

Université Mohamed BOUDIAF M'sila 2
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

TRONC COMMUN

Cours de Physiologie végétale

Destinés aux étudiants de deuxième année du Tronc commun

Section : Ecologie

Préparé par : Dr. BENSEMANE Latifa

Année universitaire 2020/2021

PHYSIOLOGIE VEGETALE

OBJECTIFS DU MODULE

Connaissances de base à la compréhension de :

- a. La biosynthèse des substances nutritives et ou des tissus comestibles (base des aliments de source végétale) d'où l'importance de la connaissance des phénomènes liés au développement des végétaux
- b. La physiologie de la maturation des fruits et de l'accumulation qualitative et quantitative des réserves (sources des substances nutritives). A l'issue de cet enseignement l'étudiant sera capable d'expliquer les phénomènes physiologiques et d'en comprendre l'origine, le processus et leurs résultats.

L'étudiant doit maîtriser des notions en Botanique et en Physiologie végétale.

1ère Partie : La Nutrition

La nutrition végétale est l'ensemble des processus qui permettent aux végétaux d'absorber dans le milieu ambiant et d'assimiler les éléments nutritifs nécessaires à leurs différentes fonctions physiologiques : croissance, développement, reproduction...

Pour se développer, une plante a besoin d'eau, de lumière, d'oxygène, de carbone mais également d'éléments minéraux présents en plus ou moins grande quantité dans le sol. Tous les éléments nutritifs que la plante utilise proviennent du sol ou de l'air ou de l'eau.

1. Rappel sur les notions de base

1.1. Organisation d'une plante

Les plantes regroupent notamment les plantes à fleurs (Angiospermes), les Gymnospermes (sapins, pins) et les fougères. Une plante se définit comme des êtres vivants fixés. On distingue les plantes herbacées (10 cm de hauteur env.) et les plantes ligneuses qui possèdent un tronc et des tiges brunes et ramifiées qui contiennent du « bois » (le chêne, le marronnier ...).

Une plante est généralement constituée d'un appareil végétatif comprenant des racines ancrées dans le sol et des tiges feuillées se développant en milieu aérien et d'un appareil reproducteur comprenant des fleurs pour une grande majorité.

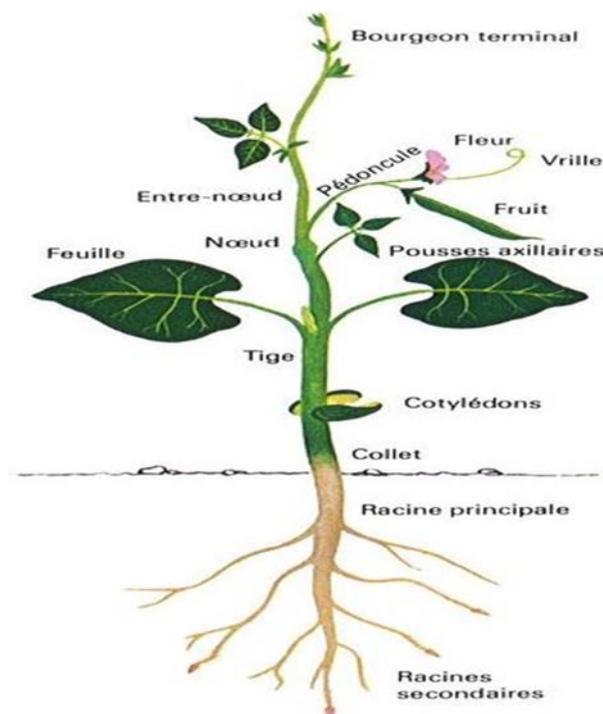


Figure 1 : Structure d'une plante

La tige occupe l'espace situé au-dessus de la racine. Elle sert de support aux feuilles, aux fleurs et aux fruits. Elle se ramifie le plus souvent en développant des rameaux secondaires qui permettent d'étaler la surface foliaire dans l'espace aérien. L'extrémité des tiges comporte des bourgeons qui permettent la croissance. Dans certains cas, la tige peut être souterraine. Elle peut alors former :

- Un rhizome, tige horizontale croissant au ras du sol. Elle donne des rameaux aériens (fraisier par exemple).
- Un tubercule, rameau latéral dont les extrémités se gorgent de réserves (par exemple pomme de terre).

- Un bulbe, qui présente une tige très courte renfermant généralement des réserves (oignon, ...).

La feuille s'insère sur la tige au niveau d'un bourgeon latéral grâce à un pédoncule, le pétiole, qui forme à sa base un petit évasement ou gaine. La feuille s'étale pour former le limbe souvent vert (siège principal de la photosynthèse grâce à la chlorophylle qui y est abondante). Dans le prolongement du pétiole, un réseau de nervures parcourt le limbe. Il existe des feuilles simples, où le limbe est d'un seul tenant ; et des feuilles composées, où il est découpé en plusieurs folioles.

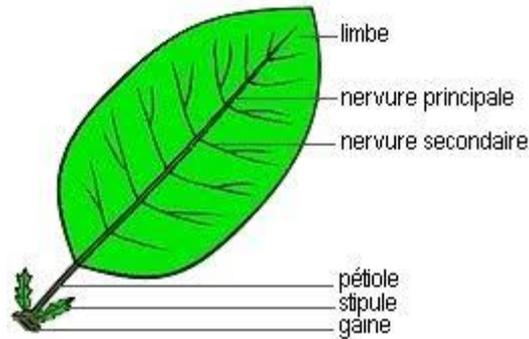


Figure 2 : Feuille

La racine est la portion souterraine de la plante. Elle est plus ou moins ancrée dans le sol. Elle assure deux fonctions essentielles :

- La fixation dans la terre ;
- L'absorption de l'eau et des sels minéraux du sol.

Généralement, la racine apparaît comme une touffe chevelue plus ou moins fournie qui se ramifie dans le sol. On estime que le volume radicaire équivaut à celui développé par la partie aérienne. La pointe des racines est recouverte d'une calotte (coiffe) protégeant les tissus sous-jacents qui assurent la croissance de la racine. En arrière de la coiffe, se trouve une zone pilifère où se développent de nombreux poils absorbants assurant une des deux fonctions de la racine.

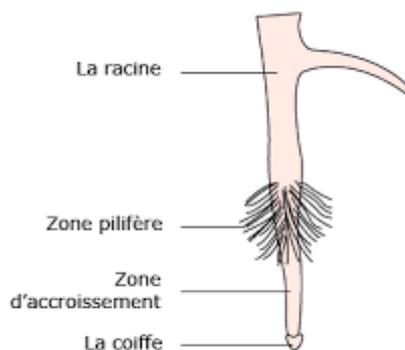


Figure 3 : Racine

1.2. Organisation d'une cellule végétale

Comme la cellule animale, la cellule végétale s'entoure d'une membrane plasmique et contient un noyau, des mitochondries, du réticulum endoplasmique, un appareil de Golgi, des ribosomes, des peroxysomes, un

cytosquelette, ... En outre, la cellule végétale possède en plus une paroi cellulaire et renferme des organites appelés chloroplastes et vacuoles qui lui sont spécifiques.

La **cellule** est l'**unité fondamentale** de la structure et du fonctionnement des organismes. La cellule représente le premier niveau d'organisation biologique capable de vie. Plusieurs organismes se composent que d'une seule cellule, les organismes **unicellulaires**. Les organismes supérieurs tels que les végétaux et les animaux se composent de plusieurs **cellules spécialisées** formant des tissus, organes et systèmes. L'**activité cellulaire** est au centre de tout ce que réalise un organisme.

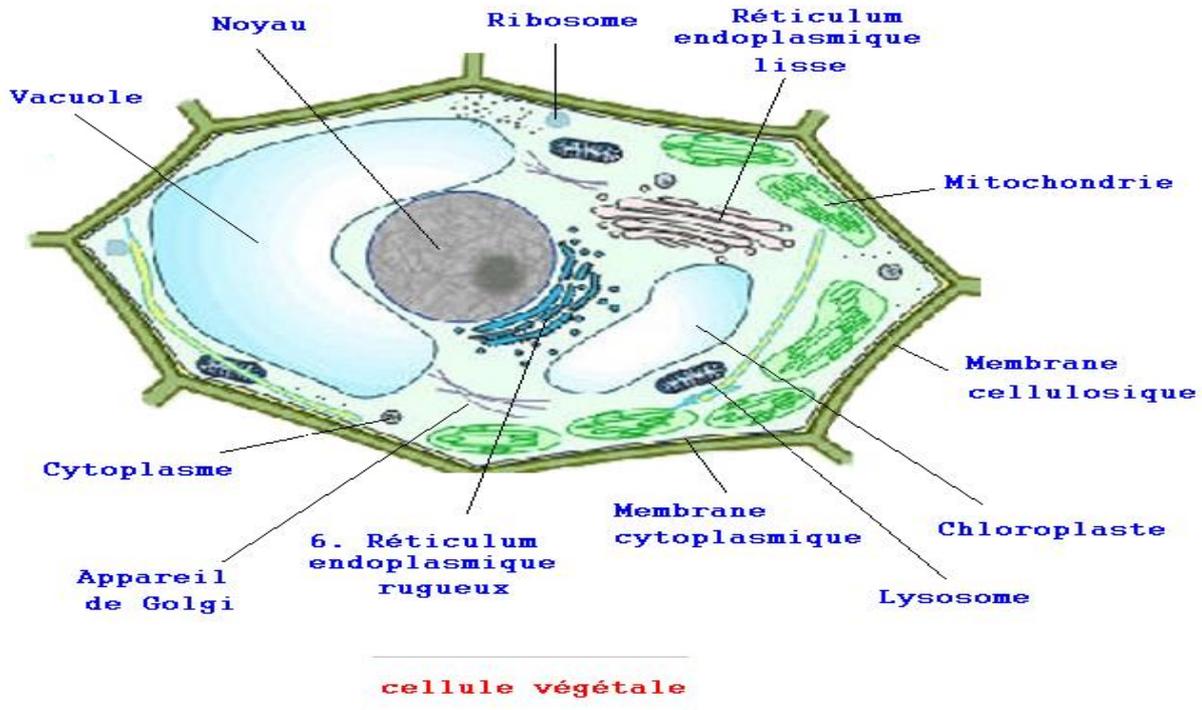


Figure 4 : Cellule végétale

Tableau 1 : comparaison entre cellule végétale, cellule animale et cellule de levure

	Cellule Animale	Cellule Végétale	Cellule de Levure
Noyau	Présent	Présent	Présent
Membrane	Présent	Présent	Présent
Cytoplasme	Présent	Présent	Présent
Réticulum	Présent	Présent	Présent
Appareil de Golgi	Présent	Présent	Présent
Mitochondrie	Présent	Présent	Présent
Petite Vésicule	Présent	Présent	Présent
Chloroplaste	Absent	Présent	Absent
Grande Vacuole	Absent	Présent	Présent
Paroi extra-cellulaire	Absent	Présent	Présent

2. Nutrition hydrique (mécanisme de l'absorption et le transit de l'eau)

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.

2.1. Sol et phénomène physique

2.1.1. L'eau dans le sol

Il est essentiel de faire la distinction entre la quantité 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. Cette rétention est d'autant plus faible que le sol est bien irrigué et donc que les ions sont plus dilués. Ces forces sont donc généralement faibles, voire négligeables.
- **Des forces matricielles**, qui sont générées par les éléments non solubles du sol, qui exercent sur l'eau des forces capillaires, ainsi que des forces d'imbibition.
 - **Des forces capillaires**, qui sont générées par la tension superficielle existant entre l'eau et les interstices laissés libres dans le sol.
 - **Des forces d'imbibition**, ou forces colloïdales, qui sont dues à la propriété des substances colloïdales à gonfler en présence d'eau. Ce sont des attractions électrostatiques entre les charges négatives des colloïdes du sol et les charges positives de l'eau. Ces forces sont d'autant plus grandes que le sol est riche en argile, ... Ces forces sont d'autant plus fortes que les particules sont petites.

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.

2.1.2. Phénomène physique

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 (du moins négatif au plus négatif), et donc de la zone retenant le moins l'eau (la plus hydratée), à la zone retenant le plus l'eau (la moins hydratée). Quand le sol se dessèche on observe donc une diminution du potentiel hydrique, devenant ainsi plus négatif. L'eau pure possède un potentiel hydrique de 0, mais dans le sol circule un soluté et pas uniquement de l'eau pure. Le potentiel hydrique peut être décomposé en potentiel osmotique et potentiel matriciel.

Le potentiel matriciel d'un sol est l'énergie qu'il faut appliquer au sol pour libérer 1g de soluté. Les forces osmotiques étant faibles, les deux potentiels ont presque la même valeur.

La succion correspond à une pression qui caractérise l'action attractive exercée par le sol sur l'eau. Afin de déterminer la succion on mesure la dépression minimale qui permet le départ de l'eau. Le potentiel hydrique est souvent assimilé à la succion car on observe une proportionnalité entre la valeur absolue du potentiel hydrique et la succion.

2.2. Absorption et transport de l'eau aux vaisseaux de xylème

2.2.1. Mécanismes directs de l'absorption

➤ L'osmose

L'osmose correspond à la diffusion d'eau à travers une membrane hémiperméable du milieu le moins concentré (hypotonique) vers le plus concentré (hypertonique).

De cette manière lorsque la cellule se situe dans une solution hypotonique, elle va se gorgée d'eau jusqu'à rétablir l'équilibre osmotique avec le milieu extracellulaire, on dit que la cellule devient turgescente.

Attention, grâce à leur paroi pecto-cellulosique, les cellules végétales n'éclatent pas dans une solution hypotonique (contrairement à la cellule animale).

Les mécanismes d'osmose sont donc déterminés par les pressions dites osmotiques s'exerçant de part et d'autre de la membrane semi-perméable. La pression osmotique s'exprime par la lettre Π , suit la loi de Van't Hoff et s'exprime en J/m³.

➤ La succion

La succion est liée à la différence de pression osmotique des vacuoles. La plante ne peut absorber l'eau que si la succion de ses racines est supérieure à celle du sol, autrement dit si le potentiel hydrique de la plante est inférieur à celui du sol.

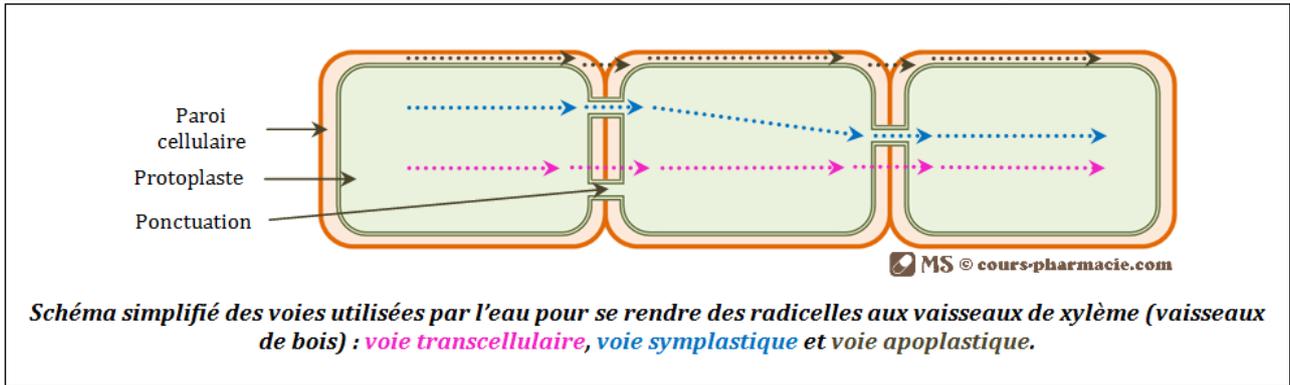
On observe une diminution du potentiel hydrique du sol vers le sommet de la plante. La circulation de l'eau dans la plante se fait ainsi dans la direction du potentiel hydrique le plus bas.

2.2.2. Transport de l'eau aux vaisseaux de xylème

L'eau est absorbée par les radicelles, qui correspondent aux plus petites racines au niveau desquelles on peut apercevoir des poils absorbants ; elle doit par la suite atteindre les vaisseaux de xylème, et pour se faire, elle peut utiliser différentes voies :

- La **voie apoplastique** correspond à la voie utilisant la paroi végétale.
- La **voie symplastique** correspond à la voie utilisant le cytoplasme de la cellule végétale (aussi appelé protoplaste), ainsi que les plasmodesmes, au niveau des ponctuations, pour passer d'un cytoplasme à un autre.
- La **voie transcellulaire**, correspond à la voie utilisant le cytoplasme dans la cellule végétale, mais qui traverse la paroi pour passer d'un cytoplasme à un autre.

Proche des vaisseaux de xylème (vaisseaux de bois), on observe des épaisissements subéreux en forme de cadre formant les **cadres de Caspary** qui empêche les transports par voie apoplasmique en obligeant la voie symplasmique. Cette caractéristique lui permet de jouer son rôle de filtre



2.3. La transpiration et l'équilibre hydrique

La transpiration joue un rôle indirect mais principal dans l'absorption d'eau par la plante, et ceci grâce au fait qu'elle est le moteur de la montée de sève. La transpiration se fait à deux niveaux :

➤ Dans de moindre mesure au niveau de la **cuticule** des feuilles ; qu'en milieu humide la cuticule présentait un réseau relativement lâche qui permettait une certaine perméabilité. La transpiration représente ici 5 à 10 % de la transpiration totale. On parle de **transpiration cuticulaire**. La majorité au niveau des **stomates** ; on parle de **transpiration stomatique**.

Un arbre peut transpirer jusqu'à 220 litres par heure. La transpiration des plantes est comparable à la transpiration qu'effectuerait 1/6 de la transpiration d'un plan d'eau de même taille.

2.3.1. Mécanismes d'ouverture des stomates

La transpiration stomatique varie suivant l'ouverture et à la fermeture des stomates, liées aux différences de pressions osmotiques dans les cellules de garde. Les cellules de garde (donc les stomates) s'ouvrent ou se ferment selon les forces osmotiques qui correspondent aux variations de la concentration de potassium intracellulaire. Par augmentation des concentrations potassiques il y a formation d'un milieu hypertonique qui entraîne une turgescence des cellules de gardes, et ainsi une ouverture des stomates.

Les cellules de garde ont des parois renforcées du côté interne qui délimite l'ostiole, et sont souvent accompagnées de cellules compagnes épidermiques, dépourvues de chloroplastes, avec lesquelles elles sont intimement en contact par leur face externe, permettant des échanges intercellulaire plus important.

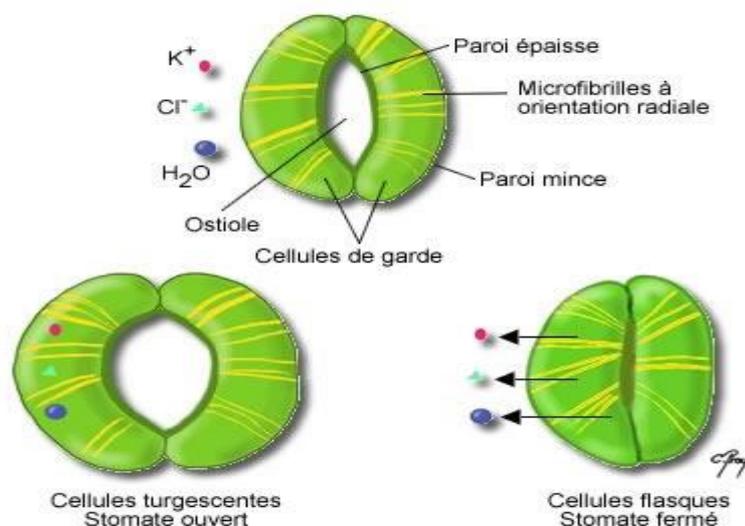


Figure 5 : Ouvertures et fermetures des stomates (Production Chantal PROULX)

2.3.2. Rôle de la transpiration dans la circulation de la sève brute

La sève brute est une solution très diluée de faible pression osmotique. La sève circule dans les vaisseaux de bois à une vitesse de 1 à 6 m/h, jusqu'à 100 m/h pour une transpiration maximale.

L'eau est transpirée par la feuille, d'autant plus que la demande climatique est élevée. Elle « coule » depuis le sol où elle est peu retenue (fort potentiel hydrique) vers les feuilles où elle est plus retenue (faible potentiel hydrique). Ce mouvement peut être décrit par une équation de transfert où le flux est d'autant plus fort que la différence de potentiel hydrique est grande, et que la résistance au transfert est faible.

De cette manière plus la plante transpire plus la succion sera efficace, et plus la plante absorbera de l'eau dans le sol. La plante utilise ainsi des phénomènes de variations de l'ouverture des stomates afin de faire varier la force d'absorption lorsque le sol ou l'air est trop sec. Mais ceci n'est vrai que jusqu'à un certain seuil au-delà duquel la plante sera à un stade de stress hydrique trop important, l'obligeant à fermer les stomates afin de se préserver.

2.3.3. Fermeture des stomates et poussée radiculaire

Chez une plante en déficit hydrique, les stomates sont partiellement fermés. Ceci diminue le flux d'eau, et donc la différence de potentiel hydrique entre le sol et les racines, diminuant la quantité d'eau qui sera absorbée par les racines. Cette fermeture stomatique est donc un processus adaptatif nécessaire à la survie de la plante. Elle a pour inconvénient de ralentir la photosynthèse et de causer l'échauffement de la feuille.

En absence de transpiration, on observe un phénomène appelé la poussée radiculaire, qui permet malgré la fermeture des stomates (par exemple pendant la nuit) d'avoir une absorption d'eau au niveau des racines. L'eau ne sera donc plus sous tension comme pour la transpiration, mais sous pression. Lors de ce phénomène, le potentiel hydrique est rétabli (diminution) par la sécrétion d'ions dans le xylème, permettant ainsi à l'eau d'y pénétrer par osmose à travers les cellules voisines.

2.3.4. Facteurs influençant la transpiration

➤ Facteurs structuraux

Au niveau de la plante la transpiration stomatique dépend de son anatomie, autrement dit de la surface d'évaporation. De cette manière on distingue ainsi différents facteurs structuraux :

- La **surface foliaire** correspond à la surface des feuilles de la plante. Les stomates étant présents au niveau des feuilles, sa réduction (chute des feuilles, feuilles réduites à des aiguilles, ...) permet une baisse de la transpiration.
- La **constitution foliaire**, en effet certaines espèces de plantes vivant en climat aride, présentent un collenchyme qui permet un épaississement de la feuille par de la cellulose ou une cuticule épaisse qui est imperméable au gaz permettant une protection contre les pertes d'eau.
- La **densité des stomates**.

➤ Facteurs externes

Les facteurs externes correspondent à l'environnement de la plante, les plus importants sont :

- La **nature du sol** : Un sol chargé en ion possède une pression osmotique plus élevée, ce qui nécessite une augmentation de la succion des plantes concernées et ainsi de la transpiration, l'extraction y

étant plus difficile. Au bout d'un certain seuil, lorsque la plante est soumise à un stress hydrique trop important les stomates se ferment diminuant la transpiration afin de se préserver.

- **L'humidité du sol** : Lorsque le sol s'assèche, la concentration en ion augmente, donc les forces osmotiques sont plus importantes, ce qui entraîne également une extraction plus difficile et une nécessité d'augmentation de la transpiration. De la même manière que précédemment, au bout d'un certain seuil, lorsque la plante est soumise à un stress hydrique trop important les stomates se ferment diminuant la transpiration afin de se préserver.
- **L'humidité de l'air** : L'humidité de l'air agit différemment suivant le seuil atteint. Il faut comprendre que les cellules épidermiques perdent leur eau plus facilement que les cellules stomatiques dont la paroi est plus épaisse. Ainsi, une **sécheresse modérée** provoque une diminution de la turgescence des cellules épidermiques sans modifier notablement celle des cellules stomatiques. La pression exercée par les cellules épidermiques sur les cellules stomatiques diminue et les ostioles ont tendance à s'ouvrir, **augmentant** ainsi la **transpiration**. Ce phénomène est intensifié par le fait que l'air sec exerce une succion importante sur l'eau de la plante. Si la sécheresse de l'air augmente au-dessus d'un certain **seuil**, au point d'entraîner l'évaporation de l'eau des cellules stomatiques, la diminution de leur turgescence tend à les accoler plus étroitement ce qui diminue le diamètre des ostioles et aboutit à une **diminution de la transpiration**.
- **L'agitation de l'air** : L'évaporation est favorisée par le renouvellement de l'air au voisinage des feuilles. Ainsi, l'augmentation de l'agitation de l'air entraîne tout d'abord l'ouverture des stomates. Cependant, si l'agitation dépasse un certain seuil, elle entraînera leur fermeture. Le vent a d'autant plus un pouvoir desséchant qu'il élimine la « couche limite » qui protège les feuilles.
- **La température** : La température agit également sur l'évaporation de l'eau cellulaire. En effet, son augmentation entraîne de la même manière une augmentation de l'ouverture des stomates et donc de la transpiration. De plus, lorsque la température dépasse un certain seuil (environ 30°C), elle provoque la fermeture des stomates et donc une diminution de la transpiration.
- **La luminosité** : La lumière entraîne, pour la majorité des plantes, l'ouverture des stomates et donc l'augmentation de la transpiration. Cependant, la sensibilité des plantes varie selon l'espèce. Contrairement aux facteurs précédents, la lumière n'a pas d'action sur l'évaporation de l'eau cellulaire mais sur le métabolisme des cellules stomatiques, en stimulant l'activité de leurs ATPases membranaires responsable de l'entrée d'ions K^+ contre la sortie d'ions H^+). Le K^+ s'accumule ainsi dans les vacuoles, permettant l'entrée d'eau dans les cellules de garde, l'augmentation de la pression de turgescence et donc l'ouverture des stomates.

3. Nutrition minérale

Pour assurer les différentes fonctions physiologiques chez la plante (croissance, reproduction, développement...) et la constitution de ses tissus, la plante sélectionne et prélève les éléments dont elle a besoin dans le milieu environnant : le carbone à partir du dioxyde de carbone atmosphérique, l'oxygène dans l'air et dans le sol et enfin l'eau et les autres éléments nutritifs qu'elle contient principalement à partir du sol.

La plante se nourrit de sels minéraux sous forme d'ions qui pénètrent dans les racines. L'acquisition des nutriments minéraux par les plantes est un processus très efficace. Par ailleurs, des symbioses formées entre des bactéries (*Rhizobium*) ou des champignons (mycorhizes) et les racines collaborent à l'acquisition de ces éléments minéraux. Plusieurs mécanismes moléculaires du transport ionique sont impliqués dans la nutrition minérale.

Les végétaux chlorophylliens tirent des composés minéraux obligatoires à leur bon fonctionnement dans les milieux environnant (sol, eau, air). L'absence ou la carence de l'un de ces éléments minéraux perturbent leur fonctionnement.

3.1. Les besoins alimentaires des végétaux chlorophylliens

La nutrition minérale des plantes est l'ensemble des mécanismes impliqués dans le prélèvement, le transport, le stockage et l'utilisation des ions minéraux et des gaz nécessaires au métabolisme et aux différentes fonctions physiologiques chez la plante (croissance, reproduction, développement...).

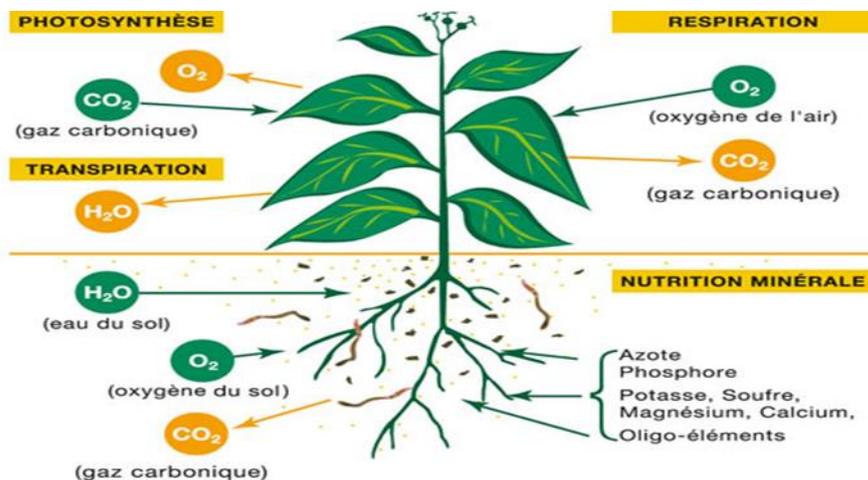


Fig 6 : Besoins nutritionnels des plantes

Tableau 3 : composition élémentaire moyenne d'une plante (en % MS)

9 macroéléments = éléments plastiques ou constitutifs	C	(% de la matière sèche)	4 éléments ≈ 90 – 95%
	O		
	H		
	N		
	K, P, Ca, Mg, S		
		0,5 % chacun	5 éléments inf. à 5%
≈ 60 microéléments = traces ou oligoéléments ou éléments dynamiques	Fe, Mn, Cu, Zn, Mo, Bo, Al, I, etc...		Inf. à 0,5%

90 à 95% de la matière sèche des plantes provient uniquement de 4 atomes : carbone, hydrogène, oxygène et azote fournis par les gaz O₂ et CO₂ et par l'eau. Si un élément est présent en plus grande quantité qu'un autre, c'est que la plante en a plus besoin.

Le besoin d'une culture correspond à la quantité de l'élément nutritif nécessaire et suffisante pour atteindre un objectif de production défini par le rendement et la qualité recherchée pour cette production (teneur en sucre, en huile ou en protéines).

3.2. L'origine des minéraux

Les ions sont en solution dans le sol, ils varient selon la nature et le pH du sol. Ils sont, soit à l'état fixé dans des solutions colloïdales (le complexe argilo-humique), dans le complexe anionique. La majorité des ions sont transformés par la plante pour pouvoir être utilisés. On trouve dans la plante des ions à faibles concentrations et à concentrations élevées. On observe, chez une plante, une sélectivité pour l'absorption des ions et pour le maintien de la concentration de ces ions.

3.3. Le rôle des éléments nutritifs

Les éléments peuvent avoir un rôle « plastique » quand ils rentrent directement dans la composition des composés organiques : c'est le cas de l'azote, du phosphore et du soufre. Ils peuvent rester essentiellement sous la forme minérale d'ion tel qu'ils ont été absorbés par les racines comme c'est le cas du potassium. Ils jouent enfin un rôle dans de très nombreuses réactions enzymatiques qu'ils catalysent.

- **Les macro-éléments** : Carbone, Oxygène, Azote, Phosphore, Soufre, Potassium, Calcium, Magnésium, forment les tissus et représentent 99% de la matière sèche. S'y ajoutent en quantité plus faible et très variable selon les espèces : le sodium, le chlore et le silicium.

L'azote est l'un des éléments majeurs pour la croissance des végétaux, sa carence ayant un très fort impact sur la réduction de la croissance. Il entre dans la constitution des acides aminés, des protéines, de la chlorophylle ainsi que dans l'ADN. Le phosphore participe dans la photosynthèse, la gestion de l'énergie métabolique (ATP) et entre dans la constitution d'enzymes ainsi que de nombreuses molécules. Il stimule la croissance et le développement des racines et des fruits. Le potassium intervient fortement dans le contrôle de la pression osmotique, la régulation stomatique, l'économie de l'eau, ainsi que dans les résistances au stress hydrique, au gel et aux maladies.

- **Les oligo-éléments** : Fer, Manganèse, Cuivre, Zinc, Bore, Molybdène, Cobalt, Nickel, sont actifs en très petites quantités dans l'activation de nombreux complexes enzymatiques.

Les oligo-éléments se trouvent au niveau des enzymes avec des variations distinctes selon les espèces. On trouve le soufre chez les crucifères, le potassium chez les algues, le silicium chez les graminées et les fougères. On trouve des variations selon les organes d'une plante. La graine est plus riche en phosphore pauvre en potassium que la plante. Les parties âgées sont plus riches en calcium alors que les parties jeunes sont riches en potassium, phosphore et azote.

Il est donc nécessaire d'entretenir la fertilité du sol en reconstituant ses réserves par des apports de matières fertilisantes adaptées. Ces apports dépendront de la richesse du sol et des besoins des plantes. L'examen de la phase solide du sol montre qu'il est constitué, en général, de particules d'argile associées à des composés organiques, l'humus, en formant des complexes argilo-humiques(CAH).

3.4. Modalités et mécanismes de l'absorption

Pour obtenir des plantes de qualité et résistantes aux maladies, il est important de connaître les modalités et les mécanismes de leur nutrition qui permettent de raisonner la fertilisation.

3.4.1. Modalités.

L'absorption des éléments minéraux se fait à partir de la solution du sol. Les éléments minéraux sont absorbés sous forme d'ions. Certains éléments comme le fer sont difficilement absorbables à pH élevé ; l'existence de certains complexes organométalliques, les chélates, permet de surmonter cette difficulté. L'absorption des éléments minéraux est sélective. La vitesse de franchissement se fait dans l'ordre suivant : les cations : $\text{NH}_4^+/\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ les anions : $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-/\text{H}_2\text{PO}_4^-/\text{SO}_4^{4-}$.

La vitesse des anions est inférieure à celle des cations. L'intensité de l'absorption dépend de : l'espèce, l'âge, le type de cellules, la composition minérale du milieu et l'état physiologique des cellules. Les ions circulent par voie symplastique (dans le cytoplasme) jusqu'au xylème puis ils passent dans la sève brute. Certains ions sont retenus au niveau des parois, comme le calcium, d'autres s'accumulent dans la vacuole puis sont excrétés. La vacuole est une réserve.

3.4.2. Mécanismes de l'absorption

L'absorption est sensible à la température et aux inhibiteurs métaboliques ; par exemple, une cellule morte n'absorbe pas. Ils existent plusieurs composantes dans le phénomène de transport des ions et des petites molécules. On trouve trois possibilités de pénétration : la diffusion, le transport passif (diffusion facilitée), le transport actif.

a\ La simple diffusion.

La membrane cellulaire permet à l'eau et aux molécules non polaires de pénétrer par simple diffusion mais aussi à quelques petites molécules polaires comme l'urée, le glycérol, le CO₂, peuvent pénétrer. Ce phénomène de diffusion est exprimé par la loi de Fick.

$(DQ/dT) = k.a.\Delta c$; **k** est le coefficient de diffusion, **a**, la surface de diffusion, **Δc**, la variation de concentration.

La diffusion tend vers un état d'équilibre pour que le gradient de concentration soit nul. Le transport de petites molécules se fait grâce à des protéines membranaires de deux types. On trouve des protéines porteuses et des canaux protéiques.

Le transport des molécules est réalisé par des canaux protéiques, par des protéines porteuses et par perméabilité membranaire. On trouve deux types de protéines porteuses, des protéines qui permettent un transport passif et des protéines qui réalisent ce transport grâce à de l'énergie : c'est un transport actif.

b\ Mécanisme actif.

Lapicque a mis en évidence le phénomène d'épictèse : c'est une absorption active des ions et des petites molécules.

Une cellule végétale dans une solution hypertonique, concentrée en saccharose est plasmolysée. Au bout d'un certain temps, la cellule redevient turgescente : la cellule rétablit son hypertonie en absorbant des ions (ou des petites molécules) contre le gradient du potentiel électrochimique. Ce phénomène explique qu'une cellule est capable de concentrer des ions. Ces déplacements nécessitent de l'énergie d'origine chimique, par exemple l'ATP, d'origine physique : le gradient ionique, due aux déplacements d'électrons. Cette énergie permet le fonctionnement des pompes ioniques donc le type le plus représenté est le type des pompes à protons. On trouve deux types de pompes :

- des pompes redox donc la circulation est réalisée grâce à des déplacements d'électrons. Ces pompes produisent de l'ATP.

- Des pompes de type ATPase : elles expulsent les protons au niveau de la membrane du plasmalemma ou du tonoplasme (transports actifs). Elles utilisent de l'énergie. Le transport des protons par ces ATPases est un transport actif primaire.

Cette émission de protons crée la «force motrice protonique », qui permet à son tour d'énergiser le déplacement d'autres espèces ioniques. On parle de transports actifs secondaires.

Ce transport actif secondaire se fait dans le sens opposé au gradient, en demandant donc de l'énergie.

S'il y a transport d'un seul soluté, on parle de système uniport.

Si deux solutés traversent dans le même sens, c'est un système symport.

Si les 2 solutés traversent dans un sens différent, c'est un transport antiport.

3.5. Rôles des ions dans la plante

3.5.1. Rôles physiques.

Les phosphates favorisent l'entrée du magnésium, alors que le calcium freine son entrée. Les ions permettent le maintien de la turgescence, du pH (système tampon), la création de potentiels membranaire qui agissent sur la perméabilité de la membrane.

3.5.2. Rôles physiologiques.

Les rôles constitutifs sont tenus par les éléments phosphorylés, comme les phospholipides, les composés phosphorylés, les nucléotides, et les acides nucléiques.

On trouve le soufre dans les acides aminés et dans les protéines.

On trouve le calcium dans les parois où ils forment avec les peptides, des pectates ; dans la vacuole il est sous forme de cristaux d'oxalate de calcium ; dans le cytoplasme.

On trouve le fer (Fe) au niveau des hèmes et des cytochromes.

Le calcium se trouve dans les chloroplastes (en formant les plastocyanines) et dans les mitochondries où ils forment les cytochromes oxydases.

On trouve du molybdène dans les nitrate-réductases et dans les nitrogénases.

Le phosphore est en importante quantité pendant la floraison et dans les graines.

Le potassium est impliqué dans le métabolisme des glucides.

Le calcium se trouve le plus souvent dans les lieux de stockage des produits toxiques (en général se sont les vacuoles).

3.6. Quelques particularités.

a\ Le calcium.

Face à la présence du calcium, on trouve deux types de plantes :

Les calcicoles, qui tolèrent (ou supportent) le calcium. Quand la concentration en calcium va augmenter, le pH va aussi augmenter (solution basique).

Les calcifuges, qui ne supportent pas le calcium. Leur concentration en Ca diminue en entraînant une diminution du pH (acidification).

Les plantes calcicoles peuvent modifier la composition de leur membrane pour limiter l'entrée de Ca.

b\ Le fer. Sur un sol basique, le fer ne peut pas être absorbé car il précipite.

c\ Le sodium.

On trouve des plantes halofuges (qui ne supportent pas le sel) et des plantes halophiles (les halophytes) qui supportent le sel. Ces halophytes poussent dans les eaux saumâtres ou près de la mer (des eaux salées). Soit, elles excluent le sel, soit, elles l'accumulent dans leurs vacuoles ou dans des glandes à sel. Ces plantes ont l'aspect de plantes grasses.

4. La photosynthèse

Dans la nature, on trouve le carbone sous deux formes assimilables :

- Le carbone minéral (CO_2 ou H_2CO_3).
- Le carbone organique qui se trouve dans les molécules organiques.

Et par conséquent, 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).

4.1. Définition

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 (ATP et pouvoir réducteur NADPH,H+) afin de réaliser la nutrition carbonée à partir du CO₂ atmosphérique, de (bi)carbonate, ... Ce processus est accompagné d'un dégagement de dioxygène. Ce phénomène se déroule chez les végétaux évolués et chez les algues bleues.

La nutrition carbonée des végétaux fait intervenir un ensemble de réactions métaboliques originales, que l'on ne retrouve que chez quelques bactéries : la **photosynthèse**.

La photosynthèse est certainement le phénomène métabolique le plus important dans le monde vivant. En effet, les végétaux chlorophylliens (verts) et certaines bactéries synthétisent leur propre matière organique à partir des substances minérales disponibles dans l'air (le dioxyde de carbone) et dans le sol (l'eau et les sels minéraux). Cette synthèse se réalise grâce à l'énergie lumineuse provenant du soleil (inépuisable) au niveau de structures spécialisées (les chloroplastes) contenant une machinerie complexe et des pigments, dont le plus connu est : la chlorophylle.

La photosynthèse fait intervenir des réactions directement dépendantes de la lumière et un ensemble complexe de réactions biochimiques. Les réactions réalisées au niveau du chloroplaste ont des répercussions sur la vie de la cellule chlorophyllienne, mais aussi indirectement sur l'ensemble des cellules de la plante et, d'une manière encore plus générale, sur l'équilibre de la biosphère.

Naturellement, les cellules des végétaux chlorophylliens utilisent également les autres voies métaboliques rencontrées chez les êtres hétérotrophes (exemple : la respiration).

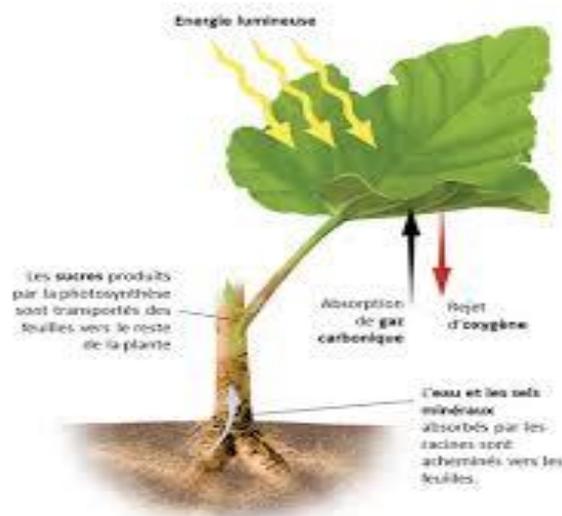
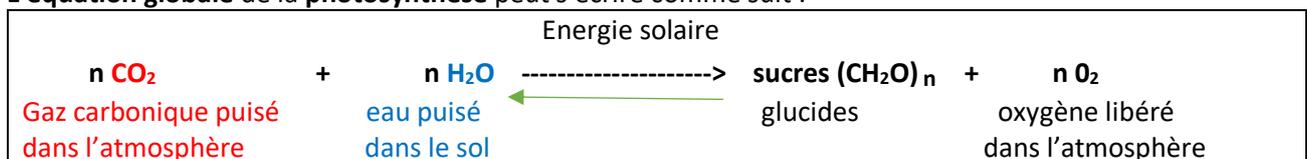


Figure 7 : Phénomène de la photosynthèse

L'équation globale de la **photosynthèse** peut s'écrire comme suit :



4.2. Les 2 phases de la photosynthèse

I) **La phase claire** qui est un ensemble de réactions photochimiques, qui dépendent de la lumière. Elle permet directement la transformation de l'énergie lumineuse (photons) en énergie chimique. Qu'on nomme aussi **phase photochimique** : elle se déroule dans les **thylakoïdes**. La lumière est captée sous forme de photons qui ont un potentiel énergétique selon leur longueur d'onde. C'est au **centre réactionnel** que l'énergie lumineuse sera convertie en énergie chimique.

II) **La phase sombre** correspond au cycle de Calvin qui se déroule dans le **stroma**, elle est entièrement enzymatique et indépendante de la lumière. Elle permet de changer du dioxyde de carbone et de l'eau en glucides. C'est la phase d'assimilation du gaz carbonique.

C'est la sève brute qui fournit aux cellules des feuilles l'eau nécessaire à la réaction **photosynthétique**. Cette sève brute monte depuis les **racines** jusqu'aux feuilles, à travers le xylème (vaisseaux conducteurs de la sève brute). Cette sève brute contient de l'eau et, sous forme dissoute, les minéraux et oligo-éléments captés dans le **sol** (azote, phosphore, potassium, magnésium, fer, etc.). Dans les feuilles, cette sève brute se charge en glucides (saccharose, mannitol...) produits par la photosynthèse : on l'appelle alors sève élaborée. Cette sève élaborée est redistribuée, via les vaisseaux du phloème, dans toute la plante pour permettre la synthèse et l'entretien des tissus végétaux, ainsi que leur fonctionnement.

C'est grâce à la photosynthèse que la plante produit sa propre matière : à partir des sucres ainsi synthétisés et des minéraux puisés dans le sol, elle va fabriquer tous les tissus qui la constituent. C'est pour cela que l'on dit des végétaux que ce sont des puits à carbone : ils captent du CO₂ dans l'air (où C=carbone), et le recyclent en bois, en feuilles, en tiges, c'est-à-dire en matière organique. Le carbone est ainsi momentanément stocké sous forme organique, avant de revenir, plus tard, à l'état minéral (décomposition des déchets végétaux dans le sol, bois que l'on brûle...).

4.3. Photosynthèse et chlorophylle

La photosynthèse est réalisée par tous les organismes photosynthétiques possédant de la **chlorophylle** : **plantes terrestres**, **algues**, et certaines **bactéries**. Chez les plantes, la photosynthèse a lieu la plupart du temps **dans les feuilles** (plus précisément, dans la partie interne des feuilles : le mésophile foliaire). Cependant, chez certaines plantes, la photosynthèse peut avoir lieu dans les tiges (ex : cactus...).

Les cellules du mésophile foliaire contiennent des **chloroplastes**, où se trouve la **chlorophylle**, un pigment qui donne aux feuilles leur couleur verte. C'est la chlorophylle qui permet la réaction photosynthétique. La photosynthèse est essentielle à l'échelle de la plante, puisqu'elle lui permet de vivre. Elle est également indispensable pour nous : **la photosynthèse permet en effet la vie sur Terre**, ni plus, ni moins ! C'est **grâce à l'activité photosynthétique que l'atmosphère de la terre s'est peu à peu enrichie en oxygène**, et elle est aussi le **seul moyen de créer de la matière organique à partir d'éléments minéraux**. Sans elle, pas de matière organique (donc pas de végétaux, pas d'animaux, pas de champignons... en un mot : pas de vie !). Sans photosynthèse, la Terre ne serait une planète morte...

Les forêts ne sont pas le principal "poumon vert" de la planète. **Les algues et le phytoplancton produisent globalement plus d'O₂ que les arbres**. Ce sont ainsi les mers et les océans qui sont le siège de l'activité photosynthétique la plus importante, induisant la plus forte émission d'oxygène, devant les forêts.