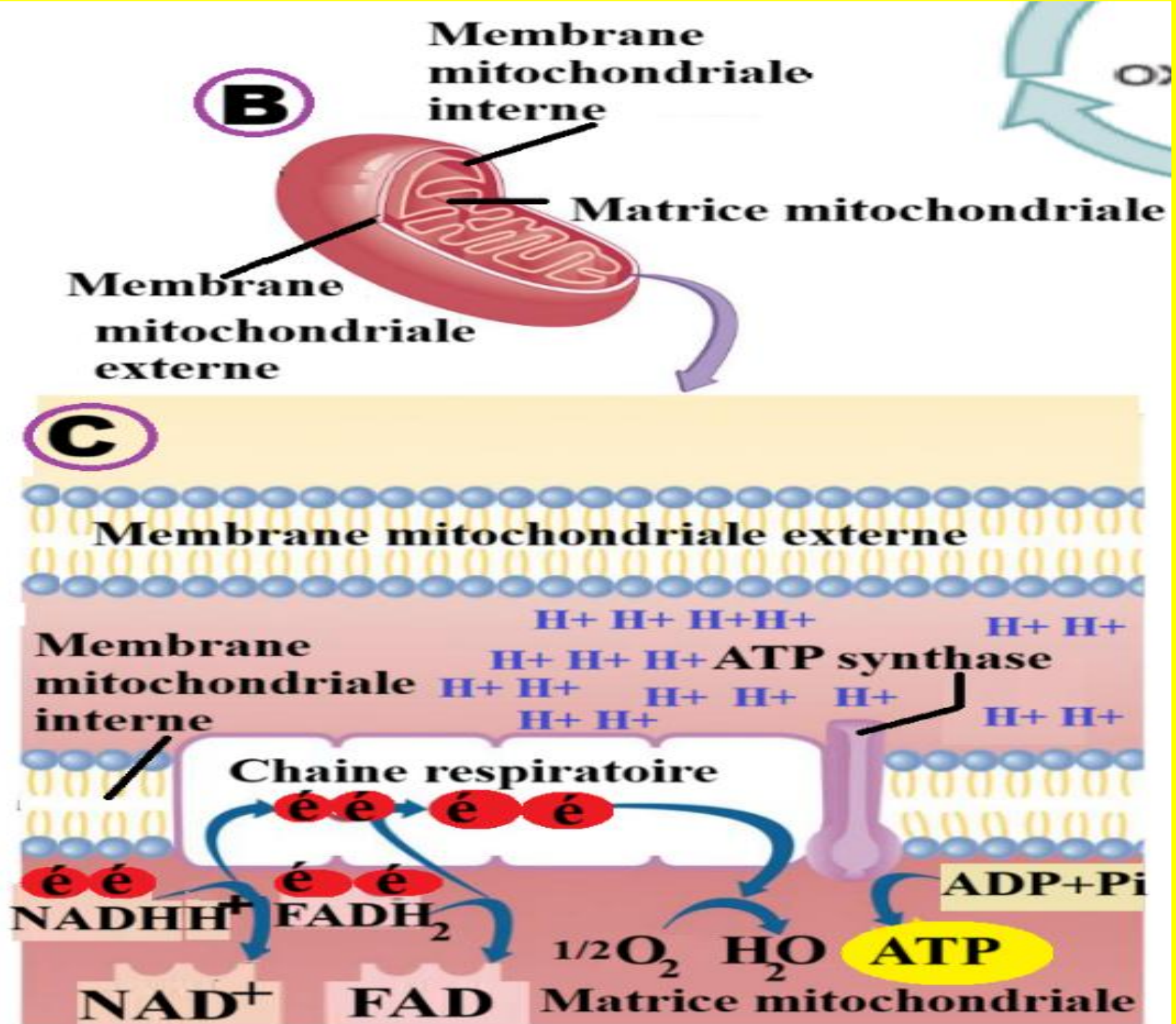
Leurs monomères entrent dans la glycolyse ou dans le cycle de l'acide citrique en divers points.

La glycolyse et le cycle de l'acide citrique représentent des **entonnoirs cataboliques** à travers lesquels les électrons provenant de tous les nutriments amorcent leur **descente exergonique** vers le dernier accepteur d'électrons.

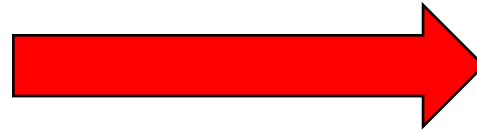


Chaîne respiratoire=Chaîne de transport des électrons=Chaîne de la phosphorylation oxydative.

En présence d'oxygène la chaîne de transport des électrons et le complexe ATP synthase permettent la production de la majeure partie de l'ATP disponible au niveau de la cellule, à partir de la dégradation complète du glucose ainsi que celle des graisses et des acides aminés



Voies anaboliques

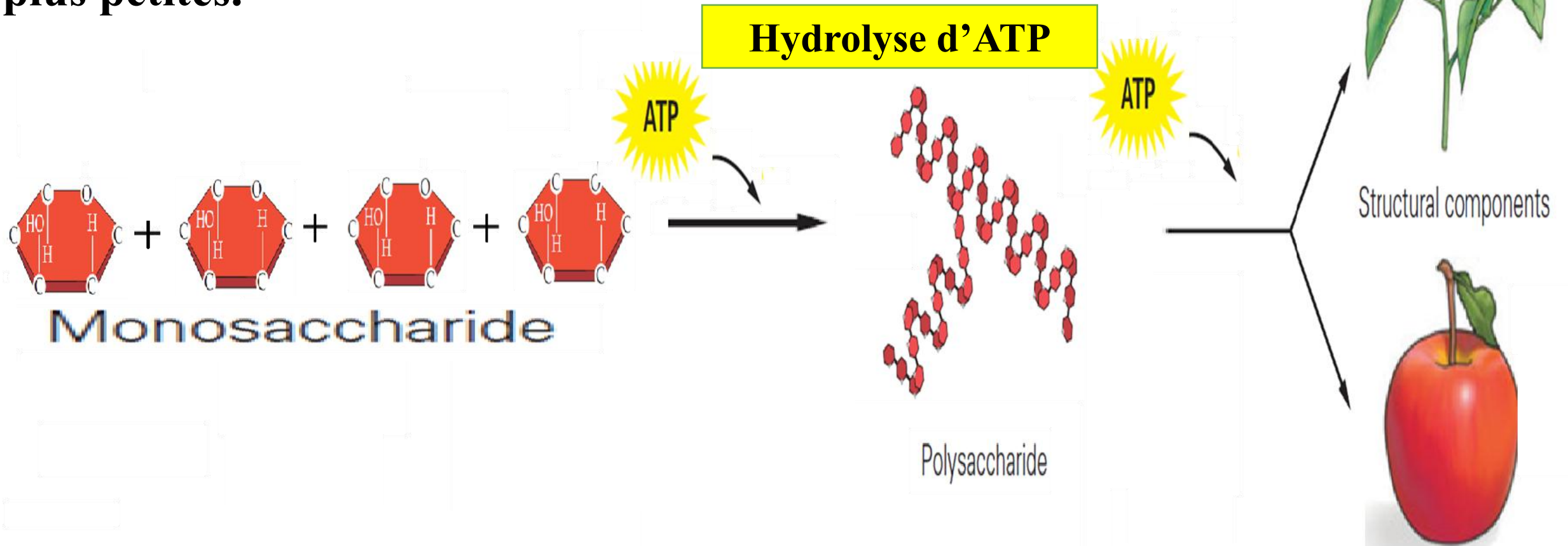


Réactions endergoniques



Ensemble des réactions métaboliques qui synthétisent des molécules à partir d'unités plus petites.

L'anabolisme absorbe de l'ATP



Bioénergétique

- **Bio-** (du grec *bios*) : **Vie, vivant**, relatif à la vie.
- **Énergétique** (du grec *energetikos*, dérivé de *energeia*, **action, force**)

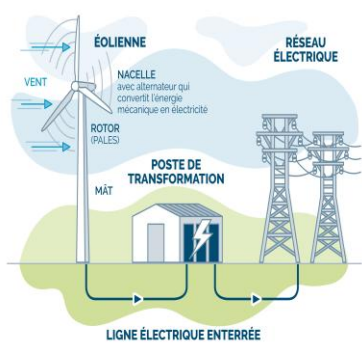
≡ Origines , **transductions** transferts et utilisations de l'énergie au sein des organismes vivants



Utilisation d'énergie.

Ce colibri puise son énergie dans le nectar des fleurs. Il utilise l'énergie chimique stockée dans cette nourriture pour voler et accomplir ses autres activités.

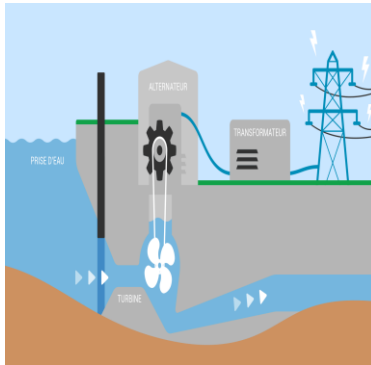
Transduction d'énergie



Énergie éolienne



Énergie solaire



Énergie hydraulique



Énergie électrique



Énergie mécanique
Énergie lumineuse
Énergie thermique

Lumière solaire

Les végétaux=êtres autotrophes (producteurs) absorbent l'énergie lumineuse et la transforment en énergie chimique.

Energie chimique

L'énergie chimique contenue dans les aliments est transférée des Etres autotrophes aux Etres hétérotrophes.

Les fibres musculaires d'un animal convertissent l'énergie chimique contenue dans les aliments en énergie cinétique, ou énergie du mouvement.

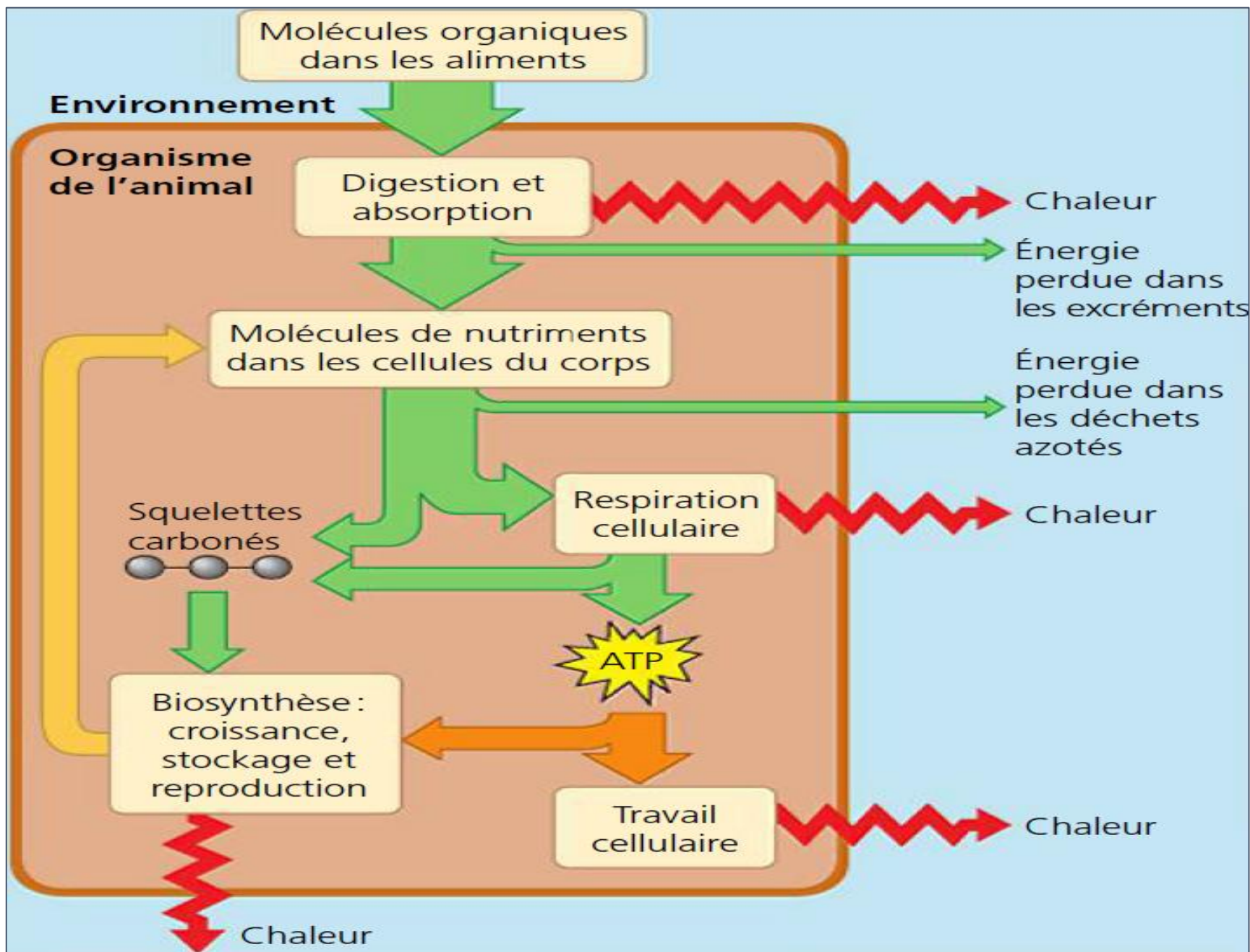
Chaleur

Une partie de l'énergie utilisée pour accomplir une tâche est convertie en énergie thermique, qui se dissipe sous forme de chaleur.

Les cellules des végétaux utilisent l'énergie chimique pour accomplir un travail, par exemple produire de nouvelles feuilles.

Figure: La circulation de l'énergie dans un écosystème.

En voie de disparition, ce colobe bai (*Piliocolobus badius*) vit en Tanzanie.



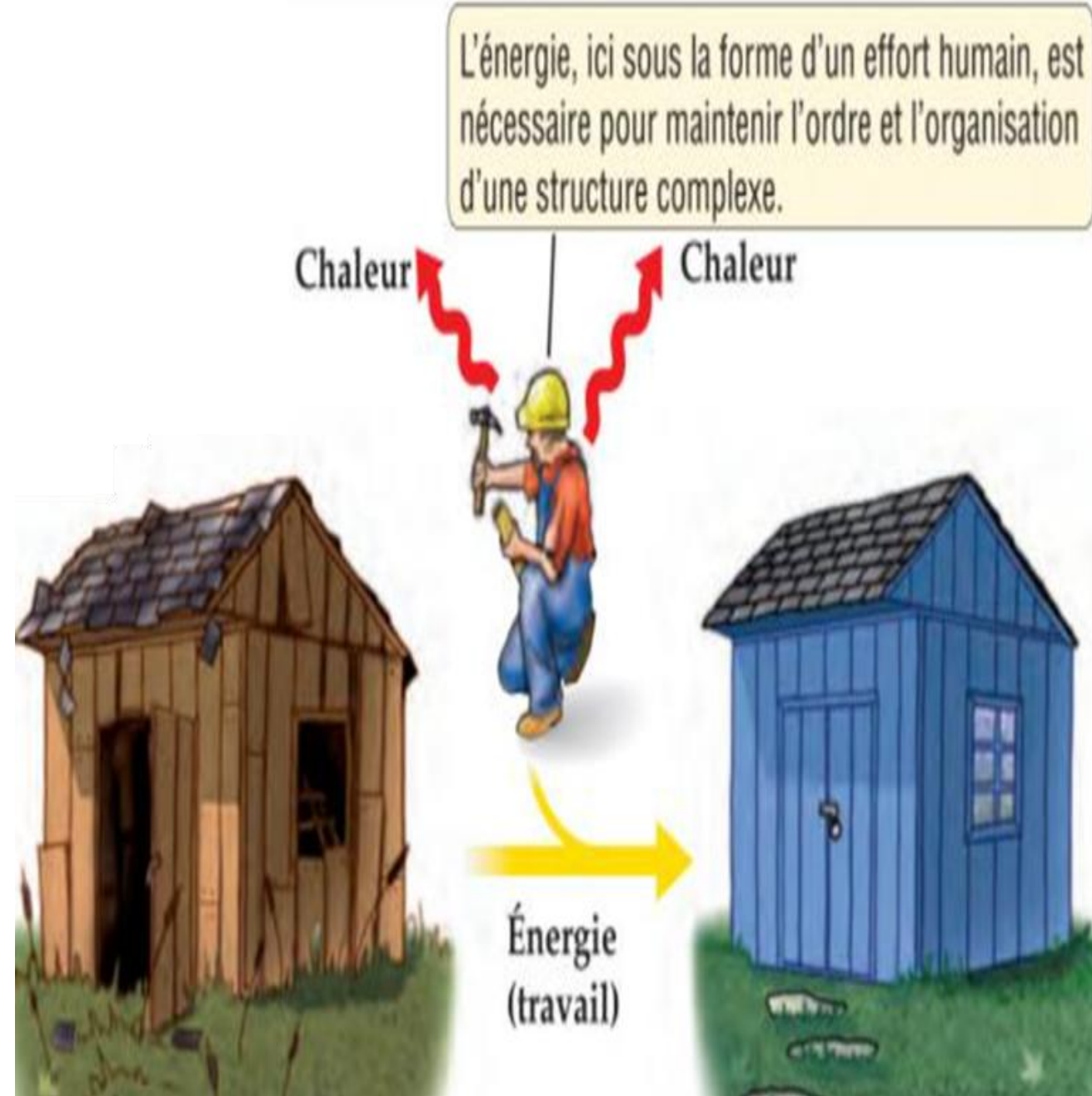
**Vue d'ensemble
de la bioénergétique
d'un animal.**

Energie

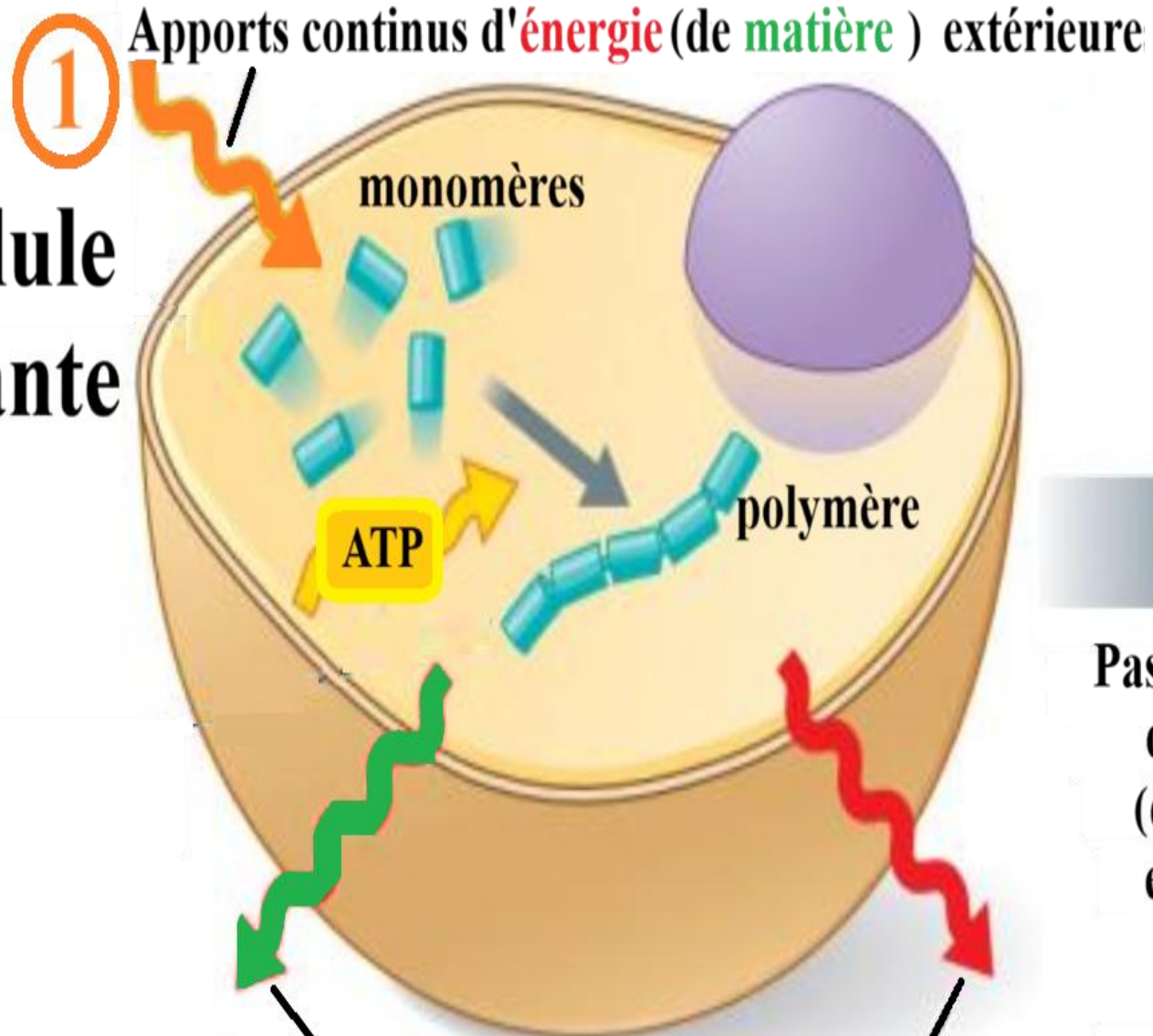
== Capacité à produire un travail

Travail

== Capacité à apporter du changement dans un **système**.



**Cellule
vivante**



Pas d'apport
d'**énergie**
(de **matière**)
extérieures



Deux principales formes d'énergie

I. Energie Potentielle

1) Energie Chimique

Instabilité relative d'une liaison entre deux groupements d'une molécule, qui peut être de ce fait facilement hydrolysée

Potentiel chimique

molécules neutres

2) Energie Osmotique

Gradient de concentration décroissant

Potentiel électrochimique

molécules chargées
Ions (cations et anions)

II. Energie Cinétique

Energie Thermique

Agitation des molécules microscopique

Mouvement des molécules

Transports membranaires

Attraction des molécules de charges opposées

Polymérisation des MF et MT

Mouvement des protéines motrices

Kinésine dynéine myosine

Energie mécanique conformationnelle

Deux principales formes d'énergie



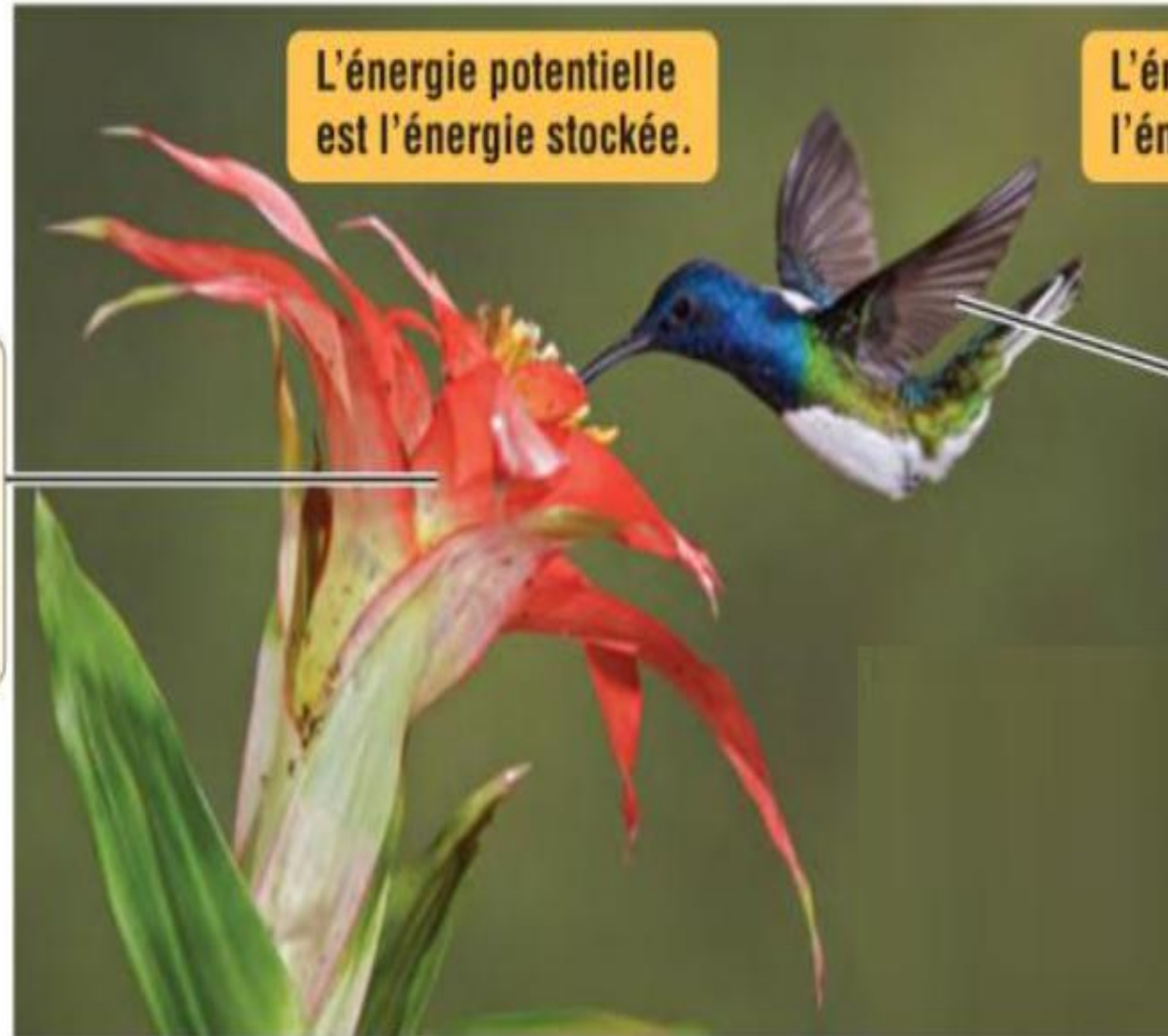
a)Energie Potentielle

(dans le cas de cette petite fille elle est due à son emplacement)



b)Energie Cinétique

Transformations d'énergie dans un organisme vivant



L'énergie potentielle est l'énergie stockée.

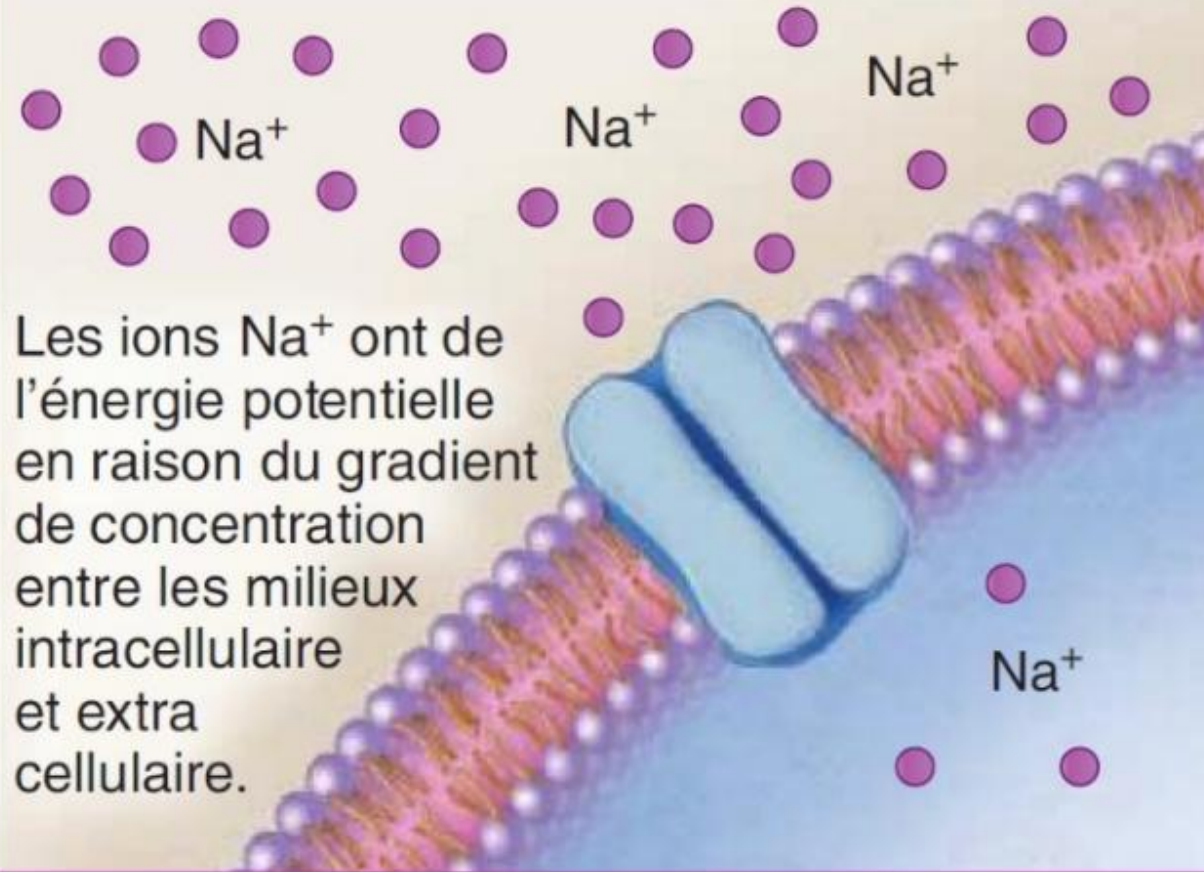
L'énergie cinétique est l'énergie du déplacement.

Les liaisons covalentes dans les molécules de sucre du nectar renferment de l'énergie chimique, une forme d'énergie potentielle.

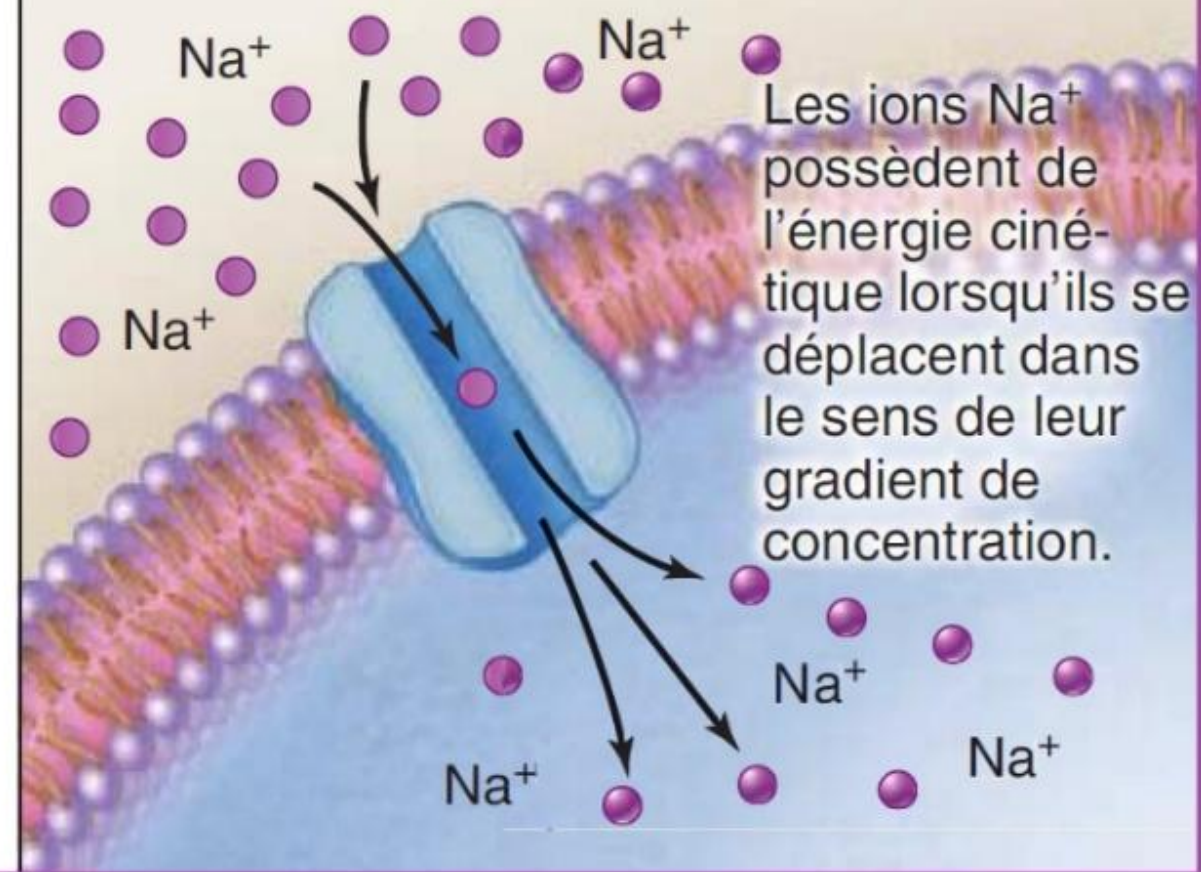
L'énergie chimique présente dans les molécules de sucre alimente les contractions musculaires dans les ailes de cet oiseau, qui peuvent battre jusqu'à 90 fois par seconde.

L'énergie potentielle contenue dans la nourriture est convertie en énergie cinétique dans le corps de cet oiseau

Énergie potentielle : énergie du gradient de concentration du Na^+

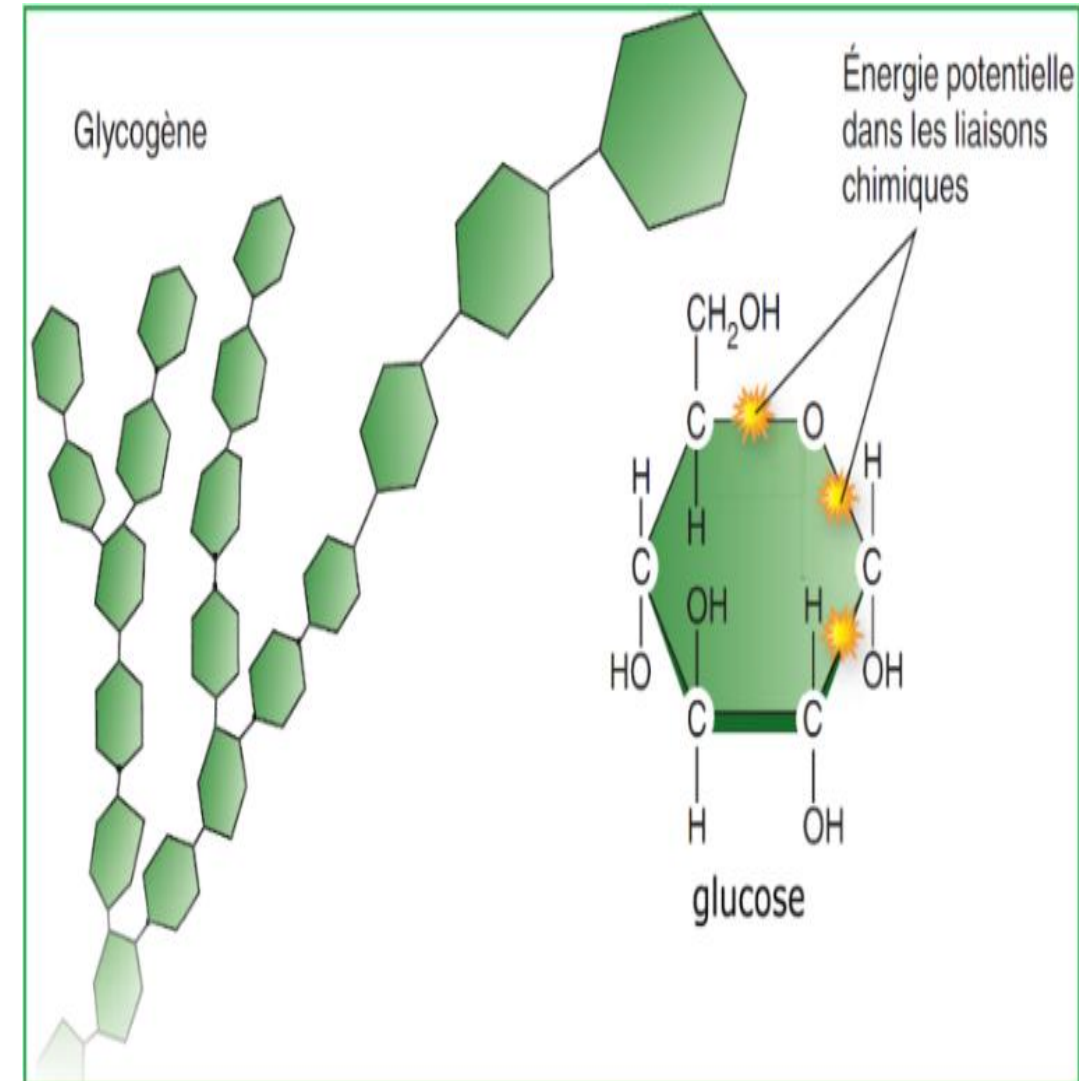


Énergie cinétique : énergie du mouvement



Formes de réserve de l'énergie potentielle dans la cellule

Métabolites riches en énergie chimique principalement les molécules complexes glucidiques et lipidiques = énergie chimique potentielle



Formes de réserve de l'énergie potentielle dans la cellule

ATP = énergie chimique potentielle

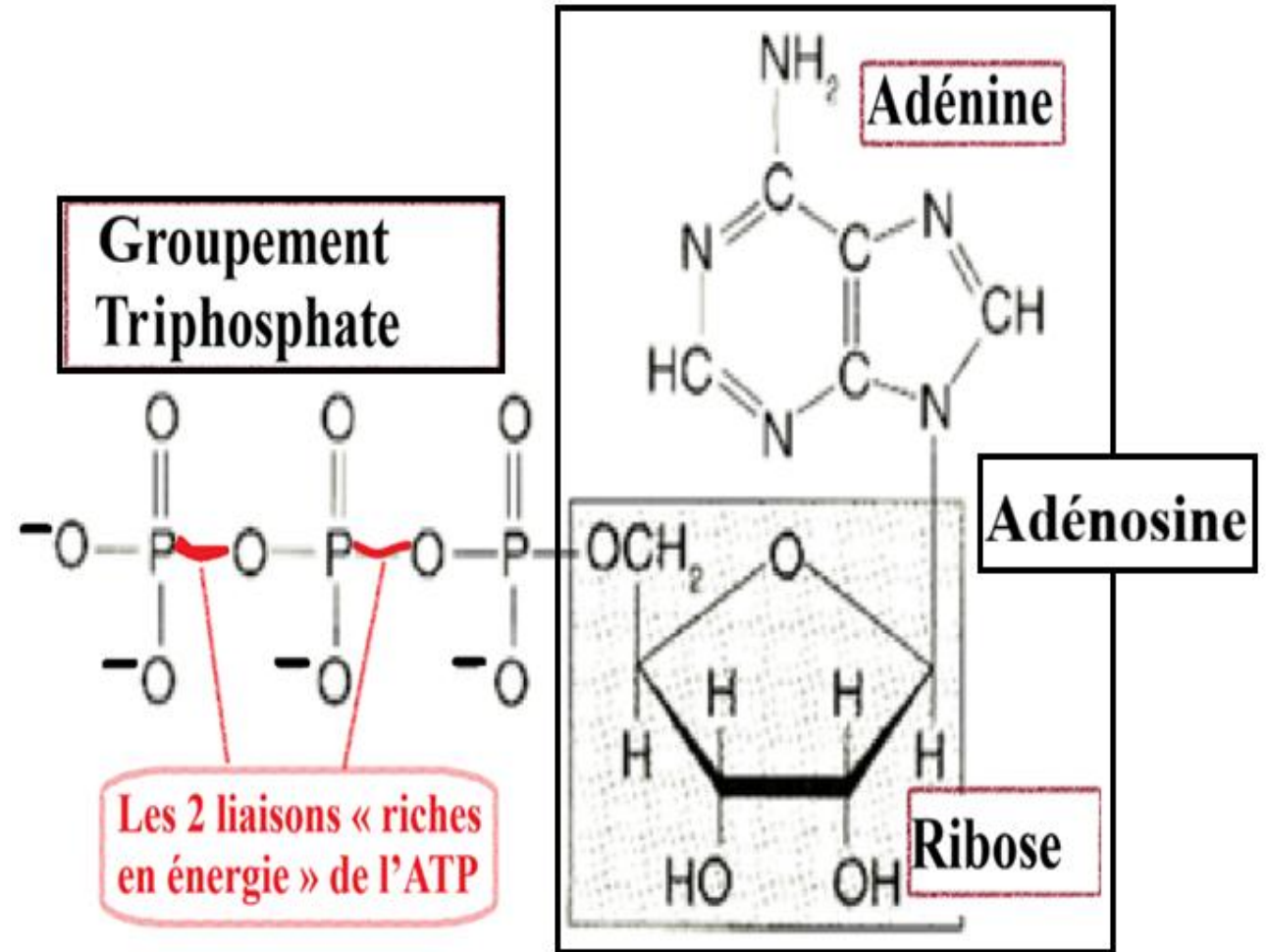
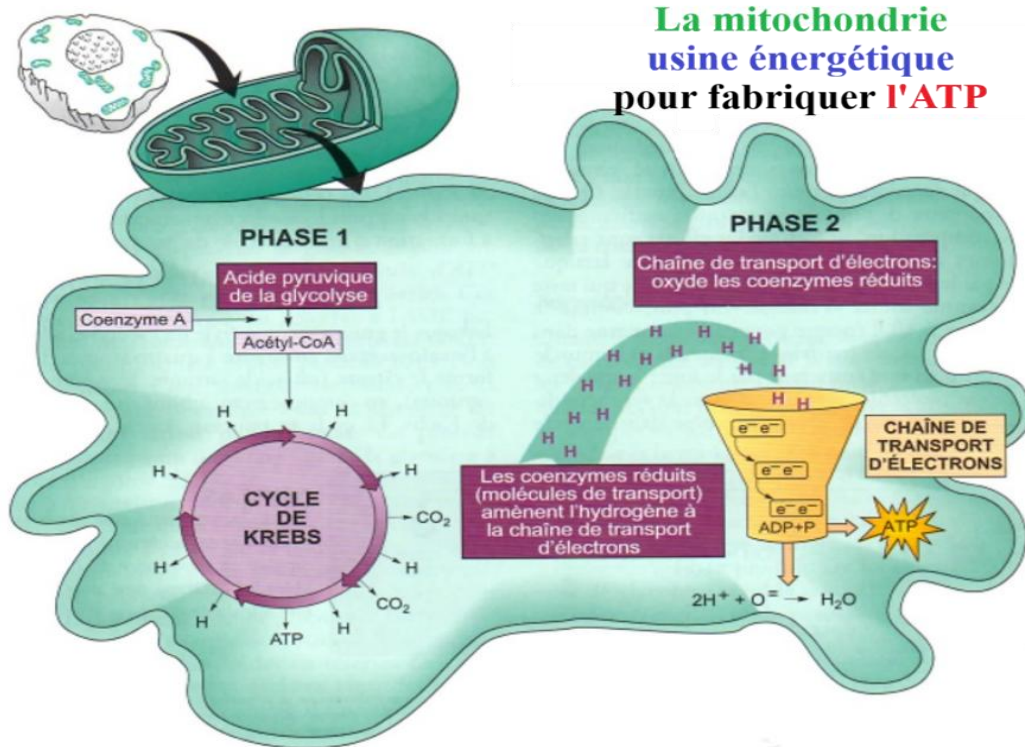
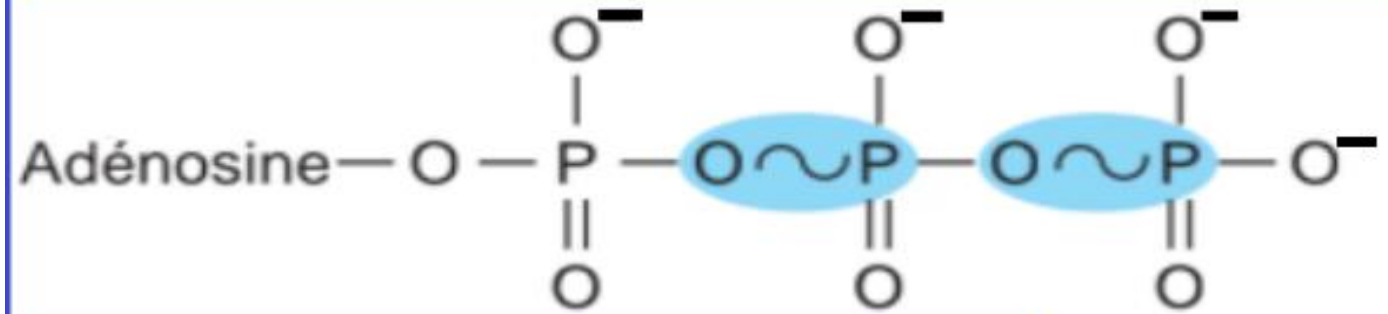
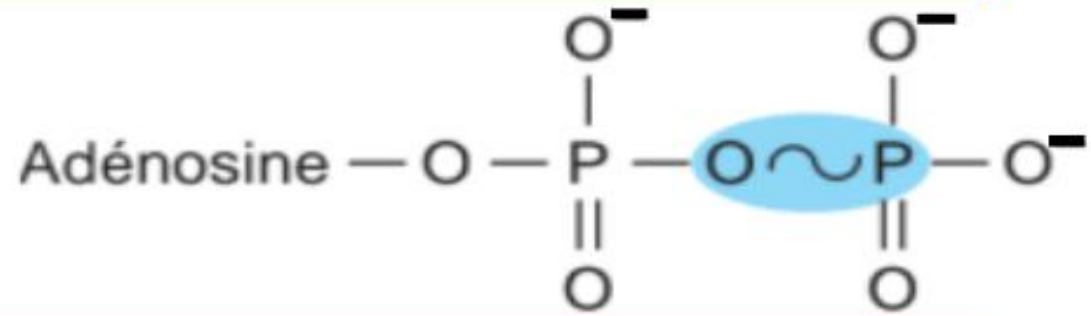


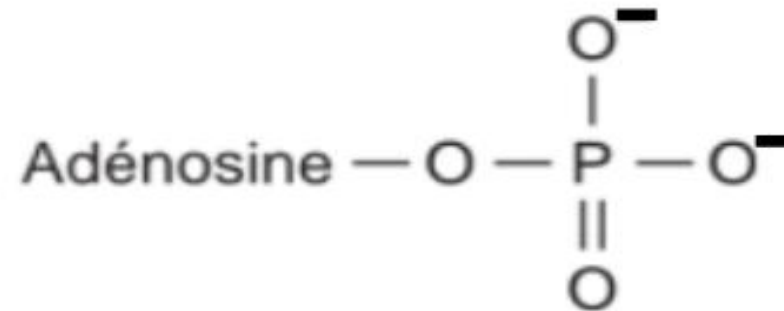
Figure : structure simplifiée de l'ATP, l'ADP et l'AMP montrant la position et le nombre de **liaisons à haute énergie**. Comme le montre cette figure, l'ATP contient deux groupes phosphate à haute énergie et l'ADP en contient un seul. **L'ADP est plus stable et faiblement énergétique comparé à l'ATP.** L'AMP (adénosine monophosphate) est le plus faiblement énergétique puisqu'il ne contient pas de liaisons à haute énergie.



Adénosine triphosphate (ATP)



Adénosine diphosphate (ADP)



Adénosine monophosphate (AMP)



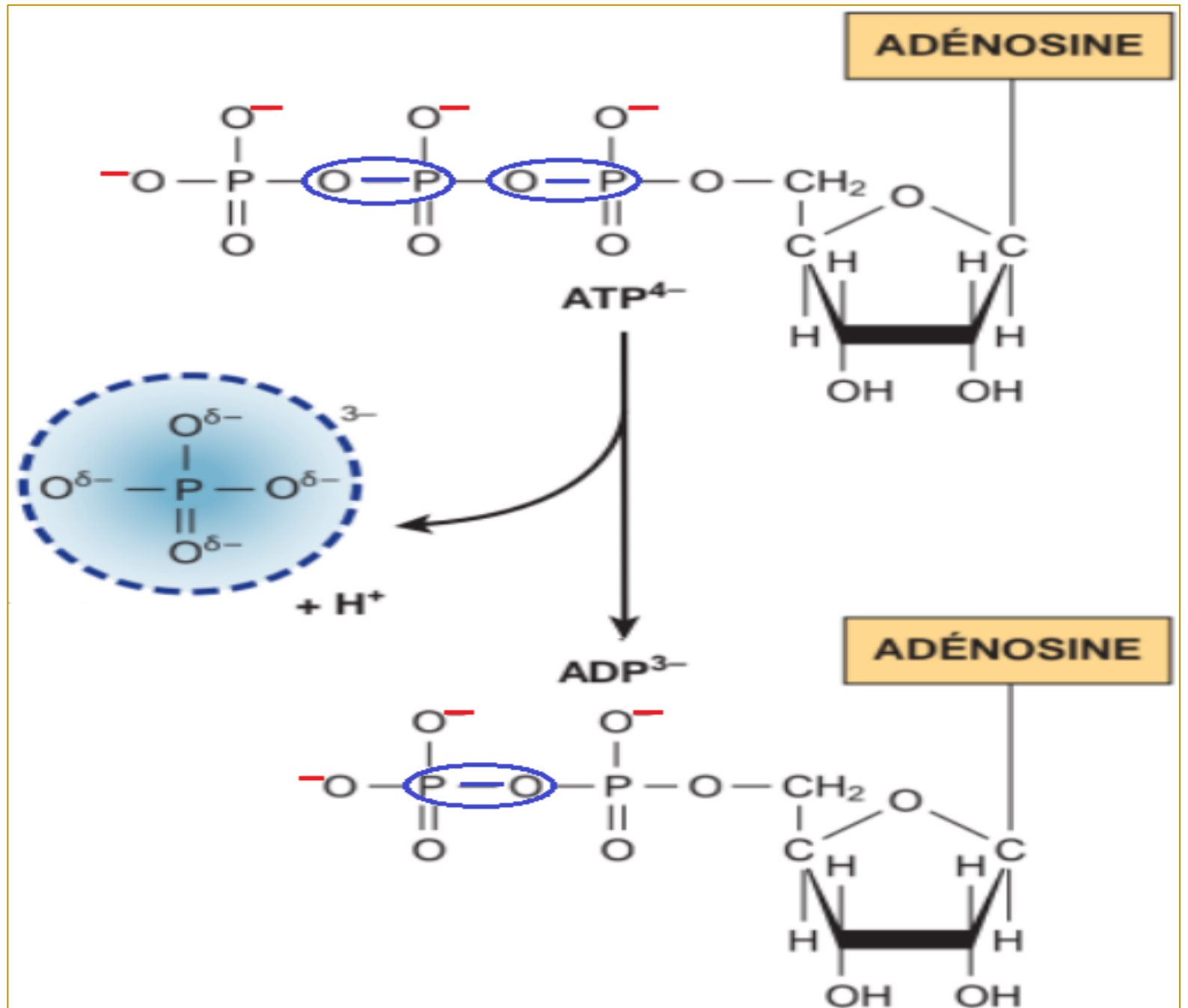
$$\Delta G = - 30,5 \text{ kJ/mol}$$

(conditions standards)

(ΔG =variation d'énergie libre)

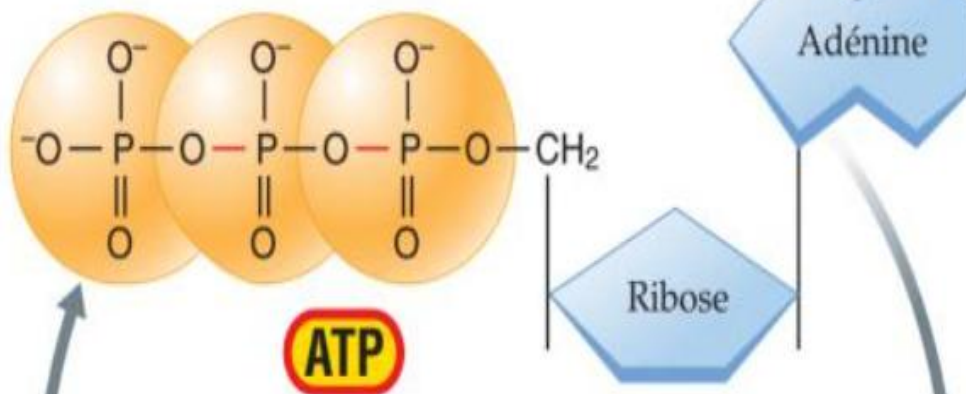
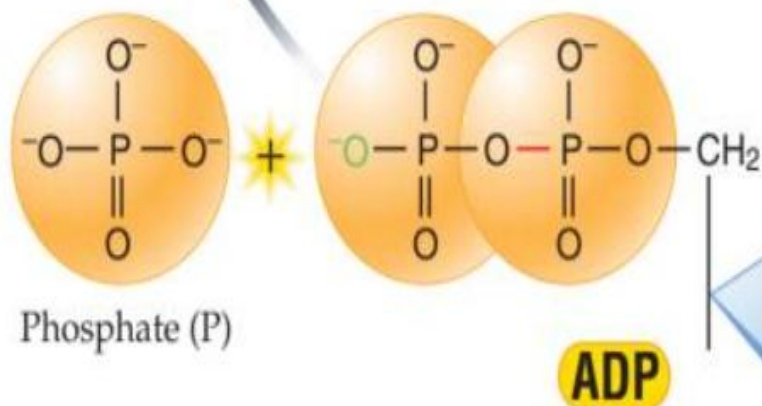
l'hydrolyse d'une liaison
covalente normale

$$\Delta G_0' \approx - 25 \text{ kJ.mol}^{-1}.$$





Énergie
provenant de
la nourriture

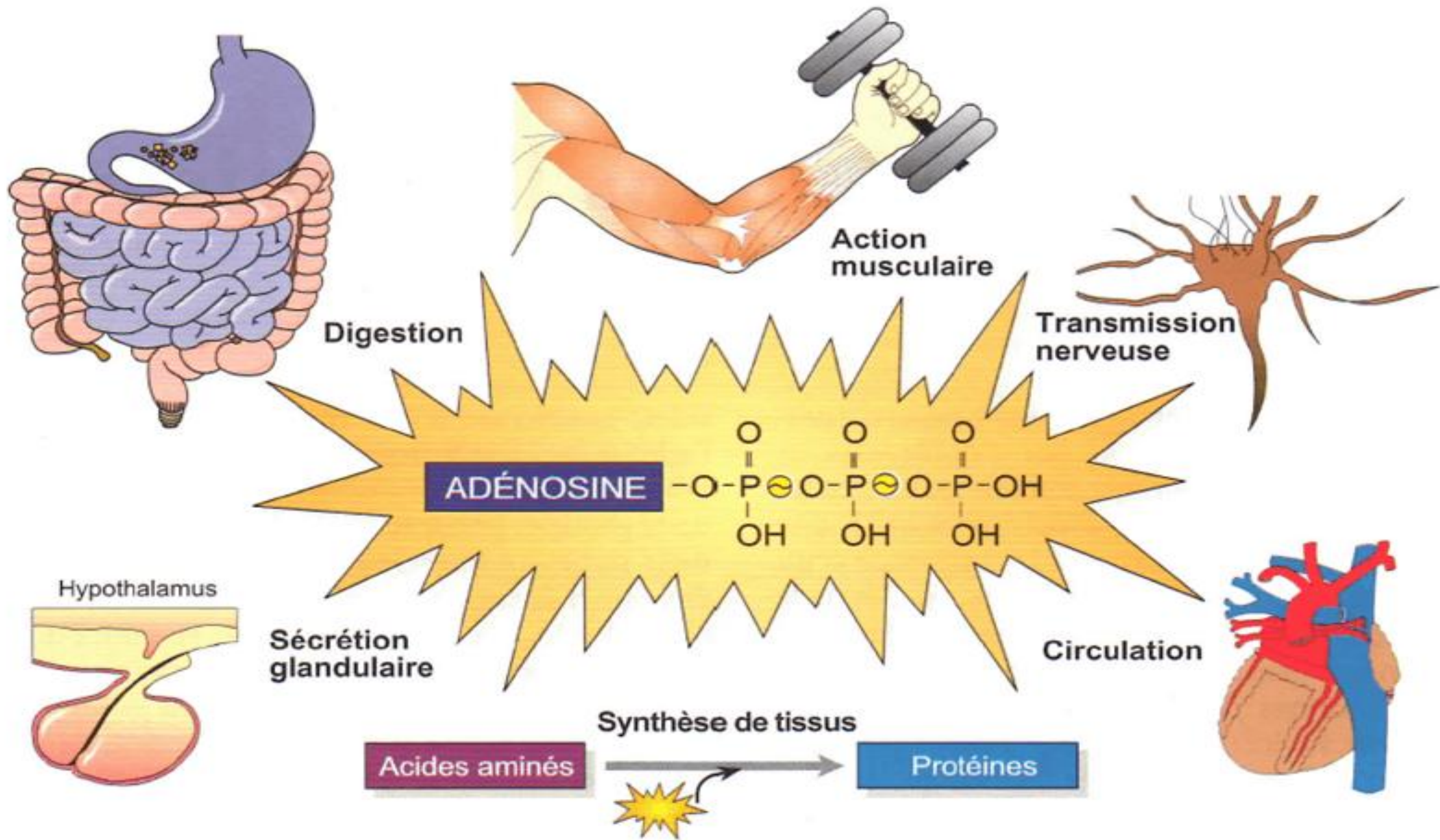


L'ATP stocke de l'énergie dans les liaisons covalentes qui relient les groupements phosphate.

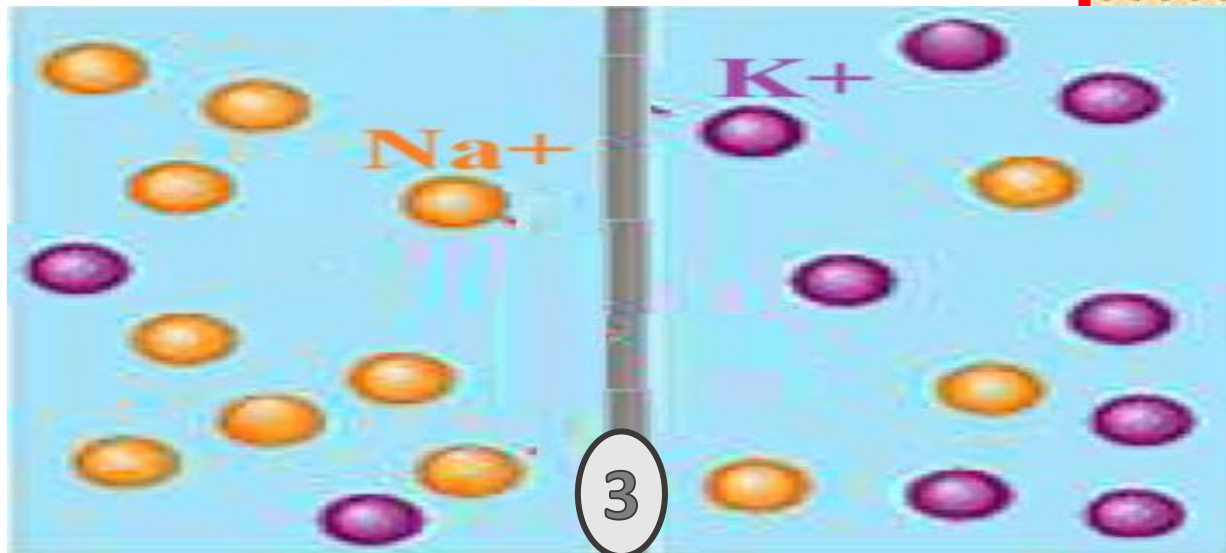
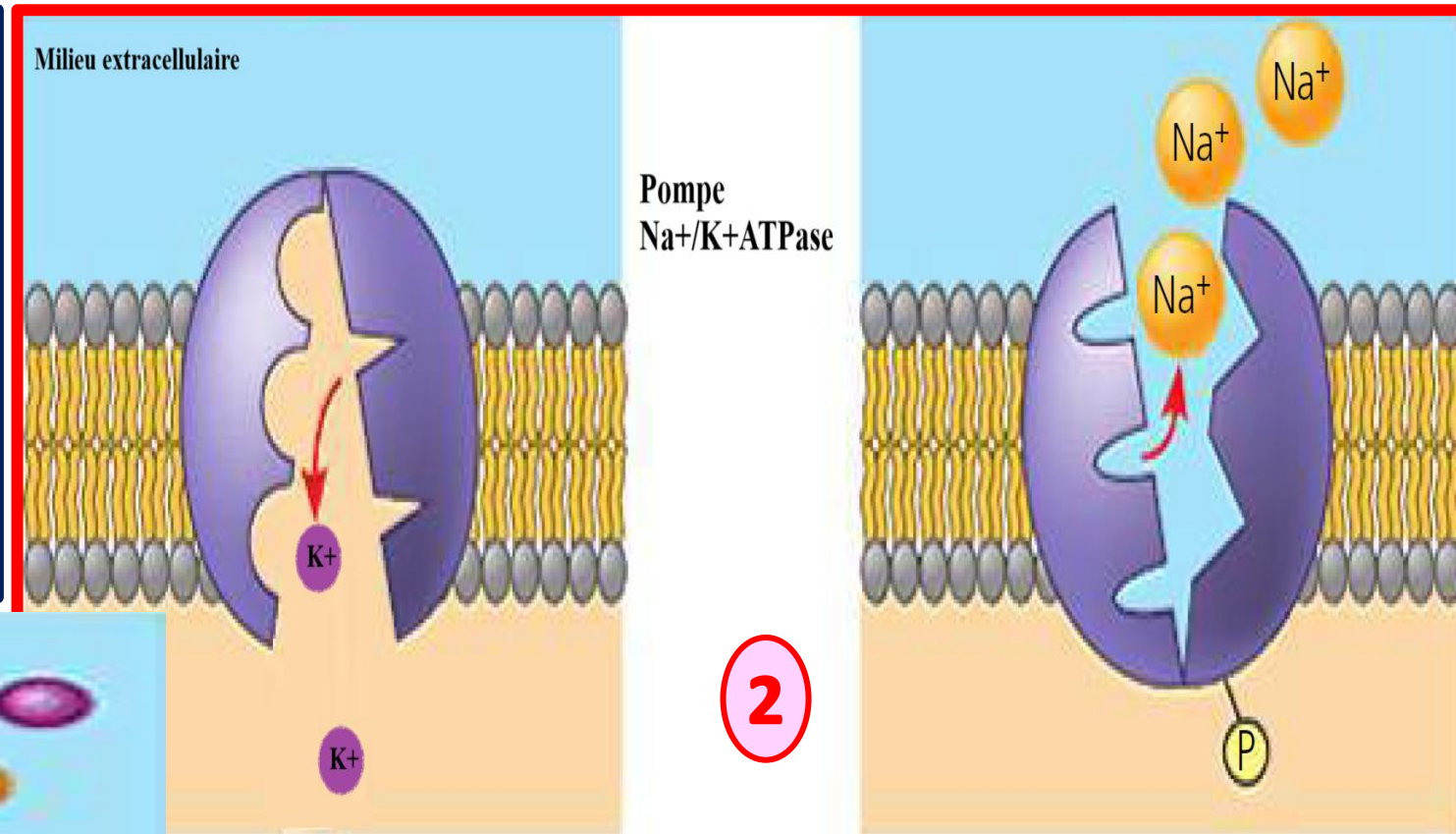
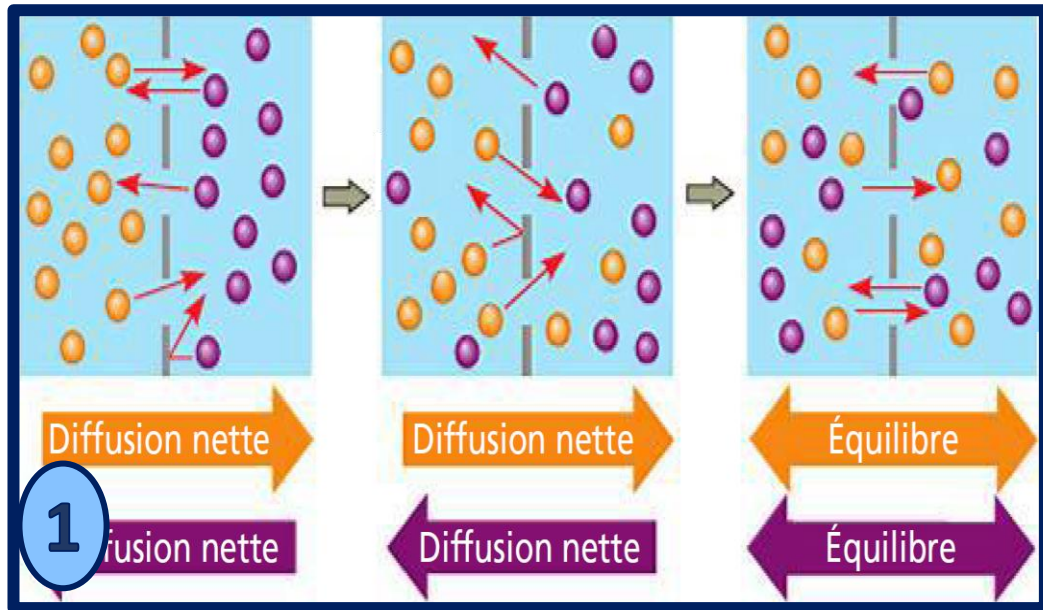
Énergie
disponible



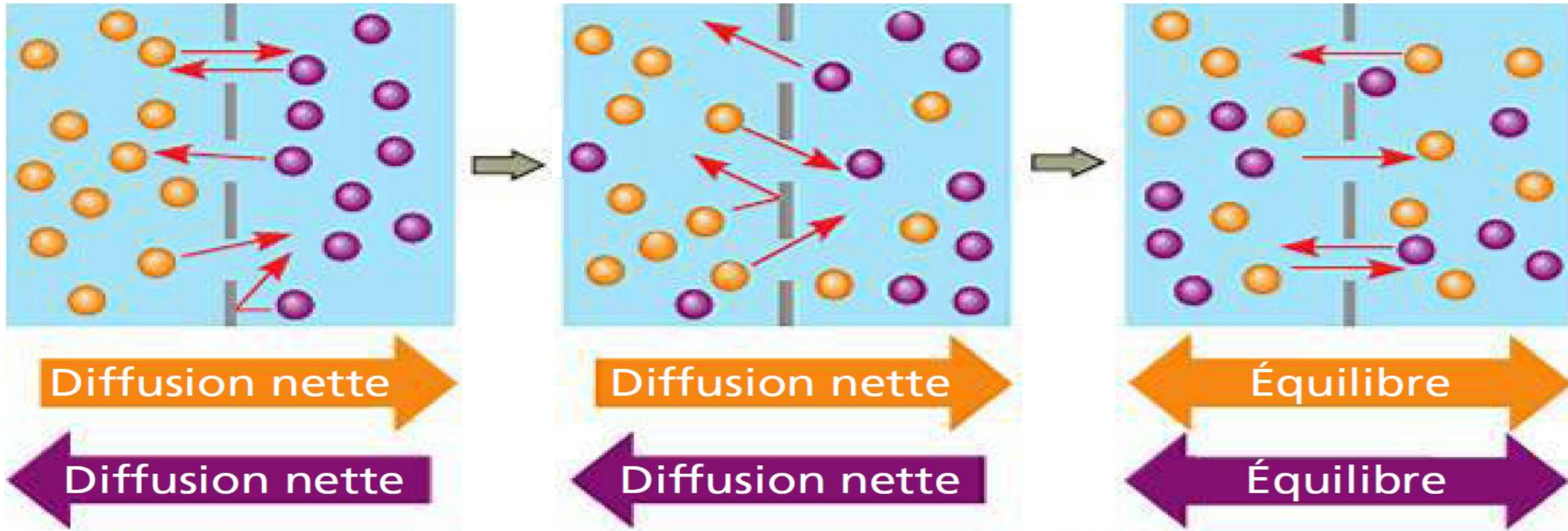
Lorsque de l'énergie est nécessaire pour des processus biologiques, une liaison riche en énergie est rompue, libérant de l'énergie et libérant de l'ADP et du phosphate.



Formes de réserve de l'énergie potentielle dans la cellule



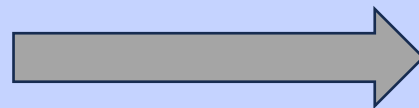
**Gradient de concentration =
énergie osmotique potentielle**



Diffusion simultanée de deux solutés en milieu aqueux.

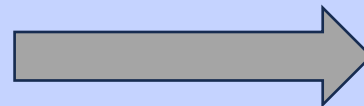
Deux solutions de couleurs différentes sont séparées par une membrane

Molécules neutres non chargées



gradient chimique

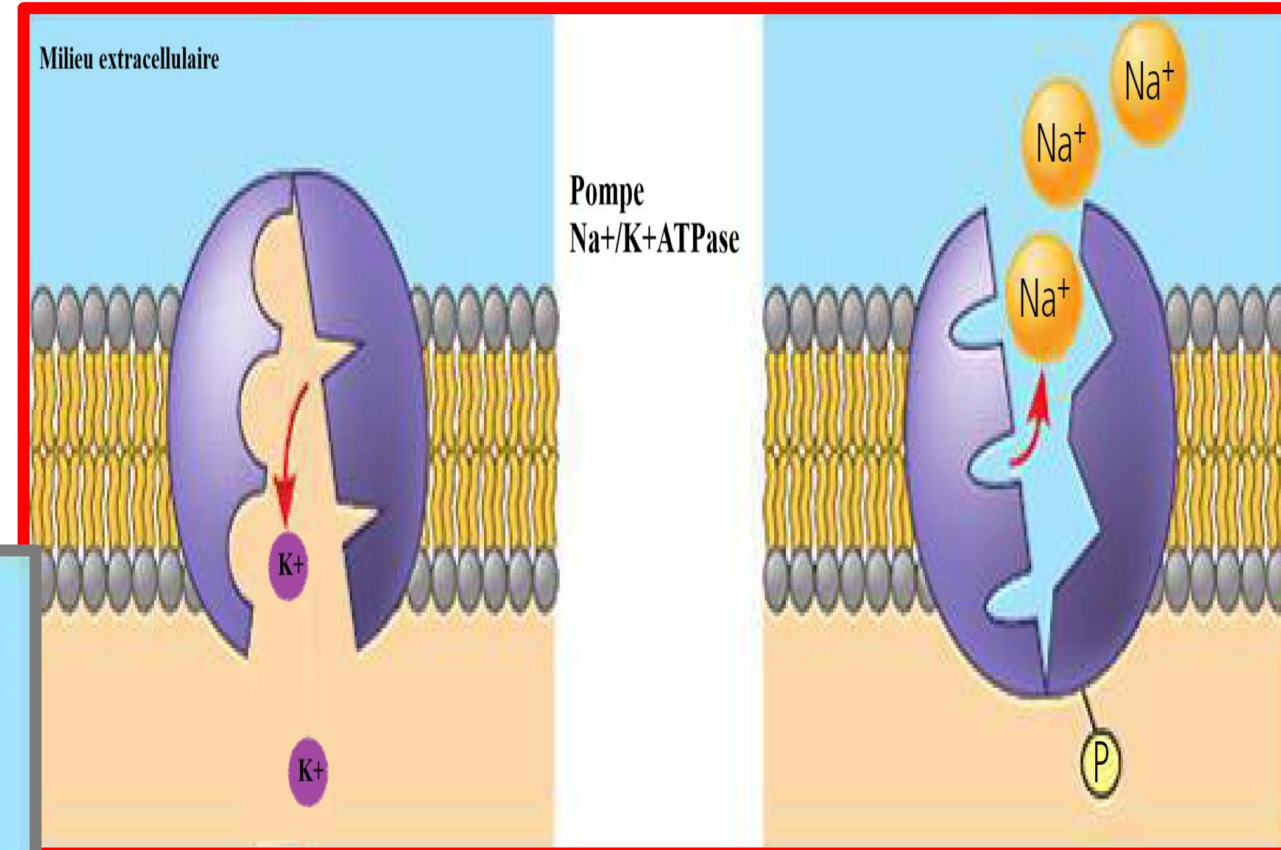
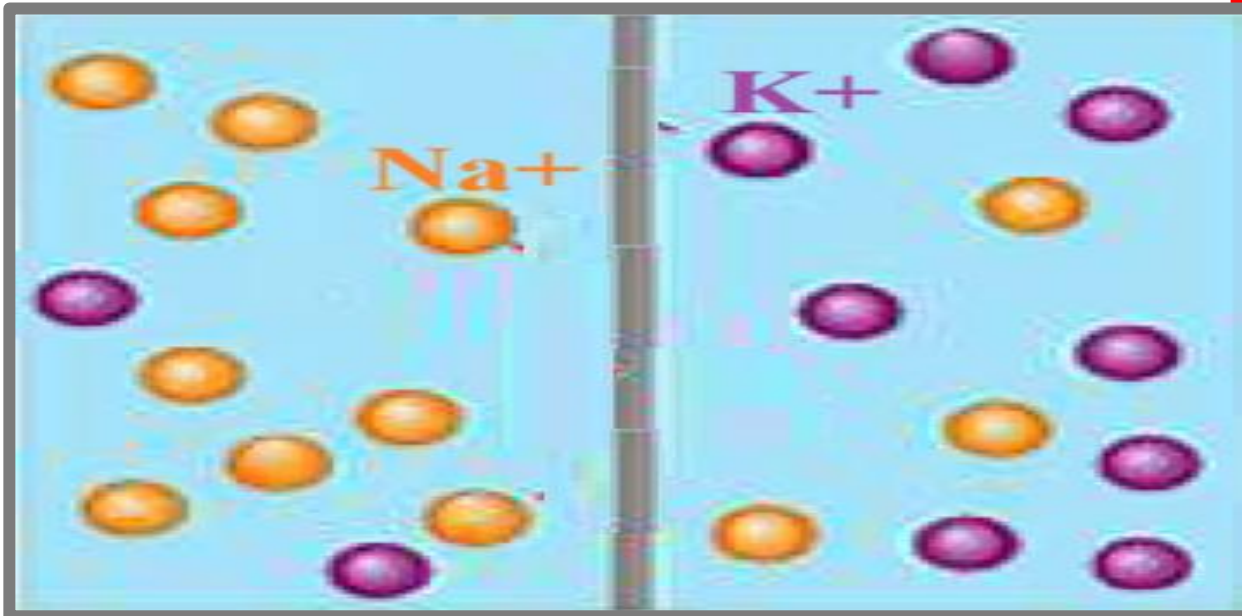
Molécules chargées cations et anions



gradient électrochimique

Formes de réserve de l'énergie potentielle dans la cellule

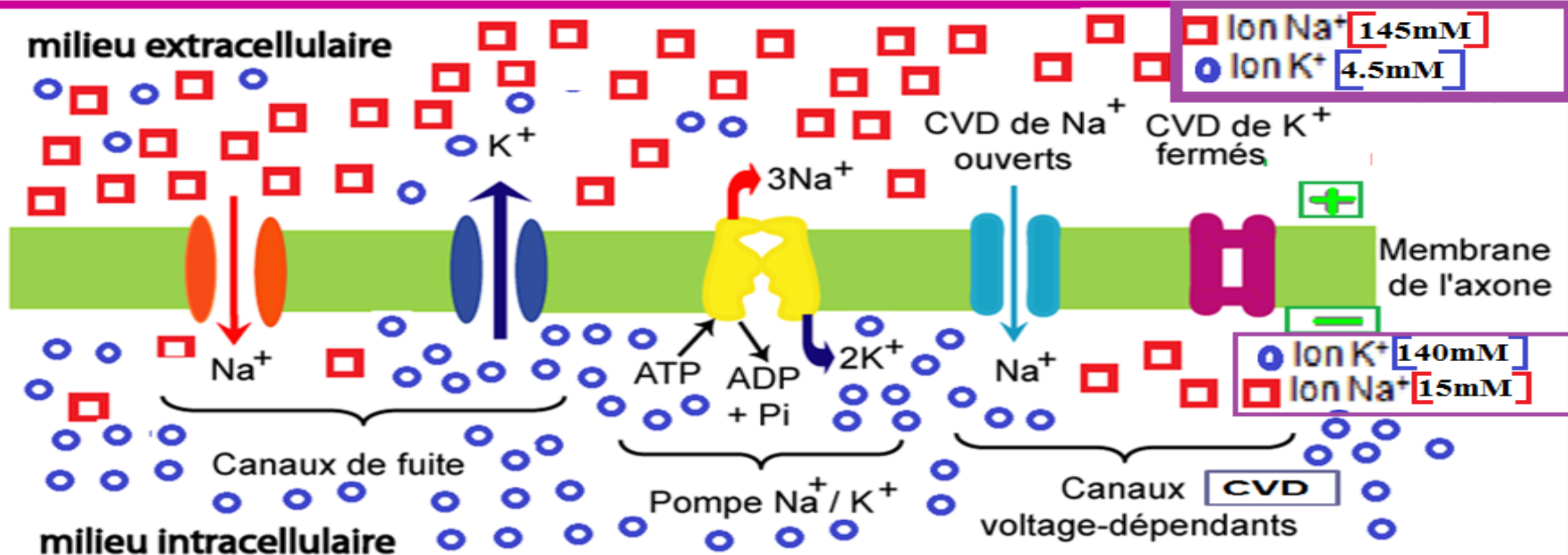
**Gradient de
concentration = énergie
osmotique potentielle**



Formes de réserve de l'énergie potentielle dans la cellule

Gradient de concentration osmotique = Energie osmotique potentielle

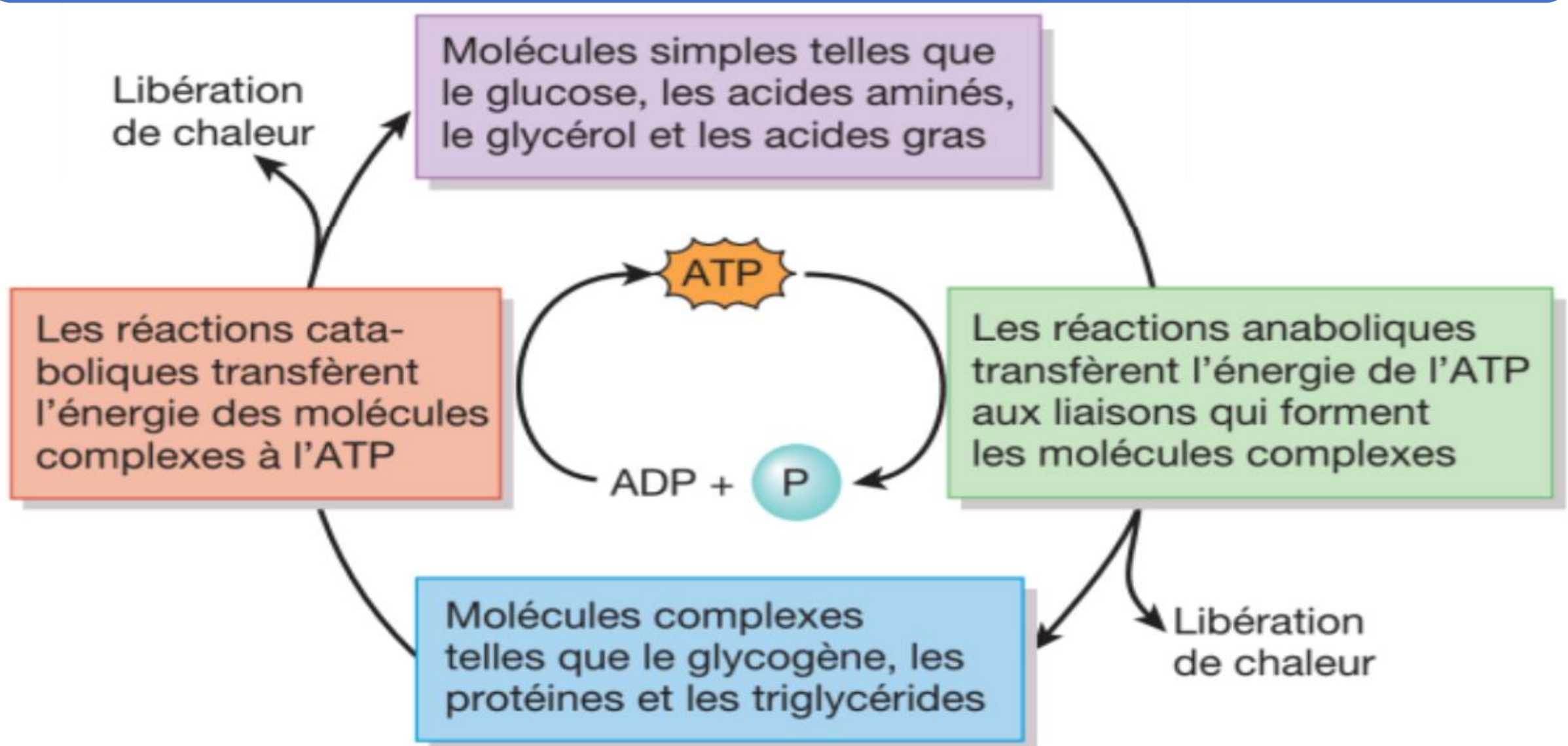
Potentiel électrique de séparation de charges = Énergie potentielle



Au niveau cellulaire, L'hydrolyse de l'ATP ($\text{ADP} + \text{P}$ ou $\text{AMP} + \text{Pi-Pi}$) est une réaction spontanée quasiment totale, et donc très exergonique. Le couplage de cette réaction à la phosphorylation non spontanée (endergonique) d'une autre molécule (telle que le glucose, ou même une protéine telle que la pompe Na^+/K^+ ATPase) conduit à la modification des propriétés physicochimiques de cette dernière, et s'accompagne souvent de son activation.

Le **couplage d'énergie** est un processus clé de la bioénergétique. Il consiste à employer l'énergie dégagée par une réaction exergonique pour déclencher une réaction endergonique, en grande partie grâce à l'ATP. Dans la majorité des cas, l'ATP est la source d'énergie

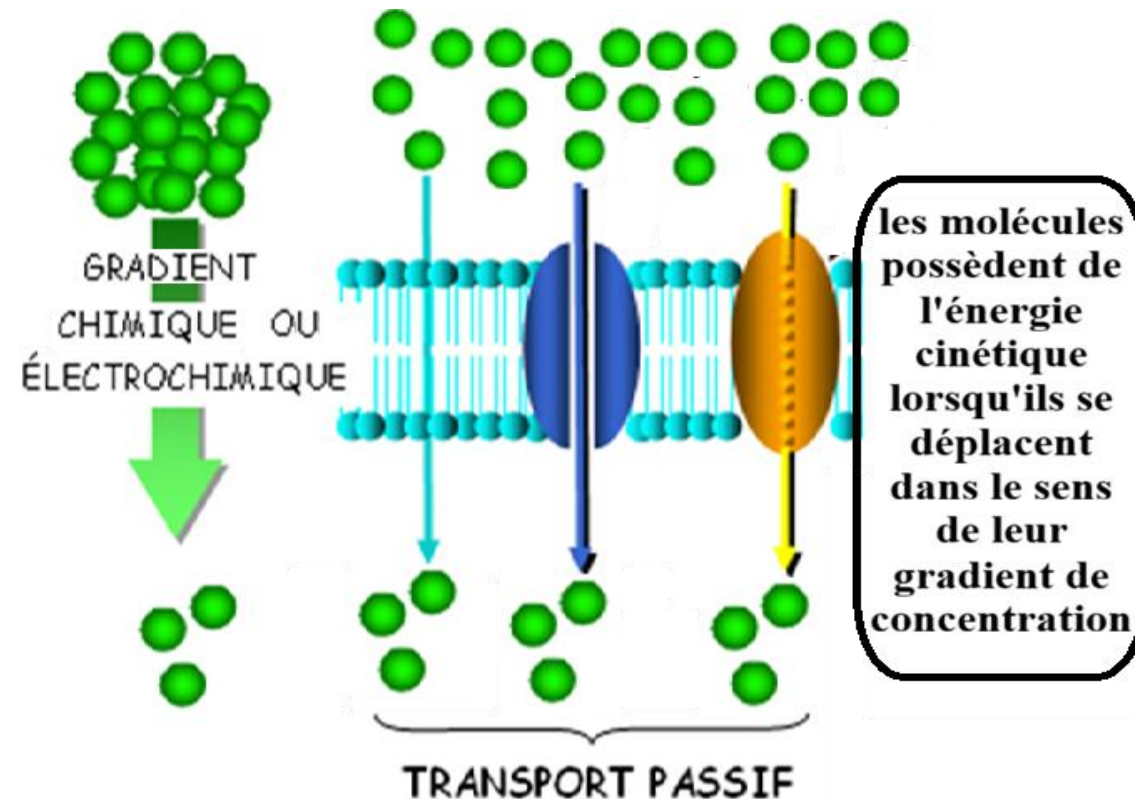
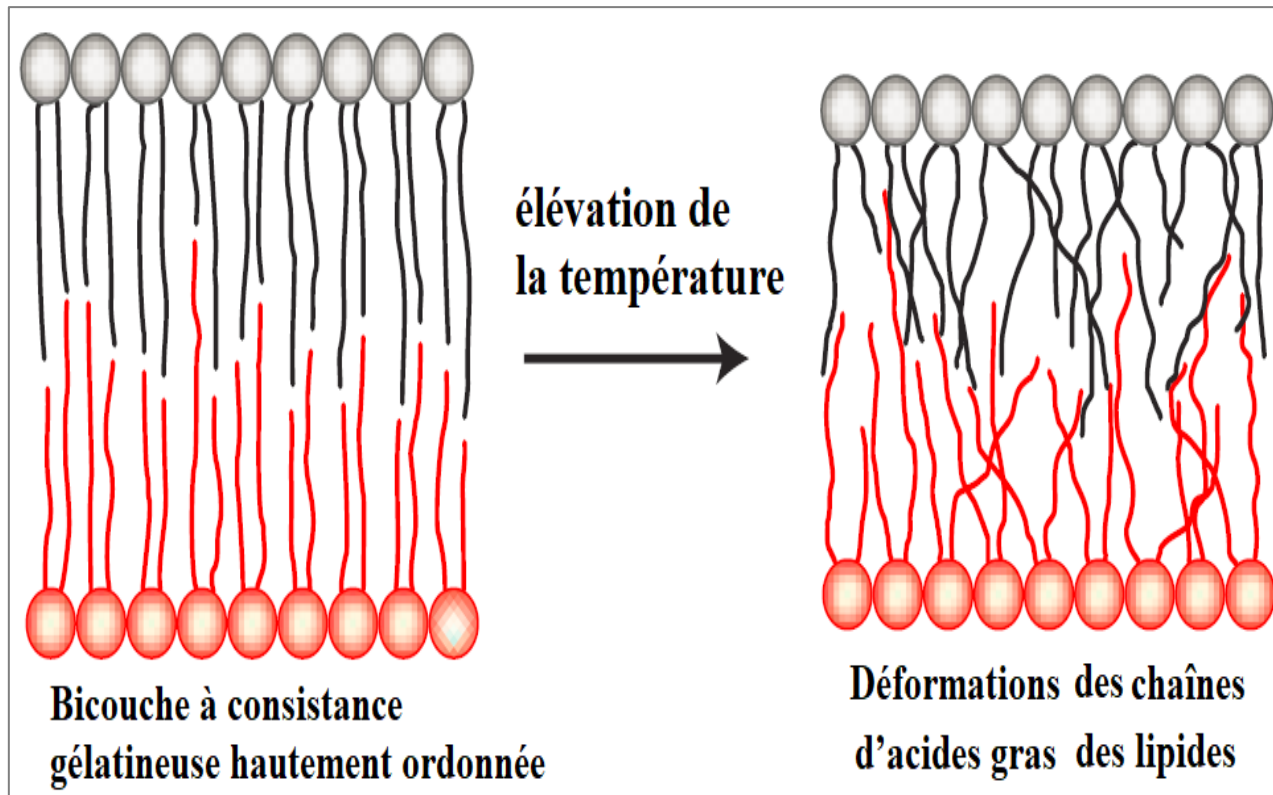
Rôle de l'ATP dans le couplage des réactions cataboliques et anaboliques



Formes d'énergies cinétiques dans la cellule

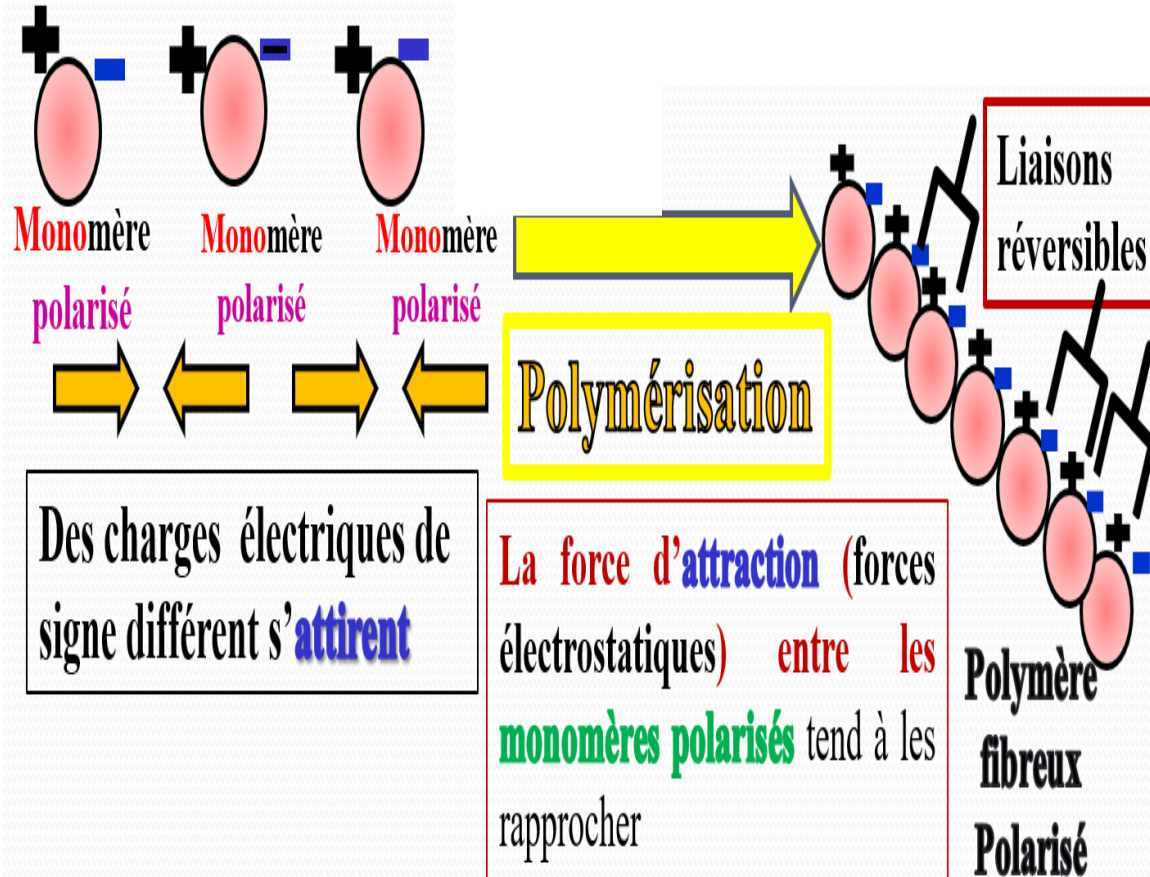
**La chaleur, ou énergie thermique =
Energie cinétique**

**Energie de mouvement =
Energie cinétique**

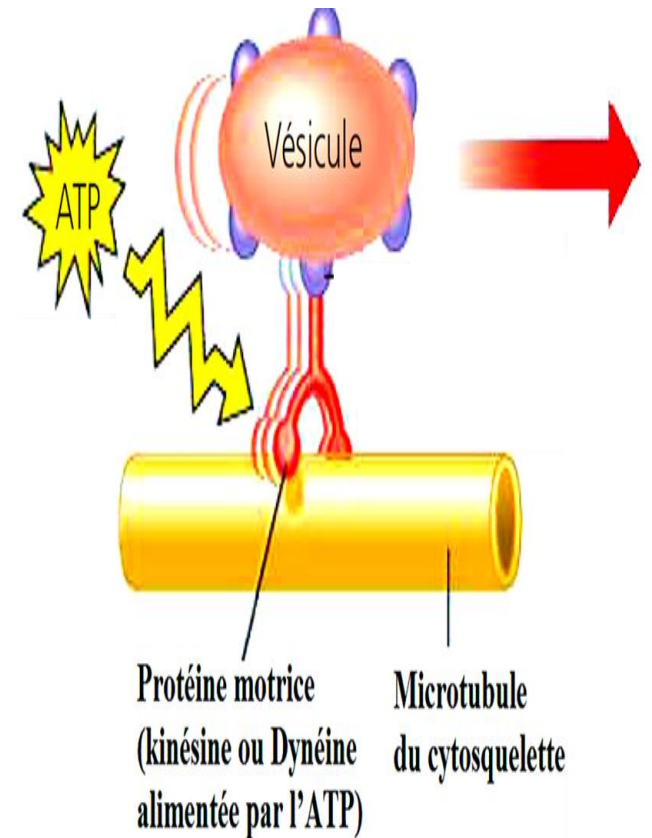


Formes d'énergies cinétiques dans la cellule

Attraction des molécules de charges opposées =
Energie cinétique



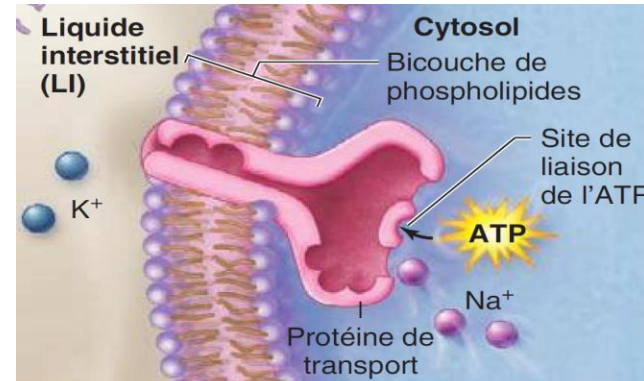
Mouvement des protéines motrices



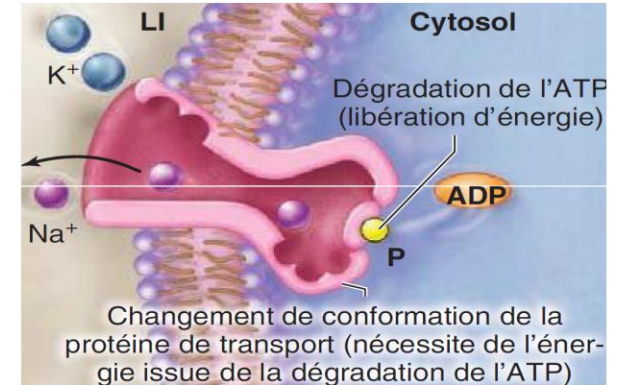
Formes d'énergies cinétiques dans la cellule

**Energie mécanique
conformationnelle = Energie
cinétique**

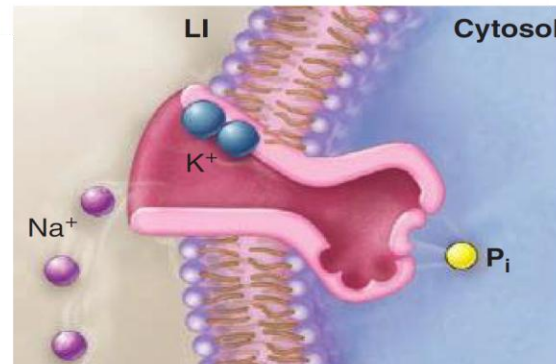
ATP hydrolases ou ATPases,
convertissent l'énergie chimique en
énergie conformationnelle ou mécanique
Le terme d'hydrolyse ne correspond pas à
une réaction chimique simple car il s'agit
d'une **réaction couplée**.



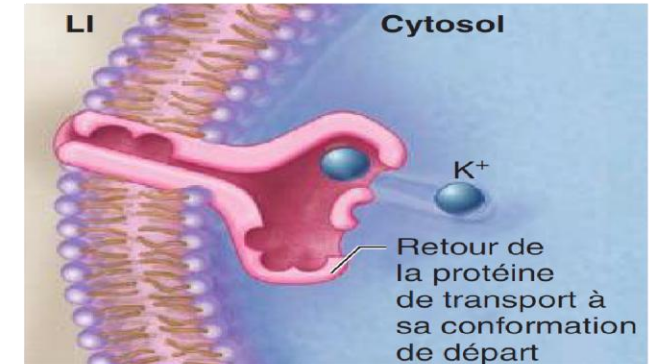
Liaison de trois ions de sodium (Na⁺) et de l'ATP aux sites de la surface cytoplasmique de la pompe à Na⁺-K⁺



Dégradation de l'ATP en ADP et en phosphate inorganique (Pi), entraînant la liaison du Pi à la pompe et une libération d'énergie provoquant le changement de conformation de la pompe à Na⁺-K⁺ et la libération des ions Na⁺ dans le liquide interstitiel



Liaison de deux ions K⁺ du liquide interstitiel aux sites de la pompe à Na⁺-K⁺ à la surface de la cellule ; parallèlement, libération dans le cytosol du Pi produit plus tôt par la dégradation de l'ATP



Retour de la protéine de transport à sa conformation de départ, entraînant la libération des ions K⁺ dans le cytosol ; pompe à Na⁺-K⁺ maintenant prête à recommencer le processus

LOIS DE LA THERMODYNAMIQUE ET IDEE D'ENTROPIE

Thermodynamique  étude des **interconversions** d'énergie dans un système.



Bioénergétique

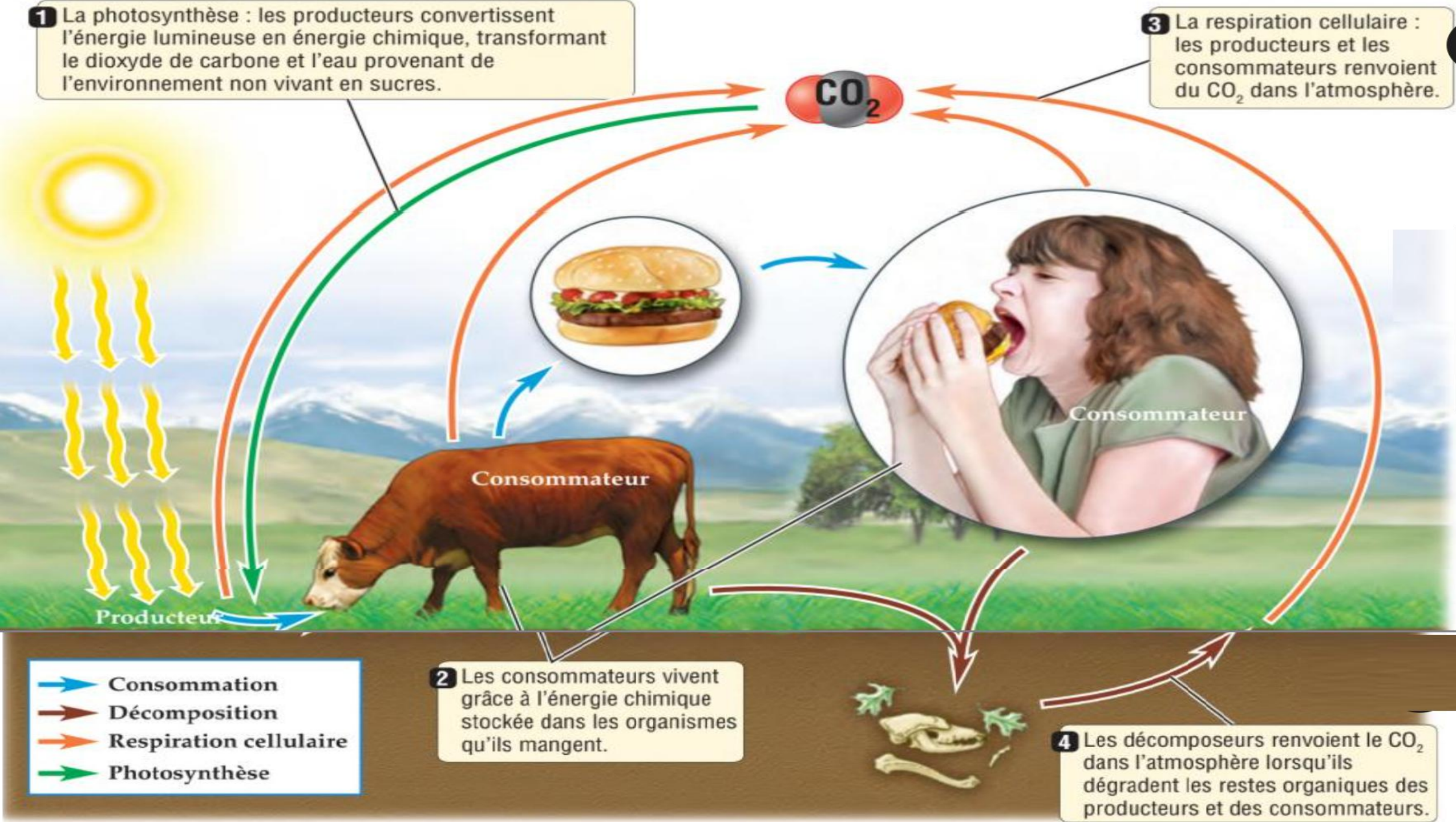
- Comment les cellules produisent de l'énergie (ATP),
- Pourquoi certaines réactions biochimiques se produisent spontanément et d'autres non,
- Comment la température influence les enzymes et le métabolisme,
- Comment les organismes maintiennent leur équilibre interne (homéostasie).

Les physiciens ont déterminé que deux lois régissent ces interconversions.

1. Conservation de l'énergie
2. le transfert d'énergie, ou la transformation d'énergie d'une forme à une autre, augmente l'entropie.

1 La photosynthèse : les producteurs convertissent l'énergie lumineuse en énergie chimique, transformant le dioxyde de carbone et l'eau provenant de l'environnement non vivant en sucres.

3 La respiration cellulaire : les producteurs et les consommateurs renvoient du CO_2 dans l'atmosphère.



L'ordre dans les systèmes non vivants

Si l'on ne s'en occupe pas, les systèmes organisés tels que cet abri de jardin, tendent à perdre leur ordre et à se dégrader.



Le désordre augmente



Énergie (travail)



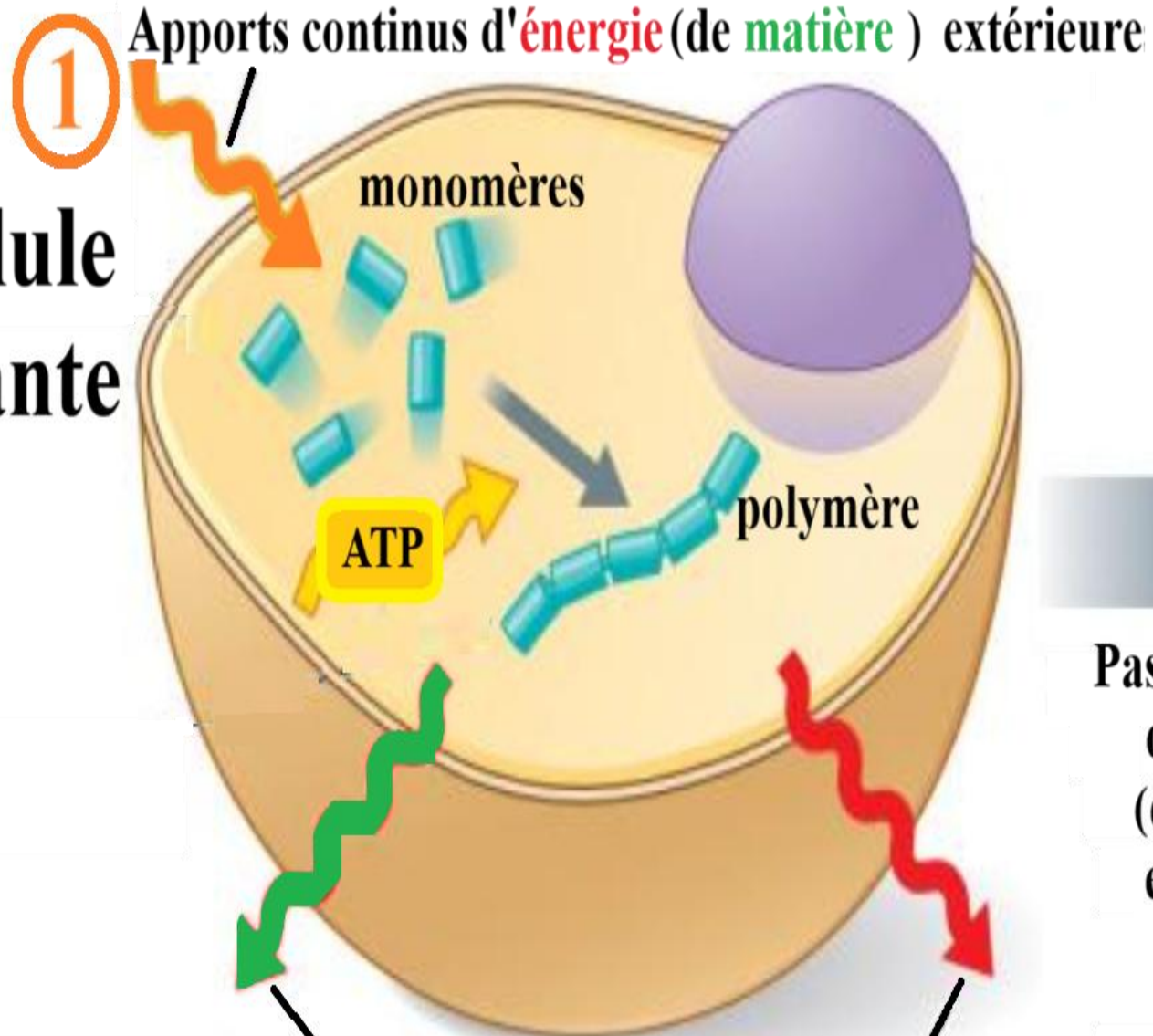
L'énergie, ici sous la forme d'un effort humain, est nécessaire pour maintenir l'ordre et l'organisation d'une structure complexe.

Chaleur

Chaleur

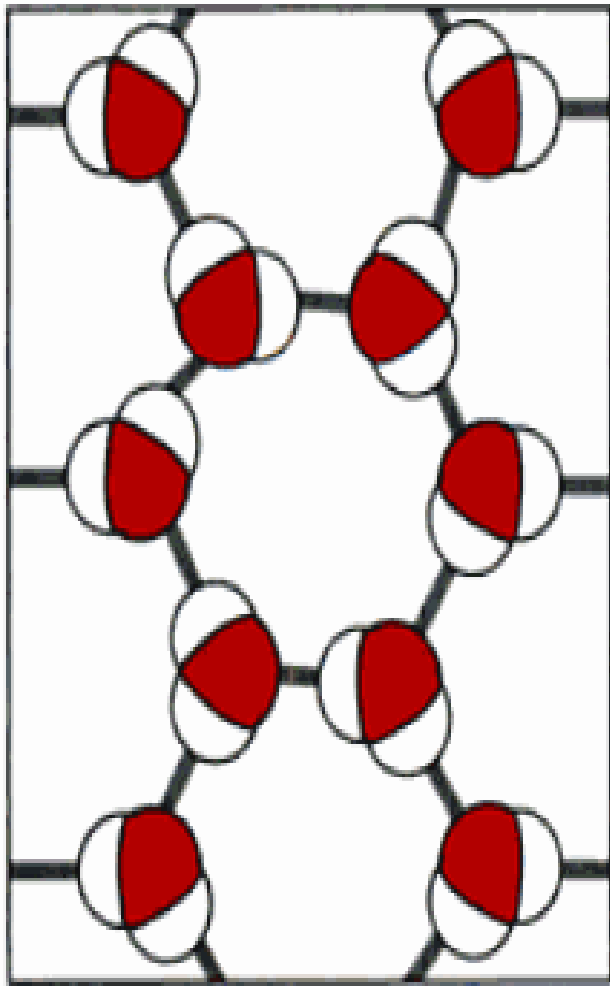


**Cellule
vivante**

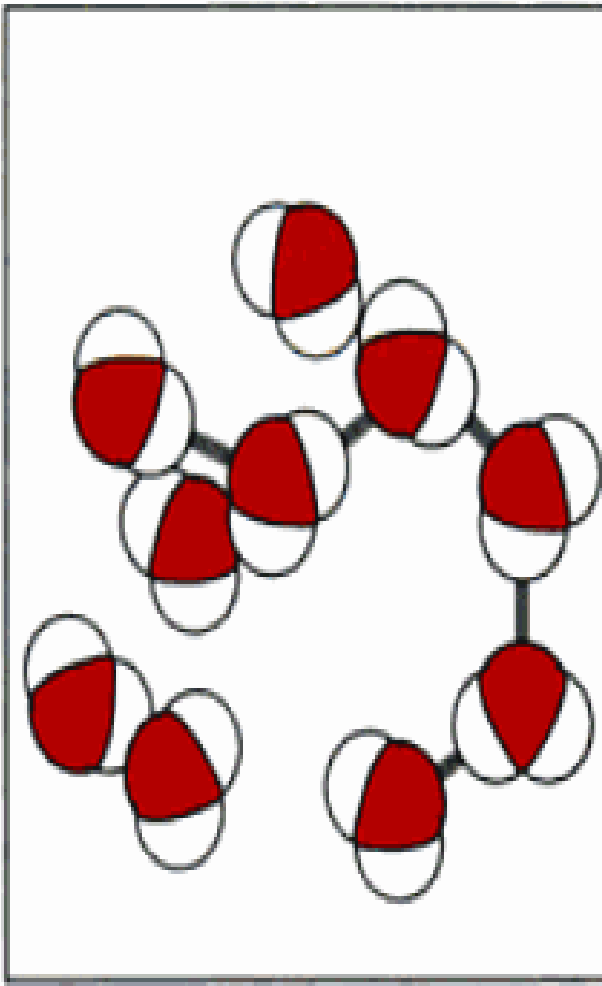


Pas d'apport
d'**énergie**
(de **matière**)
extérieures

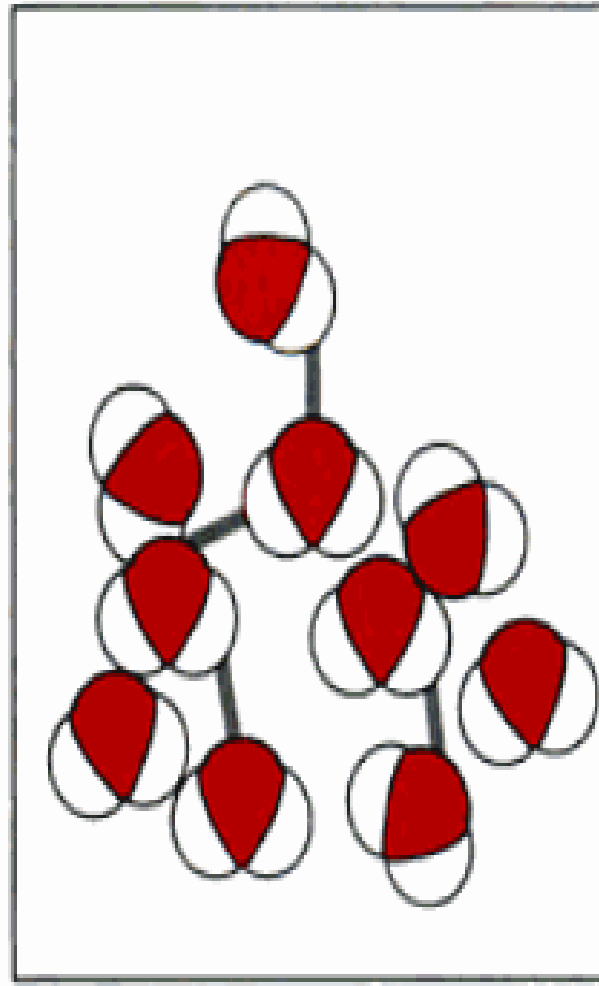




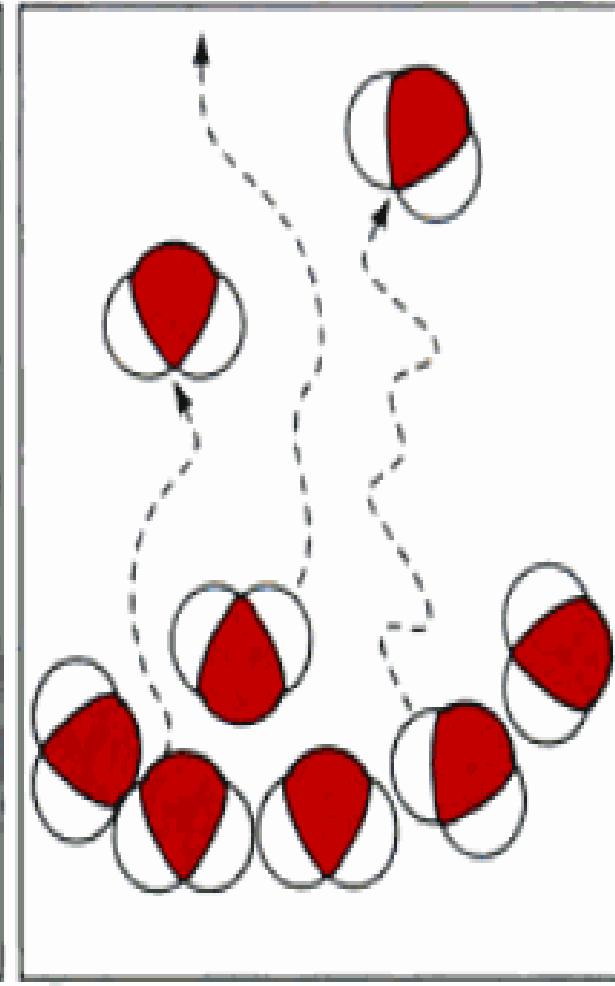
Glace (-273 à 0°C)



Glace fondante (0°C)



Eau liquide (0 à 100°C)



Eau bouillante (100°C)

Figure: Relation entre entropie et température. La structure de l'eau ou de toute autre substance, devient de plus en plus désordonnées lorsque la température s'élève, donc son entropie augmente.

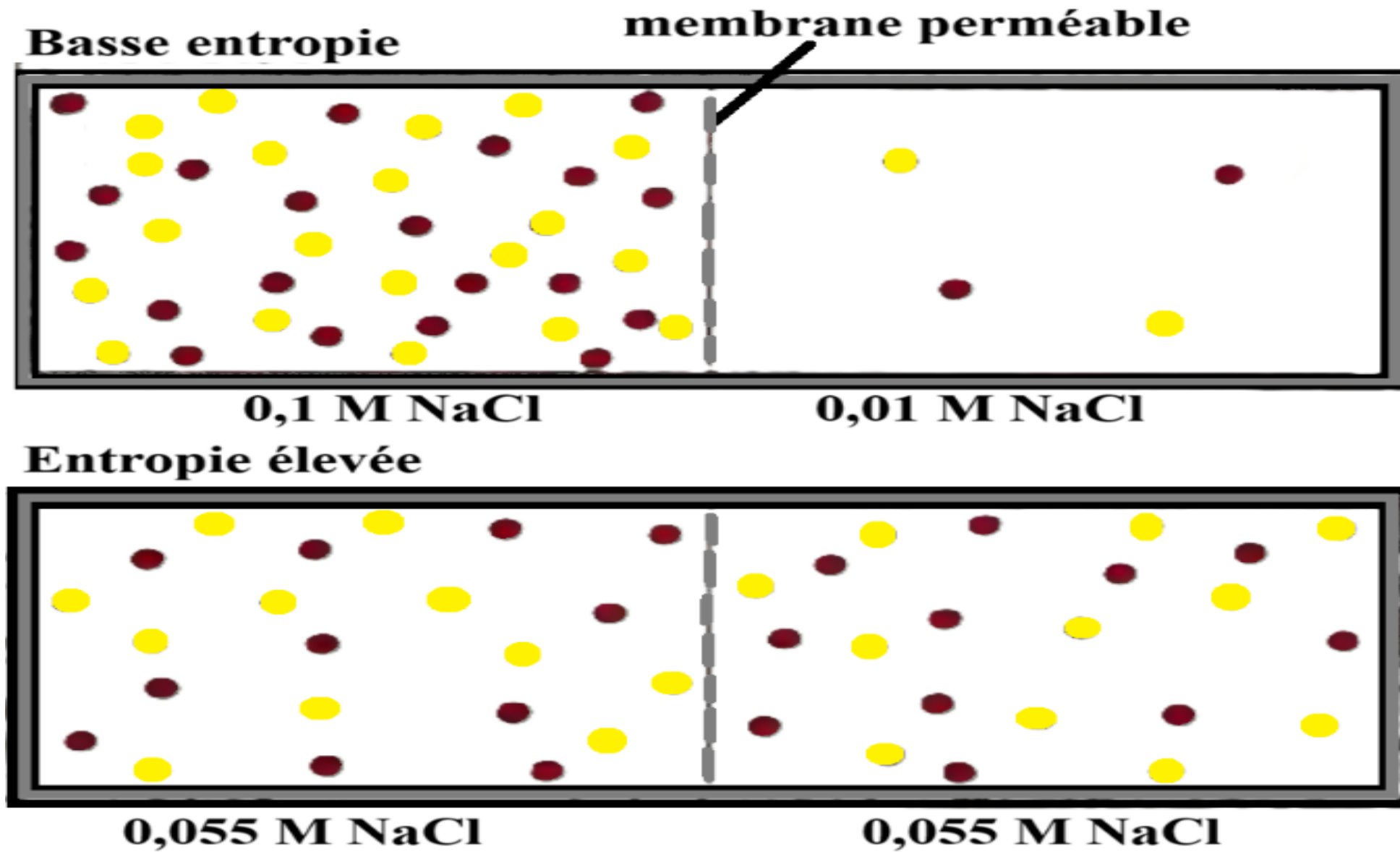


Figure : Relation entre l'entropie et la diffusion des solutés selon leur gradient osmotique décroissant.

**Energie libre accrue
(G plus élevée)
Stabilité réduite
Capacité de travail accrue**

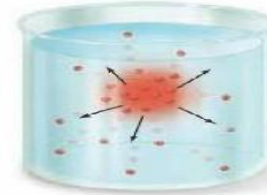
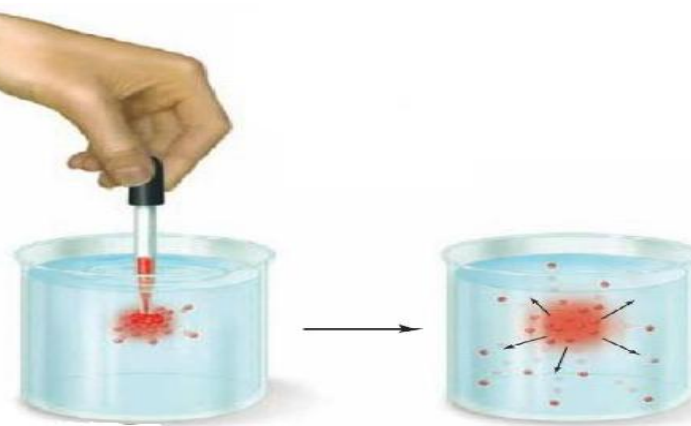
①

Lors d'un changement spontané :
-L'énergie libre du système diminue ($\Delta G < 0$).
-Le système devient plus stable.
-La portion de l'énergie libre qui correspond à la diminution de l'énergie libre du système peut servir à effectuer un travail.

②

**Énergie libre réduite (G plus faible)
Stabilité accrue
Capacité de travail réduite**

③

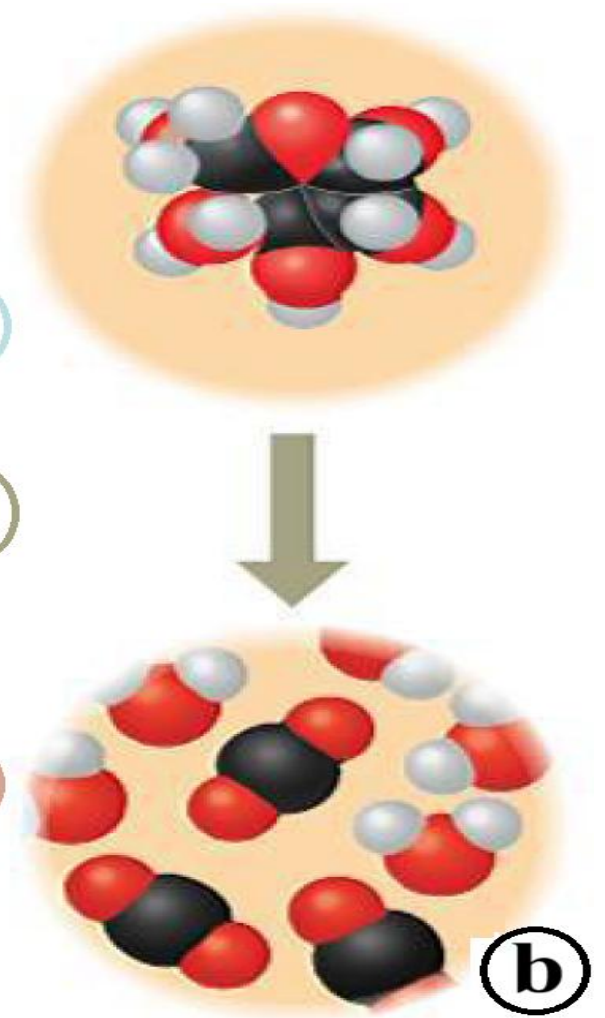


①

②



③ a



- (a) **Diffusion.** Les molécules d'une goutte de colorant diffusent jusqu'à ce qu'elles soient dispersées au hasard.
- (b) **Réaction chimique.** Dans une cellule, une molécule de glucose est dégradée en molécules plus simples

Δ : la lettre grecque delta, signe indiquant une **variation** comme un changement, come avant et après une réaction chimique.

$$\Delta G = G \text{ produits} - G \text{ réactifs}$$

Energie libre

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

ΔS est la variation de l'entropie

ΔH est la variation de l'**enthalpie** c'est à dire la chaleur.
Dans les conditions des **réactions biochimiques**, ΔH est à peu près égale à ΔE qui est la variation totale de l'**énergie interne** de la réaction.

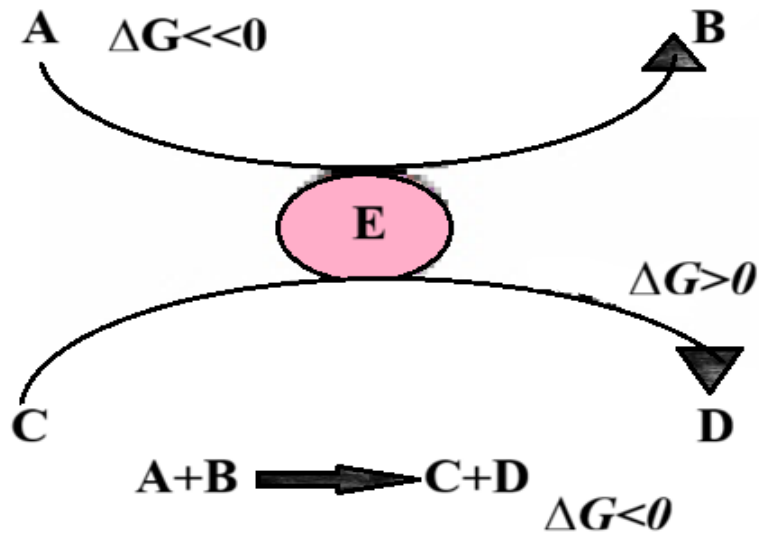
T est la température absolue.

NOTION DE COUPLAGE ENERGETIQUE DES REACTIONS BIOCHIMIQUES

Un système évoluant vers son équilibre fournit du travail et produit de l'entropie. Cette évolution peut être dirigée de telle sorte que le système fournisse un travail autre que celui qu'il produirait spontanément. Nous arrivons ainsi à la notion fondamentale en biologie qui est celle du **couplage énergétique** entre deux événements.

COUPLAGES CHIMIO-CHIMIQUES

1. Principe



2. Exemple

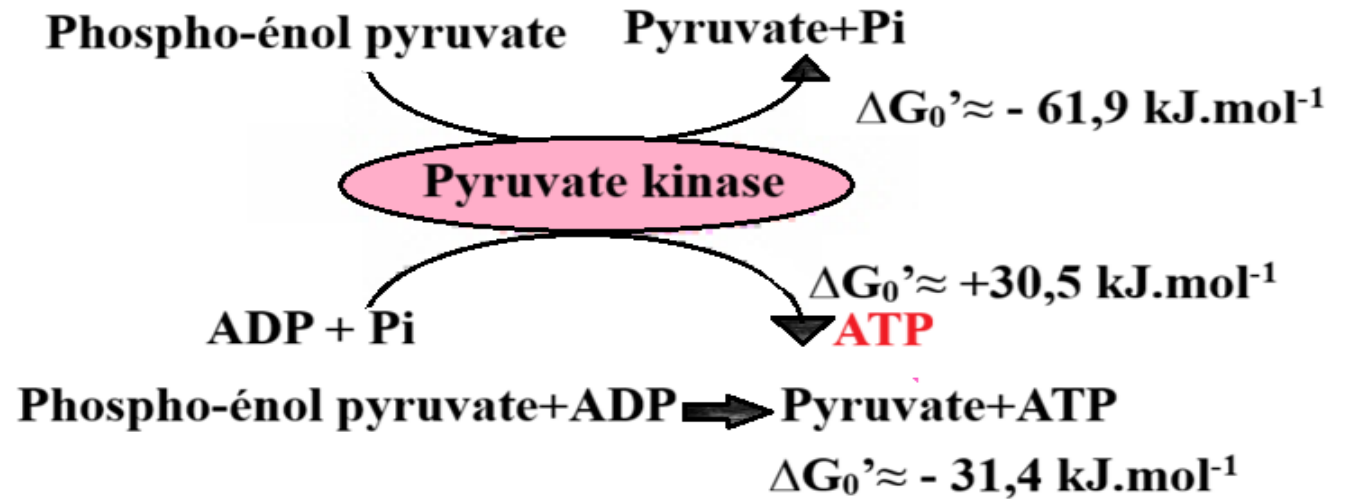


Figure : Couplage chimio-chimique. 1) La conversion du métabolite A en métabolite B s'effectue avec une libération d'énergie libre. Cette conversion est couplée à une autre réaction dans laquelle de l'énergie libre est requise pour transformer le métabolisme C en métabolite D. 2) Exemple de la synthèse d'ATP à partir d'ADP et de phospho-énol pyruvate lors de la glycolyse. Le facteur de couplage, ici, est une enzyme, la pyruvate kinase.

COUPLAGES CHIMIO-OSMOTIQUES

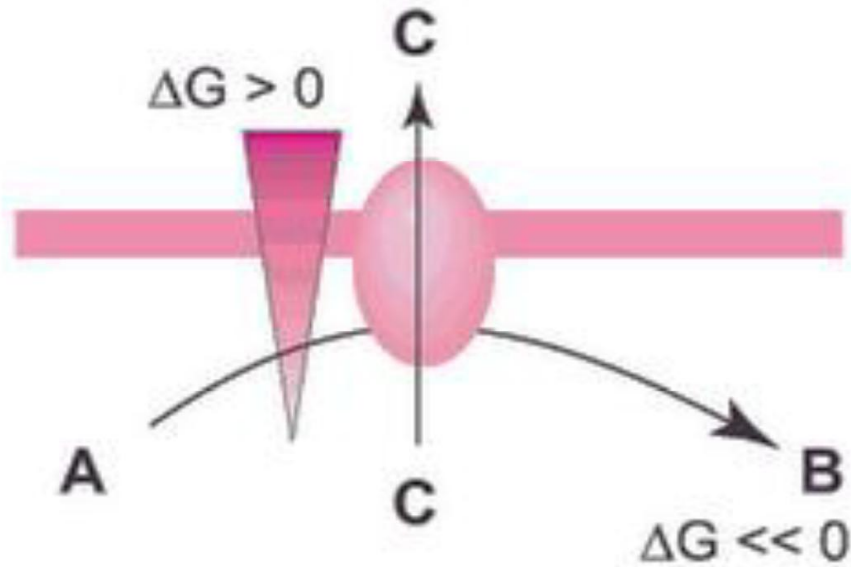
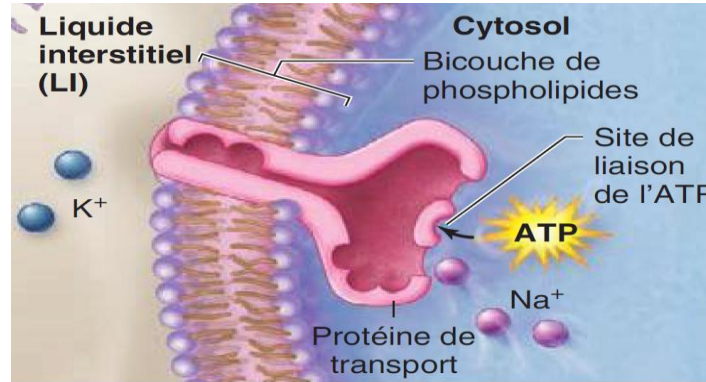
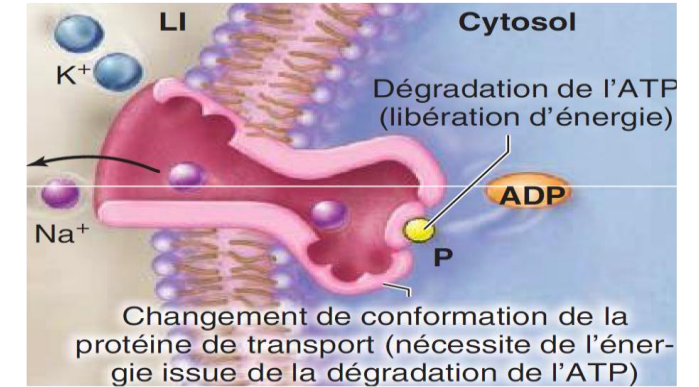


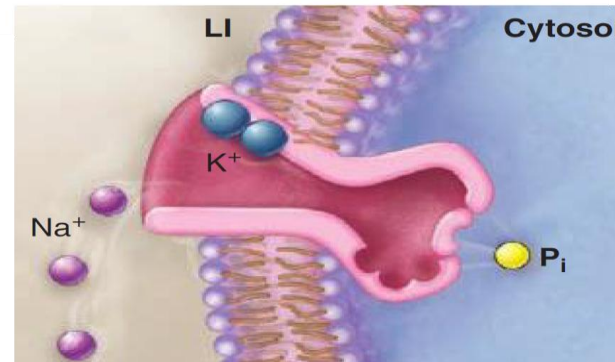
Figure : Couplage chimio-osmotique la conversion du métabolite A en B est une réaction exergonique permettent le transport du soluté C contre son gradient osmotique. Le facteur de couplage, ici, est constitué par la protéine enzymatique membranaire.



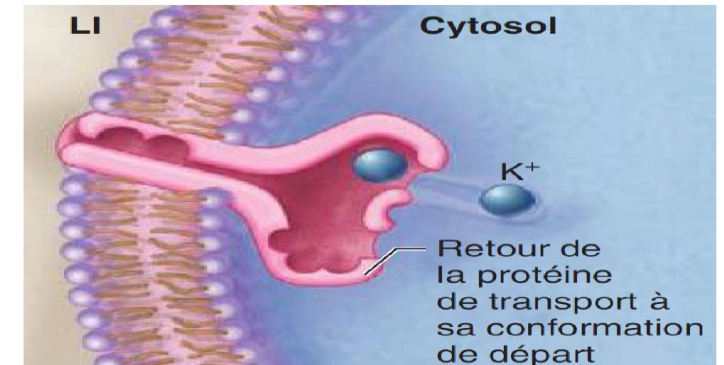
Liaison de trois ions de sodium (Na^+) et de l'ATP aux sites de la surface cytoplasmique de la pompe à $\text{Na}^+\text{-K}^+$



Dégradation de l'ATP en ADP et en phosphate inorganique (P_i), entraînant la liaison du P_i à la pompe et une libération d'énergie provoquant le changement de conformation de la pompe à $\text{Na}^+\text{-K}^+$ et la libération des ions Na^+ dans le liquide interstitiel

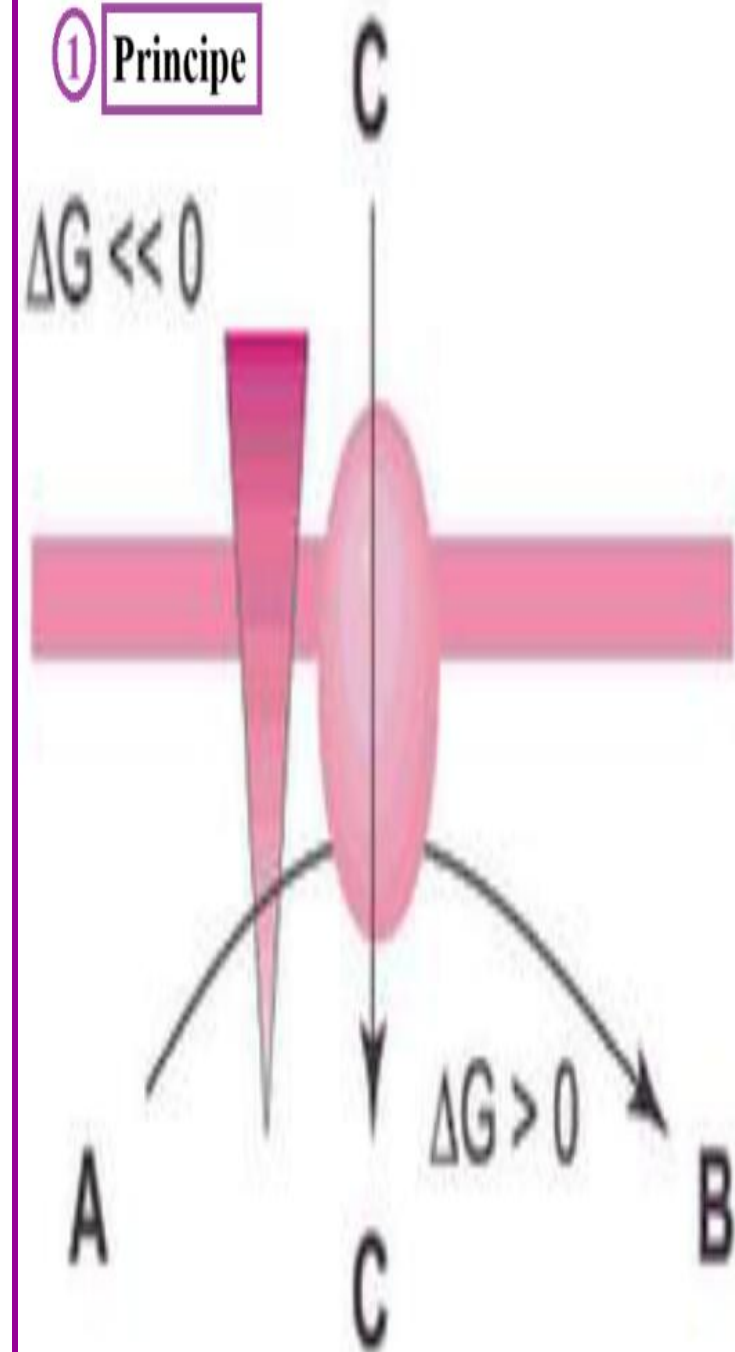


Liaison de deux ions K^+ du liquide interstitiel aux sites de la pompe à $\text{Na}^+\text{-K}^+$ à la surface de la cellule ; parallèlement, libération dans le cytosol du P_i produit plus tôt par la dégradation de l'ATP

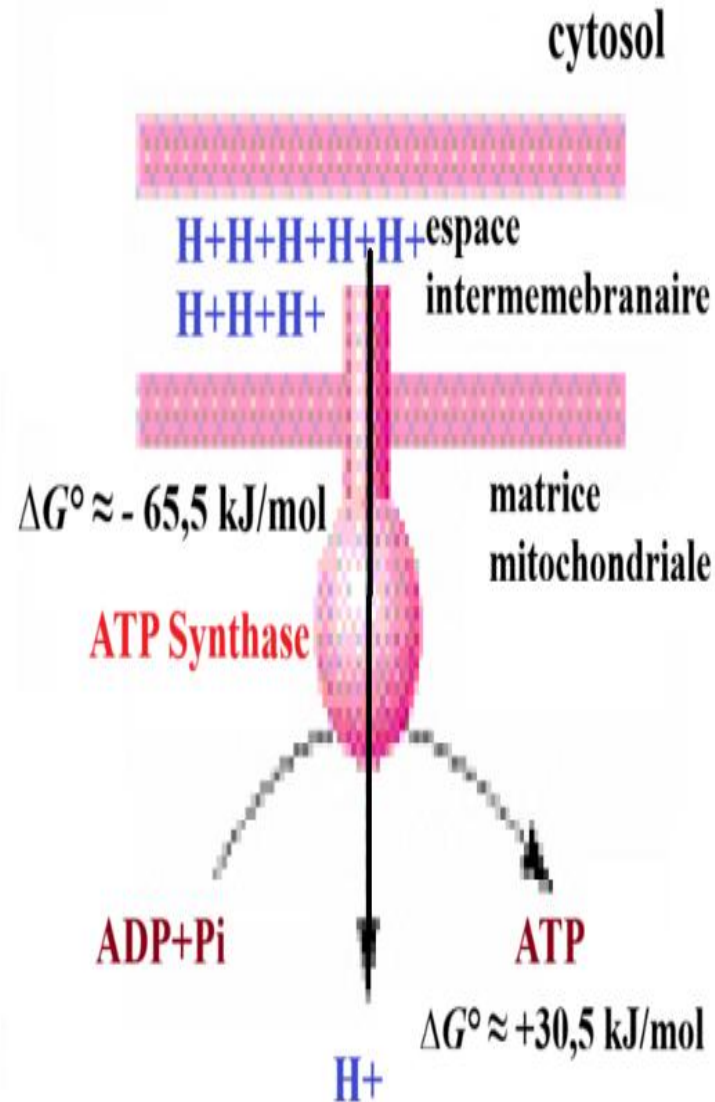


Retour de la protéine de transport à sa conformation de départ, entraînant la libération des ions K^+ dans le cytosol ; pompe à $\text{Na}^+\text{-K}^+$ maintenant prête à recommencer le processus

① Principe



② Exemple



COUPLAGES OSMO-CHIMIQUES

Figure Couplage osmo-chimique.

Principe : La conversion du métabolite A en B est une réaction endergonique. Elle est couplée à la réaction de diffusion du soluté C selon son gradient électrochimique décroissant (énergie potentielle osmotique). La diffusion du soluté C est exergonique, elle s'effectue avec une libération d'énergie libre.

Exemple du fonctionnement de l'ATP synthase sous l'effet du gradient de protons. L'ATP synthase, servant de facteur de couplage, catalyse la synthèse d'ATP à partir d'ADP et de Pi en utilisant l'énergie contenue dans le gradient de protons.

Figure Couplage osmo-osmotique.

1) Principe : La diffusion du soluté A, selon son gradient électrochimique décroissant, s'effectue avec une libération d'énergie libre. Cette diffusion est couplée à un autre transport dans laquelle de l'énergie libre et requise pour transporter le métabolite B selon son gradient osmotique croissant. Le facteur de couplage est un cotransporteur (antiport ou symport).

2) Exemple : du transport de glucose dans l'entérocyte. L'entrée du glucose dans la cellule, réaction endergonique, est couplée au transport exergonique de sodium, via la protéine de transport, SGLT-1, qui constitue le facteur de couplage.

COUPLAGES OSMO-OSMOTIQUES

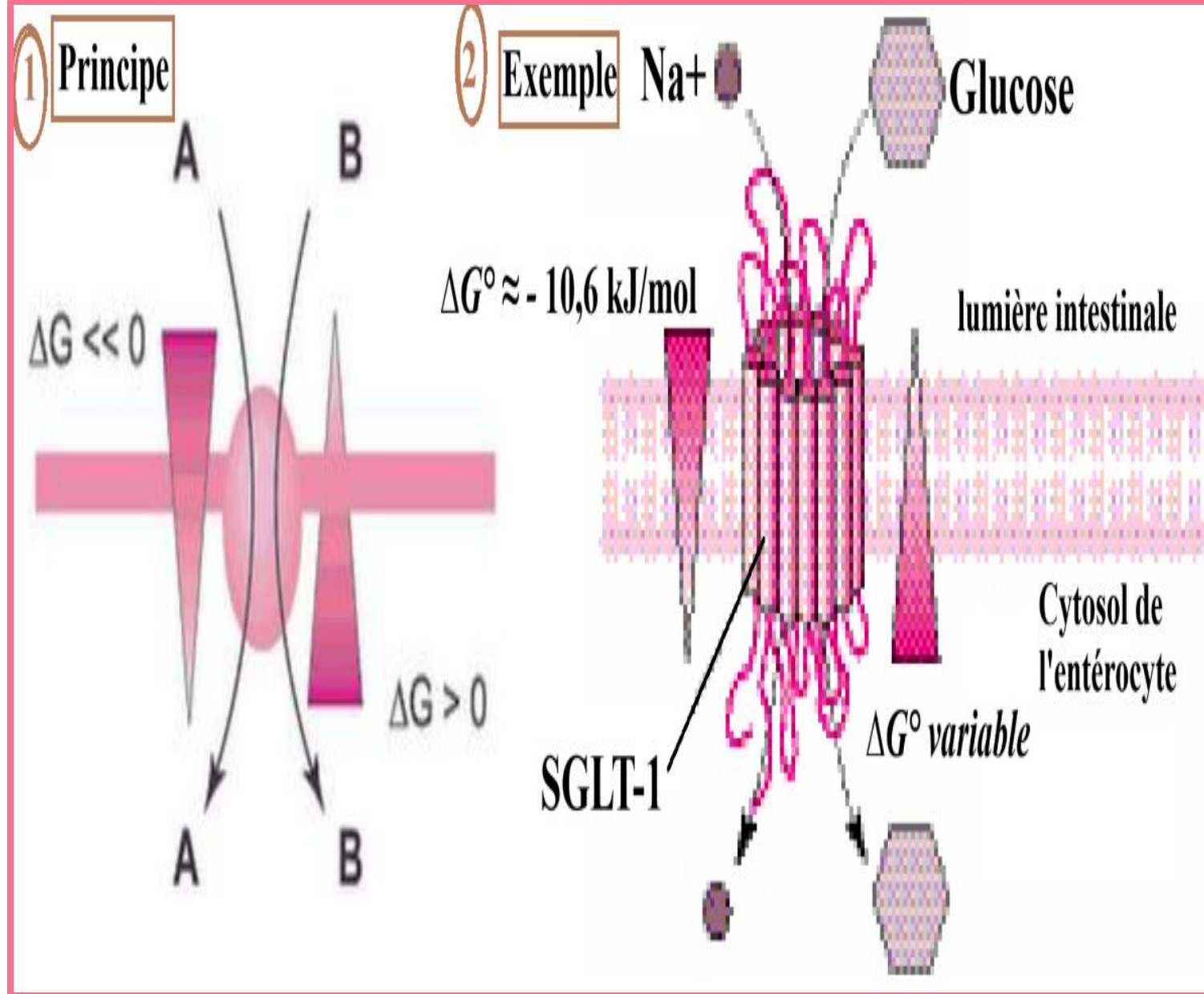


Figure : Transport du glucose dans les entérocytes

(1) Le **cotransporteur sodium-glucose isoforme 1 (SGLT1)** catalyse le transport actif du glucose (contre son gradient de concentration) à travers la membrane apicale de l'entérocyte, en le couplant à la diffusion passive de Na^+ selon son gradient de concentration ;

(2) Le **gradient sodique est maintenu** par l'expulsion active de Na^+ par la **pompe Na^+/K^+ ATPase** à travers la membrane basolatérale vers le liquide extracellulaire, puis les vaisseaux sanguins ;

(3) Le **glucose diffuse passivement** hors de la cellule selon son gradient de concentration grâce aux **transporteurs GLUT2 (glucose transporter)** des membranes basolatérales,

COUPLAGES OSMO-OSMOTIQUES

