

# Structure et grandes fonctions métaboliques des plantes

## Interface sol racine : alimentation en eau et nutrition minérale

### A. Besoins de la plante en eau et en sels minéraux

Une plante compte beaucoup d'eau (17 fois plus que l'homme). Dans un organisme animal toute la circulation des liquides se fait dans un système fermé alors que dans les végétaux c'est un système ouvert. 99% de l'eau capturée par les racines est perdue par la transpiration. La cuticule permet de limiter la perte en eau des plantes C4 et des plantes CAM, il y a une adaptation au milieu.

#### 1. Importance de l'eau dans la plante

L'eau a un rôle crucial à deux niveaux :

- structural (80 à 90 % d'eau dans la cellule)
- métabolique (elle implique des réactions de synthèse de composés)

La vacuole est un compartiment très hydraté et occupe un grand volume, il y a plus de composés organiques (solutés). Le phénomène de turgescence permet en partie à la plante d'avoir un port érigé. C'est le moteur de la croissance : une cellule gagne en volume grâce à la forte turgescence exercée sur les parois qui présentent une certaine élasticité. C'est également le moteur de l'ascension des sels minéraux. Il y a des échanges gazeux entre la plante et l'environnement. L'absorption permet l'alimentation en eau et sels minéraux.

Au niveau d'une plante cultivée (p.41) : rendement du maïs en fonction de la quantité donnée en eau. Pendant quelques jours il y a une carence en eau. Il y a une relation directe entre la concentration en eau et le rendement. L'eau est souvent le facteur limitant de la croissance d'un végétal. La plante peut naturellement se trouver dans une situation limitante. Au niveau d'un écosystème on reporte la quantité d'eau en fonction de la quantité de matière apportée. Comme en système agricole, il y a proportionnalité entre la quantité d'eau et de matière.

#### 2. Les différents états hydriques et paramètres du bilan hydrique

##### a. Paramètres classiques et notion de potentiel hydrique

En fonction de la proportion d'eau absorbée et transpirée, un végétal peut passer d'un état de turgescence à un manque d'eau, le dessèchement.

#### **Structure de l'eau**

C'est une molécule électriquement neutre qui se comporte comme un dipôle. Il y a une accumulation de charges négatives au niveau de O et un déficit au niveau des H. Elle peut facilement créer des liaisons hydrogènes avec d'autres molécules présentant une disparité de charge (avec d'autres molécules d'eau par exemple). La molécule peut faire un maximum de 4 liaisons Hydrogène. Il existe 3 états : toutes les liaisons H sont établies (état cristallin, glace), aucune liaison H (gaz, vapeur) et quelques liaisons s'établissent (liquide). Dans l'eau liquide il y a toujours une cohésion par les liaisons H. Ceci reste vrai pour un rapport entre des molécules d'eau et des molécules qui se comportent comme un dipôle (molécule avec un groupe OH). L'eau interagit fortement avec des molécules fortement oxygénée (ex : la

cellulose qui forme la paroi). Les molécules sont cohésives les une avec les autres mais elles peuvent interagir avec les parois des vaisseaux, des trachéides par lesquelles elles se déplacent.

### *Humidité pondérale*

Cela représente la quantité d'eau en fonction de la quantité de matière fraîche.

### *Teneur en eau*

Quantité d'eau par quantité de matières fraîche \* 100 en %

### *Teneur en eau relative*

Quantité d'eau que contient le végétal par rapport à la quantité maximale qu'il peut contenir.

### *Déficit hydrique*

$DH = 1 - TR$  (TR = teneur relative), c'est la part d'eau qui manque pour être totalement hydraté.

### *Le potentiel hydrique (p.41) $\Psi$*

Cellule animale : dans un milieu isotonique le volume de la cellule est normal, dans un milieu hypertonique son volume diminue et dans un milieu hypotonique il augmente jusqu'à son éclatement. Les cellules animales ne supportent pas une augmentation de volume.

Cellules végétales : dans un milieu hypertonique, la cellule entre en plasmolyse, dans un milieu hypotonique le volume augmente. On montre le phénomène de turgescence mais également l'élasticité et la présence de la paroi. L'eau passe à travers la paroi. Les mouvements d'eau peuvent se faire dans un sens ou dans l'autre. Dans les molécules d'eau, il y a une énergie potentielle stockée permettant le déplacement. On parle de potentiel hydrique. Il permet de se rendre compte de la tendance de déplacement passif de l'eau. L'eau se déplace toujours dans le sens des potentiels hydriques décroissants, il y a donc une perte d'énergie. Plus l'eau sera sous pression, plus le potentiel hydrique sera important et plus l'eau sortira. Plus l'eau est sous tension, moins elle se déplacera et elle sera alors retenue dans le compartiment. La tension est une force qui s'oppose au déplacement de l'eau. On a une concentration en soluté, deux compartiments séparés par une membrane perméable à l'eau mais pas au soluté : le potentiel hydrique du compartiment 1 est plus important que celui du compartiment 2  $\rightarrow$  on aura donc des mouvements d'eau.

### *Composante osmotique*

Plus le compartiment est concentré en solutés, plus le potentiel hydrique est faible. On utilise un niveau de référence : l'eau pure où le potentiel hydrique est nul. Dans les compartiments où l'eau sert de solvant pour des solutés, le potentiel hydrique est négatif. La pression osmotique  $\pi$  est directement proportionnelle à la concentration en solutés dans le milieu.

$$\pi = RTC$$

Dans les conditions standards,  $\pi = 2,4 * C$

Formule page 43

Les cellules sont généralement en turgescence donc il y a une certaine pression P positive. Dans un végétal,  $\Psi$  toujours négatif et  $\pi$  très largement positif. Dans le sol, il y a des composés dissout donc  $\pi$  est positif et l'eau est sous tension, la pression P est donc négative et

$\Psi$  aussi. Pour que l'eau se déplace dans le sens des potentiels hydriques décroissants il faut donc que  $\Psi_c - \Psi_s < 0$ . Cela permet donc aux cellules d'absorber l'eau.

#### b. Etat hydriques de la cellule

(Diagramme de Hofler) Cette représentation met en relation le volume de la cellule et les trois paramètres ( $P$ ,  $\Psi$  et  $\pi$ ). On mesure les différents paramètres pour des cellules en turgescence placée dans des milieux où les osmolarité sont de plus en plus importantes lorsque le flux d'eau est en équilibre. Quand elle est en turgescence, elle arrive à la turgescence maximale c'est-à-dire où  $\Psi = 0 \rightarrow P = \pi$ . Le flux d'eau favorisé par  $\pi$  est contrebalancé par une pression exercée par la paroi. Les deux forces s'équilibrent et le volume de la cellule est maximal. Si on augmente la concentration en soluté, on s'éloigne de la turgescence maximale car la pression diminue et la pression osmotique augmente. Le potentiel hydrique diminue jusqu'à une valeur remarquable où il n'y a plus de pression ( $P=0$ ) exercée par le plasmalemma qui se décolle alors de la paroi. C'est la plasmolyse limite.

#### c. Eau sous tension

Dans le sol, l'eau est liée par capillarité aux particules du sol. Dans la plante, il s'agit de l'eau du xylème et la tension est exercée par évapotranspiration.

### 3. Besoins en éléments minéraux

Pour se développer la plante a besoin d'une alimentation minérale :  $\text{CO}_2$ , azote, composés du sol... Quand on analyse les végétaux, on y retrouve une grande variété d'atomes mais l'ensemble n'est pas indispensables (ex : les métaux lourds)

#### a. Eléments essentiels

Suivant les périodes, il y a environ 15 éléments essentiels classés selon les deux grandes vagues d'analyses :

1<sup>ère</sup> vague : C, H, O, N, P, K, Mg, Ca, S, Fe

2<sup>e</sup> vague : Mn, Zn, Cu, Cl, Mo, Bo

Ces composés sont toujours en concentration faible, il n'y a jamais plus de 5% de la matière sèche. Le reste correspond à de la matière organique.

Les éléments essentiels sont les éléments strictement nécessaires pour la croissance du végétal, c'est-à-dire qu'ils entrent dans la synthèse d'autres composés indispensables à la cellule (page 46). Il y a trois phases : une phase où la teneur en éléments essentiels est faible. Plus la teneur sera importante, plus la croissance sera importante. La croissance est donc limitée par la quantité d'éléments essentiels. La 2<sup>e</sup> zone correspond à celle où il n'y a plus de croissance bien que la teneur soit optimale pour le développement. La 3<sup>e</sup> zone correspond à la zone où l'élément en concentration trop importante devient toxique pour les cellules. Tous les composés ne sont pas présents dans les mêmes proportions car ils ne sont pas tous utiles dans les mêmes teneurs. Il existe deux catégories : les micro-éléments et les macroéléments. On réalise des analyses au niveau de jeunes plantes : les micro-éléments sont présents en faible concentration (pas plus de 100 mg/kg de matière fraîche) et à l'inverse les macro éléments sont présents en concentration plus importante. Ils sont essentiellement présents sous une

forme ionique. La concentration en éléments essentiels est plus importante dans la plante que dans le sol, il y a donc une accumulation dans la plante contre le gradient électrochimique.

### *b. Fonction des éléments essentiels*

Il y a deux groupes de fonctions : structure et fonctionnement des enzymes. Sur la base fonctionnelle, il y a quatre grands groupes :

- Constitution des molécules organiques
- Energie et intégrité de la structure
- Osmorégulation et cofacteur
- Réaction redox

### *c. Carences*

Les formes sont variées selon les composés impliqués. Il y a des phénomènes de chlorose (décoloration), nécrose, croissance retardée... Les effets des carences sont variables selon les composés, et leur mobilité.

Carence en Mg → chlorose dans les feuilles âgées car les jeunes feuilles mobilisent le Mg des feuilles âgées. Plus un composé est mobile et plus les effets de carence seront marqués et rapides. Pour prévoir, il faut analyser les sols et les cellules foliaires. Il existe une méthode unifactorielle qui consiste à utiliser un milieu où tous les composés sont en excès sauf un que l'on étudie. On fait varier la concentration de ce composé pour voir ses effets selon sa concentration et ainsi déterminer sa concentration optimale pour une croissance optimale. Ceci est relativement partiel car l'utilisation d'un composé dépend souvent des autres. Par exemple, N favorise les prélèvements de Ca par les plantes.

## *B. Le sol : réserve en eau et en minéraux*

### *1. Définition, classification et constitution*

#### *a. Définition*

Sol : partie superficielle de la roche mère au contact de l'atmosphère. Il est remanié par les êtres vivants. C'est un élément essentiel pour les réserves en eau et en minéraux nécessaires au développement de l'appareil racinaire.

#### *b. Organisation et classification des sols*

La première couche se distingue par sa composition et sa nature, elle est très superficielle, c'est la litière. (A<sub>0</sub>) Elle est formée par dépôt des éléments végétaux morts et elle est en permanente évolution. La couche A est celle où se développent les racines. C'est une couche plus sombre car elle contient une grande quantité de matière organique en décomposition. Elle présente une grande activité biologique (bactéries), chimique (décomposition). Elle comprend différentes fractions. L'humus est composé de matière organique en décomposition et conduit aux colloïdes organiques qui sont des particules de toute petite taille. Les molécules organiques sont dégradées et pour certaines elles peuvent fortement s'hydrater. Ce sont des molécules chargées qui interagissent avec les ions du milieu. L'humus interagit avec les colloïdes organiques et inorganiques. Comme colloïdes inorganiques il y a les argiles. On obtient des complexes argilo-humiques. La couche A est également appelée couche éluviale. La couche B est la couche illuviale. Elle est composée de matière organique qui s'écoule de la

couche A et qui s'accumule. C'est un horizon moins riche que le A et il est plus clair. Il contient les composés lessivés par la couche A : atome de Fer, roche mère en décomposition.

Il existe différents types de sols. Les sols calcaires sont les sols les plus facilement cultivés. Il existe différentes formes selon les régions et les climats :

- sol brun : marnes
- sol rouge
- plateau calcaire

Il existe des sols acides qui sont siliceux : zones forestières, latéritiques. Il y a des sols riches en humus : la tourbe, la toundra... La nature des sols dépend du climat.

**1<sup>er</sup> paramètre** : la texture du sol → granulométrie du sol. Graduation des particules de différentes tailles :

- cailloux : 2 cm
- graviers : 2 cm à 2 mm
- sables : 2 mm à 50  $\mu$ m
- limons : 50  $\mu$ m à 2  $\mu$ m
- argiles : < 2  $\mu$ m
- colloïdes : 0,1  $\mu$ m à 2  $\mu$ m

Les colloïdes peuvent être de deux types. Les minéraux proviennent de la dégradation de la roche mère, ils sont fortement hydrophiles et hydratables avec leur charge négative. Les colloïdes organiques sont des sous produits de lignine et de la dégradation de la cellulose, chargés négativement. Ils peuvent s'associer à travers des ponts salins (liaison ionique). Il existe trois grands types de sols.

-sol sableux : le sable est en proportion importante (au moins 45 %) et il y a de petites particules (argile, 35%).

- sol limoneux : 40% de limon, jusqu'à 40 % d'argile.

- sol argileux : les sols agricoles contiennent fréquemment une grande proportion d'argile.

**2<sup>e</sup> paramètre** : la structure. Il existe deux grands types de structure. Etat dispersé : système homogène où les particules sont libres les unes par rapport aux autres. Ce sont des sols pauvres en cations divalents. Ils sont pauvres du point de vue agricole. Etat floculé : système où les particules sont collées les unes aux autres avec un ciment. Cette structure augmente la granulométrie, espace où l'eau passe et l'oxygène. Ce sont les conditions favorables pour les plantes. Le chaulage permet d'augmenter l'oxygénation du sol.

**3<sup>e</sup> paramètre** : la porosité. Il y a plusieurs types. La porosité non capillaire : les espaces sont de taille importante. Il n'y a que de l'eau car lorsque le sol est saturé en eau, elle tombe par gravité. La porosité capillaire : on trouve de l'eau mais si le sol n'est pas totalement saturé. Il y a des zones de rétention de l'eau. Elle se retrouve dans les petits espaces. Plus les particules sont petites plus il y aura de la porosité capillaire. L'eau qu'on retrouve est essentiellement utilisée par la plante. Il y a également l'eau liée à la matrice, aux particules, c'est l'eau d'hygroscopicité, qui hydrate les molécules de sels. Cette eau n'est pas utilisée par la plante. On détermine les différentes phases du sol : solide, liquide et gazeux qui pourra temporairement remplacer l'eau.

Phase liquide : il y a un apport d'eau mais aussi de composés organiques. Plus le sol va s'assécher plus les forces de rétention d'eau seront difficiles à utiliser par la plante.

Phase gazeuse : elle est importante pour la plante notamment pour la respiration de la plante mais également pour les bactéries et les animaux du sol. Le CO<sub>2</sub> est important dans le sol.

## 2. Rétention d'eau et potentiel hydrique du sol

Dans un sol favorable à l'agriculture, 50 % du volume du sol est poreux. Si la moitié est utilisée par l'eau, les conditions seront favorables au développement des plantes. Quand le sol est saturé en eau, l'eau ruisselée pénètre dans le sol, retenue par la porosité capillaire. Plus la granulométrie est importante, plus vite la porosité non capillaire sera remplie d'eau. Un sol qui a une granulométrie argileuse, la porosité est capillaire et la percolation de l'eau sera moins rapide. Plus il y a de grosses molécules plus il y aura des porosités non capillaires mais la structure a également un rôle. Par exemple, l'argile qui contient peu de Mg<sup>2+</sup> et de Ca<sup>2+</sup> sera dans état dispersé et l'eau pourra passer.

### *Capacité de rétention d'eau*

C'est la teneur maximale qu'on pourra trouver dans un sol.

### *Capacité au champ*

Cela représente la quantité d'eau retenue dans le sol contre la gravité. Cela dépendant de la structure et de la texture du sol.

La plante utilisera l'eau des porosités non capillaires (faible proportion) et essentiellement l'eau retenue par les porosités capillaires. Si le sol s'assèche l'eau ne sera pas utilisable par la plante. Il existe plusieurs limites : la capacité de rétention, la capacité au champ l'eau retenue dans le sol par des particules mais non utilisée par la plante qui va alors flétrir.

*Le point de flétrissement permanent* correspond à une teneur en eau dans le sol qui n'assure plus les besoins de la plante (p.48). Exemple pour l'argile : le sol est saturé en eau ce qui représente 80 % de la masse du sol. Entre 50 et 40 % de l'eau est éliminée par la gravité. La capacité au champ est le reste de l'eau après la percolation. Il y a 42% d'eau. L'eau s'évapore. 20% de la teneur en eau conduit au PFP. Cela s'accompagne d'une diminution du potentiel hydrique. On atteint le PFP au moment où le potentiel hydrique atteint < -1,5 hPa. A ce moment l'eau ne sera plus absorbée par la racine. Dans le cas de l'argile la capacité de rétention est grande et donc elle nécessite beaucoup d'eau alors que pour le sable, il faut moins d'eau pour atteindre la capacité de rétention maximale. Pour les deux sols, pour un potentiel hydrique, on a différentes teneurs en eau. Les forces de rétentions dans ces sols sont différentes. Pour le PFP, il est de 10 % pour le sable et de 20 % pour l'argile. Les déplacements d'eau d'une part et la rétention de l'eau d'autre part sont différents. La proportion de l'eau liée aux particules est plus importante dans l'argile que dans le sable. Dans le sable, il vaut mieux mettre des petites quantités d'eau et fréquente alors que pour l'argile il vaut mieux une grande quantité d'eau et moins fréquente.

## 3. Disponibilité en sels minéraux

La seule source de minéraux est le sol. Les minéraux proviennent de deux sources : de la roches mère (les ions) et de la récupération à partir de matière organique. Seuls les minéraux en solutions seront prélevés. Les composés absorbés sont essentiellement ioniques : cations, anions. Les concentrations en ions sont faibles dans la structure du sol. En revanche on a des concentrations élevées fixés sur des particules du sol. Il y a un facteur 10 entre les particules en solution et celle dans le sol. C'est essentiellement sur les colloïdes ou les particules

associées aux colloïdes. Les cations s'associent par complémentarité des charges avec les colloïdes et forment ces complexes, il se forme des précipités (précipité avec des métaux). C'est le cas pour le phosphore. Le nitrate est retenu par le sol quand il pleut. Plus le composé est concentré plus il sera fixé. Il y a une capacité d'échange (p.48). C'est un équilibre, au fur et à mesure de la réorganisation du sol, l'équilibre se réorganise. S'il y a des protons dans le sol, il y aura une libération de cations présents à la surface des complexes. Le pH est important pour la libération et le maintien des complexes. Il y a une base mécanique qui se produit au niveau de la racine. Dans le sol, la concentration en CO<sub>2</sub> qui passe en solution est importante, il s'établit un équilibre entre HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et H<sup>+</sup>



Il y a une modification du sol autour de la racine. La capacité d'échange des cations est la capacité à capter des ions selon le type de sol. Le sol est riche en minéraux si c'est un sol argileux. Dans un sol de même type mais avec des argiles différentes, il y a aura des capacités différentes. Ceci dépend de l'âge de formation. Plus le sol est vieux moins il y a de particules. Le pH a une influence : l'acidification du sol par la racine permet la libération en ion. Le pH influe sur la disponibilité en ions. Une plante supporte de faible variation de pH et en condition extrême les ions sont difficilement assimilables. Par exemple pour les sols alcalins, l'ensemble des ions est sous forme de précipité et les ions comme le fer et le zinc sont en très faibles proportions et peu assimilables par les plantes. Il existe des milieux synthétiques qui sont en fait une solution nutritive. La concentration en ion est largement plus faible que dans le sol. Il y a une dynamique du sol. (cf. schéma de la disponibilité en ion). L'activité ionique va modifier la quantité disponible au niveau du sol. Plus on se rapproche de la surface racinaire plus la quantité en ions devient faible. Il y a un appauvrissement du sol, c'est une zone de déplétion. Les minéraux sont peu mobiles dans le sol et sont essentiellement fixés sur des colloïdes. La croissance de la racine conduit localement à une situation de carence. Pour son alimentation la plante doit donc étendre son système racinaire par multiplication et élongation afin de prélever les minéraux dans les zones où les ions ne sont pas absents. Il y a donc une modification permanente du sol.

#### 4. Absorption racinaire et transport dans les racines

Il y a un contact étroit entre le sol et les racines (document page 53), cependant seul une partie de la racine est capable d'absorber l'eau et les ions, c'est l'assise pilifère où se situent les poils absorbants. C'est une zone proche de l'apex racinaire qui représente 60 % de la surface totale de la racine. Dans le sol, il y a des déplacements d'eau par des déplacements de matière. Dans la racine, il y a un déplacement de cellule à cellule en suivant 3 voies possibles. Il y a la voie apoplastique où les ions et l'eau se déplacent dans l'espace de la paroi. Il y a la voie symplastique où l'eau et les ions pénètrent dans la cellule et se déplacent par les plasmodesmes. Enfin l'eau et les ions peuvent se déplacer à travers la membrane plasmique (ce déplacement est le moins utilisé). Une fois arrivés à l'endoderme, il y a une sélection entre les ions. Dans cet endroit, les molécules ne peuvent que passer par la membrane plasmique qui permet de faire une sélection. Puis une fois l'endoderme passé, les 3 voies de déplacements peuvent être de nouveau empruntées jusqu'à être chargées dans le xylème. Le potentiel hydrique du xylème est lié à l'eau sous tension qui est elle-même liée à l'ouverture stomatique (Cf. le schéma des variations du potentiel hydrique). Les déplacements d'eau sont des déplacements passifs. Pour passer de la plasmolyse à la turgescence, il y a une entrée d'eau dans la cellule grâce à la pression osmotique, qui est essentielle pour les déplacements de l'eau.

## C. Mécanisme de transport des ions dans la cellule

### 1. Potentiel électrochimique et diffusion

#### a. Définition

Le potentiel électrochimique est quasi ment égale au potentiel hydrique mais il est appliqué à des molécules ioniques et permet ou non le déplacement. C'est l'énergie d'une molécule quand elle est en solution dans un solvant. Il est noté  $\mu$  et s'exprime en J/mol.

#### b. Distribution des ions entre la cellule et le milieu

Une molécule peut se déplacer tant que potentiel électrochimique dans le compartiment d'arrivée est inférieur à celui du compartiment d'où elle part. Donc la variation de potentiel est négative. Il existe une série de paramètres qui régissent la valeur de ce potentiel : il y a un paramètre de concentration, de charge, de pression et de gravité. La gravité et la pression peuvent être négligés donc il ne reste que la concentration et la charge.

$$\mu = RT \ln \Delta[C] + zF\Delta E$$

(p.50) Dans un compartiment séparé par une membrane on a mis du KCl. La membrane est perméable aux K. Le 2<sup>e</sup> compartiment contient de l'eau. Avant tout mouvement,  $[K]=0$ . Dans l'eau pure il n'y a aucune charge, le potentiel hydrique est nul. Le potentiel chimique est nul. Quand il y a des déplacements, le K va du compartiment le plus chargé vers celui qui l'est moins donc sa concentration diminue et elle augmente dans le second compartiment. Il y a donc des variations du potentiel électrique. Il se crée un potentiel de membrane. Quand on atteint l'équilibre, il n'y a plus de mouvement de K et  $\Delta\mu = 0$ . C'est l'équilibre de Nernst et le potentiel de Nernst est souvent égal au potentiel de membrane.

Une molécule ionique se déplace grâce à la différence de potentiel. Pour des composés non chargés, c'est possible grâce aux différences de concentration.

Système expérimental : on utilise des racines séparées de la partie aérienne (p.49) et on suit le K radioactif. Préalablement la racine est carencée en K. On observe les différentes phases d'accumulation du K. Il y a d'abord une augmentation très rapide, c'est la phase d'installation. Le K s'accumule dans l'apoplasme sans pénétrer dans les cellules. Ce phénomène est rapide et passif. Vient ensuite une phase linéaire : c'est la phase pré stationnaire, le K de l'apoplasme entre dans les cellule et s'accumule dans les cellules. C'est un phénomène actif qui dépend de la structure de la membrane. En phase stationnaire il n'y a pas d'accumulation, il y a un équilibre, autant de K entre et sort. L'équilibre est atteint par le phénomène actif et passif. La cellule maintient la variation de potentiel entre l'intérieur et l'extérieur. On réalise la première expérience jusqu'à atteindre l'état stationnaire et on mesure la teneur en K. On réalise la même expérience avec les autres ions et ainsi on peut comparer la valeur réelle avec la valeur calculée par l'équation de Nernst. Le potentiel de membrane est d'environ  $-110$  mV. Il y a différents cas. Si la concentration calculée est identique à celle mesurée, le passage est passif. C'est le cas des ions K donc leur déplacement est passif. Il y a une ségrégation quasiment parfaite entre les anions et les cations. Pour les cations, la concentration mesurée est inférieure à celle calculée, le transport est actif et conduit à excréter les cations contre le gradient électrochimique. Le phénomène est inverse pour les anions.

#### c. Potentiel de membrane

Le potentiel de membrane est plus élevé que dans les cellules animales. On réalise un traitement par un inhibiteur métabolique (document p.50) le cyanure. Il y a une diminution de moitié du potentiel de membrane qui dépend de deux valeurs dont une est inhibée par le cyanure. Elle est active et directement reliée au métabolisme. La seconde composante est résiduelle même en absence d'activité métabolique. La valeur de  $-50$  mV correspond à de la diffusion passive.

## 2. Transport des ions

### a. Transport passif

La diffusion membranaire est limitée car les composés sont souvent lipophiles et chargés. La diffusion facilitée est réalisée par des canaux. Au niveau du plasmalemme se trouve le canal Ca. (p.52) La diffusion peut se faire par des transporteurs. La capacité de transport est alors inférieure à celle réalisée par les canaux car les transporteurs sont saturables. Ce transport est réalisé pour des composés dont la concentration est inférieure à ce qu'elle devrait être dans les cellules.

### b. Transport actif

Il consomme de l'énergie. Les transports actifs primaires utilisent directement l'énergie d'hydrolyse de l'ATP et celle des pyrophosphates (PPi). Ces transports sont réalisés par des pompes ioniques (pompes ATPase Na/K). Les transports actifs secondaires utilisent les gradients de concentration mis en place par les transports primaires et transportent une 2<sup>e</sup> molécule. La création d'un gradient de proton (force proton motrice) crée un système de cotransport. Ce sont des transports contre le gradient de concentration.

## 3. Transport actif primaire

### a. ATPase de type P

(p.51) Elle est utilisée pour le transport de protons ou de calcium chez les végétaux. Il s'établit un gradient de proton entre l'extérieur et l'intérieur de la cellule. Les protons sont expulsés. Ce gradient est utilisé pour un cotransport. La pompe maintient la concentration cellulaire en calcium stable mais faible car le calcium est un messager. Chez la plupart des êtres vivants, il s'agit de la pompe à proton plasmalemmique. Elle est également présente au niveau des RE. C'est une ATPase de type P car son fonctionnement requiert une phosphorylation. C'est une pompe monomérique avec 10 segments transmembranaires et extra membranaire. Elle est composée d'environ 950 acides aminés pour un poids moléculaire de 100 kDa. Les extrémités N et C terminales sont dans le cytoplasme. Le site de fixation à l'ATP se trouve au niveau de la 4<sup>e</sup> boucle dans le cytosol, environ au centre de la molécule. Le motif protéique est constant chez les ATPase : il y a fixation de l'ATP au niveau d'un aspartate intégré dans un motif DKTGT. L'ATP est hydrolysé et le Pi se fixe sur l'aspartate. La pompe est alors phosphorylée et prend en charge les protons dans le cytoplasme pour les transférer dans l'apoplasme. Pour transporter un proton il faut un ATP, c'est un système très consommateur. L'inhibiteur de la pompe est le vanadate. Il joue le rôle d'un analogue de l'ATP et bloque la pompe. Il y a une phosphorylation de régulation au niveau de C-Terminal qui implique une sérine. L'ATPase phosphorylé peut fixer une protéine régulatrice et changer de conformation. Le canal est alors libéré et permet le passage des protons. Si l'extrémité C terminale n'est pas phosphorylée, elle bloque le passage. Il y a une forte régulation au moment de la croissance : l'acidification de l'apoplasme permet une augmentation de volume.

### b. ATPase de type V

Elles se situent sur la membrane vacuolaire et présentent une structure multimérique. Il y a un déplacement de proton contre le gradient électrochimique.

### c. Autres transports actifs primaires

Système ABC (ATP binding cassette) possède un site de fixation à ATP qui l'hydrolyse et utilise l'énergie pour transporter une variété de produits. Ils varient selon la localisation et l'espèce. C'est une famille multigénique. Ce système de transport est monomérique. Il y a par exemple transport et accumulation des anthocyanes dans la vacuole. Le système de pyrophosphates utilise une liaison énergétique et une liaison du PPI. L'énergie du clivage est utilisée pour générer un gradient de proton.

## 4. Transport actif secondaire

Ce système de transport utilise l'énergie générée par les transports actifs primaires. Il utilise un gradient de proton pour transporter une seconde molécule en même temps que le proton ainsi le gradient de proton disparaît. Il existe deux grandes familles : les transports symport qui transportent la molécule dans le même sens et les transports antiports qui transportent dans le sens opposé. En terme énergétique  $\Delta\mu (H^+) < 0$  entre le compartiment extra et intracellulaire. Les protons vont entrer dans la cellule et libérer de l'énergie.  $\Delta\mu$  (saccharose)  $> 0$  naturellement il ne peut pas sortir de la cellule. La somme des 2 est  $< 0$  donc l'énergie des protons donne suffisamment d'énergie pour transporter le saccharose hors de la cellule. Les forces proton motrices sont essentielles à la cellule.

## D. Nutrition minérale et symbiose mycorhizienne

### 1. Généralité

La rétention des ions dans les particules des sols est très variable. Dans le sol, la diffusion des minéraux est très faible. Le stock d'ions autour de la racine ne se refait pas seul. En effet la plante se trouve souvent en carence. Le mycorhize est un système de symbiose entre le système racinaire et des champignons. Ce système n'est pas obligatoire. La plante va très largement augmenter sa capacité de prospection. La prospection phagique est 1000 fois plus importante que celle de la plante et permet de trouver des sources de minéraux plus importantes. On considère que 80 % des plantes réalisent cette symbiose (p.54)

### 2. Les différents types de mycorhizes

Le type le plus ancien est l'endomycorhize. Une partie du mycélium du champignon se développe dans la plante et prend alors une forme particulière, un arbuscule, et sert de zone d'échange favorisée entre la plante et le champignon. Le champignon ne se développe pas s'il n'est pas en interaction avec la plante. Seul les Glomales sont concernés : ce sont des champignons primitifs dont on ne connaît pas de stade sexuel. Il existe des structures de réserves, ce sont des vésicules pour les champignons dans les plantes.

Il y a les endomycorhize à peloton. Le mycélium dans les plantes ne se développe plus, il y a remplissage complet de la cellule. Ce système se retrouve chez les orchidées et les éricacées.

Il existe aussi les ectomycorhizes. Les cellules mycéliennes ne se développent jamais dans les cellules de la racine. Evolutivement, c'est le type le plus récent. Il y a une prolifération des micelles à l'extérieur et une couche donne le manteau. Entre les cellules du rhizoderme et du cortex il y a une zone d'échange entre la racine et le champignon. Il y a une modification de la croissance et de la morphologie de la racine. Quand la racine est affectée par le champignon, la croissance s'arrête et les poils absorbants disparaissent. Ce sont désormais les mycéliums qui jouent le rôle d'absorption.

### 3. Mise en place et fonction

Les champignons se trouvent dans le sol sous forme de spores. La germination donne des mycéliums. Il y a une première phase d'infection et les deux organismes échangent des signaux pour favoriser la croissance des mycéliums par la racine grâce aux flavonoïdes. Le mycélium entre en contact avec la racine, il s'attache et se développe. Il se forme alors un réseau de Hartig. Le mycélium forme un appressorium (ventouse) qui l'accroche à l'endroit où il pourra pénétrer. Sous l'appressorium, il se forme un fin mycélium qui entre dans les cellules de la racine après s'être ramifié.

C'est toujours la plante qui guide le contrôle car cela doit être un avantage pour elle. Le fait de développer des interactions mycorhiziennes permet une croissance plus importante. En effet l'interaction permet l'augmentation de l'absorption des composés dans la plante. Le phosphate est le composé le plus important mais aussi difficile à récupérer donc l'interaction permet d'améliorer l'absorption. En terme de transport, il y a un système de transport de composés du mycélium vers les cellules de la racine. La plante fournit des composés carbonés au champignon. 20% des produits carbonés fabriqués par la plante sont utilisés par le champignon.