

Structure et grandes fonctions métaboliques des plantes

Introduction

A. Importance des végétaux pour la vie sur Terre

1. La lignée verte

La Terre s'est formée il y a 4,5 milliards d'années et les premiers organismes végétaux photosynthétiques sont apparus il y a 3 milliards d'années. C'est une révolution de vie sur Terre car ils sont à l'origine de la production du O₂ qui a ainsi permis l'apparition d'organismes dépendant de la respiration. Cette augmentation de O₂ dans l'atmosphère a permis de créer la couche d'ozone qui protège les organismes des rayonnements UV → survie des organismes.

Arbre phylo

Lignée verte : tous les organismes sont photosynthétiques, pluri ou uni cellulaires. Cette lignée monophylétique s'organise autour de grandes modifications de l'organisme → apparition de caractères très marqués.

Embryophyte : formation d'embryon

Trachéophyte : système de conduction au sein d'organisme

Angiosperme : formation de graine enfouie dans les fruits. Il y a environ 2500 espèces, on distingue les mono et les di-cotylédons. Ce sont les végétaux les plus évolués.

2. Végétaux, producteurs primaires

Tous les organismes sont constitués de molécules organiques et chaque organisme n'a que 2 façons de pouvoir les fabriquer : à partir de composé inorganique → autotrophie, ou à partir de vieille matière organique → hétérotrophie. Tous les végétaux et la lignée verte sont autotrophes pour le carbone et forment de la matière organique grâce à la photosynthèse.

Dans un écosystème, on distingue les 2 et cela différencie les rapports qu'ils ont avec leur environnement. On peut parler d'autotrophie et hétérotrophie pour un C. Les C des feuilles sont autotrophes alors que celles des racines sont hétérotrophes. Tous ceci s'insère dans un cycle de la matière.

Les végétaux utilisent le CO₂ et les minéraux pour synthétiser la matière organique. Ils sont le point d'entrée de la matière inorganique dans le cycle. Ces végétaux sont alors consommés par les consommateurs primaires qui peuvent être totalement ou partiellement hétérotrophes. Ce sont donc des herbivores qui seront à leur tour consommés par les consommateurs secondaires. Enfin, les décomposeurs se nourrissent de la matière morte et restituent la matière inorganique. Les végétaux ont donc un rôle clef car ils sont le lien entre les molécules inertes, les êtres vivants incapables de synthétiser leur matière organique mais qui la consomment. La consommation constante de CO₂ par les végétaux permet de maintenir un taux pas trop élevé.

B. Importance économique

L'homme utilise les végétaux depuis 11 000 ans. Cette utilisation est d'abord apparue dans le croissant fertile. Puis il y a eu domestication des espèces végétales : orge, palmier dattier... Les espèces cultivées peuvent être classées en 2 groupes : céréales et légumineuses. Les

végétaux sont une source majeure de nutrition pour l'homme car cela représente 70% des protéines.

1. Production directe

Ce sont les graines, les fruits, les espèces aromatiques, les espèces végétales non transformées. 11% des terres de la planète sont des terres cultivées, cela constitue un agro système. Il existe différentes cultures : les céréales, les plantes sarclées (betterave, pomme de terre), oléoprotéagineux (plante donnant un important apport en huile, lipide, protide), fourrage pour le bétail, fruit, vignes, fleurs. Malgré cette diversité, la production essentielle se résout à peu car 14 espèces sont des espèces phares et représente 80% de la production mondiale.

1^{er} groupe : 6 espèces qui apportent 80% des calories nécessaires
Blé, riz, manioc, maïs, pomme de terre, patate douce

2^e groupe : apport d'un complément alimentaire, d'une diversité alimentaire
Cannes à sucre, betterave à sucre, soja, haricot, orge, sorgho, banane et cocotier

Les fruits apportent les vitamines. Il y a également les productions d'épice, les condiments (partie feuillée, ex : le persil), le thé et le café qui sont consommés pour leur goût. Ils apportent la caféine qui est un stimulant. Selon les zones géographiques, il existe une grande diversité et variabilité.

2. Autre production

Beaucoup de produits dérivés des productions directes --> ce qui provient des jus de fruit compose les épaississants, les gélifiants... Industrie pharmaceutique : présence de molécules à activité pharmacologique. Alcaloïde : morphine, cocaïne, nicotine. Terpénoïde : latex, huile essentielle... Phénol : flavonoïde (colorant), lignine (2^e composé le plus abondant). 2 grandes sources utilisées quotidiennement : le bois et le papier, textile.

3. Agriculture durable

La production a été développée selon 2 concepts : la matière première est disponible à l'infini et à coût modeste, aucune préoccupation sur l'impact environnemental. Aujourd'hui cela n'est plus possible. Les accords de Kyoto jettent les bases d'une nouvelle agriculture. Certains paramètres sont à prendre en considération : la population, le remodelage climatique, raréfaction des ressources, augmentation de la température, déforestation, réduction des surfaces végétales. On quitte l'ancienne agriculture pour une plus raisonnée. Pour optimiser les apports il faut chercher à comprendre le fonctionnement des plantes.

C. Objectif du cours

Comment une plante est-elle construite de la cellule à l'ensemble du végétal ? Comment les cellules s'agencent pour former des tissus puis des organes ? Il faut mettre en mouvement les structures et les processus biologiques. Il s'agit d'étudier les différentes fonctions assurées par les végétaux : photosynthèse, absorption de l'eau, des sels minéraux, conduction des sèves pour réguler les flux.

Un végétal est constitué de 2 parties : une partie aérienne visible comprenant différents organes : tige où s'insèrent les feuilles (présence tout au long de la vie), les fleurs et fruits (présences ponctuelles) Les feuilles assurent la photosynthèse. Une partie souterraine : le système racinaire constitué d'une ou plusieurs racines. Les 2 parties ne sont pas isolées car il y a un système de conduction. Il existe un transfert qui va de la racine vers les parties aériennes et un autre qui va des parties aériennes vers toutes les autres zones. Cette relation définit un continuum entre l'atmosphère, la partie aérienne, les racines et le sol.

La fonction photosynthétique : c'est un processus qui utilise l'énergie lumineuse pour la convertir en énergie chimique qui fixe le CO₂ et permet ainsi de synthétiser des produits carbonés. Elle est assurée par les feuilles et par les tiges pour certaines espèces telle que les asperges.

La fonction d'absorption : elle est assurée par le système racinaire.

Les fonctions sont connectées grâce à la circulation des sèves. Les ions sont absorbés et véhiculés par l'eau et redistribués dans l'ensemble du végétal par la sève brute qui circule dans le xylème. Cela constitue un système ascendant. Il existe un système descendant : le phloème véhicule la sève élaborée qui contient les produits issus de la photosynthèse.

La transpiration assure cette conduction et est réalisée par les stomates au niveau des feuilles. Il s'agit d'éliminer une partie de l'eau contenue dans le végétal.

Un végétal croît tout au long de sa vie en taille, en épaisseur et donc de nouveaux organes se forment continuellement. La multiplication cellulaire est réalisée de façon localisée sur des territoires donnés appelés méristèmes. Les méristèmes primaires sont mis en place dès les premières étapes du développement et se trouvent aux apex des organes. Ils sont responsables de la croissance en longueur et de l'émergence de nouveaux organes (tige, feuille, racine). Les méristèmes secondaires sont responsables de la croissance en épaisseur et apparaissent plus tardivement. Ils ne sont pas forcément présents chez toutes les espèces. Les monocotylédones n'en possèdent pas, ce qui limite donc leur croissance (ce sont plutôt des plantes herbacées que buissonnantes)

Le système de conduction est un point déterminant dans la conquête du milieu terrestre. De même que l'apparition de la reproduction dans un système protégé (les fruits)

Spécificité structurale et fonctionnelle des C végétales

A. Rappel sur l'organisation d'une C

1. Généralité

La C est l'entité la plus simple. C'est un lieu autonome avec de nombreuses actions métaboliques. Elle peut générer d'autres C par division. Elle est le siège de l'information génétique transmise de génération en génération. Quand un organisme est réduit à une seule C (unicellulaire), elle assure toutes les fonctions. En revanche quand il s'agit d'un organisme pluricellulaire, les différentes fonctions sont assurées par les tissus, constitués de C différenciées. Il existe donc 2 types cellulaires : les C méristématiques (ou C indifférenciées) et les C différenciées. Quand une C se différencie, elle peut sous certaines conditions se dédifférencier pour acquérir une nouvelle fonction. Cependant toutes les C n'ont pas cette capacité.

2. C animale contre C végétale

La C végétale, tout comme la C animale est eucaryote et présente un noyau contenant l'information génétique qui est entouré par une membrane nucléaire. Le cytosol contient de nombreux éléments délimités par une membrane plasmique. La C végétale contient des éléments qui lui sont propres. La membrane plasmique est accolée à une paroi qui délimite la C et lui donne sa forme. Celle-ci n'est pas continue puisqu'elle est interrompue par des plasmodesmes permettant ainsi des échanges et donc une connexion entre 2 C jointives. De plus elle possède une vacuole aux fonctions variées et bordée par ce que l'on appelle le tonoplaste. Enfin la C présente des plastes aux structures et fonctions variées. Le chloroplaste, par exemple, est le siège des réactions photosynthétiques.

3. Comparaison entre les C méristématiques et les C différenciées

La première constatation que l'on peut faire est que leur taille est bien différente : en effet la C méristématique fait environ 10 μm de long et est de forme quasiment cubique, alors que la C différenciée est bien plus grande et avec une forme non définie. Le noyau de la C méristématique occupe une grande partie du volume – le rapport nucléo-plasmique est très élevé. De plus ses vacuoles sont petites mais très nombreuses alors qu'au cours de la différenciation, toutes les vacuoles se soudent pour donner une structure beaucoup plus imposante. Les plastes des C méristématiques ne sont pas encore différenciés, c'est-à-dire que leur fonction n'est pas encore bien définie, on les nomme ainsi des proplastides. Les ribosomes sont très nombreux et la paroi est de faible épaisseur alors qu'elle l'est beaucoup plus dans une C différenciée.

B. Caractéristique des C végétales

1. La paroi

a. Généralité

La paroi est une structure rigide qui donne la forme à la C. Elle peut être de différente composition selon les espèces. Nous étudierons celle des Angiospermes. Son rôle est important car elle assure un bon port à la plante. Si nous prenons l'exemple des plantes aquatiques qui ne sont pas soumises à la gravité, nous constatons que leur paroi est beaucoup moins rigide. La paroi d'une C végétale peut être éliminée grâce à des enzymes, on obtient alors une C délimitée uniquement par sa membrane plasmique, elle est alors qualifiée protoplaste. On peut observer différentes zones dans la paroi. En effet, elle est constituée d'une lamelle moyenne, d'une paroi primaire et d'une paroi secondaire qui peut être absente chez certaines C. La paroi primaire se retrouve dans tous les types cellulaires et se met en place au début de la vie de la C. La paroi secondaire se met en place beaucoup plus tardivement car elle marque l'arrêt de la croissance de la C, elle n'est donc présente que chez les C en cours de différenciation. Traditionnellement, on associe une fonction structurale à la paroi. Cependant cette structure n'est pas statique puisqu'elle présente une activité métabolique : des enzymes sont capables de synthétiser ou de dégrader des composés. De plus elle a une importance dans les processus de sécrétion et d'absorption et dans la relation plante-microorganisme (défense).

b. Composition chimique et synthèse

La paroi est une structure hétérogène constituée donc de différents types de molécules. La cellulose forme une armature. Elle est enrobée par une matrice de molécules où on trouve de

l'hémicellulose, des pectines et des protéines. La matrice maintient les fibres de cellulose en place et confère une certaine rigidité. La cellulose, l'hémicellulose et la pectine sont des composés sacchariques représentant environ 90% de la matière sèche de la paroi. La paroi peut stocker une quantité d'eau relativement importante.

♦ *La cellulose*

La cellulose est la molécule la plus abondante (environ 50% de la biomasse terrestre). C'est un polymère linéaire de β -D-glucose relié par des liaisons glycosidiques de types β 1-4. Le nombre de maillon peut varier. La liaison a une importance dans les propriétés physiques de la molécule : elle se fait une fois au-dessus, une fois en dessous du plan de la molécule. La cellulose est chimiquement et mécaniquement très résistante, en effet il est impossible de la tordre ou de l'hydrolyser. Elle peut former des liaisons H avec elle-même ou avec d'autres molécules individuelles, lui offrant ainsi une plus grande stabilité. Elle est synthétisée par la cellulose synthase qui est une enzyme organisée en rosette présente dans la membrane plasmique. L'enzyme est synthétisée dans le réticulum endoplasmique, puis elle est véhiculée par les vésicules du Golgi jusqu'à la membrane plasmique où elle est incorporée par exocytose. L'enzyme n'est active qu'une fois dans la membrane plasmique. La cellulose est donc directement déposée en couche sur la membrane plasmique. De l'UDP-glucose est véhiculé jusqu'à l'enzyme, l'UDP et le glucose se rompent ce qui libère de l'énergie qui est alors utilisée par l'enzyme pour accrocher le glucose à la molécule de cellulose en formation. Plus une \mathbb{C} est en croissance et plus cette synthèse qui se déroule in situ est importante. En effet il n'y a pas de déplacement de la cellulose, c'est l'enzyme qui se déplace sur un rail de microtubule dans la membrane au fur et à mesure qu'elle dépose la cellulose. Les différentes molécules formées s'associent pour former des microfibrilles puis les microfibrilles s'associent en macrofibrilles. C'est sous cette forme qu'est présente la cellulose dans la paroi. Le dépôt de cellulose dépend de l'état de différenciation de la \mathbb{C} . Pour une \mathbb{C} en division (méristématique) les molécules sont disposées aléatoirement. En revanche pour une \mathbb{C} qui s'allonge sans division cellulaire, la cellulose est disposée dans la direction perpendiculaire à celle de l'allongement. Enfin pour une \mathbb{C} en cours de différenciation, l'enzyme dépose des couches successives parallèles mais décalées par rapports aux précédents.

♦ *Composant de la matrice*

• *L'hémicellulose*

L'hémicellulose est présente en grande quantité uniquement dans les \mathbb{C} dont la croissance est terminée, leur taille ne varie plus. C'est un polymère d'éléments osidiques avec des ramifications. Selon l'espèce, le monomère de base peut varier : glucose, mannose... Ainsi il y a une distinction entre l'axe glucidique formé par l'enchaînement de monomère et les ramifications. Si nous prenons l'exemple du xyloglycane, il s'agit d'un axe osidique formé de glucose avec des ramifications riches en xylose. L'hémicellulose a tendance à se déformer et peut aussi former des liaisons H pour structurer la paroi en formant un réseau.

• *La pectine*

La pectine possède des propriétés chimiques importantes. C'est un polymère d'acide uronique qui est une molécule très réactive car elle est ionisable du fait de la présence de fonction carboxylique. Dans certaines conditions, la pectine forme un gel qui offre une bonne structuration à l'ensemble. Contrairement à la cellulose et à l'hémicellulose, la pectine permet de retenir une grande quantité d'eau. La pectine peut être formée de ramifications diverses.

L'estérification de certaines fonctions acide carboxylique crée une liaison éthyl-ester, la fonction carboxylique peut aussi être perdue par méthylation ou déméthylation. La pectine forme un réseau de molécule grâce aux ponts ioniques qui s'établissent entre 2 fonctions carboxyliques et un cation. Ce réseau très hydraté prend la forme d'un gel.

L'hémicellulose et la pectine sont synthétisées dans les réticulums endoplasmiques puis exportées par les vésicules golgiennes pour être intégrées à la paroi par exocytose. Contrairement à la cellulose, la synthèse ne se fait pas in situ.

- *Les protéines*

Les protéines sont spécifiques à la paroi et représentent environ 10% mais cela varie d'une cellule à une autre. Les propriétés seront alors différentes selon la proportion en protéine. Au début la protéine était nommée extensive car on pensait qu'elle avait un rôle dans la croissance. Finalement on a constaté qu'elle assurait plus un rôle de structuration de la paroi et un rôle défensif contre les éléments pathogènes. De plus cette protéine est riche en hydroxyproline, ainsi elle se nomme désormais Hydroxyproline Rich GlycoProtein. C'est une glycoprotéine ce qui signifie que sur certains acides aminés on peut trouver des chaînes latérales osidiques. Elle s'associe étroitement avec la cellulose pour former un complexe rigide.

- ♦ *La lignine*

La lignine n'est présente que dans les types cellulaires qui ont une fonction de soutien du végétal ou une fonction de conduction de sève. C'est un composé du métabolisme du phénol. C'est un polymère d'unité simple formé d'un noyau benzénique et d'une chaîne propane. La lignine est directement synthétisée dans la paroi grâce à des enzymes, les peroxydases qui sont présentes. La paroi est formée par une superposition de couche de cellulose sur la membrane plasmique ce qui signifie que les couches les plus récentes sont au contact de la membrane et les couches les plus anciennes en revanche sont au contact de la lamelle moyenne. Les monomères constituant la lignine sont synthétisés dans les réticulums endoplasmiques, puis transportés par les vésicules golgiennes jusqu'à la paroi où ils sont exocytés. Ils vont diffuser dans la paroi jusqu'à atteindre la lamelle moyenne (et donc la couche de cellulose la plus ancienne) où ils seront polymérisés grâce aux peroxydases. La lignine apporte une grande rigidité dans les tissus de soutien. C'est une molécule hydrophobe d'où son intérêt pour la conduction des sèves : elle permet aux sèves de ne pas adhérer aux canaux et donc d'être transportées plus efficacement et plus vite. Le processus de lignification ne peut se faire qu'une fois la paroi formée.

- c. Apposition pariétale

L'apposition pariétale ne compose que certains types cellulaires : les cellules directement exposées à l'atmosphère (feuille, tige, épiderme) Elle permet de limiter les pertes d'eau car ce sont des molécules hydrophobes, de renforcer la protection des tissus exposés au milieu extérieur. Elle se dépose donc à l'extérieur des cellules et des organes. L'apposition est réalisée par des molécules lipidiques : cutine, subérine et cires. La cutine et les cires sont présentes dans les épidermes (extérieur des feuilles et la tige) et la subérine est dans le liège. Elles sont formées d'une grande chaîne carbonée et pour certaines à partir de l'enchaînement d'acide gras.

- d. Organisation tridimensionnelle

La lamelle moyenne forme un ciment entre les 2 \mathbb{C} et elle est majoritairement formée de pectine. La paroi primaire se forme au contact de la lamelle puis elle s'en éloigne de plus en plus car elle est synthétisée par dépôt de couche sur la membrane plasmique. Elle est formée de pectine, de protéine et d'hémicellulose associés aux macro et microfibrilles de cellulose. Tant que la \mathbb{C} est en croissance, la paroi primaire conserve une certaine élasticité, car pour grandir la \mathbb{C} à besoin de plasticité. Lorsque la croissance est terminée, la paroi secondaire se met en place et uniquement à ce moment. Elle est beaucoup plus organisée que la paroi primaire. C'est elle qui subit les transformations et l'imprégnation de la lignine. C'est aussi une paroi beaucoup plus résistante puisque le volume cellulaire ne varie plus donc elle n'a pas besoin d'être élastique.

e. Mise en place de la paroi

La lamelle moyenne se met en place vers la télophase, lorsque les 2 \mathbb{C} formées vont des séparées. Cette lamelle fait intervenir plusieurs compartiments cellulaires et sa mise en place nécessite donc une bonne coordination. La paroi primaire se dépose pendant la croissance et la division. La paroi secondaire se dépose lorsque la \mathbb{C} a atteint sa taille adulte. Tant que la paroi secondaire n'est pas mise en place, la \mathbb{C} peut se différencier autant qu'elle le souhaite. Une fois cette paroi en place en revanche, elle a une fonction spécialisée et ne peut plus se différencier. Après la mise en place de cette paroi il peut arriver que le protoplaste (\mathbb{C} limitée par la membrane plasmique) dégénère et dans ce cas la \mathbb{C} est vide de contenu et elle n'est limitée que par sa paroi. C'est alors une \mathbb{C} morte.

f. Communication entre les \mathbb{C} : les plasmodesmes

La paroi est le point limitant de communication entre les \mathbb{C} . Si elle est étanche, toute communication est impossible. La paroi permet la diffusion d'espèces mais elle est très limitée : il y a une restriction de taille car seul les petites molécules peuvent circuler. Comment résoudre ce problème ? Les plasmodesmes (p.9) sont des structures de diamètre réduit (30 à 60 nm) qui interrompent la paroi et mettent le cytosol de 2 \mathbb{C} adjacentes en continuité. C'est une structure relativement élaborée : au niveau du plasmodesme, le plasmalemma (la membrane plasmique) des 2 \mathbb{C} est en continuité (fusion). L'essentiel de son volume est occupé par un tubule provenant du réticulum endoplasmique, c'est le desmotubule. Il est maintenu dans le plasmodesme grâce à des protéines formant un anneau et c'est à travers lui que fonctionne le plasmodesme. Le desmotubule peut se contracter ou se relâcher pour permettre le passage de composés dont la taille est inférieure à 600 daltons. Le contrôle des échanges dépend également de la charge globale de la molécule, de la taille (encombrement sphérique), des fonctions chimiques qu'elle contient, de sa polarité. Les virus par exemple utilisent souvent les plasmodesmes pour se répandre dans la plante. On définit le symplaste qui est l'espace généré par la continuité entre toutes les \mathbb{C} grâce aux plasmodesmes. De même comme il y a une continuité de la paroi, des composés (surtout des ions) peuvent également de déplacer dans cette paroi et on définit alors l'apoplasme. Le nombre de plasmodesme est variable selon les \mathbb{C} et leur fonction (de 1000 à 10 000). Ils se mettent en place lors de la division cellulaire : quand la paroi se met en place entre les 2 \mathbb{C} filles une partie du RE se trouve piégé dans la paroi et forme alors les plasmodesmes.

2. La vacuole

a. Identification et description

C'est un compartiment très important du fait du volume qu'il occupe dans la C mais aussi par sa fonction. La vacuole peut représenter jusqu'à 80% du volume cellulaire.

De Vries observe à la fin du 19^e siècle cette vacuole et la définit alors comme un plaste dont la fonction est de gérer la disponibilité en eau. Elle est limitée par une membrane, qu'il qualifie de tonoplaste, responsable de la régulation des fonctions de la vacuole. Ce compartiment bien individualisé gère les échanges entre le cytosol et le contenu vacuolaire. Chez certaines espèces, la vacuole peut stocker des pigments colorant. Selon les conditions, son volume peut évoluer. De plus pour certains types cellulaires elle se présente sous forme d'une grande vésicule alors que pour d'autres elle est sous forme de plusieurs petites vésicules.

b. Plasmolyse et turgescence

Si on place une C végétale dans un milieu où la force osmotique est importante (milieu très concentré) la vacuole va se rétractée. C'est le phénomène de plasmolyse. Il est d'abord observé au niveau de la vacuole puis au niveau de la C entière avec un décollement du plasmalemmes. Cependant ce phénomène est réversible. En effet, une C mise en présence d'eau aura sa vacuole qui va gonfler par une entrée d'eau. C'est la turgescence. La vacuole joue un rôle moteur dans 2 phénomènes : la turgescence est essentielle pour la rigidité de la plante, et les mouvements d'eau permettent le passage d'un état vers un autre. La membrane qui la protège est semi-perméable donc il existe une différence de composition entre l'intérieur de la vacuole et le cytosol.

c. Origine et différenciation

L'ensemble des vacuoles, aussi appelé vacuome, évolue selon l'état de différenciation de la C. Dans une C méristématique les vacuoles sont nombreuses et petites. Elles finiront par fusionner pour former une ou quelques grosses vacuoles. Pour un même type cellulaire la forme de la vacuole peut varier. Par exemple pour les C de gardes des stomates, on constate qu'elles sont très actives le jour, la vacuole est alors très importante, et la nuit elles sont inactives donc la vacuole est plus petite. Le principe est le même pour les C du cambium bien qu'elles dépendent des saisons. Elles sont très actives au printemps et en été, donc la vacuole est importante à cette période et c'est l'inverse en hiver.

(p.10) La vacuole est élaborée à partir du RE. Il y a d'abord augmentation du volume du RE pour former une provacuole qui a une structure filamenteuse. C'est sous cette forme que se retrouve la vacuole dans une C juste après sa division. Les lysosomes I évoluent en se repliant les uns avec les autres pour former une structure compacte, un peloton. Une partie de la membrane va être digérée par autophagie grâce à des enzymes synthétisée dans le RE puis transportées vers la vacuole. On obtient alors des structures individualisées et sphériques qui vont fusionner pour former une vacuole de plus gros volume. Elles vont aussi intégrer des vésicules issues du RE.

d. Contenu vacuolaire

Le contenu vacuolaire est variable selon les espèces, les organes, les types cellulaires et les activités métaboliques de la C. On peut y trouver des acides organiques (ex : acide malique) qui tamponne les pH élevés car celui-ci doit rester acide. Ce sont des intermédiaires du cycle de Krebs pour beaucoup d'entre eux. Leur fonction est liée au pH. Il y a également des ions inorganiques, des glucides. Il peut y avoir des acides aminés et des protéines mais en faible quantité. Exception pour les céréales où on trouve une couche appelée couche à Aleurone qui

accumule des protéines. Les glycosides présents, qui sont des pigments (ex : anthocyane chez l'oignon), sont à l'origine de la couleur des organes et peuvent changer de couleur selon le pH. On y trouve également des molécules associées à la défense de la plante (ex : coumarine qui est un répulsif à herbivore). Du tanin peut être présent et confère une activité antiprotéasique. La fonction des alcaloïdes est encore inconnue. De nombreuses enzymes lytiques sont présentes (protéase, glycosidase, estérase...) car l'activité lytique y est très importante. En effet la vacuole a une fonction de « poubelle ». Elle permet également le stockage de toutes les molécules citées cependant le stockage peut être transitoire ou à plus long terme. Les composés issus du métabolisme primaire (acides aminés, protéines, glucides, acides, enzymes) sont stockés transitoirement. Le métabolisme primaire permet la synthèse des composés indispensables et essentiels à la C en grande quantité. En revanche les composés issus du métabolisme secondaire, donc ceux qui ne sont pas indispensables à la C (pigments, tanin, alcaloïde, molécules de défense...) sont stockés plus longtemps. La vacuole est une zone tampon pour la C.

e. Tonoplaste et transport vacuolaire

Le tonoplaste est semi-perméable donc certaines molécules vont pouvoir passer et d'autres non. Cette membrane est plus fine que la membrane plasmique (environ 8 µm d'épaisseur). En plus de la bicouche lipidique, il y a des protéines de transports. Selon les protéines, les échanges peuvent être uni ou bidirectionnels. Les transports peuvent être actifs ou passifs. Dans le tonoplaste, on trouve une grande diversité de protéines de transports : des canaux comme le canal calcium, des perméases qui fixent un composé sur une face, changent de conformation pour le faire passer sur l'autre face, des protéines générant un gradient de proton. L'ATPase permet aux protons de passer de la vacuole au cytosol alors que la pyrophosphatase permet le passage inverse. Il peut y avoir des protéines antiport, elles transportent des protons vers l'extérieur où elles prélèvent des ions pour les faire entrer. A l'inverse il y a des protéines symport qui transportent conjointement 2 molécules.

f. Fonction

La vacuole permet l'élimination des molécules et organites indésirables à la C. En effet les végétaux n'ont pas de système d'excrétion, c'est donc la vacuole qui effectue cette tâche grâce aux nombreuses enzymes lytiques présentes. La plupart de ces enzymes ne sont actives qu'à un pH acide c'est pourquoi le pH de la vacuole est d'environ 5. Ainsi chaque C gère ses déchets. Les composés indésirables peuvent également provenir du milieu extérieur (ex : les herbicides). La vacuole permet également la gestion de l'eau qui est importante pour le maintien de la turgescence et le contrôle de la force osmotique. Quand la plante se trouve dans des conditions de sécheresse, ou en excès d'eau, il se crée un équilibre grâce aux échanges entre le cytosol et la vacuole par l'intermédiaire des protéines qui permettent le transport des substances. C'est également une zone tampon, de stockage pour les dérivés du métabolisme primaire et secondaire. La vacuole peut avoir d'autres fonctions chez d'autres types cellulaires mais cela dépend du milieu. Par exemple pour les plantes grasses qui ont un métabolisme carboné de type CAM, la vacuole stocke l'acide malique durant la journée et le libère le soir. De même pour les plantes présentes en milieu salin, la vacuole permet de stocker NaCl.

3. Les plastes

Les plastes ont des fonctions diverses et des structures différentes. Ils sont cependant tous limités par une double membrane appelée enveloppe comprenant une membrane externe et

une membrane interne. Dans l'enveloppe on trouve un stroma comportant différents organites dont une ou plusieurs molécules d'ADN circulaire, des ARN (messager, transfert et ribosomaux) et des ribosomes. Ayant toute la machinerie nécessaire à la synthèse de protéines, on peut considérer que ces plastes possèdent une autonomie mais partielle.

a. Les chloroplastes (p.11)

Ce sont les plus nombreux, et dont la fonction est mieux définie et plus importante. Ils sont de forme ovale avec une longueur d'environ 10 μm et une largeur de 2 à 4 μm . Pour suivre un chloroplaste et voir son évolution et son devenir, on a utilisé une protéine spécialisée que l'on a marquée par fluorescence. Ainsi en pénétrant dans le chloroplaste, elle le marque. Au cours de l'évolution de la C, il y a accroissement de la forme des chloroplastes. On a aussi remarqué qu'ils peuvent se diviser. Leur nombre dépend du type cellulaire, des conditions environnementales, de l'espèce. Ils peuvent occuper jusqu'à 50% du volume de la C.

Le chloroplaste est donc entouré par une double membrane. La membrane externe a la propriété d'être perméable et de laisser passer de nombreuses molécules grâce aux porines qui forment des canaux tout le temps ouverts. De plus elle est très riche en galactolipides. Il en est de même pour la membrane interne mais celle-ci est hautement sélective. Dans le stroma on peut trouver des constituants propres au chloroplaste : les thylakoïdes. Ce sont des vésicules membranaires qui peuvent être de forme allongée, ce sont les thylakoïdes inter-granaires ou petits et regroupés en amas, ce sont les thylakoïdes granaires. Ce sont des petits organites car leur membrane est très fine (6 – 8 nm) et la lumière ne dépasse pas 3 nm. Dans cette membrane on trouve environ 50% de lipides, 40% de protéines et 10% de pigments. Dans le stroma il y a aussi des gouttelettes lipidiques et des grains d'amidon.

Il existe 2 grandes familles de pigments : les pigments actifs qui ont un rôle direct dans la photosynthèse, ce sont exclusivement les chlorophylles a. et il y a les pigments accessoires, les chlorophylles, les caroténoïdes, les xanthophylles. La réaction photosynthétique peut en fait se diviser en 2 réactions. La première consiste à convertir l'énergie lumineuse en énergie chimique et se déroule dans la membrane des thylakoïdes. Puis le chloroplaste utilise cette énergie pour fixer le CO_2 de l'air et synthétiser du glucose dans le stroma en présence d'enzyme. Le glucose synthétisé est ensuite exporté ailleurs dans la plante ou stocké provisoirement sous forme d'amidon dans le chloroplaste.

b. Les autres plastes

Les proplastides sont la source primaire pour obtenir des chloroplastes, amyloplaste... Ils sont plus petits que les chloroplastes (0,1 – 1 μm) et d'organisation plus simple. Ils possèdent une double membrane et dans le stroma il n'y a quasiment aucune vésicule membranaire. Ils sont exclusivement présents chez les végétaux supérieurs et dans un type cellulaire précis : les C méristématiques. Leur évolution est contrôlée par des signaux externes : en effet sous l'effet de la lumière, la membrane interne va s'invaginer pour former les thylakoïdes du chloroplaste, et la synthèse de chlorophylle va être déclenchée. Les proplastides peuvent se transformer pour donner des étioplastes qui restent blancs contrairement aux chloroplastes. Ils contiennent des corps lamellaires qui se retrouvent de façon totalement désorganisés. Si l'étioplaste est mis en présence de lumière il va se différencier en chloroplaste. Ainsi les conditions du milieu, il peut y avoir des inter conversions entre les différents plastes. Les plastes sont généralement très différenciés les uns des autres par leur taille et leur fonction. Les amyloplastides permettent le stockage de l'amidon à long terme contrairement aux

chloroplastes. Ils se trouvent donc dans les tissus de réserve : tissus des racines, dans les organes tel que les rhizomes, tubercules, bulbes. La synthèse de l'amidon utilise le glucose synthétisé dans les chloroplastes ce qui implique un transport du glucide sous forme de saccharose. L'amyloplaste est une structure à double membrane contenant des grains d'amidon sous forme déshydratée. Dans la plupart des cas, ils ne contiennent que de l'amidon et pas de structure membranaire. Dans une \mathbb{C} on peut trouver de 1 à plusieurs centaines d'amyloplastes. La forme du grain et de l'amyloplaste est caractéristique d'une espèce et déterminés génétiquement. L'intérêt de cette forme de stockage intervient au niveau de la force osmotique. En effet, l'amidon est osmotiquement neutre donc sa quantité n'a pas d'influence sur la force osmotique de la \mathbb{C} . L'amidon est la forme de stockage la plus importante mais pas la seule. L'amidon se dépose en strate concentrique à partir d'un noyau qui sert de base. Biochimiquement l'amidon est un mélange d'amylopectine et d'amylose. L'amylose est un polymère d' α -glucose en liaison α 1-4 soluble dans l'eau chaude. Toutes les liaisons se font sur le même plan ainsi sa structure 3D est une hélice très flexible avec de nombreuses liaisons H possibles. L'amylopectine est composée d'une chaîne principale d' α -D-glucose avec des ramifications d' α -D-glucose en liaison α 1-6. Sa structure 3D est de type buissonnant donc les liaisons H sont impossibles d'où sont insolubilité. Généralement l'amylopectine représente 30%. La synthèse d'amidon est réalisée par l'amidon synthétase et il est dégradé par l'amylyase qui libère des monomères de glucose.

Les leucoplastes permettent le stockage des lipides. Ce sont des organites non colorés.

Les chromoplastes sont des organites colorés que l'on trouve dans des organes comme les pétales, la peau des fruits... Ils accumulent des séries de pigments qui sont lipophiles contrairement à la vacuole qui stockent des pigments hydrophiles. Ce sont des signaux attractifs pour d'autres organismes : pollinisation... Les pigments sont variés et spécifiques à la \mathbb{C} : pour les carottes, c'est le β -carotène. La biosynthèse de tous ces pigments est assez proche. Ils sont constitués d'au moins 40 atomes de carbones et dérivent de la voie de biosynthèse de l'isoprène. Dans les chromoplastes, les pigments se retrouvent sous forme de gouttelettes lipidiques, c'est la forme globulaire, associés à la membrane, c'est la forme tubulaire, dans la membrane, c'est la forme membranaire et sous forme cristalline. Les chromoplastes peuvent être issus des proplastides, des chloroplastes ou amyloplastides par différenciation ou par division de chromoplastes existant.

La plasticité des plastides est contrôlée par de nombreux facteurs tels que la lumière, le métabolisme.

c. Origine et coopération fonctionnelle

La première origine possible est la biogenèse autogène : une \mathbb{C} produit ses propres plastides à partir de sa propre structure. En contradiction avec cette origine, la théorie exogène : il existe initialement un \mathbb{C} dépourvu de tous organites. Finalement elle les obtient par phagocytose d'autres organismes comme des cyanobactéries. Les arguments en faveur de cette théorie sont le fait que les chloroplastes, les mitochondries et les bactéries ont des nombreux points communs. Ils possèdent un ADN circulaire qui n'est pas enfermé dans un noyau, les ribosomes des chloroplastes sont proches de ceux des bactéries, les mécanismes de transcription sont proches, les inhibiteurs des protéines des bactéries fonctionnent sur les chloroplastes. L'étude du génome a permis de confirmer cette théorie : initialement les \mathbb{C} eucaryotes étaient dépourvus de mitochondries et chloroplastes. Le premier événement d'endo symbiose va permettre d'obtenir les mitochondries grâce aux bactéries puis certaines vont

phagocyter les cyanobactéries photosynthétiques ce qui va donner naissance à la lignée verte. Le séquençage du génome des chloroplastes a montré des hétérogénéités de taille. Dans ces séquences on trouve peu de gènes mais une grande quantité de protéines et d'ARNt nécessaires à la transcription et à la traduction de son génome. 3% des gènes codent pour des protéines effectivement présentes dans les chloroplastes, les 97% autres se trouvent dans le génome nucléaire. Il y a une coopération nucléaire pour le fonctionnement du chloroplaste. *Synechocystis* est une cyanobactérie avec un génome d'à peu près 3000 gènes. Il y a plus de 98% des gènes du chloroplaste que l'on retrouve chez cette bactérie, mais d'autres ont disparu. En réalité leurs séquences ont été transférées dans le génome nucléaire. Si on prend comme exemple la rubisco, elle est active que lorsqu'elle possède ses 2 sous unités : un gène se trouve dans le chloroplaste et l'autre dans le noyau donc pour la synthèse de la rubisco il faut une parfaite communication entre les 2.

Les principaux tissus végétaux.

Tous les tissus des végétaux sont issus de la différenciation cellulaire. Il existe deux types de méristèmes : les méristèmes primaires que l'on retrouve dans les apex, édification primaire. La croissance des monocotylédones est assurée par ces apex. La croissance en épaisseur est réalisée grâce aux méristèmes secondaires. On aura alors des tissus qui auront une origine méristématique primaire ou secondaire. Il existe deux zones : La zone génératrice subéro-phellodermique qui génère deux tissus : le suber et le phelloderme. Ce sont des tissus de protection. La zone génératrice libéro-ligneuse cambium dont la fonction est de générer des tissus conducteurs : le liber et le bois. Dans une plante on trouve 3 grands types de tissus. Les tissus protecteurs se trouvent en périphérie des organes, ce sont des tissus de revêtement. Les tissus de conduction qui véhiculent les différentes sèves au sein de la plante. Et enfin les tissus fondamentaux qui sont des tissus de remplissage.

A. Les tissus protecteurs

Ils permettent d'imperméabiliser la surface des organes pour notamment gérer les pertes d'eaux et ralentir la transpiration. Ils sont aussi très largement imperméable aux gaz et assure une protection mécanique aux organes (croissance de la racine dans le sol, attaque des herbivores). On distingue deux grandes catégories qui dépendent de l'âge. Les organes sont protégés par un épiderme pour les parties aériennes et les racines par du rhizoderme. Les organes âgés ne sont protégés que par un seul tissu, le suber (liège) qui est généré par le méristème secondaire.

1. Les tissus primaires : épiderme et rhizoderme

(Doc. page 13) Dans les épidermes des feuilles et des tiges on trouve toujours la même chose : des cellules banales, des cellules du stomate, des cellules qui sont à l'origine des poils. La couche de cellule banale peut quelque fois contenir des cellules spécialisées. Le rhizoderme est formé de cellules banales associés à d'autres qui formeront des poils absorbants. La différence entre le rhizoderme et l'épiderme est leur perméabilité à l'eau : le rhizoderme est perméable donc il laisse passer l'eau.

Les épidermes caractéristiques :

Les cellules non chlorophylliennes : ce sont des cellules très aplaties ou allongées dans certains cas. Elles peuvent être en forme de pièces de puzzle et présentent une forte résistance mécanique.

Les cellules jointives : elles ne présentent aucun espace entre elles. D'un point de vue physiologique, ce sont des cellules vivantes très vacuolisées. Cette modification est à mettre en relation avec leur fonction qui consiste à renforcer la paroi externe grâce à l'imprégnation de la paroi par des composés hydrophobes. La cutine va former un revêtement impuissant, on parle alors de cuticule (dépôt mixte de cutine et de cirres). Elles sont beaucoup plus imperméables et l'épaisseur dépend de l'âge de la feuille. La surface foliaire est extrêmement hydrophobe et imperméable à l'eau et au gaz.

Les cellules spécialisées : elles se présentent sous forme de poils. Cette pilosité est liée à une modification de morphologie. Il existe deux types de poils : des poils unicellulaires (trichome) et des poils pluricellulaires obtenus par une ou deux divisions des cellules épidermiques. Les poils ont une fonction de sécrétion (ex : les orties).

Les stomates sont abondants au niveau des feuilles. Du point de vue de l'organisation morphologique on trouve plusieurs types de cellules. On trouve des cellules annexes qui bordent les cellules de garde. Les cellules de garde contrôlent l'ouverture des stomates et délimitent l'ostiole qui permet les échanges gazeux au niveau de la feuille. Les cellules de garde possèdent des chloroplastes. La paroi délimitant les ostioles est très épaissies. Sous l'ostiole se trouve un espace dépourvu de cellule, c'est la chambre sous stomatique, qui permet d'équilibrer la concentration en gaz. Cette chambre est en contact avec la chlorophylle. Il existe des cellules très différentes des cellules épidermiques. En effet les cellules épidermiques vont subir une première division asymétrique on obtient alors une grande cellule qui sera une cellule épidermique et une petite cellule qui sera à l'origine de cellule de garde lors de la seconde division. La répartition des stomates sur les feuilles est variable selon les espèces. Chez les monocotylédones, la répartition est homogène sur les 2 faces de la feuille. Chez les dicotylédones, ils sont exclusivement présents sur la face inférieure de la feuille. Les stomates sont un lieu d'échange de gaz entre la feuille et l'atmosphère. 90% de l'eau est perdue par transpiration par les stomates. La turgescence et la plasmolyse contrôlent l'ouverture et la fermeture des stomates.

2. Les tissus secondaires

Document page 14 : ces tissus ne sont présents que chez les dicotylédones âgés. Il s'agit du suber (le liège). Dans une racine et une tige âgées, le suber remplace le rhizoderme et l'épiderme. Il provient de la zone génératrice subéro-phellodermique qui se trouve au niveau des tiges. Le suber se forme juste sous l'épiderme. Dans une racine cette zone est beaucoup plus profonde (souvent au centre de la racine). Ce sont des tissus qui ne se divisent plus. La formation du phellogène se fait par la reprise de la division qui sera systématiquement anticline. Toutes les cellules qui forment ce phellogène sont homogènes. La formation se fait vers l'extérieur : de nouvelles couches de cellules vont remplacer au fur et à mesure l'épiderme. La caractéristique des cellules subérines est leur modifications : elle se différencie par un épaississement de la paroi et de la subérine se dépose. La subérine est un composé très hydrophobe. Le suber a de très bonnes propriétés d'étanchéité mais peut facilement être modifié du point de vue mécanique. On aura des zones où les échanges seront favorisés par des lenticelles, la couche de liège craque.

B. Les tissus fondamentaux

Ce sont des tissus ubiquitaires que l'on retrouve un peu partout. Ils sont particulièrement diversifiés et abondants dans les organes aériens.

1. Les parenchymes

Ce sont les tissus les plus abondants chez les végétaux. Les cellules ne sont pas différenciées, en effet le parenchyme montre un état de différenciation le moins avancé. Il est formé de cellules qui sont vivantes dont la paroi est peu élaborée : c'est une paroi primaire. Les cellules ne sont pas tout à fait jointives ce qui permet des échanges gazeux au sein du tissu. Les cellules étant peu différenciées, elles ont alors la particularité de pouvoir se différencier pour se différencier autrement. Il peut donner naissance à d'autres tissus par divisions. Au niveau des organes aériens, les parenchymes constituent les parties externes et centrales de la tige. Au niveau des feuilles, ils constituent les mésophyles qui sont des tissus se trouvant entre les deux épidermes inférieurs et supérieurs. On en trouve dans la chair des fruits et dans les tubercules. Au niveau de la racine, les parenchymes sont à l'extérieur : c'est l'écorce de la racine. Ils sont associés à diverses fonctions :

La photosynthèse : il s'agit d'un parenchyme chlorophyllien qui effectue l'essentiel de la photosynthèse. On les nomme parenchyme palissadique et parenchyme lacuneux.

Réserve : ils se trouvent dans des organes de réserves tel que les rhizomes, les tubercules, les tiges. Ils permettent l'accumulation de glucose, de saccharose, d'eau (parenchyme aquifère présent chez les cactus) et d'air (parenchyme aëriifère présent chez les plantes aquatiques).

Transport : ce sont des cellules de transfert. Dans ce cas, le tissu est peu abondant mais associé à un autre tissu.

Glande à sel : ce sont des cellules de transfert excréteur de sel. Ces cellules ont une paroi importante et une surface plasmatique importante. Ces échanges se font à courte distance.

Rigidité des organes (en partie seulement) lors de la turgescence pour permettre de conserver en partie la forme.

2. Les tissus de soutien

Document page 15 : ces tissus permettent aux végétaux d'avoir un corps tige. On les retrouve uniquement dans les organes aériens. Ils permettent de garder des formes dignes dans les plantes de grandes tailles. On trouve deux types de tissus de soutien :

Le collenchyme : c'est globalement le tissu que l'on trouve dans les jeunes organes ou des plantes de taille peu importantes. C'est un tissu formé de cellules qu'on appelle des collocytes. Ils possèdent une paroi extrêmement résistante et épaissie (paroi primaire et secondaire) toujours pectocellulosique (cela représente 1/3 du volume de la cellule). La paroi est riche en eau et les cellules conservent leur capacité de croissance. On le trouve à l'extérieur des tiges ou au angle si la tige est en forme de carré. Les collocytes sont des cellules vivantes. Il existe différents types de collenchymes : de type annulaire, de type angulaire, il se dépose au angle de la cellule, de type tangentiel, il se dépose sur les faces opposées de la cellule. Chez les dicotylédones, sont dépôt permet tout de même la croissance de la plante.

Le sclérenchyme : tissus très développé chez les monocotylédones. Ce tissu est formé de cellules mortes c'est-à-dire que leur paroi contient de la lignine. Ce tissu se retrouve dans des organes qui ont finis leur croissance. Il existe deux types de cellules : des fibres et des sclérites. Les fibres sont des cellules allongées suivant l'axe de l'organe et pouvant atteindre plusieurs cm de longueur. Leur regroupement forme le sclérenchyme. Elles ont une grande résistance à l'écrasement dans le sens longitudinale et ce sont des fibres relativement flexibles.

Les sclérites ne forme pas un tissu bien organisé car les cellules sont en amas ou isolées. Elles assurent une partie de la rigidité. Ce sont des cellules courtes dont la paroi est épaisse.

3. Les tissus secondaires

Le phelloderme est formé par la zone génératrice subéro-phéllodermique (le phellogène). Il se trouve à l'intérieur des organes en fin de croissance. C'est un tissu peu abondant formé de cellules semblables à celles du parenchyme. Ce sont des cellules vivantes.

C. Les tissus de conduction

Ils véhiculent les sèves. La sève brute qui est chargée en sels minéraux provient des racines et la sève élaborée contient les produits issus de la photosynthèse. Le xylème véhicule la sève brute et le phloème la sève élaborée. Ces deux tissus peuvent avoir une origine primaire et secondaire. Ce sont des tissus complexes car ils sont formés de plusieurs types cellulaires avec des fonctions différentes.

1. Le xylème

En plus d'un rôle de conduction il assure le soutien des organes âgés et de taille importante. Selon le moment de la vie de la cellule différents xylèmes se mettent en place avec un fonctionnement alternatif. Dans les plantes jeunes c'est un xylème d'origine primaire, le protoxylème. Dans les organes plus âgés c'est du métaxylème toujours d'origine primaire mais plus efficace que le précédent. Ces deux formes se trouvent dans toutes les angiospermes, mais chez les monocotylédones il n'y a pas d'autres formes de xylèmes alors que chez les dicotylédones on trouve une troisième forme qui est cette fois d'origine secondaire, il s'agit du bois. Ce xylème est formé par le cambium et se met en place dans les organes dont la croissance continue. Le bois est formé d'éléments conducteurs existant sous deux formes : les vaisseaux et les trachéides.

Les trachéides sont des cellules vivantes avec un protoplasme et communiquent par des ponctuations dans la paroi. Les ponctuations sont des zones où la paroi est limitée à une paroi primaire donc elle est facile à traverser pour les liquides. La lamelle moyenne et la paroi primaire sont partiellement hydrolysées, la paroi est désorganisée. Ceci permet donc le passage de la sève. Les ponctuations se trouvent dans la paroi longitudinale et transversale. La conduction est lente.

Les vaisseaux sont des cellules mortes restreintes à leur paroi. Il n'y a pas de protoplasme et le diamètre est plus important que celui des trachéides. Au bout du vaisseau, il y a des perforations pour le passage de la sève : cela forme un long tube continu où la sève circule sans rien rencontrer. Sur la paroi longitudinale, il y a des ponctuations. La conduction y est beaucoup plus rapide que dans les trachéides.

L'abondance en vaisseaux ou trachéides dépend du type de xylème. Plus on évolue vers la formation du bois, plus il y a des vaisseaux et de moins en moins de trachéides. Leur diamètre devient de plus en plus important. Il existe une différenciation au niveau des vaisseaux. Il se traduit par le dépôt de lignine. Plus il y a de lignine meilleure sera la conduction de la sève. Le dépôt est ordonné. Plus le xylème est différencié, plus il y a d'incorporation de lignine. Dans le protoxylème il y a beaucoup de trachéides et peu de vaisseaux de plus ils sont peu différenciés (annelé ou spiralé). A ce stade les vaisseaux peuvent encore s'allonger. Quand

l'état est plus différencié, leur allongement n'est plus possible. Le xylème secondaire est formé que de vaisseaux fortement différencié (réticulé, ponctué) qui assurent une fonction de soutien grâce à la forte concentration de lignine présente qui épaissit la paroi. Ces éléments conducteurs ne sont pas isolés dans la cellule puisqu'ils sont associés à d'autres types cellulaires. Les vaisseaux sont accolés aux cellules de transfert. Ce sont de cellules parenchymateuses impliquées dans les transferts des molécules vers les vaisseaux. Ce sont des cellules vivantes au cytoplasme dense et avec une vacuole développée. Ces cellules sont directement associées aux vaisseaux grâce aux ponctuations latérales. De plus la paroi de la cellule est primaire et fine donc les échanges sont faciles mais ne se font pas au travers de plasmodesmes. Ce sont des échanges par apoplastie. L'intermédiaire entre les vaisseaux et les autres cellules est du parenchyme à fonction de réserve : ce sont des amyloplastes avec un très grande vacuole et ils communiquent avec les cellules de transfert par des plasmodesmes. Selon les espèces il peut exister deux autres types de cellules. Les fibres sont des cellules de sclérenchyme qui s'intercalent et soutiennent. Ce sont des cellules sécrétrices de résine... Dans le protoxylème, les vaisseaux sont peu différenciés et le parenchyme est relativement développé. Les vaisseaux du métaxylème sont un peu plus différenciés et il contient également des fibres de soutien et du parenchyme. Dans le xylème secondaire, tous ces éléments sont présents et on y trouve en plus des systèmes verticales et des systèmes de parenchymes horizontaux.

2. Le phloème

Il permet le transport de la sève élaborée. Il est composé de deux types d'éléments : les éléments de tubes criblés et les cellules criblées. Il existe des plages criblées qui sont des zones où la paroi est perforée et ainsi les deux protoplastes de deux cellules sont reliés. Ce sont des cellules vivantes. Comme pour le xylème, selon le moment de vie de la cellule, il existe différents types de phloème. Le protophloème constitue les organes jeunes. Puis il y a le métaphloème. Ces deux tissus sont présents chez toutes les angiospermes. Le liber qui est un phloème secondaire n'est présent que chez les dicotylédones. La différence est difficile à voir entre le proto et le méta phloème en revanche elle est nette entre le phloème primaire et le secondaire. Dans le tissu secondaire les cellules sont toujours alignées les une par rapport aux autres.

Les éléments conducteurs sont les éléments criblés. Les cellules criblées sont des cellules anucléées, sans vacuole ni ribosomes et appareils de golgi. Leur paroi est peu épaisse et pectocellulosique. Il n'y a pas de lignine. Les perforations permettent la conduction de la sève. Les dimensions des pores et leur répartition distinguent les cellules des éléments de tubes. Les cellules criblées ont des pores étroits et de taille homogène à la plage perforée. La zone criblée est à l'extrémité des cellules et dans la paroi latérale. Les éléments de tubes ont des plages criblées au diamètre variable et qui se situent aux extrémités et moins fréquemment dans la paroi latérale. Il y a une continuité entre les cytoplasmes des tubes, cela forme un tuyau où circule la sève. Chez les dicotylédones, les tubes sont plus fréquents que chez les monocotylédones où se sont les cellules criblées qui sont plus fréquentes. Dans les tubes, la conduction est plus rapide. Comme pour le xylème, ces éléments conducteurs sont associés à d'autres types cellulaires. Juxtant ces éléments il y a les cellules compagnes. Elles proviennent d'une division qui donne deux cellules : l'une est l'élément conducteur et l'autre la cellule compagne. Ce sont des cellules nucléées et fonctionnelles qui maintiennent les cellules des tubes auxquelles elles sont associées. Elles leur fournissent les protéines, l'énergie et les éléments du métabolisme dont elles ont besoin. A côté de ces cellules, il y a des cellules de parenchyme de réserve pour apporter l'amidon nécessaire aux cellules

compagnes et aux éléments conducteurs. Il peut également y avoir des fibres dont la paroi est exclusivement cellulosique (collenchyme) et des cellules sécrétrices (latex).

D. Structure et fonctionnement du cambium

1. Mise en place des éléments de conduction

Il y a plusieurs phases dans la mise en place du cambium. La première intervient juste après la germination : le protoxylème et le protophloème se mettent en place à partir d'un procambium. C'est une zone méristématique proche des méristèmes primaires. Il y a ensuite différenciation cellulaire pour donner le métaphloème et le métaxylème. L'action du procambium est continue. Quand le volume de l'organe augmente, il apparaît une nouvelle zone de multiplication cellulaire. Il y a une forte activité au niveau du procambium et de la zone méristématique entre les massifs de phloème et de xylème. Des cellules parenchymateuses vont se différencier. Il apparaît une zone circulaire : le cambium. Quand il devient fonctionnel, il y a formation de cellules qui vont se différencier et donner un anneau de phloème et de xylème secondaire. Cela augmente les possibilités d'acheminement des sèves. Le phloème se met en place vers l'intérieur de l'organe et le xylème vers l'extérieur. Les phloèmes et xylèmes d'origine primaires vont finalement disparaître fonctionnellement.

2. Organisation du cambium

Une coupe longitudinale radiale est une coupe qui passe par le centre de l'organe alors qu'une coupe tangentielle non. La zone cambiale est la zone où il y a division cellulaire entre le xylème et le phloème. Lors de la différenciation des cellules, elles sont repoussées au fur et à mesure loin du cambium. Donc le phloème et le xylème proviennent des mêmes cellules à l'origine. Cette zone est formée de cellules aux morphologies différentes. Les cellules allongées ou cubiques forment les initiales. Les cellules allongées forment les initiales fusiformes et les cellules cubiques, les initiales radiales. Elles donneront un type cellulaire différent. Les initiales fusiformes donnent toutes les cellules allongées dans le sens de longueur de l'organe (éléments conducteurs, parenchyme, cellules compagnes...) et les initiales radiales donnent les cellules dans le plan radial, elles sont longues dans le sens du rayon de l'organe. La structure est donc hétérogène dans l'espace. Les deux réseaux sont croisés.

3. Fonctionnement du cambium

Le cambium est une zone de division cellulaire. C'est donc un méristème de division permanente. Son épaisseur est globalement (4 à 40 épaisseur de cellules) constante donc les cellules se différencient rapidement. Il y a différents plans de divisions : le plan tangentiel dit périodique. Les cellules sont vers l'extérieur ou l'intérieur de l'organe. C'est le type le plus fréquent, et on le retrouve dans le bois et le liber. Il y a le plan anticline qui est plus rare. Il se fait dans le sens de la hauteur des organes. Enfin il y a le plan transversal qui permet d'augmenter le nombre d'initiales et donc permet l'allongement du cambium. L'activité de division n'est pas continue mais saisonnière. Il y a une forte activité en été et au printemps, en hiver il n'y a rien et en automne elle est plus faible. C'est donc une activité cyclique.

Anatomie des principaux organes

A. La racine

C'est un organe souterrain dont la croissance suit le gravitropisme positif (elle suit la gravité). Elle assure une fonction d'ancrage de la plante dans son substrat et une fonction d'absorption de l'eau et des sels minéraux. Après la germination, il y a formation de la racine primaire formée de différentes zones. A l'apex, il y a la coiffe, qui est surmontée d'une zone lisse où les cellules sont en élongation et au dessus c'est la zone de différenciation des poils absorbants, c'est la zone pilifère. Puis il peut apparaître des ramifications, ce sont les racines secondaires. Le tout forme un système racinaire. La coiffe est un manchon de cellules recouvrant le méristème et le protégeant. Au fur et à mesure que la racine pénètre dans le sol, il y a desquamation, donc il y a un renouvellement permanent par le méristème de la coiffe. C'est également le site de perception de la gravité. Le tissu le plus externe est le rhizoderme qui assure la protection. C'est un tissu formé de cellules dont la paroi est peu épaisse ce qui permet alors les transferts de liquides. Ensuite il y a le parenchyme cortical qui est un tissu très développé. Il est riche en amylopectine et il est très épais. L'absorption des liquides est encore possible et facile. L'endoderme est formé d'une épaisseur de cellule vivantes et bien vacuolées. Quatre de leurs six faces sont modifiées car elles sont imprégnées de subérines. Ainsi la paroi est totalement hydrophobe et les transferts sont impossibles. Pour franchir l'endoderme, il faut passer par le protoplaste (voie symplastique) ce qui implique une sélectivité. Les ions sont alors contrôlés. Sous l'endoderme se trouve une couche formée de une à deux épaisseurs de cellules : c'est le péricycle. Il est formé de cellules de types parenchymes et il est à l'origine des racines secondaires. Dans les racines, les tissus secondaires sont en alternance. Au centre on retrouve le parenchyme médullaire. Cette organisation est présente dans les racines jeunes. Quand la racine vieillit, les tissus secondaires de mettent en place à partir du cambium. Le cambium se met en place en deux temps : au niveau des massifs de xylème, le procambium évolue en cambium. Puis des cellules du péricycle vont se transformer pour former un cambium continu. A l'intérieur se formeront le bois et le liber à l'extérieur. La deuxième étape est la transformation des tissus protecteurs. Au niveau du péricycle, il y a mise en place du phellogène qui forme le liège vers l'extérieur de l'organe et le phelloderme à l'intérieur. Tous les tissus à l'extérieur vont alors éclater. L'écorce est donc formée par le rhizoderme, le parenchyme cortical et l'endoderme puis elle va disparaître. Ils forment un premier cylindre. Les massifs de tissus conducteurs et l'endoderme forme le second cylindre. Le phelloderme et le liège qui sont les seuls tissus extérieurs restants forment le périderme.

B. La tige

Elle s'édifie sous forme de différents nœuds et entre-nœud. Au niveau des nœuds, on trouve les feuilles et des bourgeons axillaires qui permettent les ramifications et de générer de nouveaux rameaux dans le cas où les feuilles éclateraient. En coupe transversale on distingue, un cylindre interne et un cylindre externe. Le cylindre externe est très peu épais et correspond à l'écorce. Le cylindre interne est le cylindre central. L'écorce est formée par l'épiderme qui est le tissu le plus externe et suivant les végétaux, les épidermes peuvent comporter des stomates ou non. Sous l'épiderme on retrouve le parenchyme cortical qui est du même type que celui de la racine. Ce sont des cellules avec une fine paroi et de grande taille. Ce tissu a une fonction de réserve. On y trouve des massifs de cellulaires pour le maintien des cellules, c'est du collenchyme. La paroi est alors épaisse et pectocellulosique. Le cylindre central est

délimité par un cercle formé par les tissus conducteurs. Tout au centre de la tige on trouve la moelle (qui est le parenchyme médullaire). C'est un tissu de remplissage. Les tissus de conduction s'organisent suivant un faisceau libéro-ligneux : le xylème est vers l'intérieur et le phloème vers l'extérieur, les deux étant superposés. Ces faisceaux sont alignés sur le cercle tout autour de l'organe. Dans les dicotylédones le nombre de faisceau est limité (entre 5 et 7) donc la capacité de conduction est limitée car ce sont les seules zones de conduction. En plus du collenchyme on peut trouver des massifs de sclérenchymes. Chez les monocotylédones, il y a plusieurs cercles concentriques et non des faisceaux. Ceci est à mettre en relation avec le fait qu'il n'y a pas de tissu secondaire.

Evolution de la structure de la tige : les faisceaux primaires sont formés à partir de zones méristématiques : le procambium. Les tissus secondaires se mettent en place à la suite de l'évolution du procambium en cambium. Cette transformation se fait en deux temps : le procambium se transforme en cambium. Les différentes zones du cambium qui est alors un cambium intra fasciculaires sont reliées par du cambium inter fasciculaire formé à partir de cellules parenchymateuses qui reprennent leur division. La zone cambiale est alors continue. Le fonctionnement est pareil que pour la racine. Les tissus conducteurs s'organisent en deux cercles, il y a accroissement du développement car la conduction est plus efficace. Le bois est très important par rapport au liber. Les tissus primaires perdent leur activité et se retrouvent comprimés. Le phellogène se met en place en surface juste sous l'épiderme. Le liège se développe vers l'extérieur et multiplie les assises cellulaires. Cette couche est hydrophobe donc l'épiderme se dessèche et fini par disparaître.

C. La feuille

C'est une structure simple organisée autour de quatre tissus. La face supérieure (adaxiale) et la face inférieure (abaxiale) sont délimitées par deux épidermes qui sont hétérogènes. La face supérieure est pauvre en stomate à la différence de la face interne. Ces épidermes entourent deux tissus qui sont du mésophyles : le parenchyme lacuneux et le parenchyme palissadique. Le parenchyme palissadique est formé de cellules jointives, allongées et aux chloroplastes abondants. Il est essentiel à la fonction photosynthétique. Le parenchyme lacuneux est composé de cellules non jointives et présentent des lacunes qui sont des espaces en relation avec les stomates. Quand ils sont ouverts il y a un équilibre entre les gaz à l'intérieur et l'extérieur.

Le péricycle est d'origine primaire, le parenchyme est composé d'une assise cellulaire différenciée qui reste en état. Le cambium est un méristème, c'est-à-dire que les cellules sont en divisions. Le péricycle et l'endoderme sont deux tissus spécifiques à la racine. L'endoderme est une zone de contrôle des ions.

Fonction de soutien : collenchyme, sclérenchyme, paroi, lignine, turgescence, vacuole, tissu de conduction surtout le bois.

Fonction de conduction : xylème, phloème, cambium, organe

Fonction de stockage : amyloplaste, parenchyme, vacuole, organe de réserve

Fonction de protection : épiderme, rhizoderme, liège, dépôt sur la paroi, phellogène

Fonction de photosynthèse : chloroplaste, stomate, feuille

Fonction d'absorption : racine, symplasma, apoplasme, plasmodesme

Apoplasme : circulation dans la paroi, symplasma : déplacement au travers des plasmodesmes.