Document téléchargeable sur le site
https://www.svt-tanguy-jean.com/

Lycée Valentine LABBÉ
41 rue Paul DOUMER – BP 20226
59563 LA MADELEINE CEDEX
CLASSE PRÉPARATOIRE TB
(Technologie & Biologie)

**ENSEIGNEMENT DE SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE (SVT)**
**°° SCIENCES DE LA VIE °°**

**Partie 1. Organisation fonctionnelle de la cellule eucaryote**
**>> Cours <<**

**Chapitre 3**

# La synthèse des constituants moléculaires par les cellules eucaryotes

## Objectifs : extraits du programme

| Connaissances clefs à construire | Commentaires, capacités exigibles |
|---|---|
| **1.3 Les biosynthèses au sein des cellules eucaryotes** | Cette partie vise à montrer que la cellule est une machine thermodynamique qui transforme de la matière. La cellule synthétise ses propres constituants moléculaires soit à partir d'autres constituants organiques servant de matière première, soit à partir de matière minérale pour certaines cellules photo ou chimiosynthétiques. Ces biosynthèses sont d'abord placées dans un contexte général montrant la diversité des synthèses, l'intervention d'enzymes, la nécessité d'énergie et de matière. La localisation des grandes voies de synthèse au sein d'une cellule eucaryote est présentée.<br>*Pour les mécanismes précis, l'étude de l'anabolisme s'appuie sur la synthèse des protéines, présentée en tant que processus de polymérisation d'acides aminés (**chapitre 4**).* |
| **1.3.1 Les cellules eucaryotes synthétisent leurs constituants moléculaires**<br>La cellule possède des constituants moléculaires complexes (acides nucléiques, lipides, protéines, polymères glucidiques), de durée de vie variable, et qui sont l'objet d'un renouvellement. | - localiser les principaux constituants moléculaires des cellules eucaryotes et de leur matrice.<br>- relier la durée de vie des biomolécules aux processus de synthèse et de dégradation au sein des cellules.<br>**Limite** : L'existence de systèmes de dégradation tels que le protéasome au sein des cellules est mentionné mais leur fonctionnement n'est pas au programme. |
| L'ensemble des biosynthèses réalisées par une cellule est spécifique en liaison avec sa différenciation et sa fonction spécialisées dans l'organisme. | - présenter une biosynthèse liée à la mise en réserve.<br>- relier le type de synthèse à la fonction des constituants moléculaires au sein des cellules. |
| Pour ce qui est du contrôle, les biosynthèses de la cellule sont soit constitutives, soit contrôlées. | - présenter un exemple de voie de synthèse contrôlé[e]. |
| Toute synthèse requiert de l'énergie, de la matière et un catalyseur. | - montrer qu'une liaison entre deux constituants requiert un apport d'énergie chimique sous la forme d'un couplage chimio-chimique.<br>**Lien** : La spécificité de réaction des enzymes est évoquée en lien avec l'enseignement de **biotechnologies** (2.1.1). |

## Introduction

Comme toute cellule, ***une cellule eucaryote échange de la matière et de l'énergie avec son environnement*** : c'est donc un **système thermodynamique ouvert**. ***Les systèmes vivants évoluent loin de l'équilibre thermodynamique*** en ce sens où il n'y a **pas équilibre avec l'environnement** : il y a en permanence des **échanges de matière** et **d'énergie** avec cet environnement. Si la **quantité de matière** et l'**organisation** d'un **être vivant** sont globalement **stables au cours du temps**, c'est au prix d'un ***rejet constant et massif d'énergie dans l'environnement*** : les êtres vivants sont donc des **systèmes dissipatifs**. Le **maintien de l'ordre** dans les organismes s'opère au prix d'une **augmentation** du **désordre** (**l'entropie**) de **l'environnement**.

Revoir le complément BI01

Il ne faut ainsi pas confondre **stabilité**, **ordre** et **équilibre**.

Les **organismes** sont globalement **stables** dans leur **constitution** (**stabilité** de la quantité d'eau, d'ions, de protéines… ce qui suppose un **équilibre entre entrées/synthèses et pertes/dégradations**) et leur **organisation** qui, paradoxalement, nécessite des **échanges permanents de matière et d'énergie** avec **l'environnement** (caractère « dynamique »). ***Cette stabilité n'est permise que parce que les êtres vivants sont des systèmes dissipatifs évoluant loin de l'équilibre thermodynamique***.

Au sein des organismes, la **matière** subit en permanence de **nombreuses transformations chimiques** qui permettent, entre autres, le **maintien du haut degré d'organisation*** des **structures biologiques**. On appelle **métabolisme** ***l'ensemble des réactions chimiques qui se déroulent dans une cellule (ou dans un organisme)***. Le métabolisme est classiquement **divisé en deux grandes parties** en réalité **interconnectées** et **interdépendantes** :

- Le **catabolisme** : ***ensemble de réactions qui permettent la dégradation de molécules biologiques, permettant souvent la libération d'énergie***. Le plus souvent, la **matière vivante** est alors **oxydée** (encadré A).
- L'**anabolisme** : ***ensemble de réactions qui permettent la synthèse de molécules organiques, consommant généralement de l'énergie***. Le plus souvent, la **matière minérale ou vivante** est alors **réduite** (encadré A). *C'est surtout à cet aspect que le présent chapitre invite à s'intéresser.*

* On appelle ***turn-over*** **moléculaire** ***le renouvellement régulier des constituants moléculaires d'une cellule et/ou d'un être vivant***.

Voir :
- la photosynthèse (chapitre 5, chapitre 11) et l'expression génétique (chapitre 4) comme exemples d'anabolisme
- les principales voies du catabolisme oxydatif (chapitre 5)

Ce cours constitue un éclairage complémentaire des notions vues en **biotechnologies** (**métabolismes**, **enzymologie**…).
Les cours de **chimie** relatifs à la **thermochimie** (et à la cinétique) sont censés être maîtrisés.

**Comment les cellules produisent-elles et renouvellent-elles leurs constituants moléculaires ?**

## *Encadré A Quelques rappels sur l'oxydoréduction*

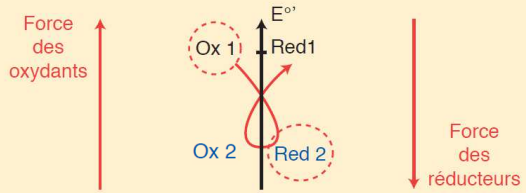
*D'après* SEGARRA *et al. (2014), corrigé*

Une réaction d'**oxydation** est une réaction de **perte d'électrons** éventuellement accompagnés de protons.
Une réaction de **réduction** est une réaction de **gain d'électrons** éventuellement accompagnés de protons

$$A^{n+} + n.e^- \leftrightarrow A$$

→ sens de la réduction
← sens de l'oxydation
$A^{n+}$ : forme oxydée ; A : forme réduite ; n = nombre d'électrons transférés

Un **oxydant** est un composé qui **capte des électrons** et donc **oxyde un autre composé** (ce faisant l'oxydant est réduit lors de la réaction). Un **réducteur** est un composé qui **donne des électrons** et donc **réduit un autre composé** (ce faisant le réducteur est oxydé lors de la réaction).
Oxydant et réducteur forment des couples oxydoréducteurs caractérisés par un **potentiel oxydoréducteur** (ou potentiel redox), E, exprimé comme une **différence de potentiel** (unités : V) par rapport à un couple standard ($H^+/H_2$). Des tables de potentiels redox standard dans les conditions d'usage biochimique ($E^{0'}$) permettent la comparaison des couples oxydoréducteurs.
Le transfert spontané des électrons entre deux couples oxydoréducteurs a lieu entre le réducteur le plus fort d'un couple (bas potentiel redox) et l'oxydant le plus faible (haut potentiel redox). Le transfert des électrons a donc lieu dans **le sens des potentiels redox croissants** (règle du gamma « γ »).




Réaction spontanée entre composés de deux couples oxydoréducteurs

# I. Les cellules eucaryotes, des structures composées de constituants biochimiques complexes, à localisation particulière et renouvelés

| | |
|---|---|
| **Capacités exigibles** | ✓ **Localiser** les principaux constituants moléculaires des cellules eucaryotes et de leur matrice.<br>✓ **Relier** la durée de vie des biomolécules aux processus de synthèse et de dégradation au sein des cellules.<br>✓ **Montrer** qu'une liaison entre deux constituants requiert un apport d'énergie chimique sous la forme d'un couplage chimio-chimique. |

## A. Les cellules eucaryotes, des entités compartimentées aux constituants variés et localisables

### 1. Une localisation des principaux constituants

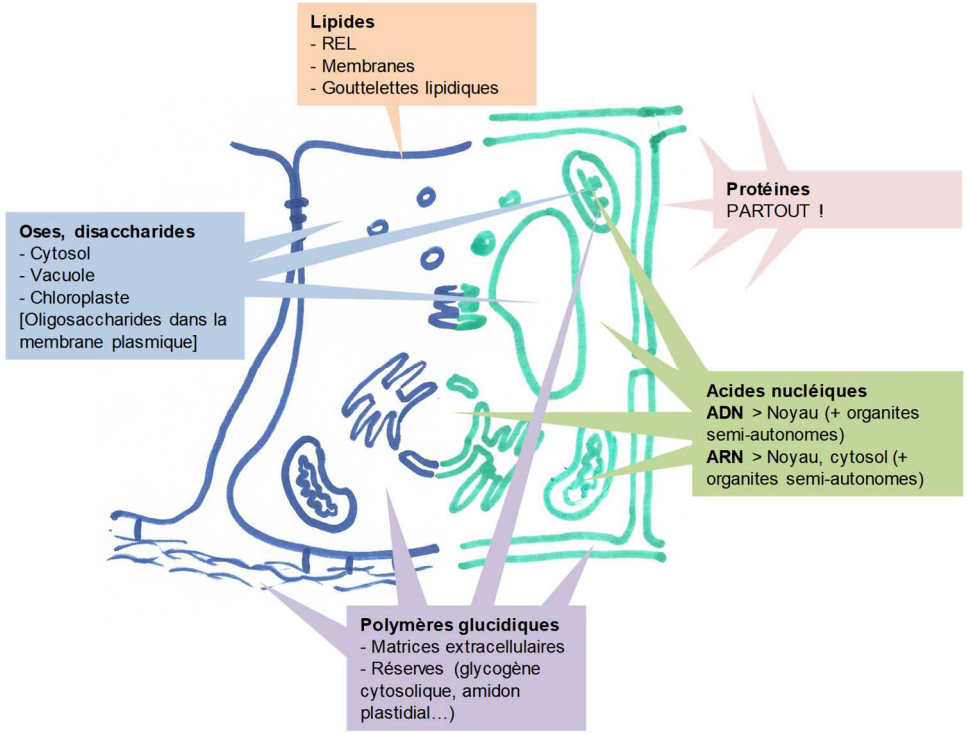



**FIGURE 1. Localisation principale des constituants cellulaires majeurs dans une cellule eucaryote.** *Original*

*On a représenté caricaturalement une cellule animale à gauche et une cellule végétale à droite. Nombre de détails n'ont pas été schématisés, dont certains organites comme le REL.*

- Les chapitres précédents mais aussi plus généralement l'ensemble des chapitres ou TP des deux années amènent à envisager des **composés biochimiques variés** qui interviennent dans la **constitution** et le **fonctionnement** des **cellules** (ou de leurs **matrices**).
- Le présent chapitre invite seulement à dresser un **panorama global** et très **simplifié** des **localisations majeures** des **principaux constituants**, ce que nous avons essayé de faire dans le figure 1.

### 2. Une compartimentation induisant la spécificité de la composition et de la fonction des volumes cellulaires

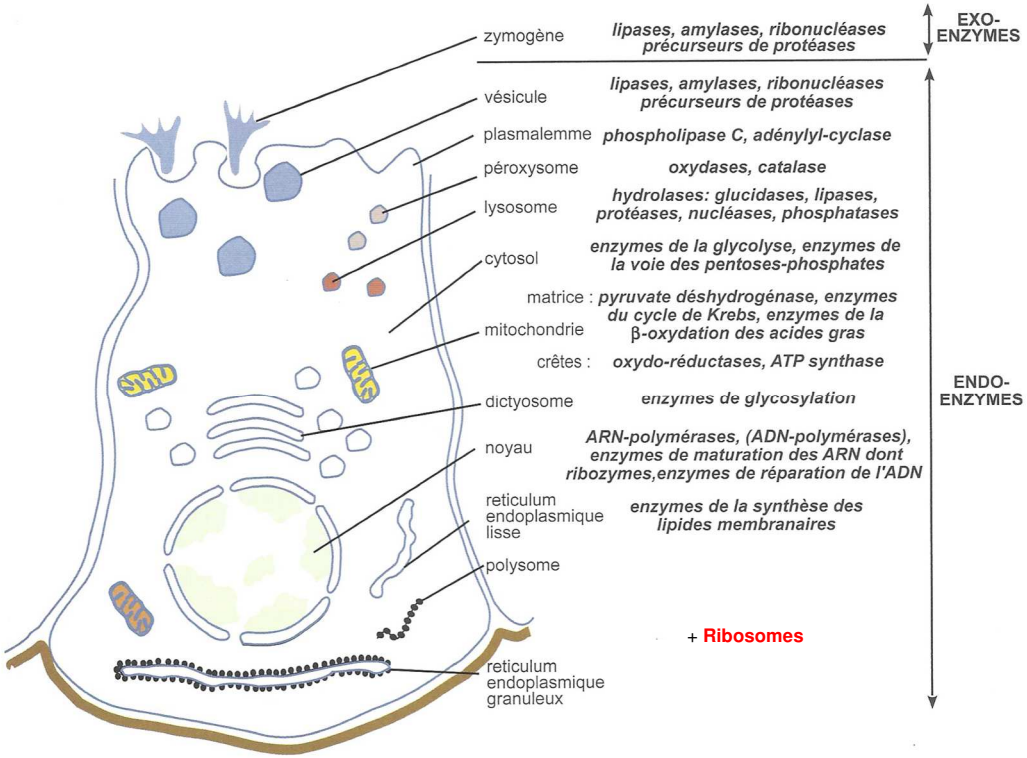



**FIGURE 2. Les enzymes de la cellule acineuse pancréatique [*pour illustration*].**
*Il convient de ne pas oublier les **ribosomes** situés dans le **cytosol** (même si ce ne sont pas des enzymes mais des complexes ribonucléoprotéiques).*
D'après PEYCRU *et al.* (2013)

- Les **cellules eucaryotes** sont fondamentalement caractérisées par leur **compartimentation**, ce qui permet entre autres une **localisation particulière** de certains **constituants**, y compris des **enzymes** responsables des **biosynthèses** (ou des processus de **dégradation**) (figure 2).

- Les **compartiments cellulaires** sont ainsi des ***volumes cellulaires limités par une membrane et spécialisés, c'est-à-dire dont la composition et donc la fonction sont spécifiques***.

## B. Les cellules eucaryotes, des entités dont les constituants ont une durée de vie limitée et sont renouvelés par des biosynthèses

### 1. Des constituants complexes et altérables, à durée de vie limitée

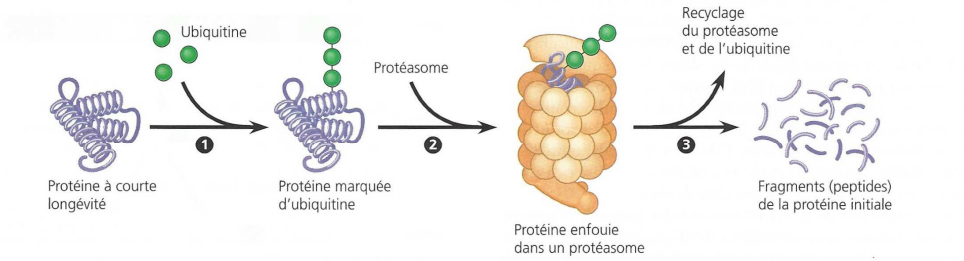
#### a. Une durée de vie limitée des composés biochimiques

- Les **constituants cellulaires** ou **extracellulaires** des organismes sont très **variés** et ont donc des **durées de vie variées** mais toutefois toujours **limitées dans le temps** ; généralement, on rend compte de cette espérance de vie par la mesure de la **demi-vie** qui est le ***temps au bout duquel la moitié d'un stock de molécules données a été suffisamment altéré pour que sa fonction ait été perdue ou sévèrement modifiée***.

> Exceptionnellement, je ne propose **pas de valeurs** car il est **impossible** de donner ne serait-ce qu'un **ordre de grandeur des demi-vies** pour une famille de biomolécules… Cela dépend de **la molécule**, de **l'organisme**, de **la cellule** dans l'organisme (ou bien si on est **à l'extérieur de l'organisme**, ou encore dans les **liquides extracellulaires**, ou les **cavités internes**…), **l'équipement enzymatique**, **les conditions environnementales** (température…)…

#### b. Une altération spontanée ou due à des mécanismes de dégradation enzymatique

- Les composés peuvent être **altérés** par **deux voies** :
  - Soit **de manière « spontanée »**, c'est-à-dire ***sans l'intervention d'un catalyseur***. Deux raisons majeures expliquent cela :
    - Les **conditions environnementales de la biomolécule** peuvent l'altérer (ionisation, pH, température, UV…)
    - Les **biomolécules**, particulièrement les **macromolécules**, sont des **molécules complexes et hautement organisées** (*s'opposant en cela, rappelons-le, à la tendance au désordre de l'univers*). Ce sont donc des **édifices résolument fragiles** et **potentiellement réactifs** qui, spontanément, peuvent se dégrader.
  - Soit **de manière enzymatique**, constituant alors une part du **catabolisme**. On peut ainsi citer :
    - L'existence d'**organites riches en enzymes hydrolytiques** pouvant **dégrader des composés** et des **organites** comme les **lysosomes** (**cellules animales**) ou encore la **vacuole** (**cellules végétales**) ;
    - L'existence d'**enzymes cytosoliques** ou de **complexes enzymatiques cytosoliques** dégradant certaines **molécules**. On peut penser à ces exemples (qui seront repris dans le chapitre 4) :
      - ✓ Les **ARNases (RNAses)**, ***enzymes qui dégradent les ARN dans le cytosol***.
      - ✓ Le **protéasome**, ***complexe enzymatique qui permet la destruction de protéines altérées ou mal repliées*** (souvent préalablement marquées par la cellule par de l'ubiquitine) (figure 3).




**Dégradation d'une protéine par un protéasome.** Un protéasome est un énorme complexe protéique dont la forme rappelle celle d'un tonneau. Sa fonction est de découper les protéines inutiles qui se trouvent dans la cellule. Dans la plupart des cas, il attaque les protéines marquées de courtes chaînes d'ubiquitine (une petite protéine). ❶ Des enzymes du cytosol ajoutent des molécules d'ubiquitine à une protéine. (On ignore comment celle-ci est choisie.) ❷ Un protéasome reconnaît la protéine ainsi marquée ; il la déploie et l'enfouit dans sa cavité centrale. ❸ Les enzymes du protéasome découpent la protéine en de petits peptides pouvant être dégradés ultérieurement par les enzymes du cytosol. Les étapes 1 et 3 nécessitent la présence d'ATP. Les protéasomes des cellules eucaryotes sont aussi massifs que les sous-unités ribosomiques et ils sont dispersés dans l'ensemble de la cellule.

**FIGURE 3. Le fonctionnement du protéasome.** D'après CAMPBELL & REECE (2004).

  - L'existence de **compartiments extracellulaires** ou de **cavités de l'organisme** très riches en **enzymes hydrolytiques** ; on peut par exemple penser au **tube digestif**.

### 2. Un *turn-over* moléculaire entretenu par des biosynthèses (constituant l'anabolisme)

#### a. Le *turn-over*, des réactions anaboliques de renouvellement des constituants cellulaires

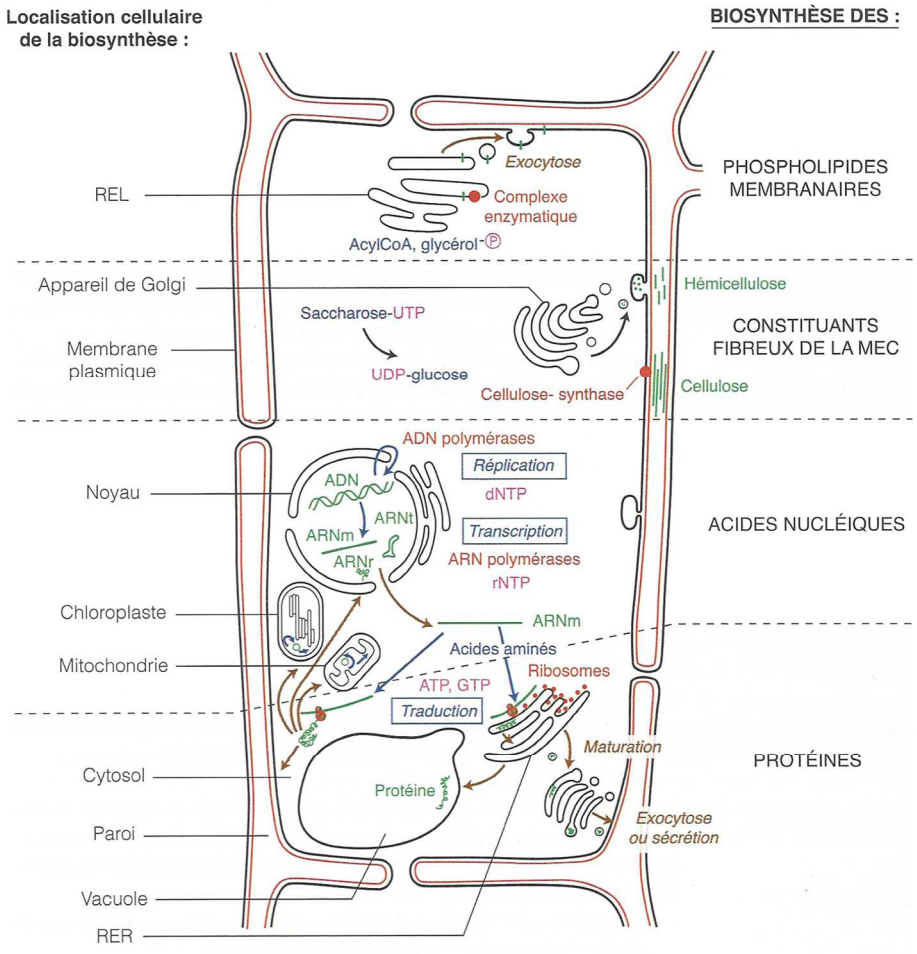
- On appelle ***turn-over* moléculaire** ***le renouvellement régulier des constituants moléculaires d'une cellule et/ou d'un être vivant***. Il est permis par des **biosynthèses** qui, chez les **cellules eucaryotes**, sont **localisées** dans des **compartiments** plus ou moins spécialisés et qui **coopèrent** entre eux

#### b. Un processus qui prend appui sur la spécialisation et la coopération des compartiments cellulaires

- Les **biosynthèses** permettent de **produire** et **renouveler** les **constituants cellulaires** (ou **extracellulaires**) sont **localisées** dans des **compartiments** plus ou moins **spécialisés** mais qui **coopèrent** entre eux (figures 4-5).
- On retiendra notamment :
  - Cytosol : synthèse des **acides gras**, des **acides aminés***, des **nucléotides**, du **glycogène** (***polymère de réserve chez certaines cellules de Métazoaires***), **traduction** (***synthèse des protéines***) ;

> * Dans les **cellules végétales**, les plastes produisent les **acides aminés** en permettant l'incorporation des nitrates du sol dans la matière organique.

  - REG, appareil de GOLGI : maturation des **protéines** destinées à la **sécrétion** et aux **membranes** + synthèse des constituants des **matrices extracellulaires** ;
  - REL : synthèse de la plupart des **lipides** ;
  - Noyau : **transcription** (***synthèse des ARN***), **réplication** (***synthèse d'ADN***) ;
  - Chloroplaste : synthèse des **glucides simples** par **photosynthèse** mais aussi d'**amidon** ;
  - Membrane plasmique : synthèse de **cellulose**.




En rouge : les principales enzymes impliquées dans la biosynthèse ; en rose : le coût énergétique ; flèches brunes : acheminement des molécules vers leur localisation fonctionnelle ; flèches bleues : réplication, transcription et traduction.
RER : réticulum endoplasmique rugueux ; REL : réticulum endoplasmique lisse.
dNTP : désoxyribonucléotides tri-phosphate.
rNTP : ribonucléotides tri-phosphate.

**FIGURE 4. Localisation de quelques réactions de synthèse dans une cellule végétale.** D'après SEGARRA *et al.* (2014)

*Notez que les synthèses glucidiques (et notamment le rôle de la photosynthèse) ne sont pas représentées.*

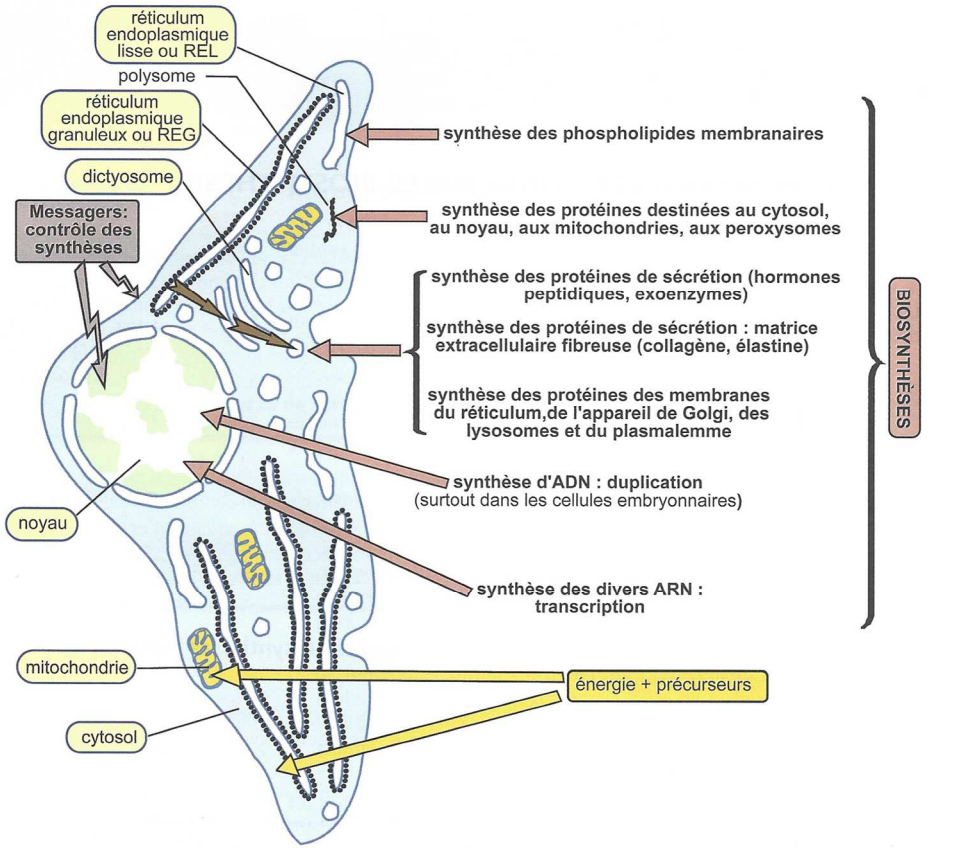



**FIGURE 5. Localisation de quelques réactions de synthèse dans une cellule animale : exemple d'un fibroblaste.** D'après SEGARRA *et al.* (2014)

## c. Un processus requérant de la matière, de l'énergie, un catalyseur et de l'information

- Les **biosynthèses** requièrent :
  - De la **matière** : il faut des **molécules initiales** qui seront **transformées** (**modification** d'un **groupement**, **ajout** d'un **groupement**…), voire **polymérisées** (= ***adjonction de molécules semblables liées entre elles par des liaisons covalentes***).
  - De l'**énergie** : comme les **synthèses** sont fondamentalement **endergoniques** et relèvent quasi-systématiquement d'une **réduction** de la **matière**, il y a **nécessité d'énergie** obtenue par **couplage énergétique** (voir d juste en-dessous). Les synthèses supposent en effet souvent de produire de **nouvelles liaisons covalentes** nécessiteuses d'énergie.

- Un **catalyseur**, c'est-à-dire une ***molécule qui accélère de manière importante la réaction chimique*** (cette molécule étant restaurée à son état initial en fin de réaction). Très souvent, ce sont des ***protéines catalytiques*** ou **enzymes** qui remplissent ce rôle. On peut toutefois citer parfois des ***ARN catalytiques***, les **ribozymes**, comme ceux que l'on trouve dans les **ribosomes**.

Voir enseignement de **Biotechnologies** en **enzymologie**

- De l'**information** : **molécules informationnelles** pour les **macromolécules séquencées** (ADN, ARN, protéines), **enzymes** (*elles-mêmes issues de l'expression génétique*) pour les **autres biomolécules** (glucides, lipides, acides nucléiques).

Rappelons à cette occasion qu'une **cellule eucaryote** est traversée par des **flux de matière**, d'**énergie** et d'**information** (chapitre 1 sur la cellule eucaryote).

## d. Un processus endergonique dont l'énergie est fournie par un couplage à un travail exergonique (notion de couplage énergétique)

- On appelle **couplage énergétique** ***l'association immédiate de deux travaux, l'un libérant de l'énergie et l'autre utilisant une partie de l'énergie libérée par le premier*** (figures 6-7).
- Tous les **travaux endergoniques** nécessitent d'être **couplés** avec des **travaux exergoniques** qui **libèrent plus d'énergie** que le **travail endergonique** n'en **consomme**. ***Le bilan est donc toujours exergonique***.

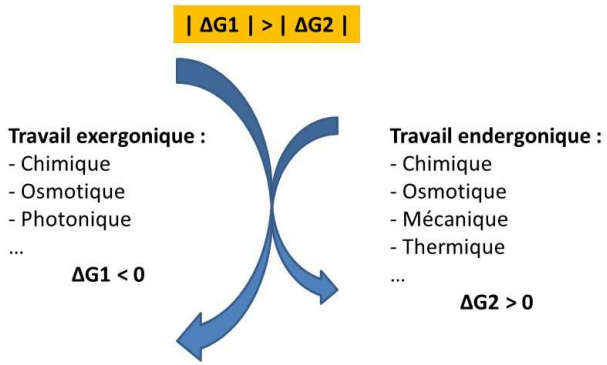



**FIGURE 6. Le principe d'un couplage énergétique.** *Schéma original.*

- ***Un couplage énergétique porte le nom d'abord du travail libérateur d'énergie et ensuite du travail consommateur.***

° Par exemple, la **contraction musculaire** est un **travail mécanique** qui utilise **l'énergie fournie par l'hydrolyse de l'ATP** (**travail chimique**) : c'est donc un **couplage chimio-mécanique**.

- ***On trouvera ainsi (figure 7) :***

° des **couplages chimio-chimiques** (***une réaction chimique en permet une autre***) (très **fréquent**),
° des **couplages chimio-osmotiques** (***une réaction chimique permet le passage d'une substance de force = transport actif primaire***),
° des **couplages osmo-osmotiques** (***le passage spontané d'une substance – dans le sens de son gradient – permet le passage de force d'une seconde substance – contre son gradient = transport actif secondaire***)
° des **couplages osmo-chimiques** (***le passage d'une substance dans le sens de son gradient permet la réalisation d'une réaction chimique***), par exemple la **phosphorylation d'ADP** en **ATP** au niveau des **ATP synthases**.

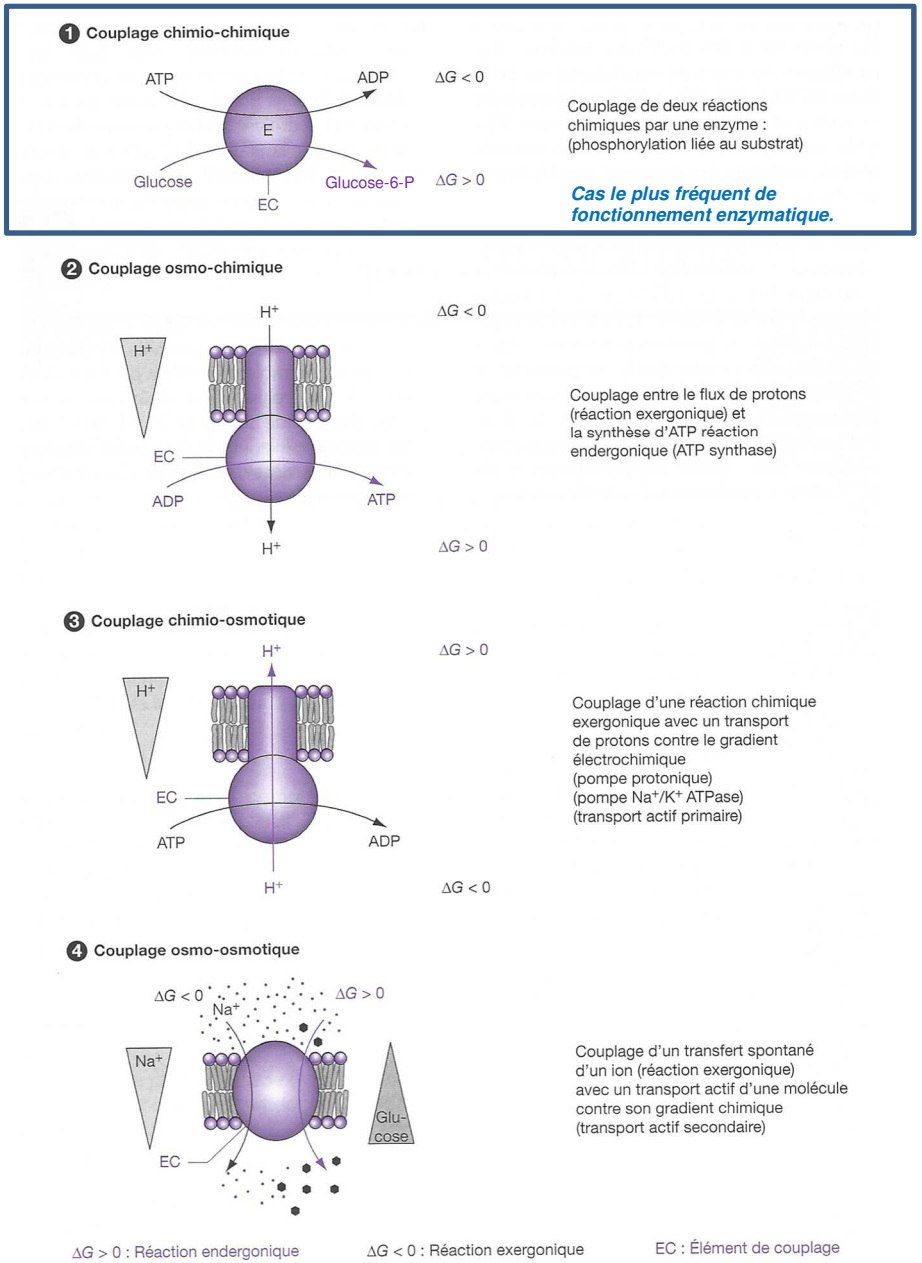



**FIGURE 7. Quelques exemples de couplages.** D'après BREUIL (2007), corrigé.

° des **couplages chimio-mécaniques** (***une réaction chimique permet un travail mécanique***), cas des **transports de vésicules**, de la **contraction musculaire**… qui consomment de l'**ATP**.
° des **couplages photo-chimiques** (***une captation d'énergie lumineuse permet une réaction chimique***), cas des **réactions photochimiques** dans le chloroplaste.
°…

- Attention toutefois, il existe une **théorie chimiosmotique**, proposée par l'Américain Peter D. MITCHELL (1920-1992) en 1964, qui postule que ***c'est le gradient de protons (énergie osmotique) qui permet la production membranaire d'ATP (énergie chimique) dans les mitochondries et chloroplastes***. Eh bien là, **les préfixes « chimio- » et « osmo- » sont dans l'autre sens !** Car il s'agit pourtant bien d'un **couplage osmo-chimique** dont parle cette **théorie « chimiosmotique »** !!!

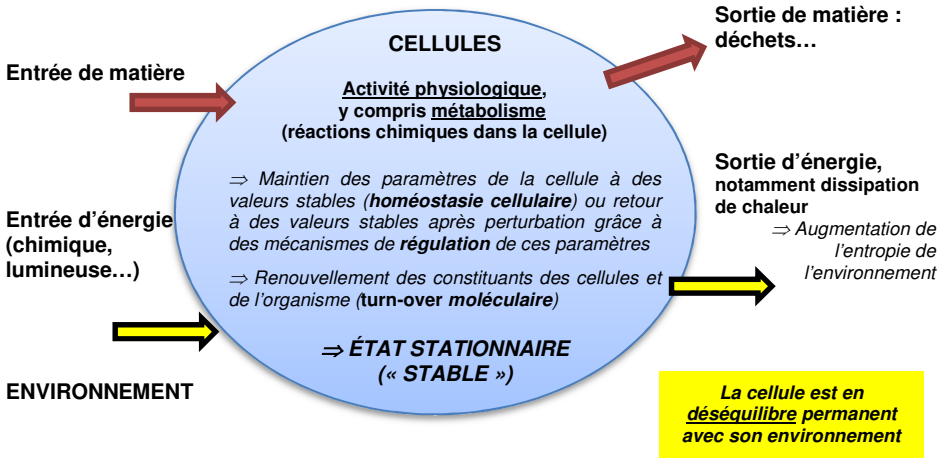
**IMPORTANT** :

- La ***mise en place d'une liaison covalente suppose le plus souvent un couplage chimio-chimique avec une autre réaction chimique***, souvent la **dégradation d'une autre liaison covalente** (qui peut être par exemple la **liaison entre deux phosphates inorganiques de l'ATP**) (figure 7-1).

## C. Les cellules eucaryotes, des systèmes ouverts qui utilisent de la matière et de l'énergie provenant de l'environnement

### 1. Les cellules, des systèmes thermodynamiques ouverts

Revoir le complément BI01




⮝ FIGURE 8. **Les cellules, des systèmes thermodynamiques ouverts (= qui échangent de la matière et de l'énergie avec leur environnement).** *Voir le texte.*

Notons que l'énergie dont il est question peut parfois être sous forme d'**énergie chimique** contenue dans la **matière** : *l'entrée et la sortie de matière et d'énergie sont alors confondues*. Les **quantités de matière et d'énergie** dans un **organisme** ou une **cellule** sont **globalement stables** à court et moyen terme (on exclut ici les phénomènes de croissance), de même que **l'organisation de la cellule**… alors que cette matière est sans cesse **transformée** et que le maintien de cette organisation et les activités physiologiques demandent une **grande quantité d'énergie**. Cela suppose **l'acquisition régulière de matière et d'énergie de l'environnement**, leur **transformation** (notamment *via* les **réactions métaboliques**) et l'expulsion de **déchets**. *Le maintien de « l'ordre » dans les cellules et l'organisme et son fonctionnement imposent une dissipation d'énergie sous forme principalement de **chaleur**, laquelle augmente le « désordre » (entropie) de l'environnement.*

- Les **substances** et l'**énergie** engagées dans la **constitution** ou le **fonctionnement** des **êtres vivants** proviennent, à un moment ou un autre, de leur **environnement**.
- Comme toute **cellule**, une cellule eucaryote ***échange de la matière et de l'énergie avec son environnement*** : c'est donc un **système thermodynamique ouvert**. Les systèmes vivants évoluent **loin de l'équilibre thermodynamique** en ce sens où **il n'y a pas équilibre avec l'environnement** : il y a en permanence des **échanges de matière et d'énergie** avec cet environnement. Si la **quantité de matière** et **l'organisation** d'un **être vivant** sont **globalement stables** au cours du **temps**, c'est au prix d'un **rejet constant et massif d'énergie dans l'environnement** : les êtres vivants sont donc des **systèmes dissipatifs**. Le **maintien de l'ordre** dans les **organismes** s'opère au prix d'une **augmentation du désordre** (**l'entropie**) de l'environnement (figure 8).

Il ne faut ainsi pas confondre **stabilité**, **ordre** et **équilibre**.

Les **organismes** sont globalement **stables** dans leur **constitution** (**stabilité** de la quantité d'eau, d'ions, de protéines… ce qui suppose un **équilibre entre entrées/synthèses et pertes/dégradations**) et leur **organisation** qui, paradoxalement, nécessite des **échanges permanents de matière et d'énergie** avec **l'environnement** (caractère « dynamique »). ***Cette stabilité n'est permise que parce que les êtres vivants sont des systèmes dissipatifs évoluant loin de l'équilibre thermodynamique***.

### 2. L'environnement, un ensemble de ressources… pas forcément biodisponibles

- Les **substances** et l'**énergie** engagées dans la **constitution** ou le **fonctionnement** des **êtres vivants** proviennent, à un moment ou un autre, de leur **environnement**.
- En biologie, on peut appeler **ressource** une ***portion de l'environnement d'un être vivant ou d'une cellule comprenant des éléments matériels et/ou énergétiques pouvant permettre sa survie ou son fonctionnement***.
  *Par exemple, la chaleur, l'eau, l'espace ou même les femelles (en écologie) peuvent constituer des ressources pour un être vivant.*

En biochimie métabolique, ce sont la **matière** et l'**énergie** qui constituent les **ressources**.

- On distinguera les **ressources biodisponibles**, c'est-à-dire ***effectivement utilisables par un être vivant ou une cellule dans le cadre de son fonctionnement*** de **celles qui ne le sont pas**.
  *Par exemple, si on s'intéresse à la **ressource azotée** chez les **Angiospermes**, les **nitrates** constituent une ressource **biodisponible chez les toutes les Angiospermes** alors que le **diazote atmosphérique** n'est **biodisponible que chez les Angiospermes associées symbiotiquement à des bactéries fixatrices d'azote**.*

### 3. Les grands types métaboliques : autotrophie et hétérotrophie

- On distingue classiquement les **êtres vivants autotrophes** et **hétérotrophes**.
- Un **organisme** (ou une **cellule**) est **autotrophe** ***s'il peut produire sa propre matière organique à partir de matière minérale***. Il est d'usage de préciser si la matière en question est **carbonée** (**autotrophie au carbone**) ou **azotée** (**autotrophie à l'azote**). On peut parler aussi de **lithotrophie** pour signifier le ***caractère minéral de la source de matière employée***.

- Un **organisme** (ou une **cellule**) est **hétérotrophe** ***s'il ne peut produire sa propre matière organique qu'à partir de matière organique préexistante***. On peut aussi parler d'**organotrophie** pour signifier le ***caractère organique de la source de matière employée***.

Notez qu'un **organisme pluricellulaire autotrophe** peut, dans le détail, présenter des **cellules hétérotrophes** et des **cellules autotrophes** – ce qui suppose des **corrélations trophiques** entre tissus de l'organisme (exemple : Angiospermes) – voir le chapitre 11.

- Dans le détail, on distingue différents **types métaboliques** (tableau I) qui se distinguent par la **source de l'énergie environnementale** (**lumineuse** vs. **chimique**) et la **source de matière** (**vivante** vs. **minérale**). Seuls les **photolithotrophes** ou **photoautotrophes** (ex. Angiospermes) et les **chimio-organotrophes** ou **chimiohétérotrophes** (ex. Métazoaires) sont **au programme** en SVT.

**TABLEAU I. Les principaux types métaboliques.** D'après BREUIL (2007).
*Ont été encadrés les types métaboliques caractérisant les eucaryotes.*

| Source d'énergie \ Source de matière | Minérale | Organique |
|---|---|---|
| Lumineuse | **Photolithotrophes** (végétaux et bactéries photosynthétiques) | **Photo-organotrophes** (quelques bactéries) |
| Chimique | **Chimiolithotrophes** (bactéries chimiosynthétiques) | **Chimio-organotrophes** (animaux, certaines bactéries, certains végétaux, mycètes) |
| | Autotrophes au carbone | Hétérotrophes au carbone |

Ces **types métaboliques** sont pour ainsi dire **tous représentés chez les Eubactéries et les Archées** : ils sont illustrés en **Biotechnologies**.
On traitera dans le chapitre 5 (Dynamiques métaboliques des cellules eucaryotes) des **principales voies métaboliques**.

**Bilan (adapté du programme)**

- ✓ La **cellule** est une **machine thermodynamique** qui **transforme** de la **matière**. La cellule **synthétise** ses **propres constituants moléculaires** soit à partir d'**autres constituants organiques** servant de matière première, soit à partir de **matière minérale** pour certaines **cellules photo-** ou **chimiosynthétiques**. On peut relever la **diversité des synthèses**, l'intervention d'**enzymes**, la **nécessité d'énergie** et de **matière**. La **localisation** des **grandes voies de synthèse** au sein d'une **cellule eucaryote** a été présentée.
- ✓ La **cellule** possède des **constituants moléculaires complexes** (**acides nucléiques**, **lipides**, **protéines**, **polymères glucidiques**), de **durée de vie variable**, et qui sont l'objet d'un **renouvellement** (***turn-over*** **moléculaire**).
- ✓ Toute synthèse requiert de l'**énergie**, de la **matière** et un **catalyseur**.

# II. Les cellules eucaryotes, des structures spécialisées réalisant des réactions chimiques constitutives ou contrôlées

**Capacités exigibles**

- ✓ **Présenter** une biosynthèse liée à la mise en réserve.
- ✓ **Relier** le type de synthèse à la fonction des constituants moléculaires au sein des cellules.
- ✓ **Présenter** un exemple de voie de synthèse contrôlée.

## A. Les biosynthèses, des voies métaboliques ayant lieu dans une cellule différenciée

### 1. Notion de voie métabolique

- On appelle **voie métabolique** une ***suite de réactions catalysées par des enzymes***. Les **biosynthèses** sont évidemment des **voies métaboliques**.

### 2. Les biosynthèses, des voies métaboliques plus ou moins liées à la spécialisation des cellules et notamment leur appareillage enzymatique

- Dans un **organisme pluricellulaire**, il existe des **voies de biosynthèses** :
  - **Ubiquistes**, c'est-à-dire ***répandues dans tous les types ou presque tous les types de cellules*** (exemple : transcription-traduction, synthèse de phospholipides…).
  - **Spécialisées**, c'est-à-dire ***présentes dans seulement un ou quelques types cellulaires*** (exemple : synthèse de glycogène chez les Mammifères).
- Dans tous les cas, c'est **l'appareillage enzymatique** – et donc **l'expression génétique** en amont – qui déterminé les **capacités de synthèse** d'une cellule, en lien avec ses **caractéristiques structurales et fonctionnelles** conférées par sa **différenciation**.

### 3. Un exemple de biosynthèse d'une molécule de réserve : la glycogénogenèse

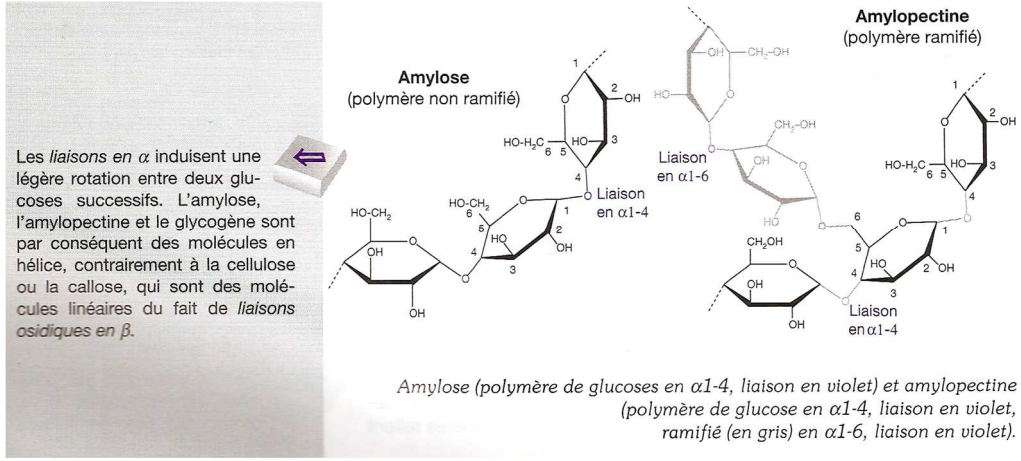
#### a. Le glycogène, un polymère de glucoses (liés en α 1-4, ramifiés en α 1-6) à fonction de réserve

- Le **glycogène** est constitué de ***chaînes de glucoses α liés en α1-4 et très ramifiées, tous les 8 à 12 résidus, par des liaisons α1-6 (jusqu'à 30 000 résidus)***. La ramification induit une **densification des monomères** favorable au **stockage**. En **électronographie**, cette molécule forme des **rosettes caractéristiques** (figure 9).

Le **glycogène** est la ***principale forme de stockage du glucose (foie, muscles) chez de nombreux Métazoaires***. Il est stocké en **granules** ayant une forme en **rosette** dans le **cytosol**.

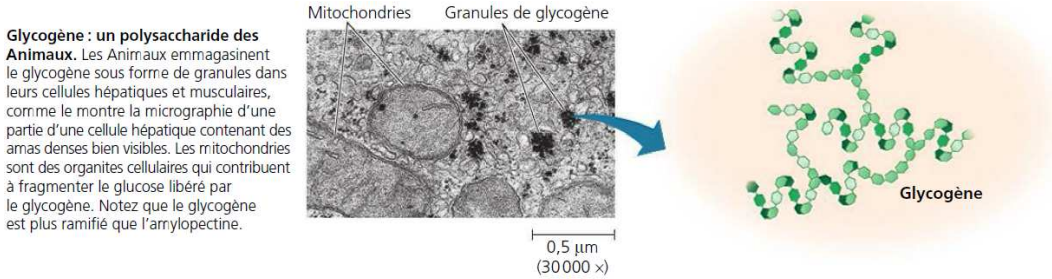
**Adaptation au stockage (relations structure-fonction) :**
° **La polymérisation réduit la pression osmotique des molécules** (*des oses isolés présentent une pression osmotique beaucoup plus forte qu'un polymère avec le même nombre d'oses*), ce qui en fait des **molécules très peu solubles qui ne font presque pas varier le potentiel osmotique** de la solution qui les abrite. Pour autant, les **groupements hydrophiles libres** peuvent **former des liaisons H avec les molécules d'eau** ; ces polymères sont donc des **hydrocolloïdes** (***macromolécules fixant l'eau mais en gênant sa mobilité, induisant une gélification***)

° Les **liaisons alpha** induisent une **légère rotation** de la chaîne à **chaque résidu**. La **conformation spatiale** de ces polymères (**enroulée** pour l'**amylose**, **ramifiée** pour l'**amylopectine** et le **glycogène**) favorise la **condensation des molécules sur elles-mêmes** et donc leur stockage.
° Les **extrémités de chaînes** sont **non-réductrices** ; ces molécules sont donc **peu réactives**.
° On trouve des **liaisons H entre oses qui stabilisent l'édifice**, réduisant d'autant le nombre de groupements disponibles pour former des liaisons H avec l'eau.




*Amylose (polymère de glucoses en α1-4, liaison en violet) et amylopectine (polymère de glucose en α1-4, liaison en violet, ramifié (en gris) en α1-6, liaison en violet).*

**Structure moléculaire de l'amidon (pour rappels) (et du glycogène)**
D'après DENŒUD *et al.* (2013).




**Structure tridimensionnelle et localisation cellulaire de l'amidon et du glycogène**
D'après CAMPBELL *et al.* (2012).

**FIGURE 9. Le glycogène, un polymère glucidique de réserve.**

## b. Localisation du glycogène chez les Mammifères : le cytosol des hépatocytes (foie) et des cellules musculaires (muscles)

- Le **glycogène** est localisé dans le **cytosol** des **cellules** qui en **contiennent**. Il présente généralement une **forme en rosette** caractéristiques au **MET** (figure 1). On le trouve surtout dans :
  - Les **cellules hépatiques** ou **hépatocytes**.
  - Les **cellules musculaires striées squelettiques** et **cardiaques** (tissu nodal compris) – *la présence de glycogène dans les CML est discutée.*

## c. Production de glycogène dans les cellules hépatiques et musculaires : la glycogénogenèse

- On appelle **glycogénogenèse** (figures 10-11) – ou parfois « glycogenèse » (mais ce terme est à éviter car il peut laisser penser à une synthèse de glucose) – ***l'ensemble des étapes métaboliques qui permettent de polymériser du glucose en glycogène***. Ce processus est **hyaloplasmique**.

Elle se déroule dans les **cellules** de tous les **muscles** (y compris **cardiomyocytes** et **cellules cardionectrices**) et les **cellules hépatiques**.

- La base de la **glycogénogenèse** est la production d'**UDP-glucose** à partir d'**UTP** et de **glucose-1-phosphate**, ce qui aboutit à la **perte d'un pyrophosphate PP$_i$** (figures 10-11). Cette étape fait intervenir préalablement, en amont :
  - Une **phase « d'activation » du glucose** en **glucose-6-P** à l'aide de l'**hexokinase** dans les **muscles** (entre autres) ou de la **glucokinase** dans le **foie** et le **pancréas** (**cellules β**).
  - Une **conversion** du **glucose-6-P** en **glucose-1-P**.

  *[Rappel : UTP Uridine TriPhosphate et UDP Uridine DiPhosphate sont des nucléotides]*

- La **glycogénogenèse** (figures 10-11) comprend ensuite **trois mécanismes** (figure 10 : A/, B/, C/).

- **A**/ La phase « d'initiation » est due à la **glycogénine** (= **glycosyltransférase**), une ***enzyme qui produit une amorce dans la glycogénogenèse***. La **glycogénine** s'adjoint un **glucose** en **α1-4** à partir d'**UDP-glucose**, rejetant de **l'UDP** : il y a formation de **glycosylglycogénine**. Puis un **autre glucose** est **ajouté** au glucose précédent de la **même manière** (= à partir d'**UDP-glucose**) jusqu'à obtention d'un **oligosaccharide** d'au moins **4 monomères** (*taille minimale nécessaire à la prise de relai par la glycogène synthase*) et pouvant aller **jusqu'à 7**. On appelle ***primer*** cette ***petite chaîne glycosidique***.

***Très souvent, la glycogénine reste au centre de la molécule de glycogène*** *(figure 12)*.

- **B**/ L'étape suivante prend appui sur le **court polysaccharide** : il y a adjonction, par la **glycogène synthase**, de **glucose** en **α1-4** à la chaîne linéaire préexistante de **glycogène** par la consommation d'un **UDP-glucose**. Cette **enzyme** est **allostérique**.

- **C**/ Enfin, les **ramifications** en **α1-6** tous les **8 à 12 résidus** sont obtenues par une **enzyme branchante** qui **coupe** de **petits tronçons** de **glycogène linéaire** et les adjoint à la **molécule-mère** par des **branchements latéraux**.

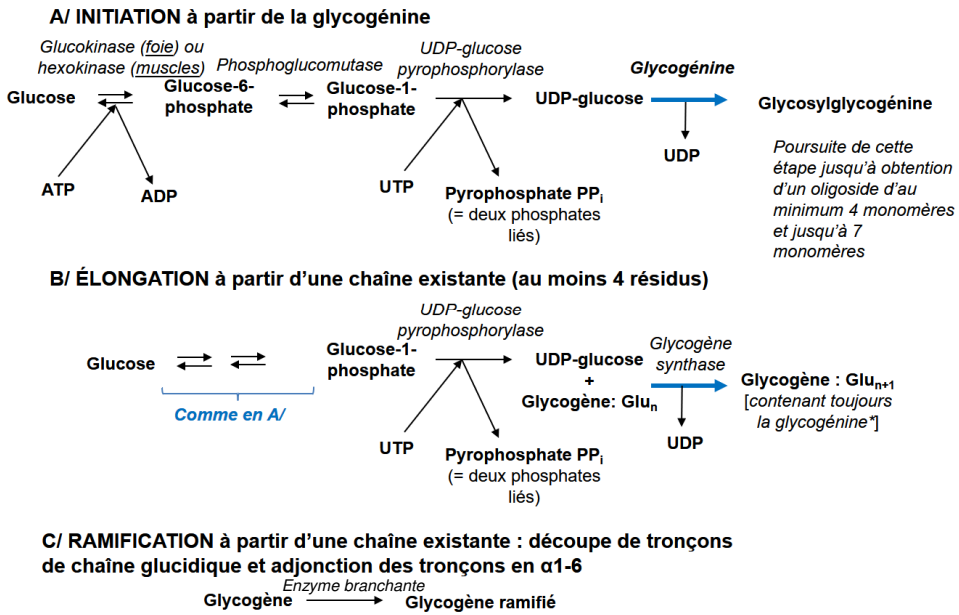



**FIGURE 10. Biosynthèse du glycogène : glycogénogenèse.** Schéma original.
*Certains auteurs semblent affirmer que la glycogénine peut être dissociée du glycogène après un certain nombre d'ajouts de glucose… Il semble pourtant que la glycogénine demeure souvent au centre du complexe.*

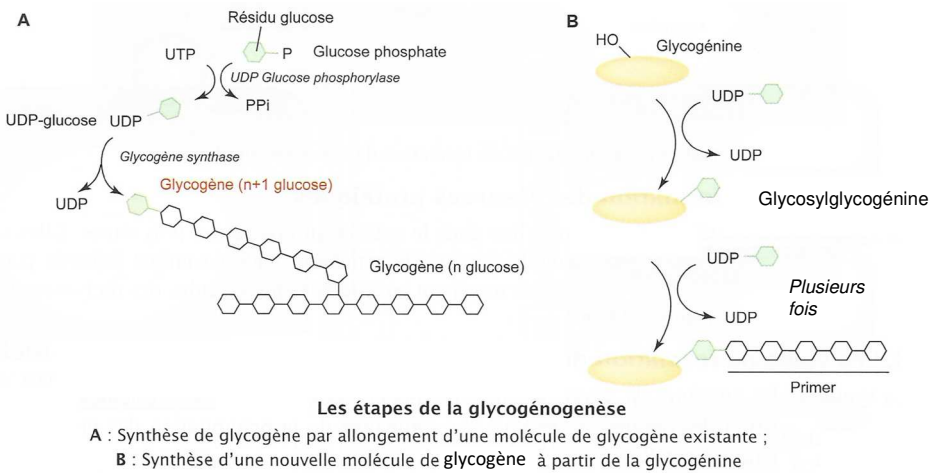



**FIGURE 11. Une vision simplifiée de la glycogénogenèse.**
D'après RICHARD *et al.* (2015), modifié.

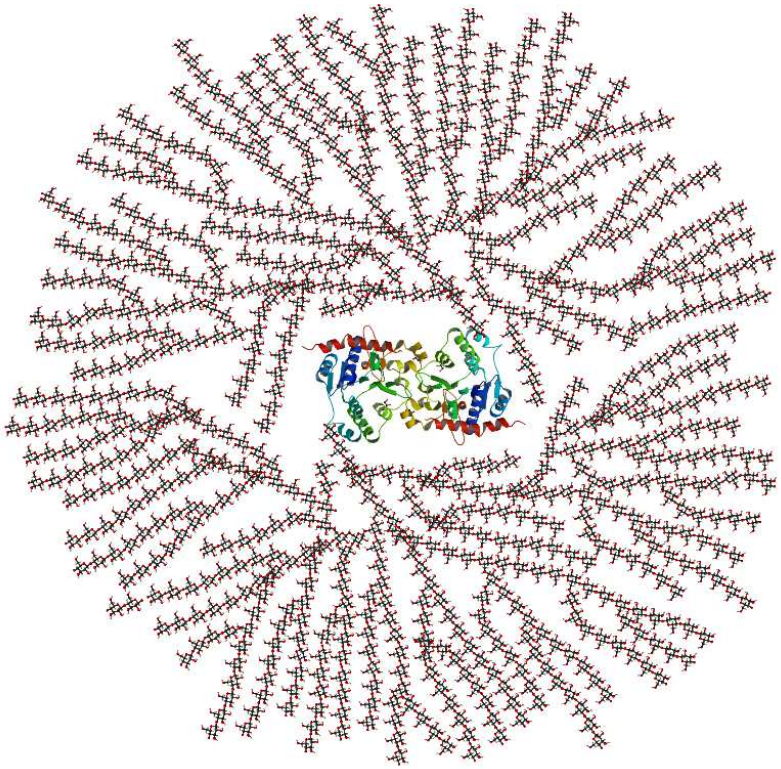


**FIGURE 12. Partie centrale d'une molécule de glycogène montrant la glycogénine.**
D'après *Wikipédia* (consultation février 2016).

## B. Les biosynthèses, des voies métaboliques constitutives ou contrôlées

### 1. Notion de biosynthèses constitutive ou contrôlée

- On dit qu'un **processus** est **constitutif** ***lorsqu'il se déroule de manière permanente au sein d'une cellule, sans variations notoires***. C'est le cas de la synthèse d'un certain nombre de **constituants cellulaires**, comme les **phospholipides**, ou **extracellulaires** comme les **constituants pariétaux** (dont la biosynthèse a été vue dans le chapitre 2). *La plupart des processus constitutifs sont toutefois* ***modulables*** *et donc en partie contrôlables.*
- On dit qu'un **processus** est **contrôlé** ***lorsqu'il est déclenché par un stimulus*** (variation environnementale, molécule informative…). C'est le cas de la **glycogénogenèse**.

### 2. L'exemple du contrôle insulinique de la glycogénogenèse

- L'**insuline** est une ***hormone pancréatique produite au niveau des cellules bêta des îlots de LANGERHANS qui a un effet hypoglycémiant, c'est-à-dire qu'elle fait baisser la glycémie***. [La **glycémie** est la ***concentration plasmatique en glucose***].

- Les **cellules hépatiques** et les **cellules musculaires** possèdent des **récepteurs membranaires à l'insuline** qui y engendre (figure 13) :
  - Un accroissement de **l'entrée de glucose** dans les **cellules**
  - Une **stimulation** de la **glycogénogenèse**.

  *>> Cela explique **l'effet hypoglycémiant**. L'insuline a un rôle majeur dans la régulation de la glycémie, notamment suite à un repas.*

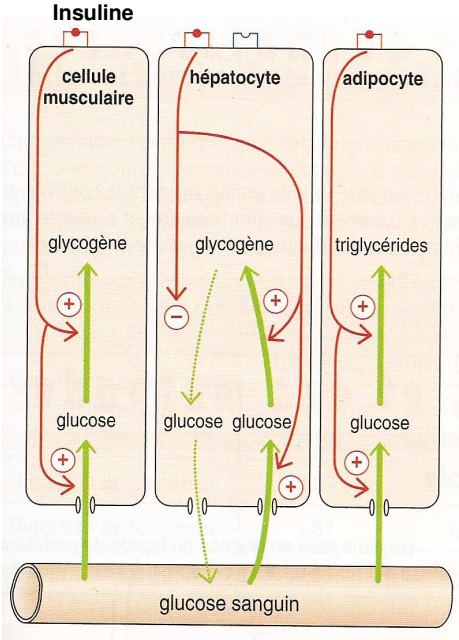



**FIGURE 13. Actions de l'insuline sur les cellules effectrices de la régulation de la glycémie.**
D'après LIZEAUX, BAUDE *et al.* (2007).
***Gros traits verts** : voies activées. Traits pointillés : voies inactivées.*
*J'ai laissé les adipocytes pour le décorum* ☺

| | |
|---|---|
| **Bilan (adapté du programme)** | ✓ L'ensemble des **biosynthèses** réalisées par une **cellule** est **spécifique** en liaison avec sa **différenciation** et sa **fonction spécialisée** dans l'organisme.<br>✓ Pour ce qui est du **contrôle**, les **biosynthèses** de la cellule sont soit **constitutives**, soit **contrôlées**. |

## Références


ALBERTS, B., A. JOHNSON, J. LEWIS, M. RAFF, K. ROBERTS & P. WALTER (2004). *Biologie moléculaire de la cellule. Quatrième édition.* Traduction de la quatrième édition américaine (2002) par F. LE SUEUR-ALMOSNI. Flammarion, Paris. Première édition américaine 1983 (1986 1e édition française).

BERTHET, J. (2006). *Dictionnaire de Biologie.* De Boeck Université, Bruxelles (Belgique).

BOUJARD, D. (dir). B. ANSELME, C. CULLIN & CÉLINE RAGUÉNÈS-NICOL (2015). *Biologie cellulaire et moléculaire. Tout le cours en fiches. Licence. PACES. CAPES.* 2e édition (1e édition 2012), Dunod, Paris.

BREUIL, M. (2007). *Biologie 1re année BCPST-véto.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

BREUIL, M. (2009). *Biologie 2e année BCPST-véto.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

CALLEN, J.-C. (2005). *Biologie cellulaire. Des molécules aux organismes.* Dunod, Paris, 2e édition (1e édition 1999).

CAMPBELL, N. A. & J. B. REECE (2004). *Biologie.* De Boeck Université, Bruxelles, 2e édition (1e édition 1995).

[CAMPBELL, N. A.], J. B. REECE, L. A. URY, M. L. CAIN, S. A. WASSERAMN, P. V. MINORSKY, R. B. JACKSON (2012). *Campbell Biologie.* Adaptation française J. FAUCHER & R. LACHAÎNE. Pearson, Paris (4e edition).

DAUTEL, O. (dir.), A. PROUST, M. ALGRAIN, C. BORDI, A. HELME-GUIZON, F. SAINTPIERRE, M. VABRE & C. BOGGIO (2017). *Biologie Géologie BCPST 1re année.* Vuibert, Paris.

DENŒUD, J., T. FERROIR, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON, M.-L. PONS & F. TEJEDOR (2011). *Biologie-Géologie BCPST-véto 2e année.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

DENŒUD, J., C. GODINOT, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2013). *Biologie-Géologie BCPST-véto 1e année.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

DENŒUD, J., C. GODINOT, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON, M.-L. PONS & F. TEJEDOR (2014). *Biologie-Géologie BCPST-véto 2e année.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

GODINOT, C., H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2010). *Biologie-Géologie 1re année BCPST-véto.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

LAFON, C. (2003). *La biologie autrement. 100 questions de synthèse.* Ellipses, Paris.

LATRUFFE, N. (dir.), F. BLEICHER-BARDETTI, B. DUCLOS & J. VAMECQ (2014). *Biochimie. Tout le cours en fiches. Licence. PACES-UE1. CAPES.* Dunod, Paris.

LIZEAUX, C., D. BAUDE (dir.), V. AUDEBERT, C. BRUNET, G. GUTJAHR, Y. JUSSERAND, A. MATHEVET, P. PILLOT, S. RABOUIN & A. VAREILLE (2007). *SVT Sciences de la Vie et de la Terre Première S.* Bordas, Paris.

MEYER, S., C. REEB & R. BOSDEVEIX (2008). *Botanique. Biologie et physiologie végétales.* Maloine, Paris, 2e édition (1e édition 2004).

MORÈRE, J.-L., R. PUJOL (coord.), J.-C. CALLEN, L. CHESNOY, J.-P. DUPONT, A.-M. GIBERT-TANGAPREGASSOM, G. RICOU, N. TOUZET (dir.) et colloborateurs (2003). *Dictionnaire raisonné de Biologie.* Frison-Roche, Paris.

PEYCRU, P. (dir.), J.-F. FOGELGESANG, D. GRANDPERRIN, B. AUGÈRE, J.-C. BAEHR, C. PERRIER, J.-M. DUPIN & C. VAN DER REST (2010*a*). *Biologie tout-en-un BCPST 1re année.* Dunod, Paris, 2e édition (2009), réimpression corrigée (2010) (1e édition 2006).

PEYCRU, P. (dir.), J.-C. BAEHR, F. CARIOU, D. GRANDPERRIN, C. PERRIER, J.-F. FOGELGESANG & J.-M. DUPIN (2010*b*). *Biologie tout-en-un BCPST 2e année.* Dunod, Paris, 2e édition (1e édition 2007).

PEYCRU, P., D. GRANDPERRIN, C. PERRIER (dir.), B. AUGÈRE, T. DARRIBÈRE, J.-M. DUPIN, C. ESCUYER J.-F. FOGELGESANG, & C. VAN DER REST (2013). *Biologie tout-en-un BCPST 1re année.* Dunod, Paris, 3e édition (1e édition 2006).

PEYCRU, P., D. GRANDPERRIN, C. PERRIER (dir.), B. AUGÈRE, J.-F. BEAUX, F. CARIOU, P. CARRÈRE, T. DARRIBÈRE, J.-M. DUPIN, C. ESCUYER, J.-F. FOGELGESANG, S. MAURY, É. QUÉINNEC, E. SALGUEIRO & C. VAN DER REST (2014). *Biologie tout-en-un BCPST 2e année.* Dunod, Paris, 3e édition (1e édition 2007).

RAVEN, P. H., G. B. JOHNSON, J. B. LOSOS, S. S. SINGER (2007). *Biologie.* De Boeck, Bruxelles.

RICHARD, D. (dir.), P. CHEVALET, S. FOURNEL, N. GIRAUD, F. GROS, P. LAURENTI, F. PRADÈRE & T. SOUBAYA (2012). *Biologie. Tout le cours en fiches. Licence. CAPES. Prépas.* Dunod, Paris, 2e édition (1e édition 2010).

SAINTPIERRE, F., C. BORDI (dir.), M. ALGRAIN, Y. KRAUSS, I. MOLLIÈRE & H. CLAUCE (2017). *Mémento Biologie BCPST 1re et 2e années.* Vuibert, Paris.

SEGARRA, J. (dir.), É. CHAUVET, C. COLSON-PROCH, M. HUILLE, M. LABROUSSE, F. LOUET, F. METZ & E. PIÈTRE (2014). *Biologie BCPST 1re année.* Ellipses, Paris.

SEGARRA, J., E. PIÈTRE (dir.), G. BAILLY, O. CHASSAING, D. FAVRE, T. JEAN, F. METZ & C. MEUNIER (2015). *Biologie BCPST 2e année.* Ellipses, Paris.

VIGNAIS, P. (2001). *La Biologie des origines à nos jours. Une Histoire des idées et des hommes.* « Grenoble Sciences », EDP Sciences, Les Ulis.

VIGNAIS, P. (2006). *Science expérimentale et connaissance du Vivant. La Méthode et les concepts.* « Grenoble Sciences », EDP Sciences, Les Ulis.

## Plan du chapitre

**Objectifs : extraits du programme** 1
**Introduction** 2

**I. Les cellules eucaryotes, des structures composées de constituants biochimiques complexes, à localisation particulière et renouvelés** 3
**A. Les cellules eucaryotes, des entités compartimentées aux constituants variés et localisables** 3
1. Une localisation des principaux constituants 3
2. Une compartimentation induisant la spécificité de la composition et de la fonction des volumes cellulaires 3
**B. Les cellules eucaryotes, des entités dont les constituants ont une durée de vie limitée et sont renouvelés par des biosynthèses** 4
1. Des constituants complexes et altérables, à durée de vie limitée 4
a. Une durée de vie limitée des composés biochimiques 4
b. Une altération spontanée ou due à des mécanismes de dégradation enzymatique 4
2. Un *turn-over* moléculaire entretenu par des biosynthèses (constituant l'anabolisme) 4
a. Le *turn-over*, des réactions anaboliques de renouvellement des constituants cellulaires 4
b. Un processus qui prend appui sur la spécialisation et la coopération des compartiments cellulaires 4
c. Un processus requérant de la matière, de l'énergie, un catalyseur et de l'information 5
d. Un processus endergonique dont l'énergie est fournie par un couplage à un travail exergonique (notion de couplage énergétique) 6
**C. Les cellules eucaryotes, des systèmes ouverts qui utilisent de la matière et de l'énergie provenant de l'environnement** 7
1. Les cellules, des systèmes thermodynamiques ouverts 7
2. L'environnement, un ensemble de ressources… pas forcément biodisponibles 7
3. Les grands types métaboliques : autotrophie et hétérotrophie 7

**II. Les cellules eucaryotes, des structures spécialisées réalisant des réactions chimiques constitutives ou contrôlées** 8
**A. Les biosynthèses, des voies métaboliques ayant lieu dans une cellule différenciée** 8
1. Notion de voie métabolique 8
2. Les biosynthèses, des voies métaboliques plus ou moins liées à la spécialisation des cellules et notamment leur appareillage enzymatique 8
3. Un exemple de biosynthèse d'une molécule de réserve : la glycogénogenèse 8
a. Le glycogène, un polymère de glucoses (liés en α 1-4, ramifiés en α 1-6) à fonction de réserve 8
b. Localisation du glycogène chez les Mammifères : le cytosol des hépatocytes (foie) et des cellules musculaires (muscles) 9
c. Production de glycogène dans les cellules hépatiques et musculaires : la glycogénogenèse 9
**B. Les biosynthèses, des voies métaboliques constitutives ou contrôlées** 10
1. Notion de biosynthèses constitutive ou contrôlée 10
2. L'exemple du contrôle insulinique de la glycogénogenèse 10

**Références** 11
**Plan du chapitre** 12
**Plan simplifié du chapitre** 12
**Plan très simplifié du chapitre** 13

## Plan simplifié du chapitre

**Objectifs : extraits du programme** 1
**Introduction** 2

**I. Les cellules eucaryotes, des structures composées de constituants biochimiques complexes, à localisation particulière et renouvelés** 3
**A. Les cellules eucaryotes, des entités compartimentées aux constituants variés et localisables** 3
1. Une localisation des principaux constituants 3
2. Une compartimentation induisant la spécificité de la composition et de la fonction des volumes cellulaires 3
**B. Les cellules eucaryotes, des entités dont les constituants ont une durée de vie limitée et sont renouvelés par des biosynthèses** 4
1. Des constituants complexes et altérables, à durée de vie limitée 4
2. Un *turn-over* moléculaire entretenu par des biosynthèses (constituant l'anabolisme) 4
**C. Les cellules eucaryotes, des systèmes ouverts qui utilisent de la matière et de l'énergie provenant de l'environnement** 7
1. Les cellules, des systèmes thermodynamiques ouverts 7
2. L'environnement, un ensemble de ressources… pas forcément biodisponibles 7
3. Les grands types métaboliques : autotrophie et hétérotrophie 7

**II. Les cellules eucaryotes, des structures spécialisées réalisant des réactions chimiques constitutives ou contrôlées** 8
**A. Les biosynthèses, des voies métaboliques ayant lieu dans une cellule différenciée** 8
1. Notion de voie métabolique 8
2. Les biosynthèses, des voies métaboliques plus ou moins liées à la spécialisation des cellules et notamment leur appareillage enzymatique 8
3. Un exemple de biosynthèse d'une molécule de réserve : la glycogénogenèse 8
**B. Les biosynthèses, des voies métaboliques constitutives ou contrôlées** 10
1. Notion de biosynthèses constitutive ou contrôlée 10
2. L'exemple du contrôle insulinique de la glycogénogenèse 10

**Références** 11
**Plan du chapitre** 12
**Plan simplifié du chapitre** 12
**Plan très simplifié du chapitre** 13

## Plan très simplifié du chapitre

**Objectifs : extraits du programme** 1
**Introduction** 2

**I. Les cellules eucaryotes, des structures composées de constituants biochimiques complexes, à localisation particulière et renouvelés** 3
- **A. Les cellules eucaryotes, des entités compartimentées aux constituants variés et localisables** 3
- **B. Les cellules eucaryotes, des entités dont les constituants ont une durée de vie limitée et sont renouvelés par des biosynthèses** 4
- **C. Les cellules eucaryotes, des systèmes ouverts qui utilisent de la matière et de l'énergie provenant de l'environnement** 7

**II. Les cellules eucaryotes, des structures spécialisées réalisant des réactions chimiques constitutives ou contrôlées** 8
- **A. Les biosynthèses, des voies métaboliques ayant lieu dans une cellule différenciée** 8
- **B. Les biosynthèses, des voies métaboliques constitutives ou contrôlées** 10

**Références** 11
**Plan du chapitre** 12
**Plan simplifié du chapitre** 12
**Plan très simplifié du chapitre** 13

© Tanguy JEAN. Les textes et les figures originales sont la propriété de l'auteur. Les figures extraites d'autres sources restent évidemment la propriété des auteurs ou éditeurs originaux.
Document produit en décembre 2017 • Dernière actualisation : janvier 2020.
Contact : Tanguy.Jean4@gmail.com
Adresse de téléchargement : https://www.svt-tanguy-jean.com/

Ces données sont placées sous licence *Creative Commons Attribution – Pas d'Utilisation commerciale 4.0 CC BY NC* qui autorise la reproduction et la diffusion du document, à condition d'en citer explicitement la source et de ne pas en faire d'utilisation commerciale.