

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université les Frères Mentouri Constantine 1
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie



COURS DE
PHYSIOLOGIE VÉGÉTALE

2023-2024

Pour les étudiants de L2
Filière écologie et environnement

Conçu par : Dr BOUZID Salha

CHAPITRE 1 : RAPPEL SUR LA CELLULE VEGETALE

CHAPITRE 2 : LES STADES DE DEVELOPEMENT

CHAPITRE 3 : NUTRITION HYDRIQUE

CHAPITRE 4 : LA NUTRITION MINERALE

CHAPITRE 5 : LA NUTRITION CARBONÉE

CHAPITRE 1 : RAPPEL SUR LA CELLULE VEGETALE

1. La classification des végétaux

Le règne végétal est traditionnellement subdivisé en deux grands groupes en fonction de l'organisation structurale du végétal: les Thallophytes et les Cormophytes.

1.1. Les Thallophytes

Ce sont des végétaux dont la structure est très simple appelé **thalle**, le thalle est composé par des cellules qui se ressemblent sans différenciation physiologiques où on ne peut distinguer ni racine, ni tige, ni feuilles ni vaisseaux conducteurs. Certaines thallophytes sont **unicellulaires** et d'autre **pluricellulaire**.



Figure 01 : les différents types de Thallophytes [1]

1.2. Les Cormophytes

Ce groupe est composé par les végétaux supérieurs qui correspondent à des organismes toujours **pluricellulaires** et dont les cellules **eucaryotes** sont réunies en **tissus** formant à leur tour des **organes** beaucoup plus complexe qu'un thalle appelé **cormus** d'où le nom de cormophyte ;

Les cormophytes sont divisées en plusieurs embranchements : **1^{er} Embranchement: Bryophytes**, **2^{ème} Embranchement: Ptéridophytes**, **3^{ème} Embranchement: Préspermaphytes (Préphanérogames)**, **4^{ème} Embranchement: Spermaphytes (Phanérogames)**

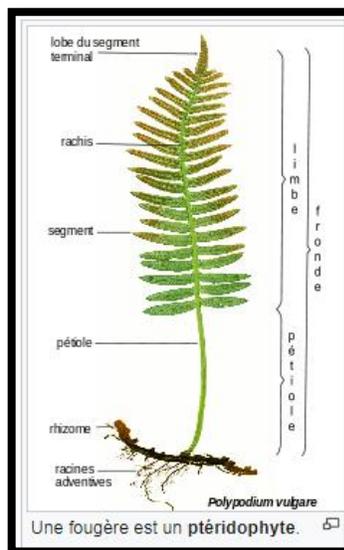
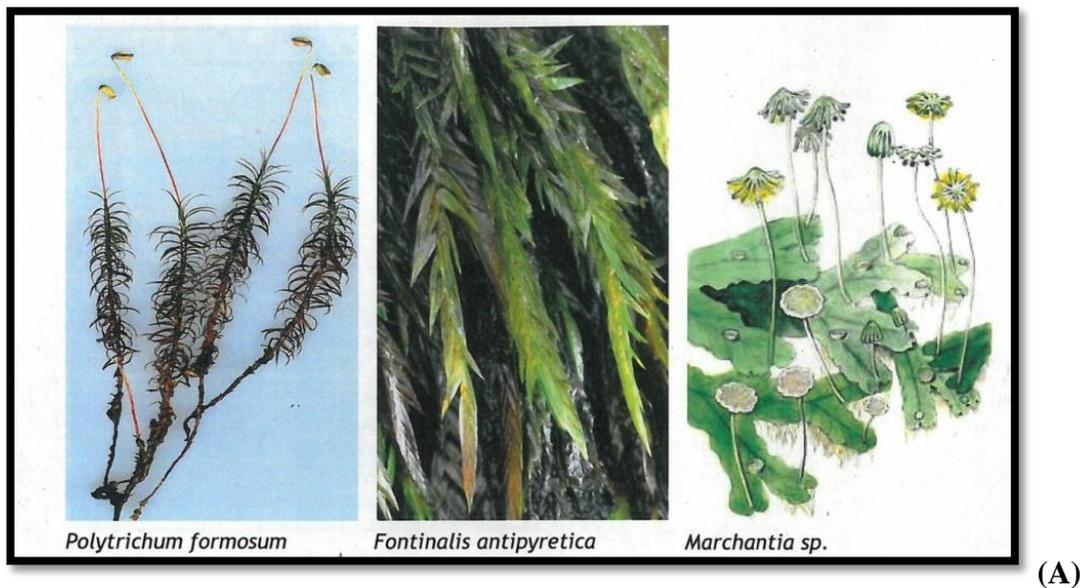


Figure 02 : (A) Les Bryophytes, (B) Les Ptéridophytes [2]

Embranchement des Spermaphytes

1. **Gymnospermes:** les ovules (ébauches des futures graines) et les graines elles-mêmes ne sont pas entourées d'enveloppes closes
2. **Chlamydospermes:** leurs organes reproducteurs sont entourés d'une enveloppe simple.
3. **Angiospermes:** Regroupe les **plantes à fleurs**, et donc les végétaux qui portent des fruits. Ils représentent la plus grande partie des espèces végétales terrestres, et ils comprennent les Dicotylédones et les Monocotylédones.

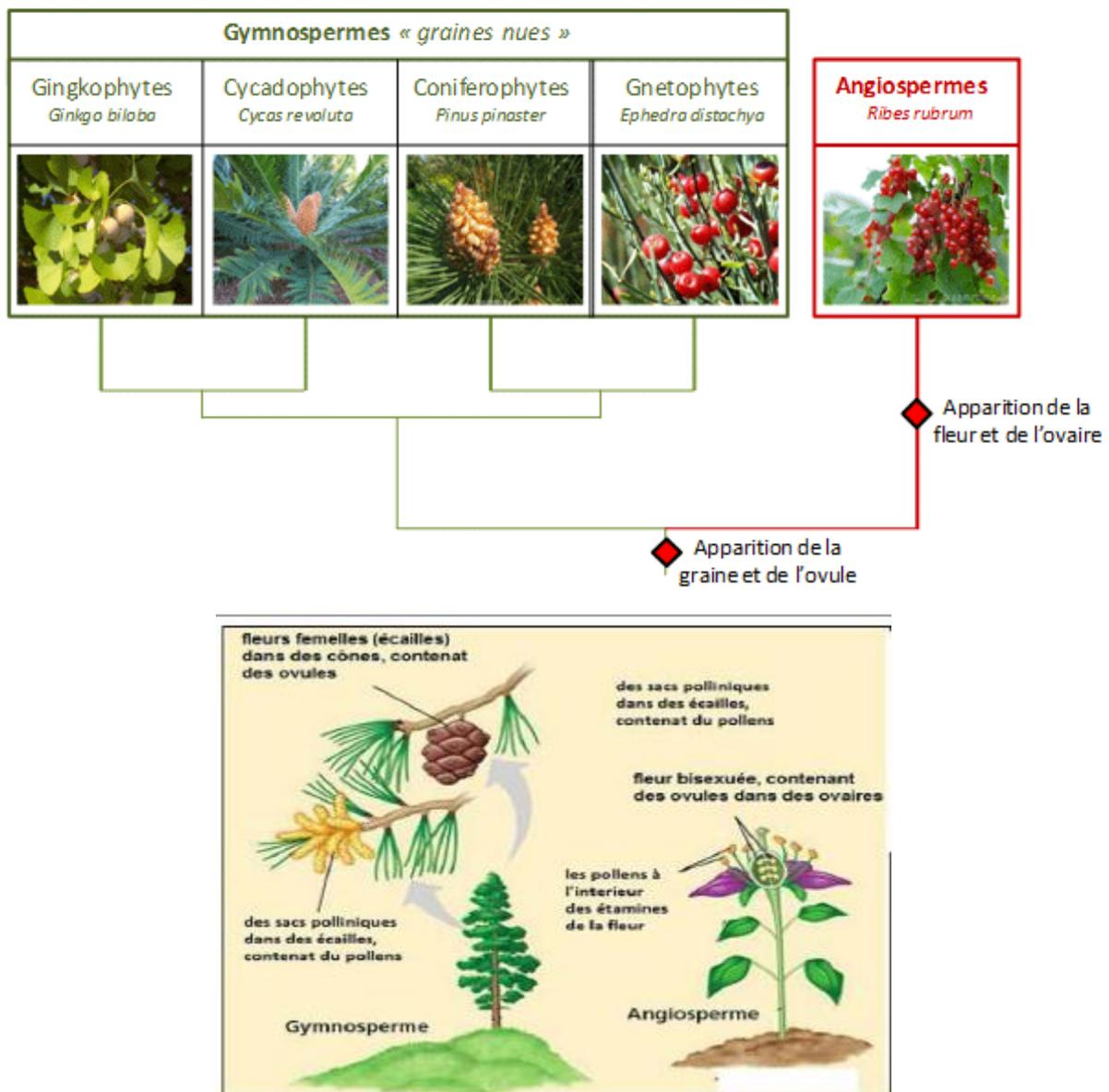


Figure 03 : La différence entre les Gymnospermes et les Angiospermes [3]

2. Particularités de la cellule végétale

2.1. Le plasmalemme appelé aussi membrane plasmique, possède une épaisseur de 6 à 9 nm, délimite le cytoplasme de la périphérie de la cellule grâce à une perméabilité très sélective, il joue un double rôle de protection et de contrôle des échanges entre les milieux intracellulaire et extracellulaire par des ponts cytoplasmiques ou des canaux qu'on appelle : **plasmodesmes**

2.2. La paroi cellulaire

Ou apoplasme, elle assure la rigidité de la cellule sans pour autant empêcher l'eau et les solutés de la traverser pour atteindre le **plasmalemme** grâce aux **plasmodesmes**.

- **La lamelle moyenne** est la partie **la plus externe** de la paroi cellulaire, elle est de nature pectique et constitue le ciment assurant la jonction entre les cellules.
- **La paroi primaire** formée de cellulose et hémicellulose, elle est **flexible et extensible** ce qui permet la croissance cellulaire. Elle se dépose entre la lamelle moyenne et la membrane plasmique.
- **La paroi secondaire** est formée lors de **la différenciation** de la cellule, plus épaisse que la paroi primaire, se dépose entre la paroi primaire et la membrane plasmique, constituée de cellulose et hémicellulose ainsi que de la **lignine**, la **subérine** et la **cutine**.

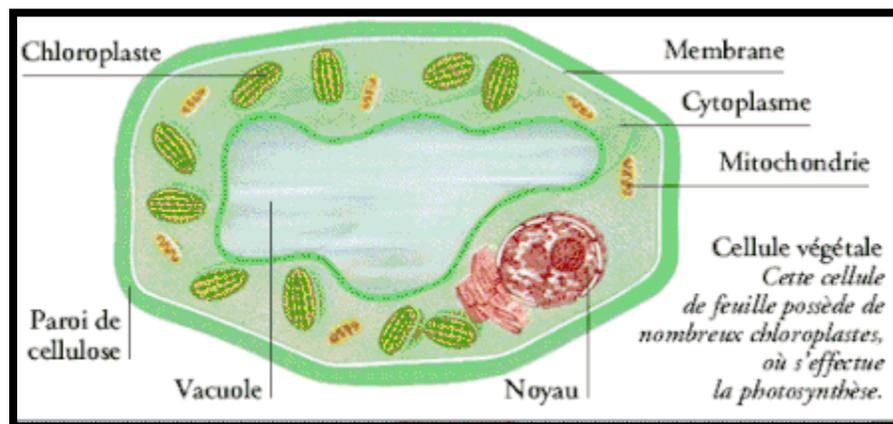


Figure 04 : La cellule végétale [4]

2.3. Les vacuoles

Elles jouent un rôle de régulation des fonctions physiologiques (pH, concentration ionique, pression osmotique) et occupent plus de 40 % du volume cellulaire total. Sa membrane est appelée le tonoplaste, elles peuvent stocker de l'eau, des éléments minéraux, des substances organiques et des pigments.

2.4. Les plastes

Ce sont des organites intracellulaires ovoïdes ou sphériques de quelques microns de long, délimités par **une double membrane**, dérivent des **proplastés**.

2.4.1. Les chloroplastes : Les chloroplastes sont limités par une double membrane, ils contiennent de la chlorophylle indispensable pour la **photosynthèse**.

2.4.2. Les chromoplastes : Ils contiennent les **carotènes** (pigments jaunes et orangés) ou **la xanthophylle**, (pigment jaune pâle). Ils se trouvent dans les cellules de plusieurs fruits colorés, comme les tomates ou des fleurs, comme les roses rouges.

2.4.3. Les amyloplastés : Ce sont des plastés contenant très peu de membranes internes mais de nombreux grains d'amidon. Le développement de plusieurs grains peut entraîner l'éclatement de l'enveloppe, l'ensemble est alors libéré dans le cytosol.

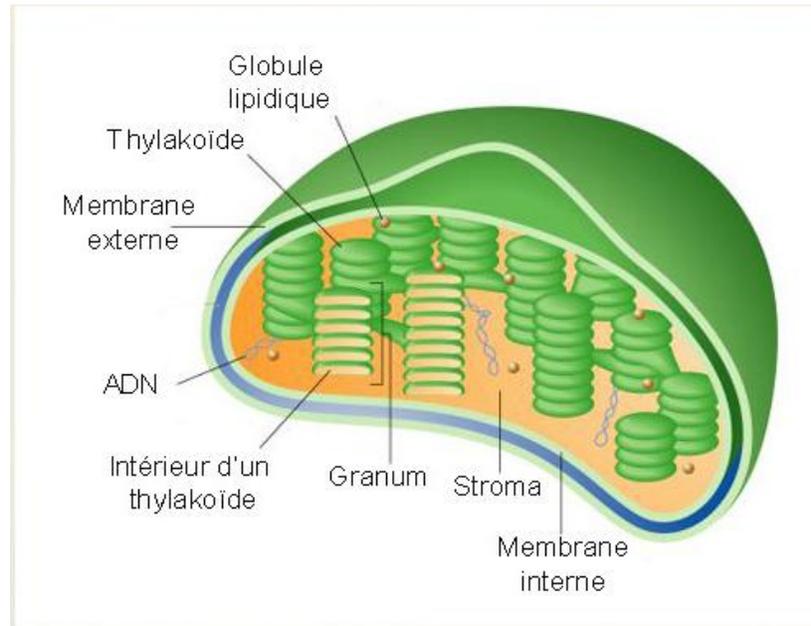


Figure 05 : Les chloroplastes [4]

CHAPITRE 2 : LES STADES DE DEVELOPEMENT

A. LA FORMATION DE LA GRAINE

1. Introduction

Toutes les différentes étapes par lesquelles passe la graine pour se développer et donner une plante adulte, constituent ce qu'on appelle le cycle de développement.

Chez les Angiospermes le cycle de développement comporte deux étapes principales:

- Le développement embryonnaire (= embryogénèse) : ensemble des processus allant de la fécondation jusqu'à l'édification complète de l'embryon de la graine (y compris sa déshydratation et sa mise en dormance).
- Le développement post-embryonnaire : ensemble des processus d'édification de la plante allant de la germination (inclusive) à la mort de l'organisme.

2. La formation de la graine

Les Angiospermes, les plantes à fleurs sont caractérisés par une « double fécondation ». Un des gamètes mâles va fusionner avec l'oosphère pour donner un œuf *diploïde* qui se divise et donne l'embryon. La fusion du deuxième gamète avec les noyaux polaires donnera naissance à un tissu de réserves *triploïde* (1n chromosomes paternels + 2n chromosomes maternels) qui est l'albumen.

L'albumen envahit toute la cavité de l'ovule, c'est un tissu polyploïde (à 3n chr), riche en substances de réserves, aux dépens duquel l'embryon va se développer.

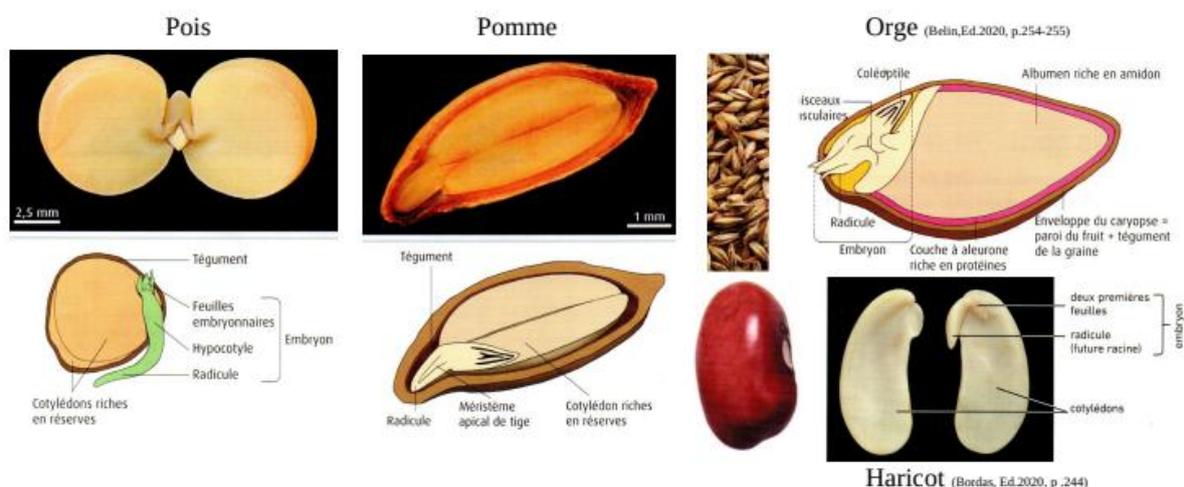
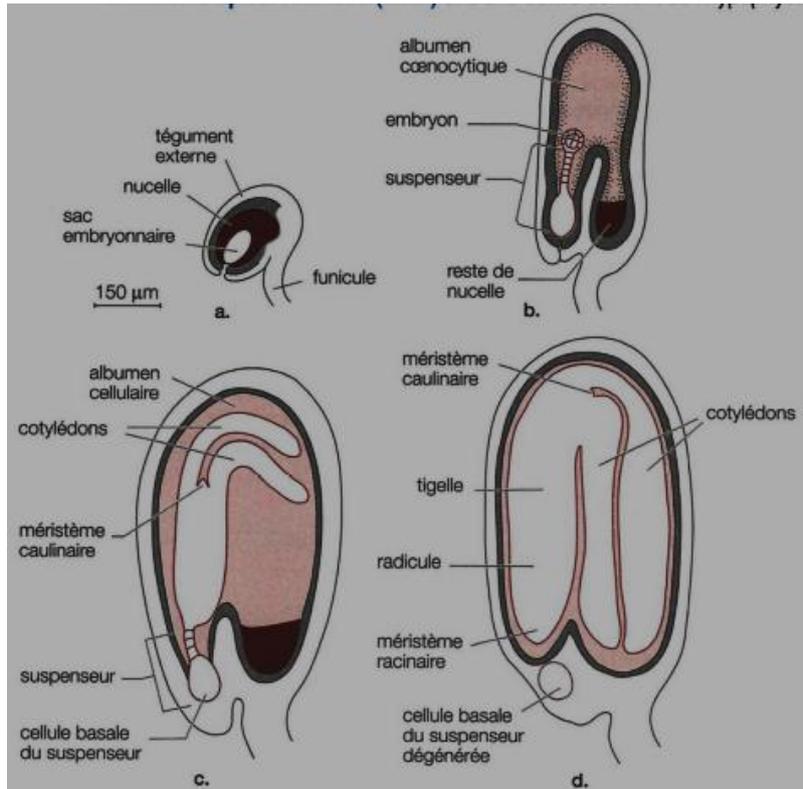
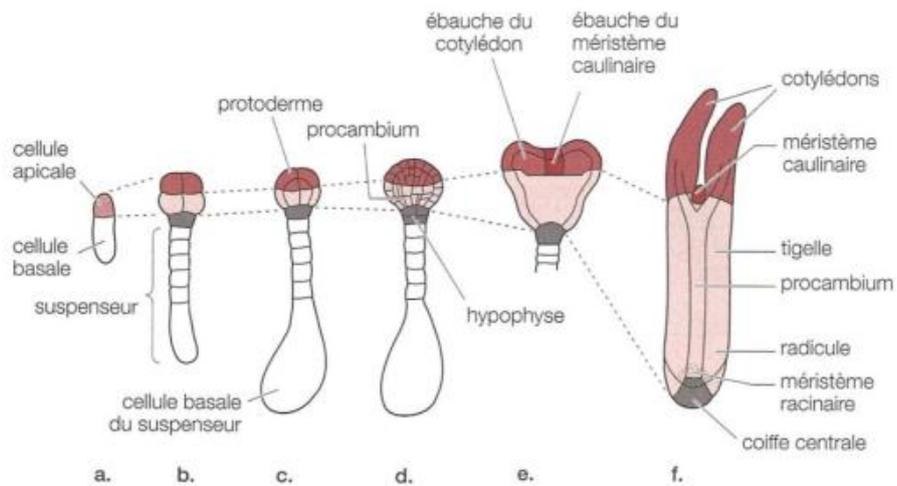


Figure 06 : Les différentes formes de graines



Le développement de la graine chez les Brassicacées (arabette, capselle).— a. Ovule mature, juste avant la fécondation. **b.** L'albumen cœnocyotique se développe au détriment du nucelle : les noyaux se trouvent en périphérie, le centre est occupé par une vacuole. Le zygote principal forme le suspenseur et l'embryon. **c.** Le suspenseur dégénère côté chalaze et l'embryon se développe. L'albumen se cellularise. **d.** Graine mature exalbuminée. (Modifié d'après Esau, *Anatomy of Seed Plants*, John Wiley and sons, 1977, et d'après Robinson Beers et coll., *The Plant Cell*, 4, 1992, pp. 1237–1249.)



Le développement embryonnaire d'une Dicotylédone (Brassicacée).— Les trois domaines apical, central et basal sont représentés en couleur. (Modifié d'après West et Harada, *The Plant Cell*, 5, 1993, pp. 1361–1365 et d'après Laux et Jungens, *The Plant Cell*, 9, 1997, pp. 989–1000.)

A FIGURE 7. Sac embryonnaire d'un *Polygonum*. D'après KLEIMAN (2001).

Figure 07 : La formation de la graine

2. Les types des graines

La graine se compose d'un **tégument** (simple ou double) et d'une **amande** formée de l'**embryon** et de tissus de réserves constituant l'**albumen**. La partie essentielle de l'amande est l'**embryon**. Celui-ci comprend une radicule, que prolonge une tigelle portant les cotylédons. Selon la présence ou non d'albumen dans les graines, celles-ci se classent en 3 catégories :

2.1. Les graine à périsperme : Albumen très peu développé avec autour le périsperme (reste du nucelle qui n'a pas été digéré et qui sert de réserve). Le lieu de réserve est le périsperme

2.2. Les graines albuminées : Disparition du nucelle, cotylédons minces dans un albumen développé servant de réserve comme par exemple, les caryopses des céréales.

2.3. Les graines exalbuminées : le nucelle a été digéré par l'albumen, qui sera digéré pour former l'embryon et les cotylédons qui renferment les matières de réserves, comme chez le pois ou le haricot.

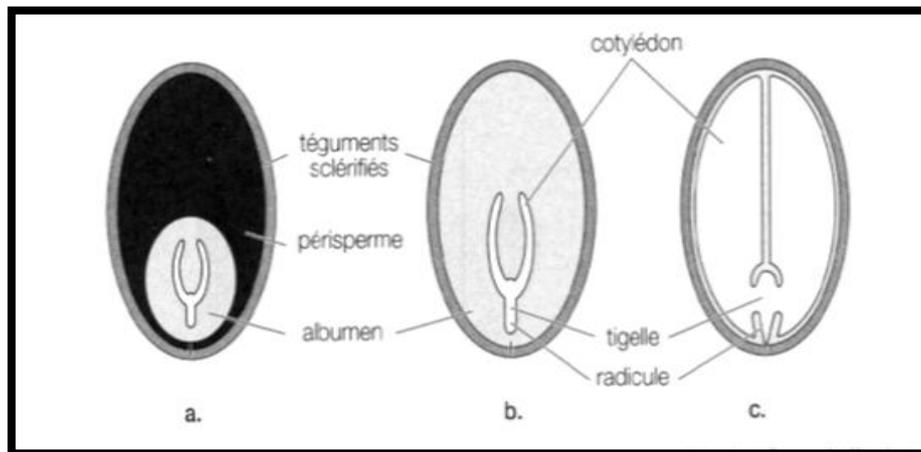


Figure 08 : Les 3 types de graines ; a. graine à périsperme, b. graine albuminée, c. graine exalbuminée

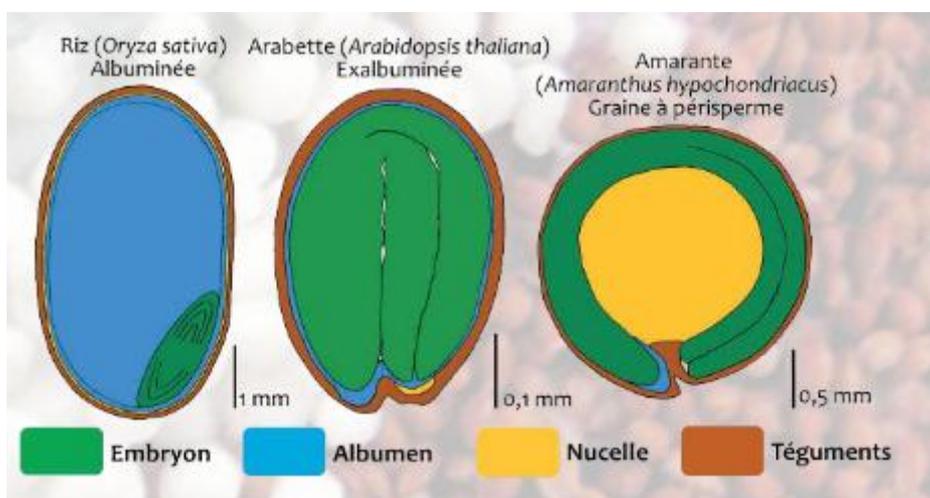


Figure 09 : Les différentes graines avec leurs tissus de réserves

B. LA GERMINATION

1. Définition

La germination correspond à l'étape par laquelle une semence en vie ralentie "se réveille" et donne naissance à une plantule. Ce passage met en jeu des mécanismes physiologiques complexes.

C'est l'ensemble des processus qui vont du début de la réhydratation de la graine à la sortie de la radicule, l'évolution des étapes suivantes constitue un phénomène de croissance. Une fois l'embryon réhydraté, il fabrique une hormone végétale, l'acide gibbérellique, stimulant la synthèse d'enzymes digestives qui hydrolysent les molécules stockées dans les tissus de réserve (amidon, protéines, lipides)

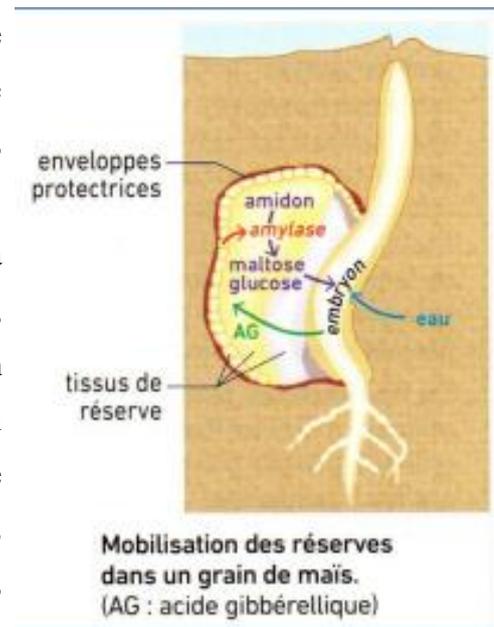


Figure 10 : Mobilisation des réserves

2. Les étapes de la germination

Il est ainsi démontré que la germination comprend trois phases successives (figure 11) : la phase d'imbibition, la phase de germination stricto sensu et la phase de croissance.

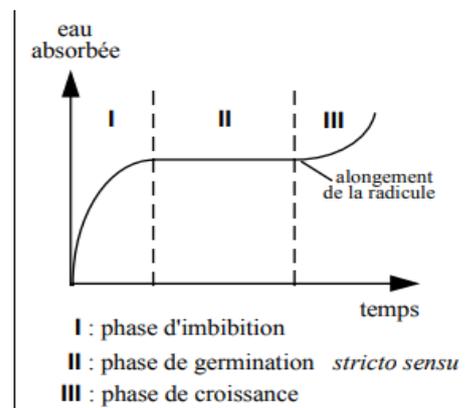


Figure 11. Courbe théorique d'imbibition d'une semence (d'après Côme, 1982).

2.1. La phase d'imbibition : Elle correspond à une forte hydratation des tissus par absorption d'eau aboutissant au gonflement de la graine : -Blé : 47 g d'eau pour 100 g de graines, - Haricot : 200 à 400 g d'eau pour 100 g de graines.

2.2 Phase de germination sensu-stricto : Durant cette phase qui est relativement brève elle aussi (12 à 48h), la graine peut être réversiblement déshydratée et réhydratée sans dommage apparent pour sa viabilité. Elle s'achève avec l'émergence de la radicule hors des téguments.

2.3. Phase III : caractérisée par une reprise de l'absorption de l'eau et une élévation de la consommation d'oxygène, elle correspond en fait à un processus de croissance affectant la racicule puis la tigelle. A ce niveau, on doit distinguer entre l'activité métabolique de la jeune plantule qui se développe à partir de l'embryon, qui a tendance à s'exalter, et celle du tissu de réserve (albumen, cotylédons), qui a tendance à décroître par suite de l'épuisement des réserves.

3. La longévité des graines

C'est la durée maximale qu'une graine peut conserver sa capacité de germer, quand l'ensemble des conditions sont réunies.

Ewart (1908) classe les semences en trois catégories : les semences macrobiotiques, qui vivent plus de 15 ans, les semences mésobiotiques, les plus nombreuses, qui ont une durée de vie comprise entre 3 et 15 ans, et les semences microbiotiques, qui ne survivent pas plus de 3 ans ; certaines meurent même après quelques jours ou quelques semaines.

4. Les types de germination

5.1. La germination épigée lorsque les tissus de réserve qui composent l'essentiel de la graine sortent du sol. La germination est alors assurée essentiellement par l'élongation importante de l'hypocotyle.

5.2. La germination hypogée lorsque les tissus de réserve qui composent l'essentiel de la graine demeurent dans le sol. La germination est alors assurée essentiellement par l'élongation importante de l'épicotyle.

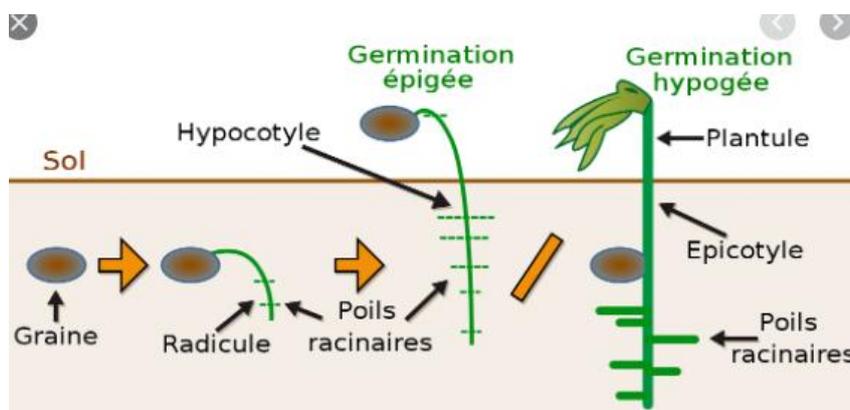


Figure 12 : La différence entre la germination épigée et hypogée

6. Les conditions de germination

Des facteurs physiques, chimiques du milieu ou internes à la graine peuvent influencer l'aptitude de la graine à germer, selon les espèces.

a. L'eau : Indispensable, elle doit être disponible dans le milieu extérieur en quantités suffisantes

b. L'oxygène : Indispensable à la germination, d'où l'importance de l'aération des sols pour la levée des semis.

c. La température : La température intervient directement, en agissant sur la vitesse des réactions biochimiques. Il faut élever la température pour stimuler la germination et éviter les températures trop basses.

d. La lumière : L'action de la lumière peut être soit nécessaire, soit défavorable à la germination selon la photosensibilité* des espèces. On trouve plusieurs types de photosensibilité :

Photosensibilité positive : elle est présente chez 70% des semences, c'est un besoin de lumière.

Photosensibilité négative : c'est un cas rare que l'on trouve chez les liliacées.

Photosensibilité facultative : on retrouve ce cas chez la majorité des plantes cultivées.

e. La maturité : toutes les parties constitutives de la semence soient complètement différenciées morphologiquement (mature).

g. La longévité : varie considérablement selon les espèces. Une longévité a un grand intérêt biologique en particulier dans les régions ou zones arides où les conditions favorables à la germination (Humidité surtout) ne se rencontrent pas chaque année.

C. LA CROISSANCE

1. Introduction

La plupart des plantes continuent de pousser tout au long de leur vie. Comme d'autres organismes multicellulaires, les plantes poussent grâce à une combinaison de croissance cellulaire et de division cellulaire. La croissance cellulaire augmente la taille des cellules, tandis que la division cellulaire (mitose) augmente le nombre de cellules dans une zone apicale. Au fur et à mesure que les cellules végétales se développent, elles se spécialisent également dans différents types de cellules grâce à la différenciation cellulaire. Une fois que les cellules se différencient, elles ne peuvent plus se diviser.

2. Définition

La croissance est l'augmentation continue de toutes les dimensions de la plante : longueur, largeur, diamètre, surface, volume et masse. Elle est l'ensemble des changements quantitatifs irréversibles de la plante qui se produisent au cours du temps.

Elle prend plusieurs formes comme la multiplication des cellules, l'allongement des entrenœuds et des racines, la multiplication et la ramification des feuilles.

La croissance d'une plante entière fait intervenir en fait deux phénomènes :

- la croissance au sens strict, en dimension de chacun des organes après leur initiation
- la multiplication du nombre de ces organes : c'est le développement.

2.1. La mérése

C'est une prolifération cellulaire qui consiste en une succession de divisions cellulaires ou mitoses, qui s'opèrent dans des régions localisées : les méristèmes

2.2. L'auxèse

C'est une augmentation des dimensions des cellules, elle peut être une augmentation du diamètre, une augmentation longitudinale (élongation) ou une augmentation (croissance) en épaisseur.

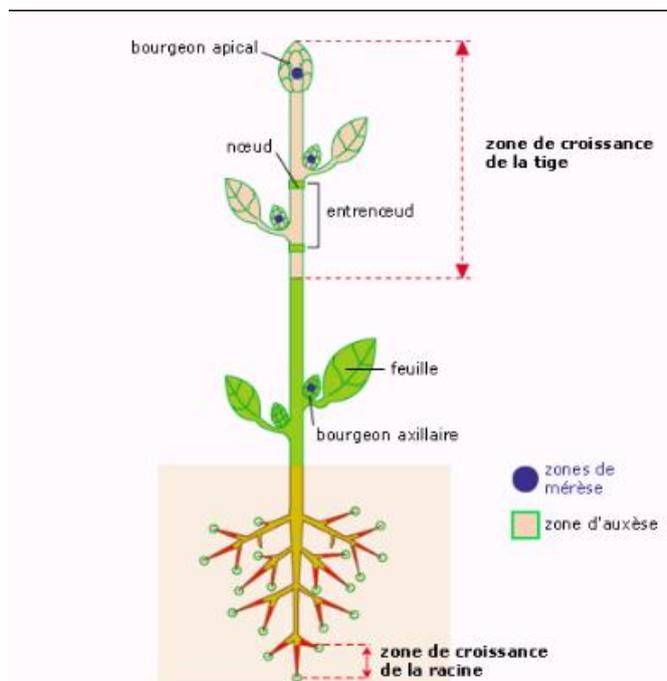


Figure 13 : Localisation des zones de croissance

2.3. La différenciation

C'est le processus qui permet aux cellules d'acquérir des fonctions physiologiques particulières, différentes selon le tissu dans lequel elles se trouvent. Pour une cellule du méristème, ce terme désigne l'ensemble des évènements qui transforment une cellule méristématique en cellule mature, de ce fait, elle acquiert la structure et la fonction qui seront les siennes, à l'état mature.

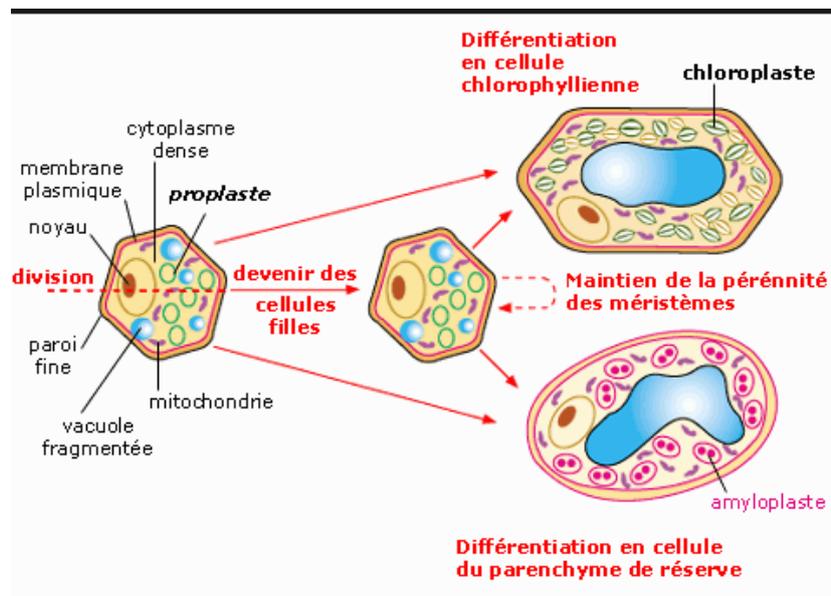


Figure 14 : La différenciation dans une cellule du parenchyme

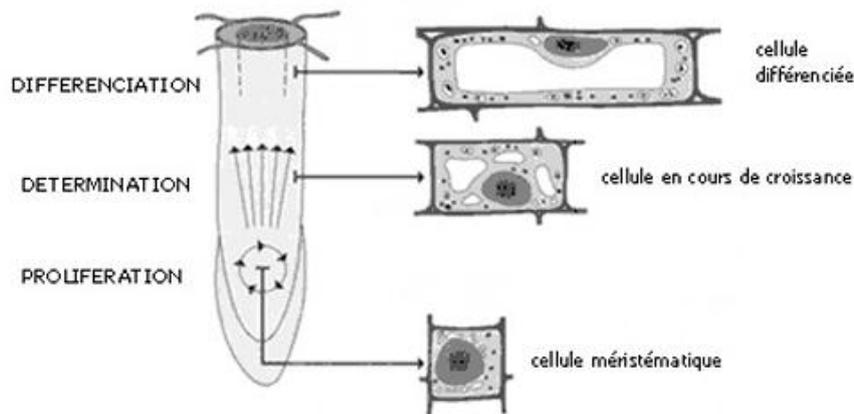


Figure 15 : La différenciation dans une cellule du méristème

3. Le développement

C'est l'ensemble des changements qualitatifs dans la formation d'une plante. Il consiste en la mise en place des différents organes du végétal, appelée organogenèse, qui comprend la **Rhizogénèse** (Racines) et la **Caulogénèse** (Tiges).

La Rhizogénèse est une organogenèse de racines et radicelles, la production de nouvelles racines secondaire est faite à partir du péricycle.

La formation des racines, appelée rhizogénèse, est conditionnée par plusieurs facteurs limitants : disponibilité en sels minéraux, en sucres, température, hormones (synergiques : auxines ; antagonistes : gibbérellines, cytokinines),

La caulogénèse est un processus qui conditionne la formation et le développement de la tige du végétal.

4. Croissance des méristèmes

4.1. Les Méristèmes Primaires

Le méristème est un tissu végétal composé d'un groupe de cellules indifférenciées, à activité mitotique importante, responsables de la croissance en longueur indéfinie de la plante.

Les méristèmes primaires apparaissent en premier au cours de l'embryogénèse, et donnent les tissus primaires.

Les cellules des méristèmes primaires se localisent sur l'extrémité des tiges (méristème caulinaire histogène et organogène) et sur l'extrémité des racines (méristème racinaire, histogène)

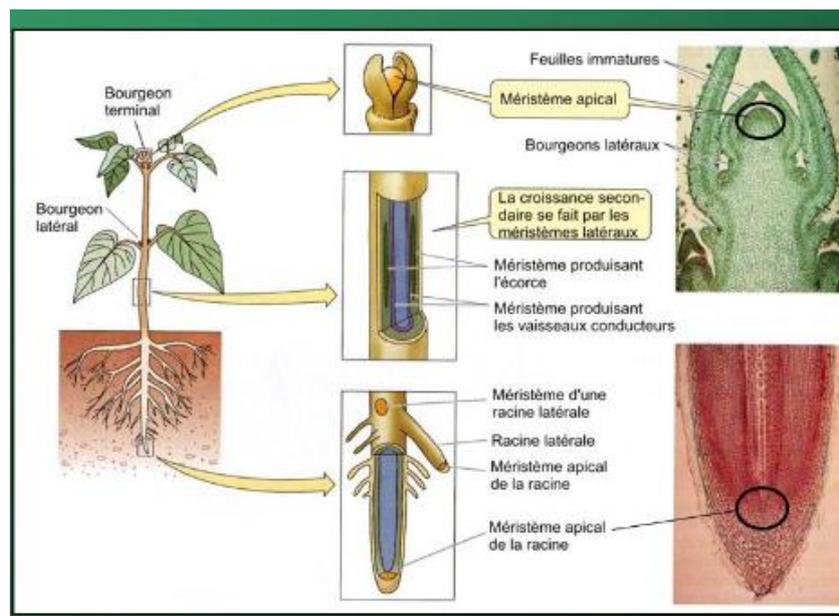


Figure 16 : Les méristèmes caulinaire et racinaire

4.2. La croissance secondaire : Les méristèmes secondaires

Les méristèmes secondaires sont à l'origine des tissus secondaires, apparaissant plus tard à maturité.

Les méristèmes secondaires permettent **une croissance en épaisseur** autour de la tige et des racines des Angiospermes **Dicotylédones**, les Monocotylédones n'en possèdent pas.

4.2.1. La zone génératrice libéro-ligneuse, ou cambium, se localise entre le xylème et le phloème, il est responsable de la formation des **tissus conducteurs secondaires** ; du xylème secondaire (**le bois**) vers l'**intérieur** et du phloème secondaire (**le liber**) vers l'**extérieur**

4.2.2. La zone génératrice subéro-phéllodermique, ou phellogène, responsable de la formation des **tissus protecteurs secondaires**, il se trouve dans l'écorce, il est responsable de l'apparition du liège (**suber**) vers l'**extérieur** et du **phelloderme** vers l'**intérieur**.

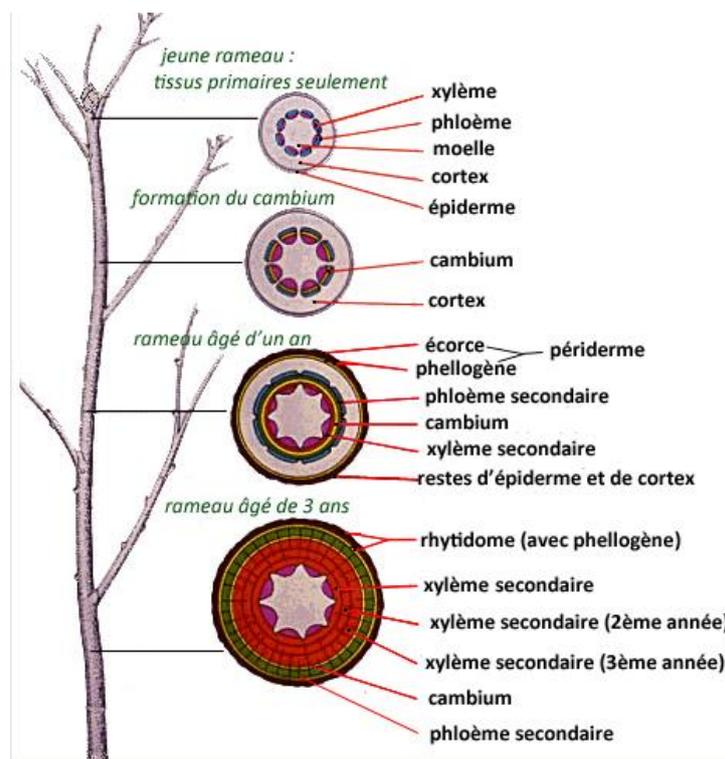


Figure 17 : la croissance secondaire dans la tige

D. La FLORAISON

1. Définition

La floraison désigne le **développement du bourgeon floral** puis l'épanouissement de la fleur ou d'une inflorescence et donner un fruit

L'induction florale, désigne la transformation d'un bourgeon foliaire (méristème caulinaire) qui devient un bourgeon floral (méristème floral), et elle dépend de nombreux facteurs, parmi lesquels la zone géographique, le climat, la luminosité, la température ou encore la richesse du sol. Il existe des plantes :

- **bisannuelles** : qui fleurissent une année sur deux (primevère, cyclamen, etc.) ;
- **annuelles** : qui donnent une floraison puis meurent (œillet d'inde, cosmos, etc.) ;
- **vivaces ou pluriannuelles** : qui fleurissent chaque année.

2. Les pièces florales

- les sépales (l'ensemble constitue le calice) ; souvent vert. Ils sont les pièces les plus externes et protègent les fleurs en bouton.
- les pétales (l'ensemble constitue la corolle) ; très souvent colorée
- les étamines (l'ensemble constitue l'androcée) ;
- les carpelles (l'ensemble constitue le gynécée) ;
- le pédoncule floral ;
- les bractées.

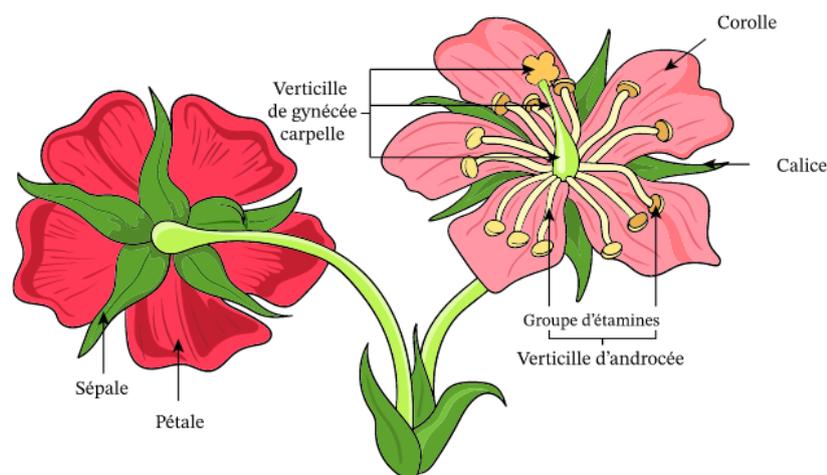


Figure 18 : Les pièces florales

La fleur type d'angiosperme est constituée du pédoncule, du réceptacle et de quatre verticilles ou groupes de pièces florales rangées en cercle autour d'un axe et s'y insérant à une même hauteur.

Les quatre verticilles sont scindés en deux catégories :

1. le périanthe, ensemble de pièces stériles, ou enveloppe florale, composé de 2 verticilles :

A. le calice, formé par l'ensemble des sépales, pièces souvent verdâtres d'aspect foliacé, situé à la base de la fleur ;

B. la corolle, formée par l'ensemble des pétales souvent vivement colorés. Les pétales sont situés au-dessus des sépales.

2. les organes reproducteurs ou pièces fertiles directement impliqués dans la reproduction et composés également de 2 verticilles :

C. l'androcée, organe reproducteur mâle de la plante, formé par l'ensemble des étamines disposées en spirales ou en verticilles sur le réceptacle. Chaque étamine est elle-même subdivisée en un filet et une anthère libérant le pollen à maturité. L'anthère est constituée de 2 thèques comportant chacune 2 loges polliniques où est enfermé le pollen ;

D. le gynécée ou pistil, organe reproducteur femelle de la plante, formé par un ou plusieurs carpelles libres ou soudés entre eux. Chaque carpelle est composé d'une partie renflée et creuse (l'ovaire) renfermant l'(les) ovule(s), d'un style prolongeant l'ovaire et d'un stigmate coiffant le style et permettant de retenir le pollen.

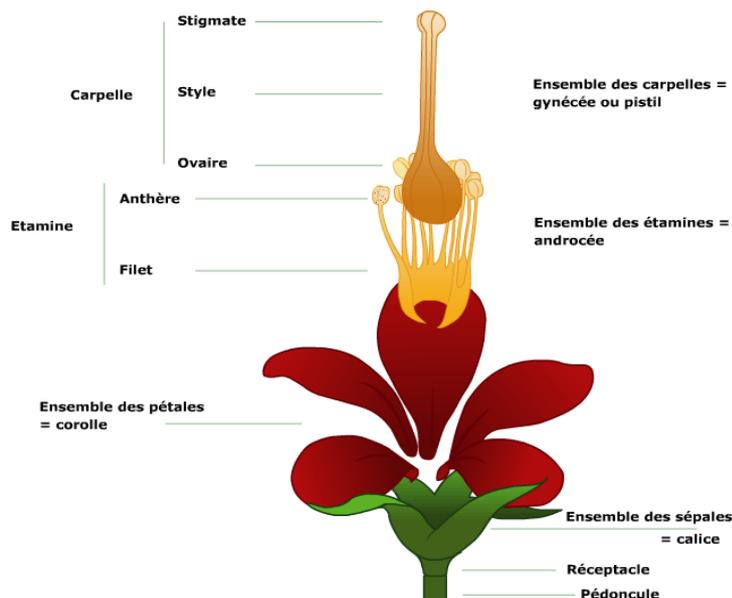


Figure 19 : Les 4 verticilles des pièces florales

3. Les types de fleurs

Le nombre de pièces florales par verticille varie. On distingue les fleurs :

- trimères ou fleurs constituées de verticilles successifs de 3 pièces chacun, cas des monocotylédones
- tétramères, - pentamères – polymères, cas des dicotylédones

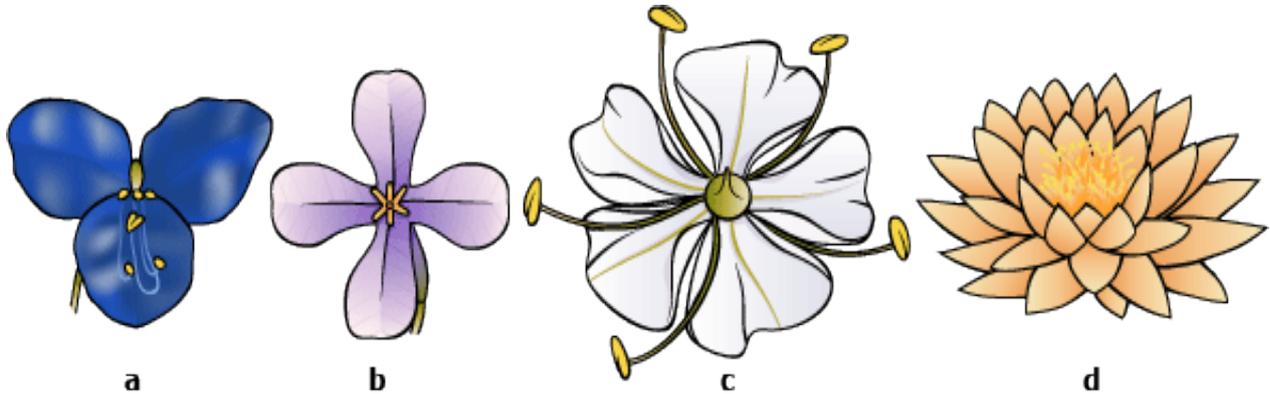


Figure 20 : Nombre de pièces florales par verticille : a. trimère - b. tétramère - c. pentamère – d. polymère

4. La formule florale

La formule florale est une description simplifiée de l'organisation des pièces florales d'une fleur.

Sont indiqués :

- le type de symétrie de la fleur,
- le nombre et l'identité des pièces (S = sépale, P = pétale, E = étamine et C = carpelle),
- le nombre de cycle par verticille,
- la fusion ou non des pièces,
- la position de l'ovaire (infère ou supère).

La formule florale indique le nombre de pièces florales constitutives de chaque verticille.

Les lettres donnent la nature des pièces florales : S pour sépales, P pour pétales, E pour étamines, C pour carpelle, et T pour tépales.

Les chiffres présentent le nombre de pièces florales. Au-delà de 12, on note « n ».

- Un X placé devant la formule florale indique qu'il s'agit d'une fleur zygomorphe, un O qu'il s'agit d'une fleur actinomorphe.
- Lorsque le C est souligné, il s'agit d'un ovaire supère, lorsque le trait est placé au-dessus du C, c'est un ovaire infère.

Exemple des **Renonculacées** :

O : 5 S , 5 P , n E , n C

O : fleur actinomorphe

5 S : 5 sépales libres

5 P : 5 pétales libres

n E : n étamines libres.

n C : n carpelles libres, ovaire supère.



- Lorsque les pièces sont soudées, on les note entre parenthèses :

Exemple : La tulipe, actinomorphe, présente 6 tépales, 6 étamines et 3 carpelles soudés avec un ovaire supère. Sa formule florale est donc O : 6T, 6 E, (3C)

- S'il y a 2 ou plusieurs verticilles (ou groupes) d'une pièce florale, on peut l'indiquer avec un « + ».

Exemple des **Brassicacées** :

O : 4 S, 4 P , 4E+2 E , (2C)

O : fleur actinomorphe

4S : 4 sépales libres

4P : 4 pétales libres

4 E + 2 E : 6 étamines libres, inégales puisqu'il y en a 4 grandes et 2 petites

(2C) : 2 carpelles soudés. Ovaire supère.



Remarque : chez les monocotylédones, le nombre de pièces florales est souvent un multiple de 3. Chez les dicotylédones, c'est un multiple de 2, 4 ou 5.

E. LE FRUIT

1. Définition

En botanique, un fruit (organe végétal) est la structure porteuse de graines dans les plantes à fleurs ce qui est caractéristique des Angiospermes. Le fruit est formé à partir de l'ovaire après la floraison, il succède à la fleur par transformation du pistil, la paroi de l'ovaire forme le péricarpe du fruit et l'ovule donne la graine.

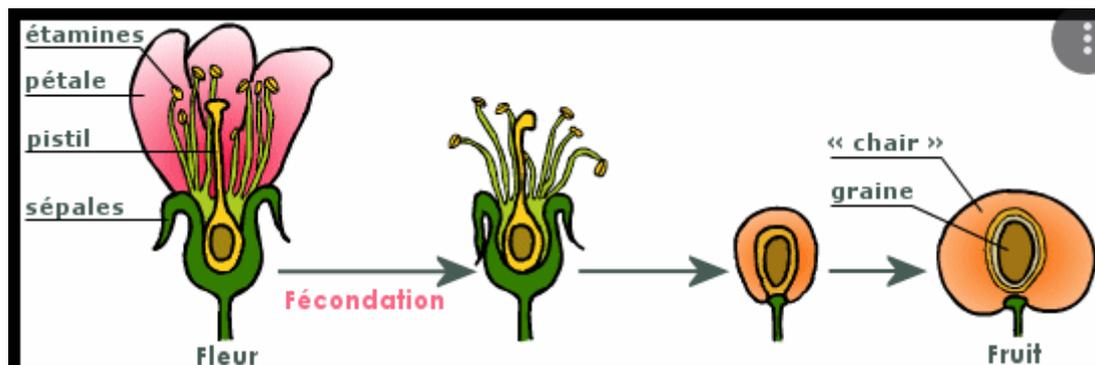


Figure 21 : La formation du fruit

2. La formation du fruit

Le passage de la fleur au fruit ou « nouaison » est normalement consécutif à la fécondation. Si la nouaison a lieu sans fécondation, on parle de *parthénocarpié* et le fruit ne renferme pas de graines.

Le fruit résulte ainsi de la transformation de l'ovaire et de son contenu après fécondation (connu comme un vrai fruit) : les carpelles une fois fécondés, les ovules deviennent des graines et la fleur se transforme en fruit, ce qui implique une pollinisation. Cependant, il existe des espèces parthénocarpiques ; elles peuvent produire des fruits sans qu'il y ait eu pollinisation, ce qui donne des fruits dépourvus de graine (ex : la banane, mandarine sans pépins).

Le développement de fruits parthénocarpiques est bien connu des horticulteurs et peut être recherché. Les plus classiques sont par exemple certains pamplemousses, les oranges Navel, les bananes communes, les clémentines.

3. Les types de fruit

Le fruit peut se développer soit en une structure succulente et aboutir ainsi aux fruits charnus comme les baies (raisin, banane, tomate ...) et les drupes (olive, pêche, cerise ...) ou bien évoluer vers une structure lignifiée à maturité dans le cas des fruits secs. Ceux-ci peuvent être déhiscents, ils s'ouvrent alors pour libérer les graines, comme par exemple les follicules (pivoine, magnolia ...), les gousses (pois, fèves), les siliques (chou, radis, colza) ou indéhiscents comme les akènes (tournesol, renoncule), les caryopses (graminées) et les samares (érable, frêne).

3.1. Fruits simples

Les fruits simples peuvent être secs ou charnus, et résultent de la maturation d'un ovaire simple dans une fleur avec un seul pistil.

3.1.1. Fruits charnus Ce sont des fruits dont une partie ou la totalité du péricarpe (paroi du fruit) est charnu à maturité. L'épicarpe et le mésocarpe deviennent charnus et succulents (parfois d'autres parties). La composition chimique des fruits charnus change selon que le fruit est vert ou à maturité. Lorsqu'il est vert on constate la présence de l'amidon, tanins, acides organiques (dont de l'acide tartrique, malique, citrique). Cette composition se modifie pendant la maturation du fruit et ces substances tendent à disparaître et on voit apparaître plusieurs sucres : glucose, lactulose, saccharose. On note aussi la disparition de la chlorophylle et la formation des nouveaux pigments dans les fruits murs, souvent des anthocyanes (ex; baie de Troène), des carotènes. Les fruits charnus sont répartis en deux grandes catégories, les baies et les drupes.

Les baies sont des fruits à pépins. Ex. de baies raisins, tomates, pomme, grenade, datte, orange, banane).

Les drupes sont des fruits à noyaux contenant une graine nommée amande, leur endocarpe est lignifié. Ex : olive, prune, pêche, cerise, noix de coco.

3.1.2. Fruits secs

Les fruits secs sont des fruits à teneur en eau réduite (péricarpe sec), ce qui leur permet une longue conservation, ils sont divisés en deux groupes :

Fruits secs déhiscents (capsuloïdes) C'est des fruits qui s'ouvrent à maturité par des fentes ou des pores et libèrent ainsi les graines, exemple : Capsule (Coton, pavot, iris) ; Follicule et gousse (Pois et Genêt) ; Silique (Chou, moutarde).

Fruits secs indéhiscents (akénoïdes) C'est des fruits qui ne s'ouvrent pas à maturité - Akène la graine reste libre à l'intérieur du fruit (Samare, tournesol, fraise) le péricarpe sec enveloppe une seule loge (ovaire uniloculaire) qui ne contient qu'une seule graine.

Ex : le glands du Chêne, faîne du Hêtre, châtaigne. - Samares : Erable, Orme. - Nucules : noisette. Caryopses : la graine adhère au fruit, c'est le fruit des Graminées : maïs et blé (caryopse de maïs : graine associée à la paroi du fruit)

Fruits charnus

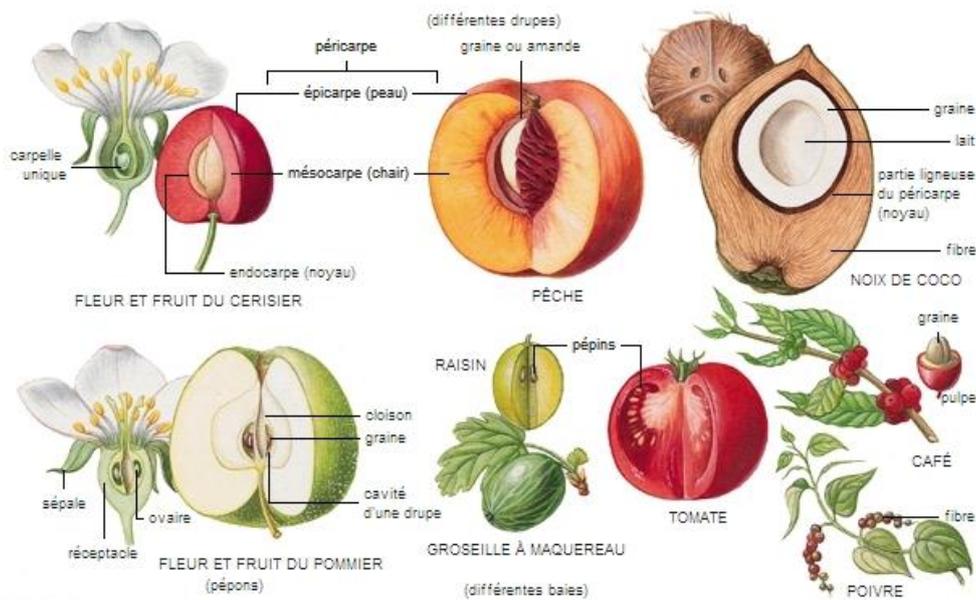


Figure 22 : Les fruits charnus

types de fruits secs

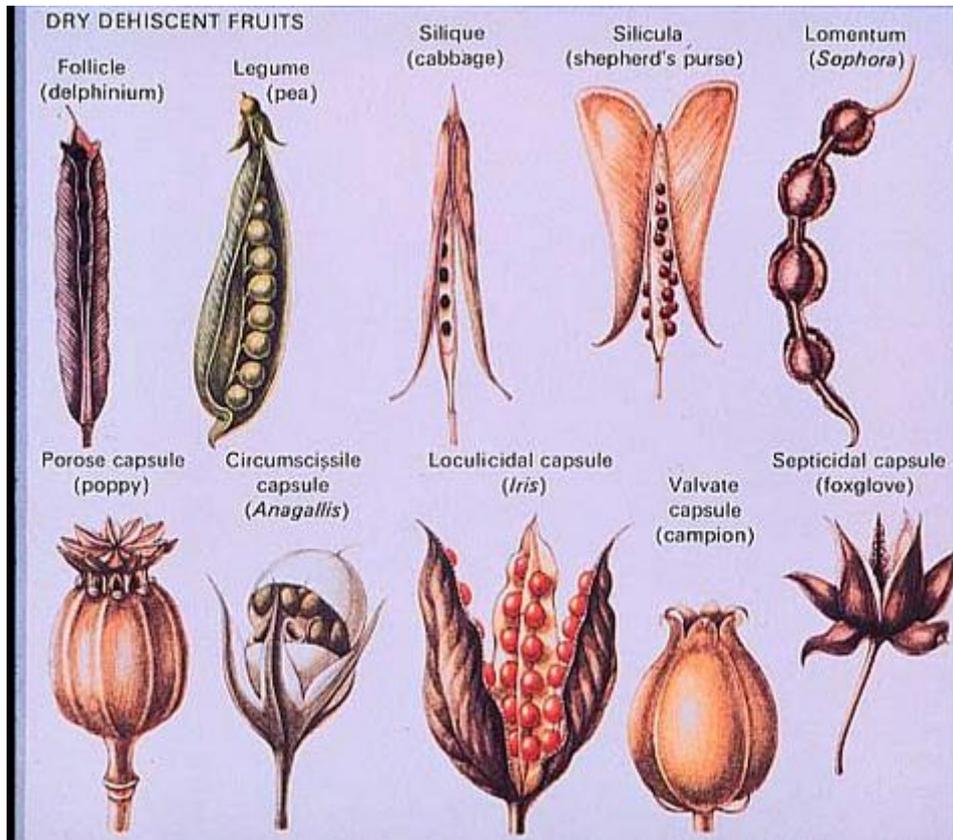
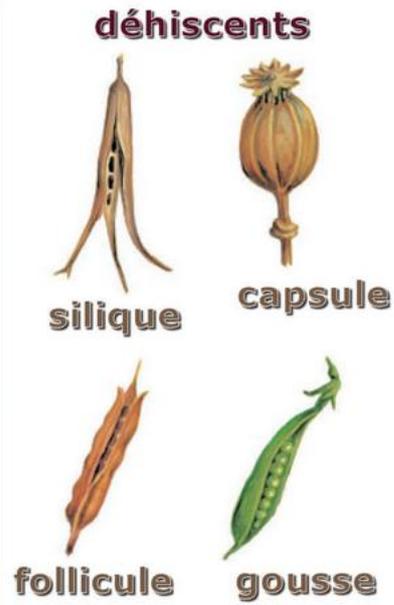


Figure 23 : Les fruits secs déhiscents et indéhiscents

CHAPITRE 3 : NUTRITION HYDRIQUE

Introduction

Tout comme l'organisme humain, la plante a besoin d'eau pour vivre. L'eau est indispensable à la formation de la sève et participe ainsi aux phénomènes de circulation et donc à l'apport de nutriments aux différents organes de la plante ; elle participe également à des phénomènes de régulations tel que la transpiration.

1. L'eau dans la plante

L'eau est un constituant très important à deux niveaux de la plante:

a- au niveau cellulaire, c'est le liquide au sein duquel s'effectuent toutes les réactions du métabolisme, le milieu de diffusion de tous les ions ou métabolites.

b- au niveau de l'organisme entier, l'eau est tout aussi importante ; c'est le fluide circulant dans les vaisseaux conducteurs, formant avec les matières en solution les sèves brute et élaborée. C'est par ailleurs le liquide responsable de la turgescence de toutes les cellules et donc du port dressé des végétaux non ligneux.

2. Les différents états de l'eau dans la plante

a- L'eau liée :

C'est l'eau immobilisée dans la cellule par des liaisons hydrogènes autour des groupements alcooliques, aminés ou carboxyliques ; la cellulose notamment fixe une quantité considérable de molécules d'eau le long des résidus glucidiques de ces chaînes moléculaires.

b- L'eau libre :

S'opposant à la précédente, c'est l'eau d'imbibition générale, facilement circulante ou stagnante dans les vacuoles.

c- L'eau de constitution :

C'est l'eau qui stabilise la structure tertiaire de certaines macromolécules protéiques et ne peut être enlevée de ces protéines sans en entraîner la dénaturation. Eau liée et eau de constitution ne sont généralement pas entraînées hors de la matière végétale par les procédés de dessiccation. Ces deux catégories forment 3 à 5 % de l'eau totale d'un tissu.

3. L'eau dans le sol

Il est essentiel de faire la distinction entre la quantité de l'eau dans un sol et sa disponibilité dans celui-ci. En effet, l'eau a une certaine mobilité dans le sol due à la gravité d'une part, et à différentes forces d'autre part :

- **Des forces osmotiques**, qui sont générées par les ions présents dans le sol, retenant l'eau dans le sol.
- **Des forces capillaires**, qui sont générées par la tension superficielle existant entre l'eau et les interstices laissés libres dans le sol.
- **Des forces colloïdales**, qui sont dues à la propriété des substances colloïdales à gonfler en présence d'eau. Ces forces sont d'autant plus grandes que le sol est riche en argile.

(Les colloïdes sont des macromolécules organiques ou minérales qui, placées dans l'eau, ne forment pas une solution, mais forment une suspension colloïdale).

En fonction de ces forces de rétention, on distingue les différents types d'eau dans le sol.

- **L'eau de gravitation** est une eau disponible qui s'écoule à travers le sol par gravité. Elle est plus ou moins retenue par les forces osmotiques et par les forces d'imbibition.
- **L'eau capillaire** est une eau disponible sur laquelle s'exercent les forces capillaires.
- **L'eau hygroscopique** est une eau indisponible, étant donné qu'elle rentre dans la constitution même du sol.

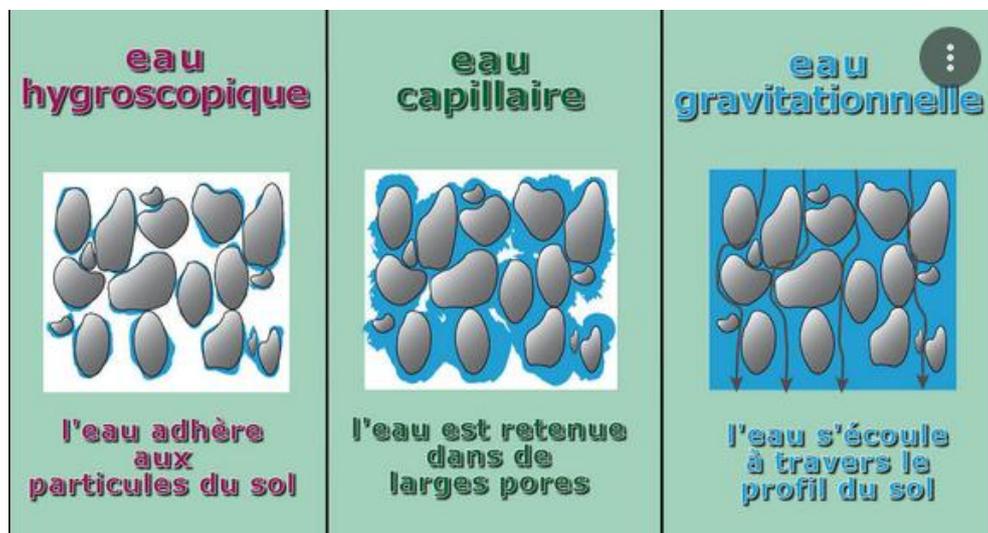


Figure 24 : Les états de l'eau dans le sol

4. Le potentiel hydrique

Le potentiel hydrique permet de déterminer le sens des échanges hydriques entre :

- différentes parties de la plante (organes, cellules...).
- le sol et la plante.
- la plante et l'atmosphère.

En effet l'eau circule toujours des potentiels hydriques les plus élevés vers les potentiels hydriques les plus bas.

Le potentiel hydrique d'un sol est l'énergie qu'il faut appliquer au sol pour libérer 1g d'eau. Ce potentiel est toujours négatif, et est d'autant plus bas que la liaison entre l'eau et le sol est forte. On note que le mouvement de l'eau va du potentiel le plus haut au potentiel le plus bas, et donc de la zone retenant le moins d'eau (la plus hydratée), à la zone retenant le plus d'eau (la moins hydratée).

Quand le sol se dessèche on observe donc une diminution du potentiel hydrique, devenant ainsi plus négatif.

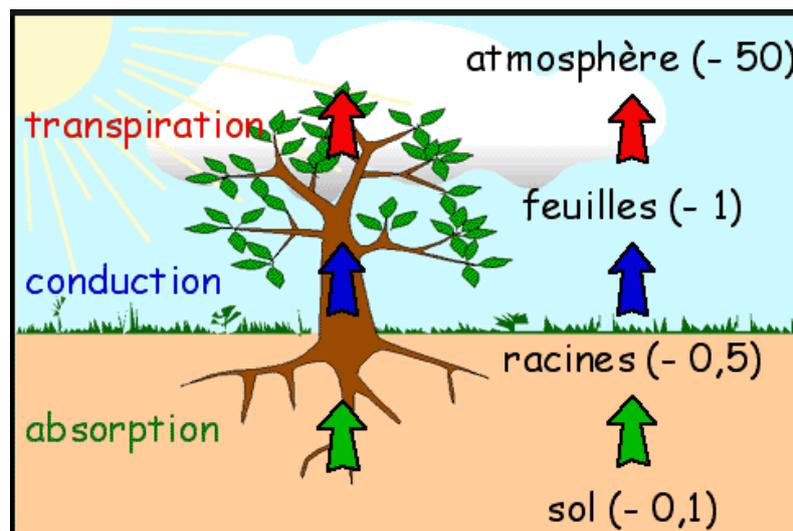


Figure 25 : Le potentiel hydrique

5. Absorption, transport et émission de l'eau

La plante absorbe l'eau du sol via ses racines pour assurer ses biosynthèses et sa transpiration. La transpiration, processus de transport de l'eau du sol par la plante jusqu'aux feuilles où elle s'évapore et qui représente la très grande majorité de l'eau absorbée, est essentielle au fonctionnement de la plante.

Pour comprendre le cycle de l'eau dans le sol et la plante, il est important au potentiel hydrique. On dit que la circulation de l'eau dans le sol et dans la plante est passive dans la mesure où elle obéit en premier lieu à un mouvement spontané depuis les zones à forte disponibilité (humides, à potentiel hydrique élevé, dans le sol) vers les zones de faible disponibilité (plus sèches, à potentiel hydrique plus faible, dans les feuilles et l'atmosphère).

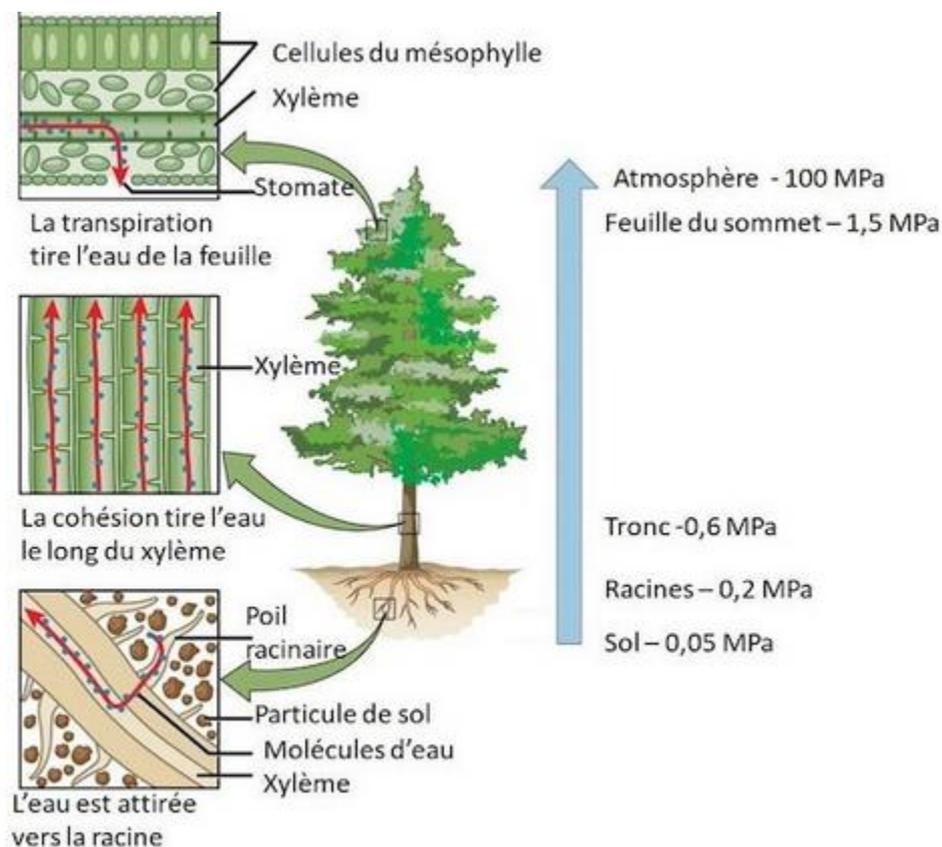


Figure 26 : Le passage de l'eau dans la plante

5.1. Absorption de l'eau

En un jour, la plante absorbe un volume d'eau équivalent à sa masse. Les plantes supérieures absorbent l'eau par leurs poils absorbant (fixés sur les racines).

L'absorption de l'eau se fait toujours à travers une paroi ou une membrane cellulaire selon les lois physiques de la diffusion : l'**osmose** (qui est un transport passif) s'effectue toujours du milieu hypotonique (le moins concentré) vers le milieu hypertonique (le plus concentré).

La **pression osmotique** est une force déterminée par une différence de concentration entre deux solutions situées de part et d'autre d'une membrane semi-perméable.

Ainsi une cellule placée dans une solution hypertonique par rapport au milieu intra-cellulaire perd de l'eau et devient **plasmolysée**. En revanche, si elle est placée dans un milieu extra-cellulaire hypotonique par rapport au milieu intra-cellulaire, de l'eau pénètre dans la cellule, la vacuole gonfle : la cellule est alors **turgescence**

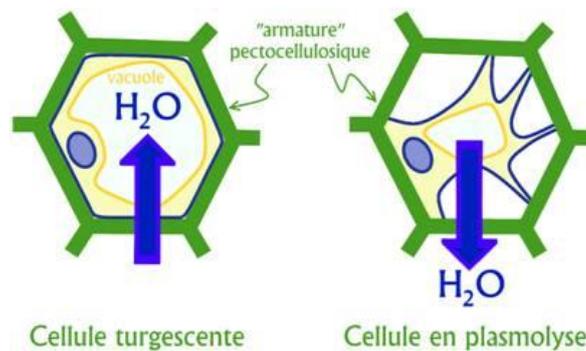


Figure 27 : L'eau dans la cellule

Remarque

Dans les conditions naturelles, la cellule du poil absorbant est toujours hypertonique par rapport à la solution du sol : elle absorbe donc l'eau **passivement** par osmose.

Une plante, arrosée avec une solution trop concentrée en sels minéraux, se fane et meurt car, non seulement les cellules des racines n'absorbent plus d'eau, mais elles en perdent ce qui entraîne leur plasmolyse.

5.2. Le transport de l'eau

L'eau et les sels minéraux sont transportés par les poils absorbants jusqu'à l'endoderme. Le cheminement se fait par la loi de l'osmose. Il y a déplacement par voie apoplastique (à travers la paroi) et symplastique (à travers les vacuoles et le cytoplasme).

Au niveau de l'endoderme, la couche cellulaire subérifiée (bandes de Caspary) oblige un passage par voie symplastique.

Dès que l'eau arrive aux éléments conducteurs du xylème, elle monte à travers la racine et la tige jusque dans les feuilles, d'où la plus grande partie se perd dans l'atmosphère par transpiration ; on peut donc considérer la voie sol-plante-atmosphère comme un continuum servant au déplacement de l'eau.

Pour traverser la racine, l'eau peut suivre au moins l'une des trois voies suivantes :

- apoplastique** : passe par les parois cellulaires
- symplastique** : l'eau passe de protoplaste en protoplaste par les plasmodesmes
- transmembranaire** : l'eau va de cellule en cellule, en passant par les vacuoles.

Protoplaste : Cellule végétale débarrassée de sa paroi cellulosique externe.

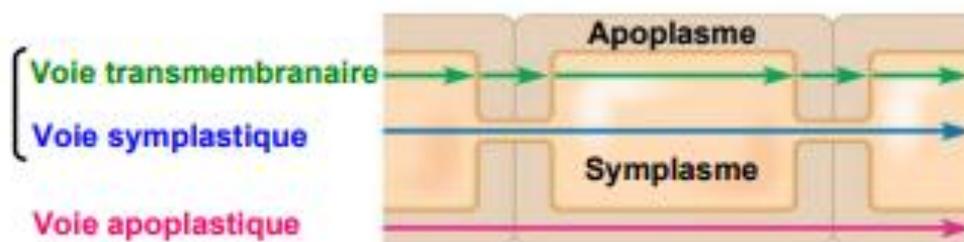


Figure 28: Les trois voies du passage de l'eau

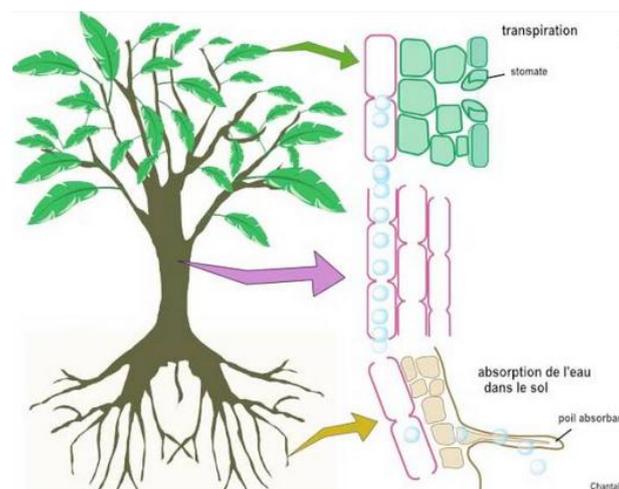


Figure 29 : Le transport de l'eau dans la plante

5.3. Emission d'eau par la plante (La Transpiration)

Moins de 5% de l'eau absorbée par les plantes, est réellement utilisée pour la croissance, et une quantité encore moindre est utilisée dans les réactions biochimiques; l'équilibre hydrique de la plante passe par une perte de vapeur d'eau, un phénomène nommé transpiration.

La plus grande partie de l'eau (plus de 90%) s'échappe par les feuilles. En effet le mécanisme de la transpiration est étroitement lié à l'anatomie de la feuille

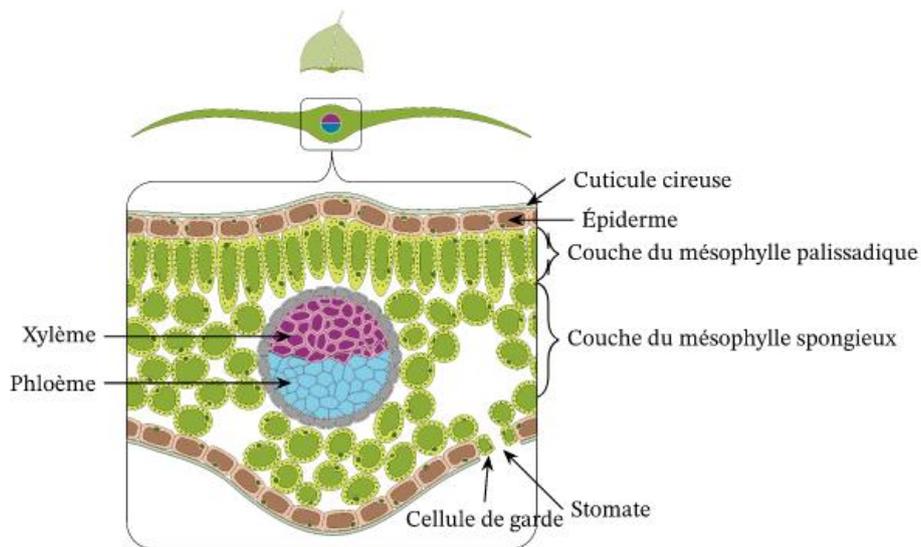


Figure 30 : Schémas de la feuille

Les stomates sont constitués de deux **cellules réniformes** (en forme de rein) appelée aussi **cellules de « garde »**, déformables en fonction de leur teneur en eau et délimitant une ouverture : l'**ostiole**. Ce dernier communique avec les **chambres sous-stomatiques** du **parenchyme lacuneux**.

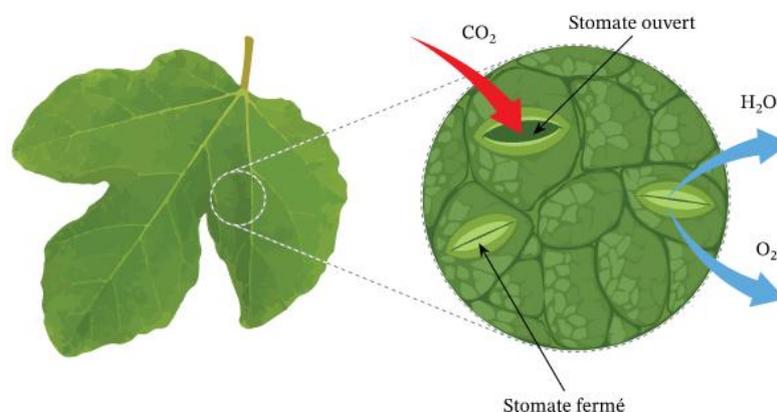


Figure 31 : Schémas des stomates

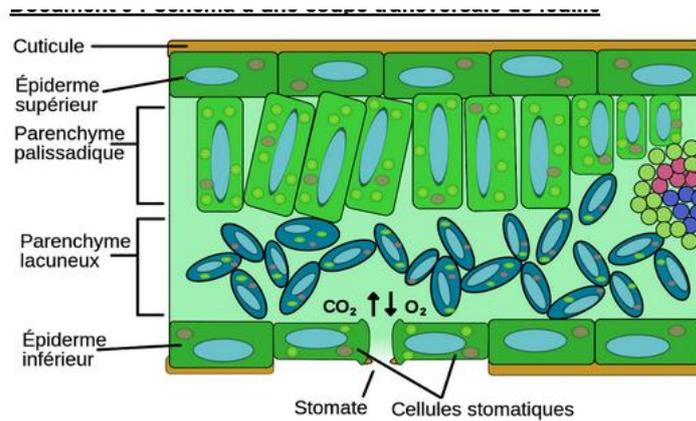


Figure 32 : Anatomie de la feuille

Mécanisme d'ouverture des stomates

Dans de bonnes conditions hydriques, les deux cellules stomatiques absorbent l'eau, se gonflent et se courbent, permettant l'ouverture de l'ostiole et les échanges. En effet, lorsque les cellules de garde sont **turgescents** (gonflées d'eau), la paroi extérieure plus mince et plus souple se dilate plus que la paroi interne qui est plus épaisse et plus rigide : les cellules s'incurvent comme un haricot ou un rein (d'où le nom de cellules réniformes) et l'ostiole s'ouvre.

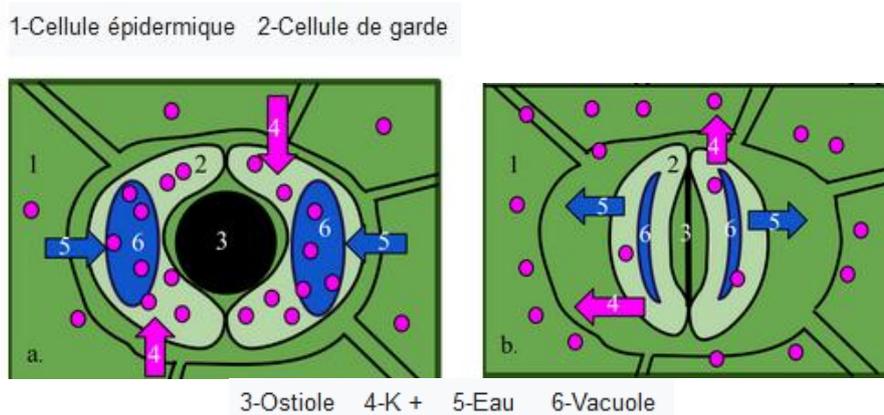


Figure 33 : Mécanisme d'ouverture des stomates (a) et leur fermeture (b)

L'ion potassium est l'élément déterminant du phénomène : son entrée et sa sortie de la vacuole des cellules de garde sont étroitement contrôlées et gouvernent la turgescence des cellules stomatiques et donc l'ouverture des stomates. En effet, l'eau circule selon le gradient de concentration de K⁺ pour maintenir le niveau de soluté identique à l'intérieur et à l'extérieur de la cellule.

Les stomates se ferment lorsque la pression de turgescence diminue parce que de l'eau sort de la cellule. L'eau sort de la cellule car les ions K⁺ sortent de celle-ci lors de l'arrêt de la pompe à protons.

CHAPITRE 4 : LA NUTRITION MINERALE

Introduction

Les racines des plantes puisent dans le sol des minéraux indispensables à leur croissance et à leur développement. Du point de vue quantitatif, on distingue les macronutriments qui comprennent les minéraux consommés en grande quantité, tandis que les micronutriments comprennent des minéraux consommés en quantité de l'ordre du microgramme.

Macro-éléments	Azote	N	100 - 300 kg/ha
	Potassium	K	100 - 400 kg/ha
	Calcium	Ca	40 - 200 kg/ha
	Phosphore	P	20 - 50 kg/ha
	Soufre	S	10 - 40 kg/ha
	Magnésium	Mg	10 - 30 kg/ha
Micro-éléments	Fer	Fe	1000 - 2000 g/ha
	Manganèse	Mn	150 - 700 g/ha
	Zinc	Zn	100 - 300 g/ha
	Bore	B	80 - 200 g/ha
	Cuivre	Cu	25 - 100 g/ha
	Molybdène	Mo	5 - 20 g/ha

Figure 34 : Besoins en macro et microéléments pour diverses cultures annuelles

1. Classification selon l'absorption de l'élément par la plante

On peut diviser les nutriments en 2 grands groupes : Essentielles et non Essentielles

1.1. Les éléments essentiels

Pour qu'un élément minéral puisse être considéré comme essentiel pour une plante, il doit avoir les trois conditions suivantes :

- L'élément doit être indispensable pour la croissance et le développement de la plante de telle manière que son absence empêche le déroulement normal du cycle de vie de la plante.
- Que la plante nécessite spécifiquement cet élément et que son déficit ne peut être corrigé par l'addition d'un autre élément (irremplaçable)
- L'élément doit être directement impliqué dans la nutrition des plantes, c'est-à-dire que son action ne peut être indirecte comme par exemple favoriser l'absorption d'un élément ou diminuer les effets toxiques d'un autre élément... ect

Les éléments essentiels eux même peuvent être classés en 2 classes ; macroéléments et microéléments.

1.2. Les éléments non essentiels

Les éléments non essentiels (facultatifs), on les divise en 2:

- Eléments utiles ou essentielles pour quelque plantes seulement (Na, Si, Co, Al, Se, Ti)
- Eléments toxique : ce sont ceux qui inhibent la croissance et le développement des plantes, leur action peut être en relation avec un blocage d'un système enzymatique, en tenant compte que l'élément minéral ajouté en concentration élevée inhibe la croissance et le développement: il devient toxique.

2. Les macroéléments (macronutriments)

Ce groupe est constitué des minéraux les plus abondants dans les cellules végétales et requis en grandes quantités par la plante afin d'assurer sa croissance et son développement nommés macroéléments. Ils sont présents dans la plante en quantités élevés qui peut varier de 0,1% à 4% de la matière sèche. . Au nombre de ces minéraux, on retrouve : l'azote, le potassium, le phosphore, le calcium, le magnésium et le soufre.

On distingue : les macroéléments primaire (azote, phosphore et le potassium) dont les plantes ont besoin en abondance et à des intervalles réguliers et Les macroéléments secondaires (soufre, calcium et Magnésium) dont la plante ne les utilisent qu'en petites quantités et à certains moment de la vie.

Les éléments C, H, O sont aussi des macronutriments indispensables à la vie de laplante mais ces derniers sont épuisés directement de l'eau et l'air.

2.1. L'azote

L'azote est le principal constituant des molécules essentielles à la construction des cellules végétales. Les acides nucléiques (ARN, ADN), les acides aminés, les nucléotides, les coenzymes et la chlorophylle ont besoin d'azote pour se former. Le taux de protéines des fruits est intimement lié à l'abondance d'azote dans le sol.

2.2. Le potassium

Cet élément nutritif intervient dans l'ouverture des stomates. Le potassium permet la circulation des sels minéraux dans les tissus végétaux par le phénomène de l'osmose. De ce fait, il contribue à l'équilibre ionique au niveau des cellules. Il sert également d'activateur à un certain nombre d'enzymes.

2.3. Le phosphore

Le phosphore est présent dans de nombreuses molécules indispensables à la vie. On le retrouve dans les acides nucléiques, les chloroplastes et les protéines du noyau. Il est présent dans les molécules énergétiques que sont l'ATP (adénosine triphosphate) et l'ADP (adénosine diphosphate). Le phosphore a donc un rôle énergétique, plastique et génétique au niveau des cellules végétales.

2.4. Le calcium

Le calcium joue un rôle primordial au niveau des parois cellulaires. En cimentant les parois cellulaires, les unes aux autres, le calcium assure leur cohésion. Il intervient dans la perméabilité de la membrane en facilitant le transport de certaines substances et en bloquant celui d'autres substances. Le fonctionnement de certaines enzymes telles que la calmoduline nécessite la présence de calcium. Le calcium intervient également dans l'élongation des racines.

2.5. Le magnésium

Le magnésium joue un rôle important dans la photosynthèse car il est l'atome central de la chlorophylle. Le magnésium est l'activateur de nombreuses enzymes dont deux enzymes critiques à savoir la ribulobiphosphate carboxylase (RuBisCO) et la phosphoenolpyruvate carboxylase (PEPC).

2.6. Le soufre

Le soufre est un élément constitutif des acides aminés que sont la cystine, la cystéine et la méthionine. Chez les légumineuses, le soufre intervient dans la formation des nodules nécessaire à la fixation de l'azote atmosphérique. Le soufre permet aux plantes de résister aux pathologies. Il intervient dans la croissance des végétaux et dans la formation des fruits. En cas de carence en soufre, les feuilles des plantes prennent une couleur vert-pâle.

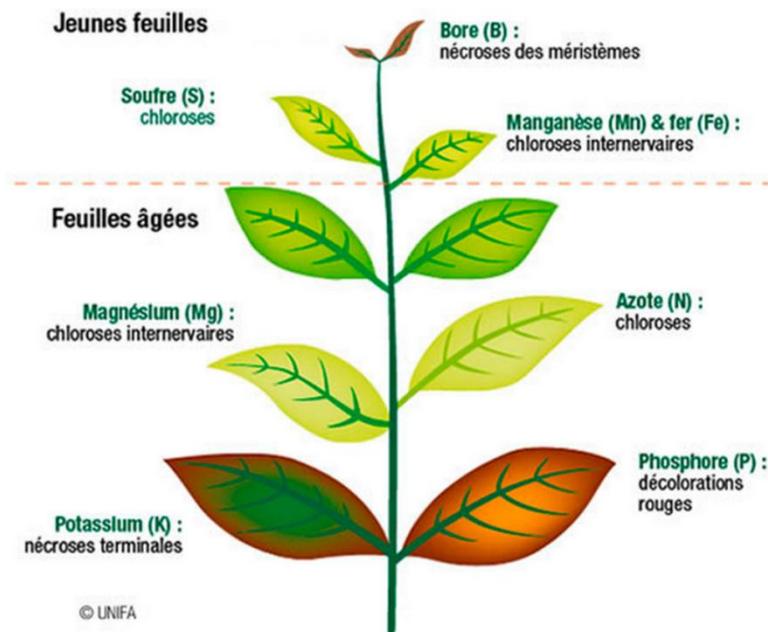


Figure 35 : Les différentes carences des minéraux chez les plantes

3. Les micronutriments ou oligoéléments

Les micros éléments ou oligoéléments jouent un rôle important dans la santé et la croissance de la plante. Ils comprennent le bore, le cuivre, le fer, le manganèse, le molybdène et le zinc.

Les quantités d'oligoéléments assimilées par les plantes sont sous forme de traces mais leur rôle dans la nutrition globale de la plante est très important. Ils sont présents dans la plante en quantité très faible qui ne dépasse pas 0,01% de la matière sèche.

En grandes cultures, le Fer, le Cuivre, le Manganèse, le Zinc, le Bore et le Molybdène sont les oligos les plus cités comme pouvant devenir facteurs limitant le développement normal des principales productions.

3.1. Le fer

Le fer est indispensable pour la production de la chlorophylle. Il est l'élément indispensable à la production des cytochromes (pigments) et de la nitrogénase (enzyme). Il est rare que les sols soient déficients en fer. Mais cet élément peut être indisponible pour les plantes si le pH n'est pas compris entre 5 et 6,5.

3.2. Le zinc

De nombreuses enzymes végétales incluent dans leur composition des atomes de zinc. Le zinc est également l'activateur de nombreuses enzymes. Cet oligoélément intervient dans la synthèse de la chlorophylle.

3.3. Le bore

Cet oligoélément intervient dans le transport des hydrates de carbone produits lors de la photosynthèse. Il joue également un rôle dans la régulation des processus métaboliques. L'utilisation de calcium, de même que la synthèse des acides nucléiques, requière la présence de bore. Le bore assure l'intégrité de la membrane plasmique.

3.4. Le cuivre

Le cuivre est l'activateur et le constituant des enzymes liées aux réactions d'oxydoréductions dans les cellules végétales.

3.5. Le nickel

Ce minéral est le constituant essentiel d'enzymes jouant un rôle clé dans l'organisme. Au nombre de ces enzymes, on retrouve les enzymes impliquée dans l'absorption de l'azote.

3.6. Le molybdène

Cet élément intervient dans la métabolisation de l'azote et la réduction des nitrates. Les plants n'ont besoin que de quantités infimes de molybdènes (moins de 50 grammes par hectare).

3.7. Le chlore

Le chlore est nécessaire à l'osmose et à l'équilibre ionique au niveau des cellules végétales. Il joue également un rôle dans les processus photosynthétiques.

Groupe		Prélèvement	Fonction biochimique
1	Carbone	Sous forme de CO ₂ ;HCO ₃ ;H ₂ O ;O ₂ NO ₃ ;NH ₄ ;N ₂ ;SO ₄ ⁻ SO ₂ . Les ions à partir de la solution du sol, les gaz de l'atmosphère	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Principaux constituants de la matière organique ❖ -Implication dans les processus enzymatiques. ❖ Assimilation par oxydoréduction.
	Hydrogène		
	Oxygène		
	Azote		
	Soufre		
2	Phosphore	Sous forme de phosphates, acide borique ou borates et silicates, à partir de la solution du sol	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Estérification avec des groupes alcool. ❖ Les esters de phosphates sont impliqués dans les réactions de transfert énergétique
	Bore		
	Silicium		
3	Potassium	Sous forme d'ions à partir de la solution du sol	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Fonction non spécifique sur le potentiel osmotique. ❖ Réactions plus spécifiques sur les activations enzymatiques ❖ Pontage réactionnels. ❖ Balance anionique ❖ Contrôle de la perméabilité membranaire et des potentiels électriques.
	Sodium		
	Magnésium		
	Calcium		
	Manganèse		
	Chlore		
4	Fer	Sous forme d'ions ou de chélates à partir de la solution du sol	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Majoritairement présents sous forme chélates dans les groupes prosthétiques (non protéique) ❖ Permettent le transport d'électron par changement de valence
	Cuivre		
	Zinc		
	Molybdène		

Figure 36 : les groupes fonctionnels des éléments minéraux

CHAPITRE 5 : LA NUTRITION CARBONÉE

Introduction

Dans la nature, on trouve le carbone sous deux formes assimilables ; le carbone minéral (CO_2 ou H_2CO_3) et le carbone organique qui se trouve dans les molécules organiques. On trouve deux types de végétaux :

- Ceux qui convertissent le carbone minéral en carbone organique. Ce sont les autotrophes. Ils utilisent l'énergie solaire pendant la photosynthèse grâce à la chlorophylle.
- Ceux qui n'assimilent que le carbone organique. Ce sont les hétérotrophes (c'est le cas des champignons et de quelques plantes parasites).

La photosynthèse réalisée par les végétaux alimente continuellement la biosphère en carbone sous forme de glucides.

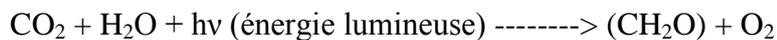
La respiration restitue ce carbone sous forme de CO_2 après dégradation des glucides.

1. Photosynthèse ou assimilation chlorophyllienne.

La photosynthèse est un processus physiologique par lequel les végétaux qui contiennent certains pigments (en particulier de la chlorophylle) sont capables de capter l'énergie lumineuse et de la transformer en énergie chimique afin de réaliser la nutrition carbonée à partir du CO_2 atmosphérique ... Ce processus est accompagné d'un dégagement de dioxygène.

Les végétaux synthétisent leur matière organique à partir de molécules simples ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) et de l'énergie lumineuse (soleil), le CO_2 et l'eau se combinent (réaction de réduction) pour former des glucides.

La formule générale de la photosynthèse est :



2. Les types de plastes

Au cours du développement de la plante, des proplastes se différencient en différents plastes par des voies différentes selon les tissus et les organes des plantes.

2.1. Les chloroplastes

Ce sont des organites présents dans le cytoplasme de la cellule eucaryote végétale, ils sont responsables de la photosynthèse.

2.2. Les chromoplastes

Un chromoplaste est un organite présent chez certains végétaux, caractérisé par l'accumulation de pigments non-chlorophylliens (caroténoïdes, xanthophylles et lycopènes) qui confèrent la couleur jaune, orange ou rouge à certaines parties de la plante (fruits, fleurs et tubercules).

2.3. Les leucoplastes

Les leucoplastes sont des plastes qui ne sont pas pigmentés, on les s'appellent les amyloplastes (accumulation d'amidon), les protéoplastes (accumulation de protéines) et les oléoplastes ou lipidoplastes (accumulation de lipides en gouttelettes lipidiques). Ils sont entourés par deux membranes où sont stockées des réserves d'amidon, de lipides ou de protéines.

3. Le chloroplaste

3.1. Localisation

Selon les espèces, on a de 10 à 100 chloroplastes par cellule (plus ils sont nombreux, plus ils sont petits). L'ensemble des chloroplastes s'appelle le plastidome.

Les chloroplastes sont généralement situés au niveau des feuilles, dans le mésophylle (ensemble de parenchymes palissadiques et lacuneux).

On ne trouve pas de chloroplastes dans l'épiderme. Ils se trouvent aussi au niveau des pétioles, des tiges herbacées et de certains organes floraux.

3.2. Structure

C'est un organite à double membrane, de forme ovoïde, de quelques dizaines de micromètres de long. La membrane externe est relativement perméable et continue, tandis que la membrane interne est imperméable (une barrière sélective) repliée sur elle-même pour former des sacs (les thylacoïdes) où se trouvent les pigments.

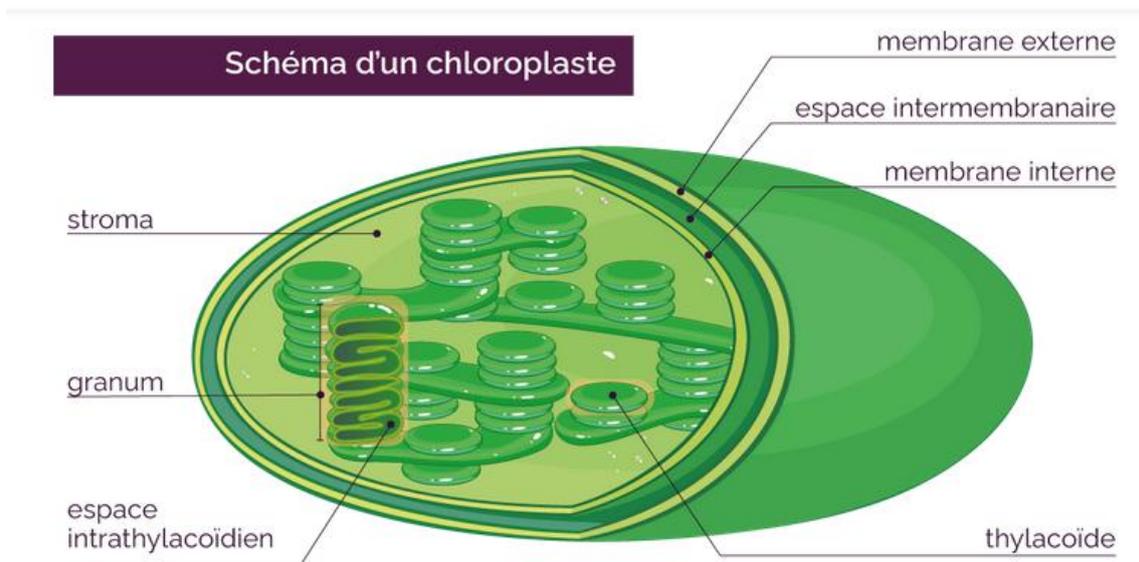


Figure 37: La structure du chloroplaste

Le chloroplaste est composé de grana et stroma, le grana est un ensemble de granum comprenant chacun plusieurs saccules ou thylacoïdes. Le granum peut être constitué de 2 à 100 disques, sont reliés les uns aux autres par des lamelles stromatiques dont l'ensemble forme un réseau continu. Le stroma contient aussi des ribosomes ainsi que de l'ADN circulaire.

4. Les étapes de la photosynthèse

Il y a deux phases. Une pendant laquelle l'eau est photodissociée (photochimique ou réactions claires) et une autre pendant laquelle le CO₂ est incorporé au cycle de Calvin (biochimique ou assimilatrice).

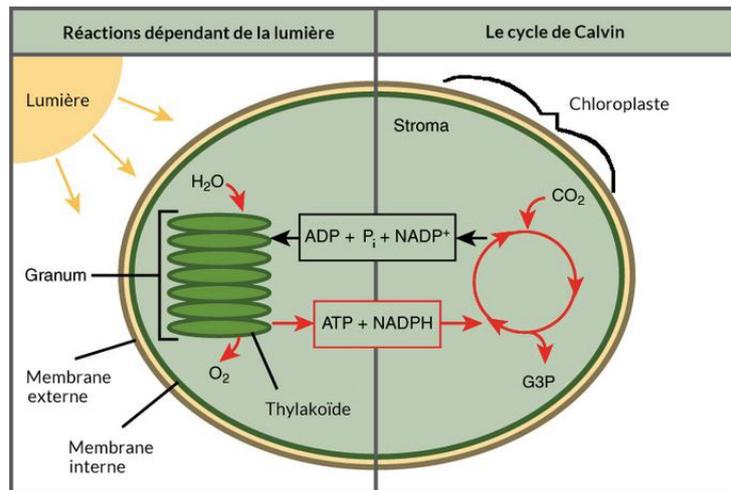
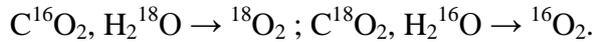


Figure 38: Le siège des deux étapes de la photosynthèse

4.1. Phase photochimique (claire)

Elle se déroule dans les thylakoïdes.

La lumière est captée sous forme de photons qui ont un potentiel énergétique selon leur longueur d'onde. L'absorption de cette énergie aura 2 conséquences : un transport d'électrons et une libération de protons.

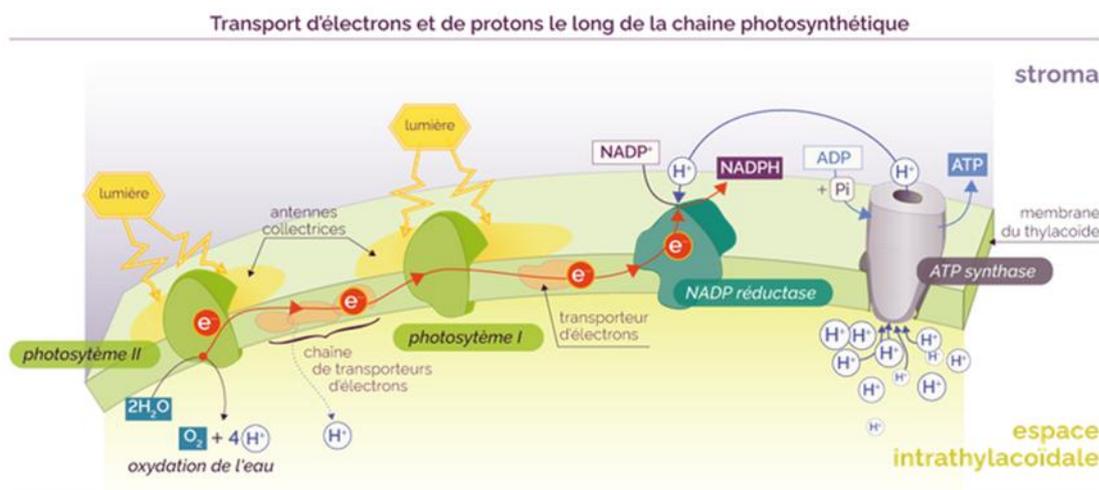


Figure 39 : La phase claire

1. Le transport d'électrons

- Quand un pigment capte un photon au niveau de l'antenne collectrice formée de protéines, il entre dans un état excité. Cette excitation est transmise de pigment en pigment pour arriver au centre réactionnel. C'est au centre réactionnel que l'énergie lumineuse sera convertie en énergie chimique.
- Il existe dans la membrane des thylakoïdes, deux centres réactionnels avec des antennes collectrices, appelés photosystème I et II. Dans les photosystèmes, l'énergie d'excitation collectée est utilisée pour arracher un électron qui est transporté à travers la membrane par des molécules acceptrices d'électrons jusqu'à un état stable.
- Dans la membrane du thylakoïde, les deux photosystèmes I et II sont branchés en séries

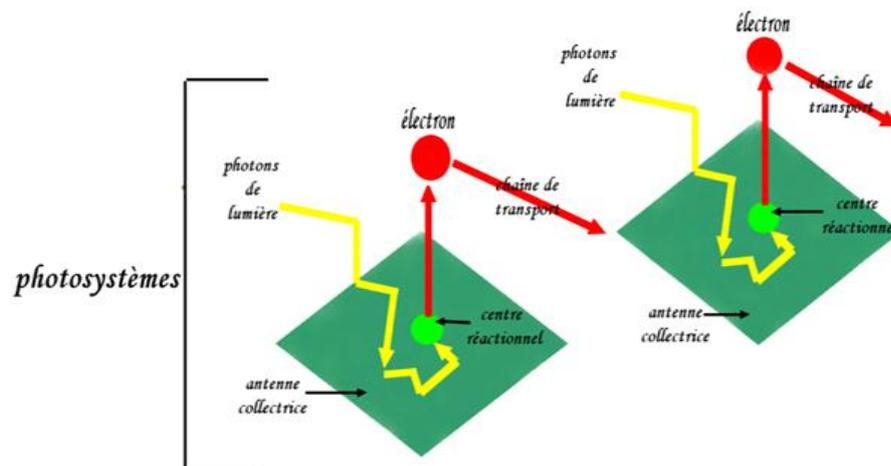


Figure 40 : Les photosystèmes

1.1. Le transport cyclique des électrons

- IL ne se fait qu'au niveau du PSI.
- L'antenne reçoit les photons, elle les concentre vers le centre réactionnel fait de chlorophylle a et d'un accepteur primaire d'électrons.
- La chlorophylle passe alors à l'état excité et donne un électron à l'accepteur primaire lors d'une réaction d'oxydoréduction.
- L'accepteur primaire transfère ensuite l'électron à une chaîne de transporteurs situés dans la membrane du thylakoïde qui le retourne finalement au centre réactionnel du photosystème I.
- Tout en transportant les électrons, la chaîne de transport fait passer des ions H^+ du stroma vers l'espace intrathylakoïdien. Les ions H^+ ainsi concentrés dans l'espace intrathylakoïdien retournent dans le stroma en passant par l'ATP synthase produisant ainsi de l'ATP.

1.2. Le transport non cyclique des électrons

- Les deux photosystèmes sont utilisés.
- Le photosystème II, absorbe 2 photons, perd 2 électrons qu'il donne à son accepteur primaire d'électrons, qui les cède à son tour à une chaîne de transport. Cette chaîne donne les électrons au centre réactionnel du photosystème I.
- Lors du passage des électrons, il y aura aussi passage d'ions H^+ du stroma vers l'espace intrathylakoïdien. Ces ions diffuseront vers le stroma en passant par l'ATP synthase. Donc, il y aura production d'ATP.
- Le photosystème I a, lui aussi, perdu 2 électrons au profit de son accepteur primaire. Celui-ci les cède à une autre chaîne de transport qui les conduira vers le $NADP^+$ au niveau du stroma. Le $NADP^+$ est le dernier accepteur d'électrons de cette deuxième chaîne, et se transforme en $NADPH + H^+$. Les électrons perdus du photosystème I sont donc remplacés par ceux provenant du photosystème II.

2. La photolyse de l'eau

- Le photosystème II n'a toujours pas remplacé ses électrons perdus.
- C'est une enzyme qui prend les électrons de l'eau et les donne au PSII. Cette réaction libère de l'oxygène.
- Elle se fait dans l'espace intrathylakoïdale.

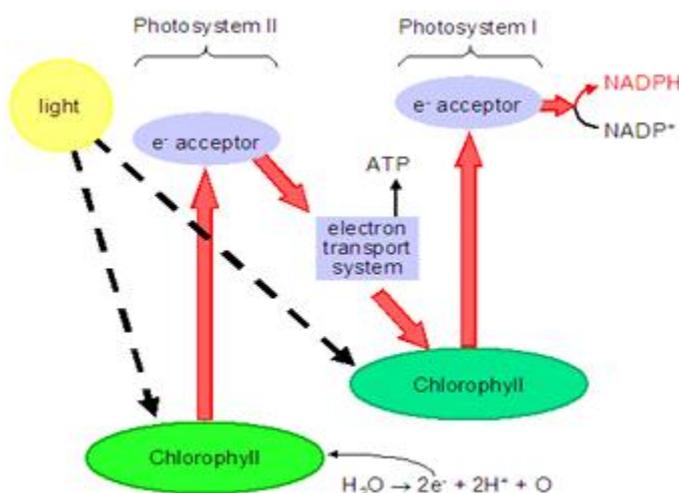


Figure 41 : Résumé des étapes de la phase claire

- Le PSII et les complexes associés sont responsables de la libération de l'oxygène dans l'atmosphère et produit de l'ATP.
- Le PSI est responsable de la libération de NADPH dans le stroma.
- Les molécules d'ATP et de $NADPH + H^+$ formées par les transports cyclique et non cyclique sont utilisées par le cycle de Calvin. L'ATP fournit l'énergie et les groupements phosphate tandis que le $NADPH + H^+$ agit comme agent réducteur (c'est un donneur d'électrons). Chaque tour du cycle de Calvin requiert 9 ATP et 6 $NADPH + 6H^+$.

4.2. Phase biochimique (sombre)

Cette phase a lieu en même temps que la phase photochimique, mais ne nécessite pas d'énergie lumineuse. La phase biochimique permet de fixer le carbone contenu dans le CO₂ atmosphérique et le lie aux atomes d'Hydrogène des molécules d'eau.

1. Fixation du CO₂

La première molécule du cycle de Calvin est le **ribulose-biphosphate (RuBP)** possédant 5 carbones. La fixation du CO₂ sur cette molécule nécessitera l'utilisation d'une enzyme appelée la **Rubisco** (*Ribulose Biphosphate Carboxylase Oxygénase*). Cette enzyme permettra la formation d'une molécule instable à 6 carbones qui donnera rapidement deux molécules de **3-phosphoglycérate** à 3 carbones.

2. Réduction du carbone fixé

La deuxième phase du cycle de Calvin correspondra à la réduction du 3-phosphoglycérate. Celui-ci sera tout d'abord phosphorylé par de l'**ATP** pour donner l'**acide biphosphoglycérique**, qui sera lui-même réduit par le **NADPH** pour former le **3-phosphoglyceraldéhyde (G3P)** qui est un sucre.

3. Régénération de l'accepteur de CO₂

Le G3P formé peut avoir différentes destinées ; un sixième de celui-ci sera utilisé par la cellule comme composant glucidique et les cinq sixièmes restant seront utilisés pour poursuivre le cycle de Calvin.

La reformation du RuBP, qui sera réutilisée pour fixer le CO₂, se fera en plusieurs étapes et nécessitera l'utilisation d'**ATP**.

Le glyceraldéhyde 3-phosphate produit dans le chloroplaste est rapidement transporté vers le cytoplasme où il est permis la synthèse de saccharose. Le saccharose est la principale forme de transport de glucides entre les cellules végétales pour fournir les glucides au reste du végétal.

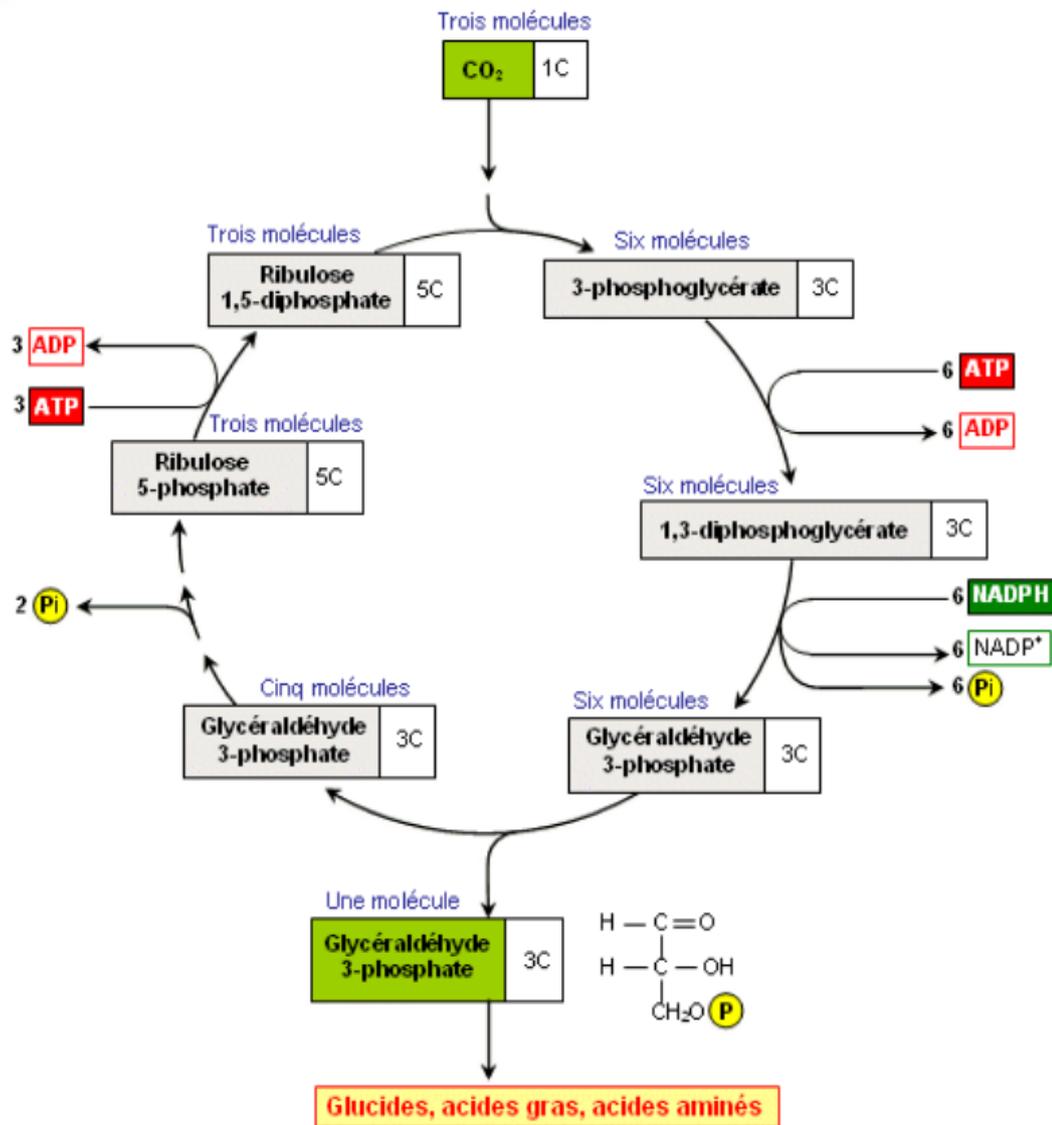


Figure 42 : Phase biochimique

5. Les différents types de fixation du carbone

Il y a trois mécanismes connus de fixation du dioxyde de carbone au cours de la photosynthèse : C3, C4 et CAM. Ces trois mécanismes diffèrent par l'efficacité de cette étape. Le mécanisme en C3 correspond au mécanisme « de base », c'est celui de 98% des plantes vertes.

Les types en C4 et CAM sont plus rares, mais on les trouve dans des espèces connues : le maïs est une plante C4, l'ananas une plante CAM. Ces sont des adaptations au stress hydrique ou à une réduction de disponibilité de CO₂ pendant la journée.

5.1. Le mécanisme des plantes en C3

La première des étapes du cycle de Calvin consiste en une carboxylation (fixation d'une molécule de CO_2) sur le ribulose 1,5 bisphosphate, catalysée par la RubisCO, pour donner deux molécules d'un composé à 3 atomes de carbone (Acide 3-phosphoglycérique, APG).

5.2. Le mécanisme des plantes en C4

Le métabolisme C4 dissocie *dans l'espace*, les phases photochimique et non photochimique. Les plantes qui l'utilisent captent le CO_2 atmosphérique, non directement par RubisCO, mais par l'action de la phospho-énol-pyruvate-carboxylase (PEP-carboxylase) qui produit un composé à **quatre** atomes de carbone qui est l'oxaloacétate, qui sera convertie en malate ou aspartate. Ces réactions commencent dans le mésophylle et se terminent dans la gaine périvasculaire.

5.3. Le mécanisme des plantes CAM (*Crassulacean Acid Metabolism*)

Elles diffèrent des C4 du fait que la fixation du carbone n'est pas séparée dans l'espace mais dans le temps (nuit/jour). Durant la nuit, lorsque les stomates sont ouverts, un stock de malate est produit, puis stocké dans la vacuole des cellules photosynthétiques. Au cours de la journée, ces malates sont retransformés en dioxyde de carbone et le cycle de Calvin peut s'effectuer, le CO_2 restant disponible pour la photosynthèse malgré la fermeture des stomates. Ainsi les pertes d'eau par transpiration sont limitées. Ce mécanisme est observé notamment chez les Crassulaceae (« plantes grasses », comme le cactus).

6. La Respiration cellulaire

La respiration cellulaire est une réaction chimique d'oxydo-réduction qui fournit l'énergie nécessaire à une cellule pour fonctionner et qui se passe dans les mitochondries

Une espèce chimique (atome, molécule, ion) qui capte un ou plusieurs électrons est un oxydant.

Une espèce chimique qui donne un ou plusieurs électrons est un réducteur.

Quand un réducteur perd des électrons, il s'oxyde. Quand un oxydant capte des électrons, il se réduit.

Ces réactions sont appelées des réactions d'oxydoréduction.

Puisqu'un donneur d'électrons nécessite un receveur d'électrons, l'oxydation et la réduction vont toujours ensembles.

La respiration cellulaire nécessite :

- un carburant : il s'agit du glucose, d'acides gras ou d'autres molécules organiques (acides aminés, corps cétoniques) ;
- un comburant, le dioxygène.

Cette réaction produit : □ du dioxyde de carbone ; □ de l'eau ; □ parfois de l'urée, si le carburant contient de l'azote (ex: acides aminés).

Le glucose, s'il n'est pas stocké sous forme de glycogène, sera dégradé afin de fournir de l'énergie directement utilisable par la cellule. Il existe deux voies métaboliques principales pour cela :

- la respiration cellulaire en milieu aérobie (milieu où il y a présence d'oxygène) ;
- la fermentation : fermentation alcoolique, butyrique... en milieu anaérobie (milieu dépourvu d'oxygène).

Lors de la respiration cellulaire, la dégradation du glucose se fait grâce à des transferts d'électrons (ce qui libère l'énergie).

La réaction globale est :

