



Sécheresse à
Salquenen/VS,
été 2018

Phytoextraction
de métaux
lourds sur sol
contaminé

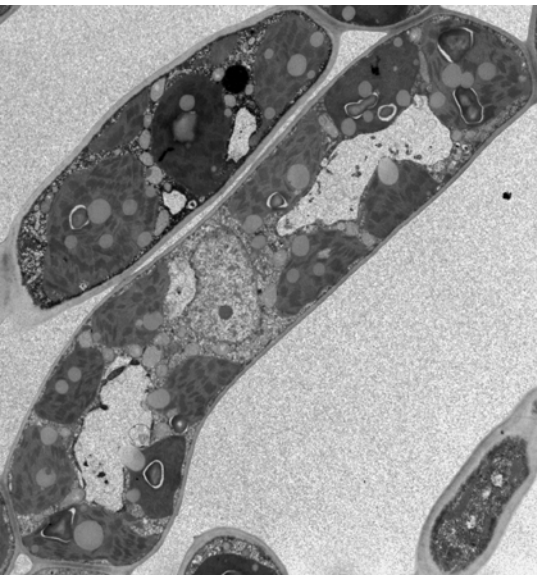


BGS, spécialisation 1: sol et végétation

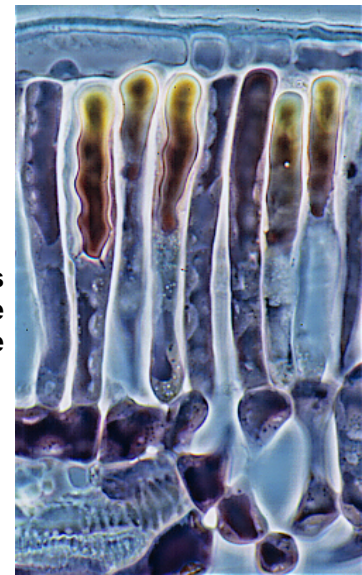
ANATOMIE ET ÉCOLOGIE FONCTIONNELLES DES PLANTES SUPÉRIEURES

Chargé de cours : Pierre Vollenweider
WSL, CH-8903 Birmensdorf/ZH

Objectif du cours: développer une compréhension des relations plante-environnement basée sur l'analyse de la structure et du fonctionnement des organes végétaux et de leur adaptation aux contraintes environnementales.



Cellule âgée de
mésophylle
foliaire chez le
hêtre



Symptômes
d'ozone
chez le hêtre

1. Introduction générale - Présentation



Dr. Pierre Vollenweider

Fonction	collaborateur scientifique Dynamique forestière Ecophysiologie
Contact	pierre.vollenweider(at)wsl.ch +41 44 739 24 35 Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL Zürcherstrasse 111 8903 Birmensdorf
Site	Birmensdorf Bi LG C 26

CV

Depuis 2001 collaborateur scientifique et directeur de recherches, WSL, Suisse

1998 - 2001 Post-doc, WSL, Suisse

1997 - 1999 1^{er} Assistant (recherche et enseignement), Université de Lausanne, Suisse

1996 - 1997 Post-doc, University of Massachusetts, USA

1991 - 1995 Assistant (recherche et enseignement), Université de Lausanne, Suisse

1988 - 1995 Consultant en écologie (différentes entreprises), Suisse

1986 - 1995 Doctorant, Université de Lausanne, Suisse

1982 - 1986 Études de Biologie, Université de Lausanne, Suisse

Associations

[Pro Quercus](#)

Autres activités:

Depuis 1997 Gestion forestière (10 ha de forêt privée), Suisse romande

site web: <https://www.wsl.ch/fr/personnel/vollenwe/>

téléchargement des cours:

<https://www.wsl.ch/fr/vollenwe/anatomie-et-ecologie-fonctionnelles-des-plant-superieures/>

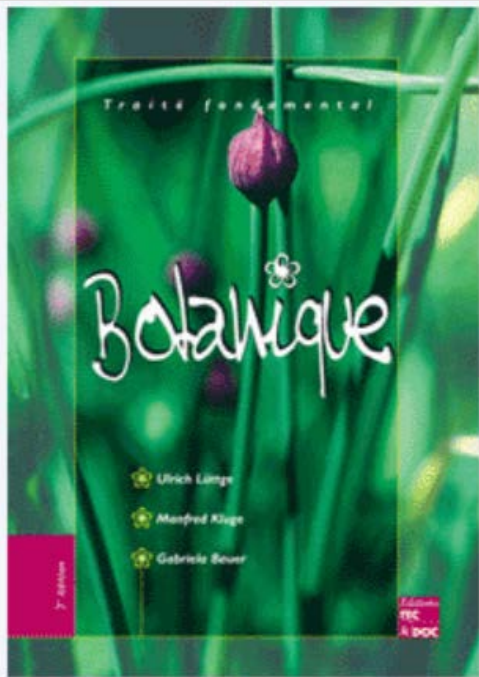


1. Introduction générale - Organisation du cours

Organisation	Horaire
Structure: 18 heures de cours, 5 demi-journées de TP, 1 excursion d'une journée.	
Cours et TP	mercredi 12 mars – mercredi 14 mai 2025
Excursion	mercredi 16 avril 2025
Langue d'enseignement: Français	
Sites d'enseignement: Neuchâtel, cours & TP: salle A317 & D019-D023 Lausanne, cours & TP: Geopolis, salle 2129 & Amphipôle salle 471	
Horaire: http://planif.unine.ch/pidho	
Évaluation: avec note, sur la base d'un rapport synthétique de TP; délai de rendu:	vendredi 06 juin 2025
Crédits: 3	

Sommaire du cours	Périodes (estimation)
1. Introduction générale.	0.5
2. La cellule végétale dans son contexte environnemental.	2.5
3. Les tissus végétaux: un échelon fondamental de l'adaptation à l'environnement.	3.5
4. La racine : de la cellule aux interactions plante-sol.	3
5. Écologie et structure:	
5.1. Structure anatomique et potentiel écologique.	2.5
5.2. Changements structuraux en réponse aux contraintes environnementales.	1.5
6. Stress environnemental et réactions structurales:	
6.1. Symptômes visibles et changements structuraux.	1
6.2. La sénescence et ses conséquences au niveau structural	1
6.3. Bioindication à l'aide de marqueurs structuraux.	2
7. Conclusions.	0.5
Total:	18

1. Introduction générale – Ouvrage de référence



Botanique : Traité Fondamental (3ème Édition)
Ulrich LÜTTGE, Manfred KLUGE et Gabriela BAUER
Éditions TEC & DOC, © 2002 - 600 p - SBN 2 7 430 0412 6
« Plébiscité par l'enseignement universitaire, cet ouvrage en est à sa troisième édition mise à jour. Ce traité fondamental s'est imposé grâce à son approche originale de l'enseignement de la botanique, en proposant l'évolution de la vie comme fil conducteur. Il permet ainsi une synthèse claire et structurée de toutes les disciplines classiques de la botanique : morphologie, physiologie, systématique, écologie et phytogéographie. Le plan général de l'ouvrage va dans le sens d'une intégration croissante des différents éléments : molécules, cellules, organes, organismes, communauté, milieu, avec une attention particulière portée aux phénomènes d'adaptation des végétaux à leur milieu. La dernière partie est consacrée à une réflexion sur l'homme et son environnement, prenant en compte les progrès scientifiques et notamment l'apport du génie génétique en agronomie. Conçu dans un but résolument pédagogique, ce traité présente un texte vivant, de nombreux exemples approfondis, des encadrés complémentaires, des bibliographies détaillées, un index très développé et une iconographie très riche. »

Disponibilité en bibliothèque:

UNIL (RENOUVAUD):

BCUL site Unithèque

Available, magasins ; **TVB 13536**

BCUL site Unithèque

Available, magasins ; **BMA 3441 58**

BCUL site Unithèque

Out of library, biologie ; **TVB 11188 58**

Musée et jardins botaniques

Available, Musée botanique ; **58 MBD.0220**

UNINE (<https://registration.slsp.ch>):



📍 Bibliothèque de la Faculté des sciences
Disponible, NE FS/biologie : libre-accès ; QK45.2 26

📍 Bibliothèque de la Faculté des sciences
Disponible, NE FS/biologie : libre-accès ; QK45.2 26b

1. Introduction générale - TP

Travaux pratiques

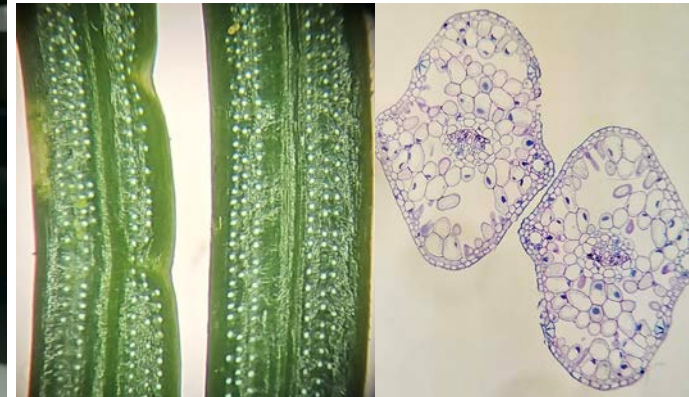
Demi-journées

1. De la plante à la cellule: caractéristiques structurales et fonctionnalités.	2
2. Structure des tissus de la tige: diversité anatomique chez les arbres et croissance secondaire.	1
3. Structure des tissus racinaires: allocation des métaux lourds et ontologie racinaire.	1
4. Structure des tissus foliaires: bioindication du stress biotique et abiotique.	1
Total:	5

Remarque: les observations morpho-anatomiques sont documentées avec le téléphone portable et un adaptateur transférable entre loupe et microscope



Morphologie et structure des aiguilles d'épicéa (TP1)



les photos doivent être éditées avant utilisation (e.g. cadrage, contraste et luminosité)

Les adaptateurs sont mis à disposition lors de chaque TP. Le protocole de prise de vues avec adaptateur sera transmis avec l'archive TP1, contenant le manuel de TP, les microphotographies et la documentation scientifique.

1. Introduction générale - Excursion



Excursion du mercredi 16 avril 2025 - Recherches au WSL sur les interactions Sol-Végétation

Organisation de la journée (programme provisoire)

09:55 arrivée du train à Birmensdorf

~10:15 arrivée au WSL (entrée principale – environ 15 min à pied)

10:20-11:30 Recherches à long terme sur les écosystèmes forestiers LWF

<https://www.wsl.ch/fr/foret/evolution-et-suivi-de-la-foret/recherches-a-long-terme-sur-les-ecosystemes-forestiers-lwf.html>

Dr. Anne Thimonier Rickenmann, Sols forestiers et biogéochimie

11:35-12:40 lunch (cafétéria du WSL)

12:45-13:30 Le laboratoire phytosanitaire du WSL

<https://www.wsl.ch/fr/a-propos-du-wsl/installations-experimentales-et-laboratoires/laboratoires/le-laboratoire-phytosanitaire/>

Dr. Simone Prospero, Phytopathologie

13:40–14:20 Impacts de la sécheresse en forêt

<https://www.wsl.ch/fr/projets/heat-keeping-it-cool-in-a-hotter-world/>

Janisse Deluigi, Doctorante, Écologie des communautés & Écologie végétale fonctionnelle, UNINE & WSL-site de Lausanne

14:30-16:00 Protection physique des sols en forêt

Marco Walser, collaborateur technique, Sols forestiers et biogéochimie

16:00-16:30 Conclusions et fin de l'excursion

dès 16:30 transfert sur la gare de Birmensdorf et retour en Suisse romande

Équipement

Selon la météo (journée en extérieur)

Numéro de téléphone en cas de problème: 079/846 12 55

1. Introduction générale - Préambule et quelques définitions

Déformation de la couronne d'un tilleul (*Tilia platiphylllos*) en réponse à une exposition à des embruns salins, causant des nécroses des feuilles et des pousses. Île de Spiekeroog, Allemagne, octobre 2015



Anatomie et écologie fonctionnelles, une définition:

Étude des rôles et des fonctions des organismes dans les écosystèmes, en relation avec leurs caractéristiques morpho-anatomiques

➤ Remarques préliminaires:

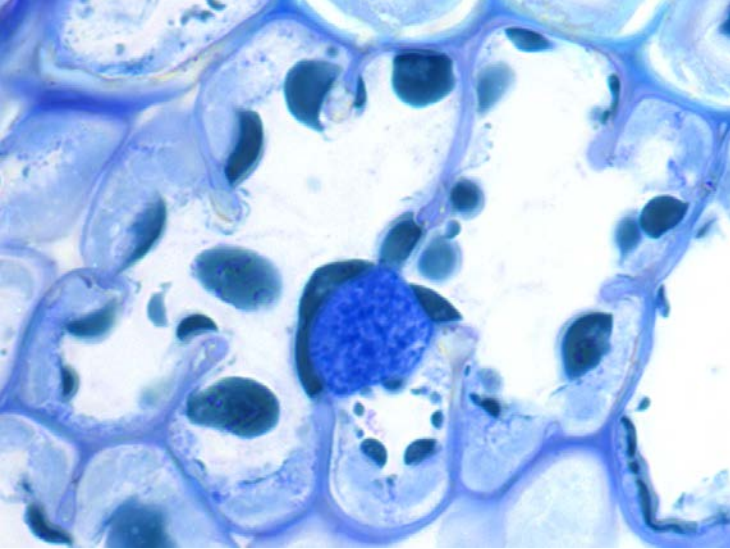
- De la cellule à la plante entière, les végétaux supérieurs présentent diverses caractéristiques (physiologiques, morphologiques, anatomiques, etc.) appelées aussi **traits fonctionnels**
- Non seulement la physiologie des plantes mais encore leur morphologie et leur anatomie varient en réponse aux **contraintes environnementales**.
- Les traits fonctionnels sont **indicateurs** de l'état physiologique des plantes mais aussi des contraintes environnementales. On peut donc les utiliser pour faire de la **bioindication**, à la fois des effets des agents de stress mais aussi de la tolérance/résilience des écosystèmes.

➤ Objectifs principaux du cours:

- Compléter les notions de botanique et de floristique acquises dans la spécialisation avec des connaissances concernant le fonctionnement des végétaux supérieurs et des écosystèmes terrestres
- Développer la compréhension des interactions plante-environnement par la démonstration des effets différenciés de contraintes environnementales ou de facteurs de stress biotique et abiotique sur la structure et le fonctionnement des végétaux supérieurs.



Croissance et survie en conditions hivernales: mise en place de pigments photo-protecteurs (anthocyanes) chez l'hellébore fétide (*Helleborus foetidus*). Haut plateau du Vercors, France, février 2017

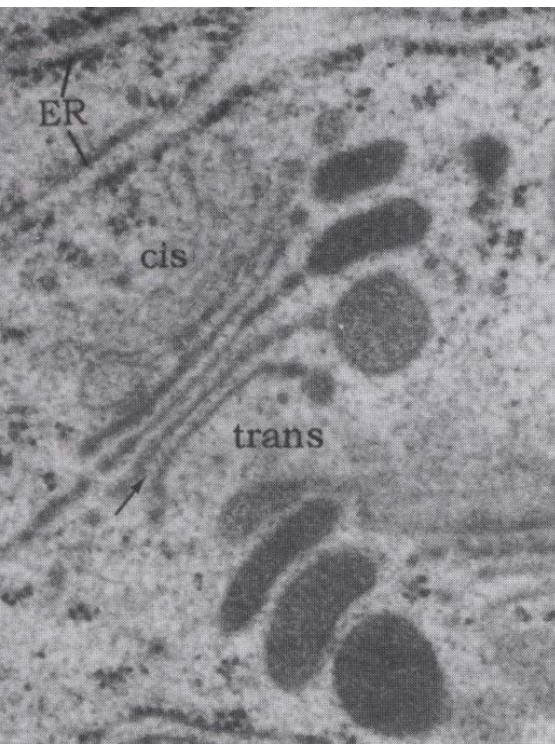


Cellule de
mésophylle
dans une
aiguille de pin

Appareil sécréteur
dans une cellule
productrice
d'huiles
essentielles

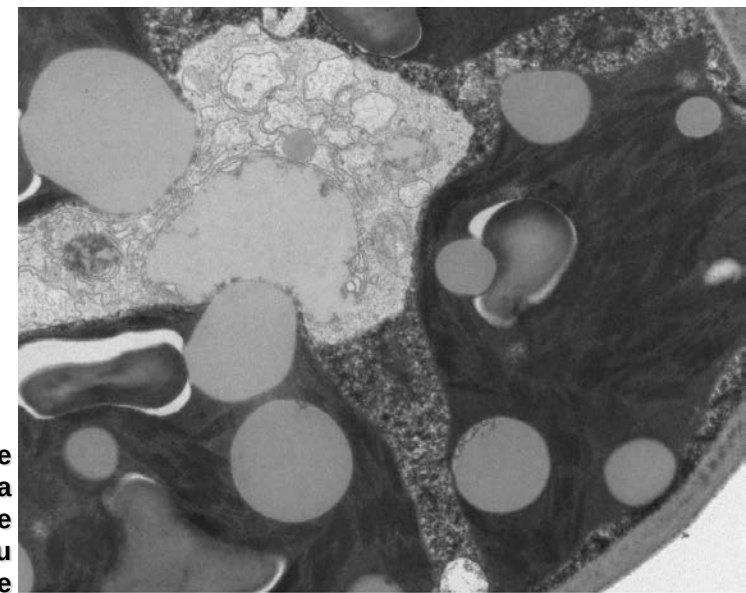


2. La cellule végétale dans son contexte environnemental



Dictyosome en phase
de production de
mucilage dans l'apex
d'une racine en
croissance

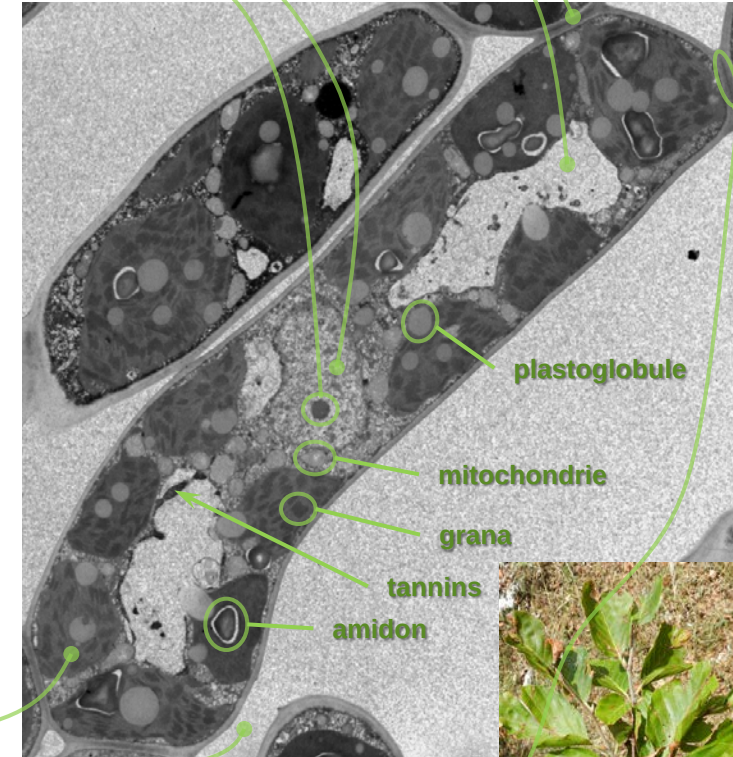
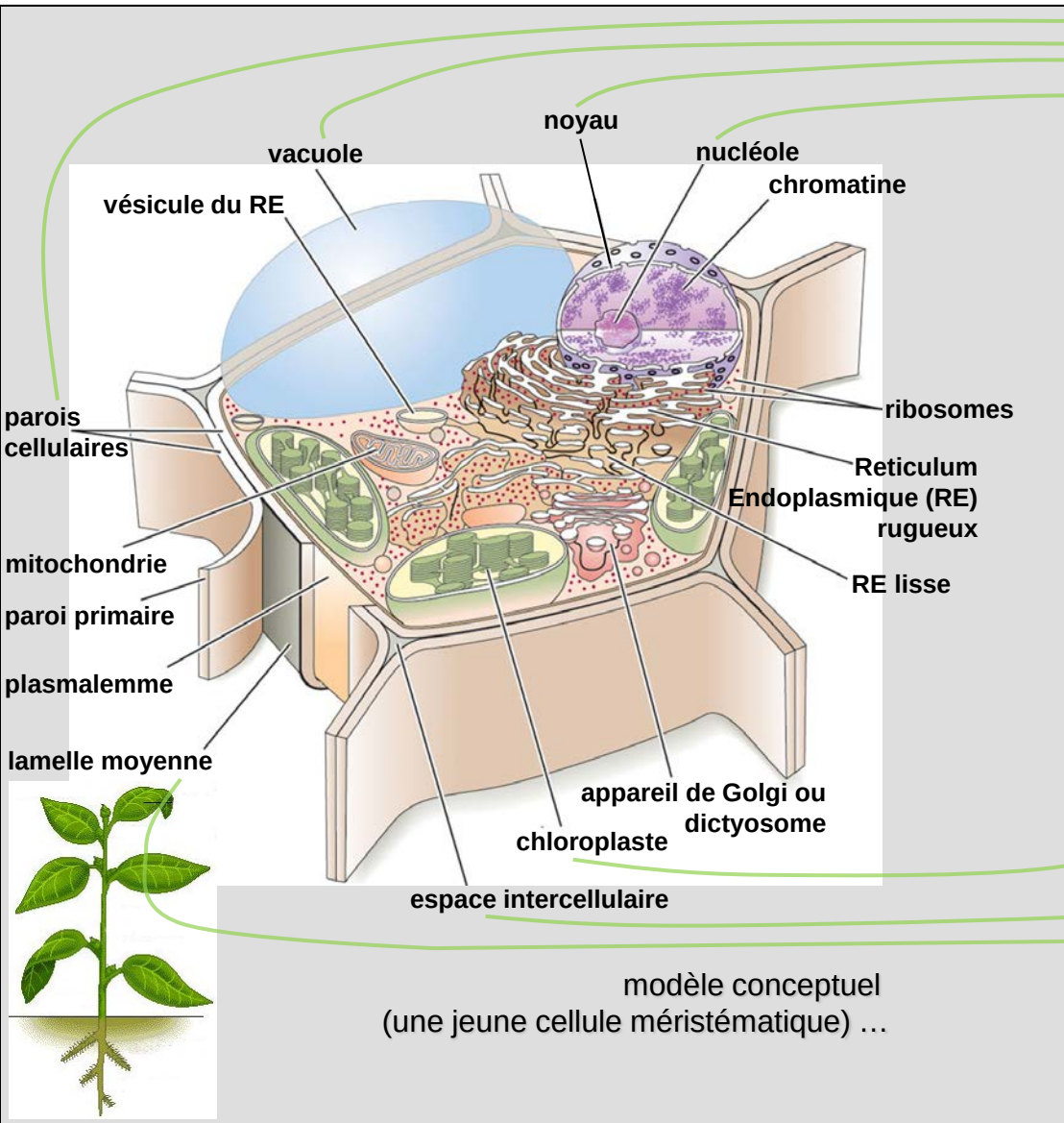
Excrétion de
plastoglobules dans la
vacuole d'une feuille de
hêtre échantillonnée au
mois de septembre



Microscope Magnification: 11500x
Filename: 415 sy7 lppal1,2 det13
16.12.2009

1 μ m

2. Encart no. 1: La cellule: unité structurale fondamentale chez les végétaux supérieurs



... et réalité environnementale
(cellule assimilatrice
de mésophylle foliaire
en fin d'été)



Par rapport au schéma classique (à gauche), les cellules constitutrices des plantes dans les communautés végétales sont façonnées par les contraintes environnementales. Leurs structures reflètent l'activité et l'âge physiologiques de l'organe végétal jusqu'au moment du prélèvement (fin de l'été dans le cas de la cellule de mésophylle foliaire de hêtre, à droite).

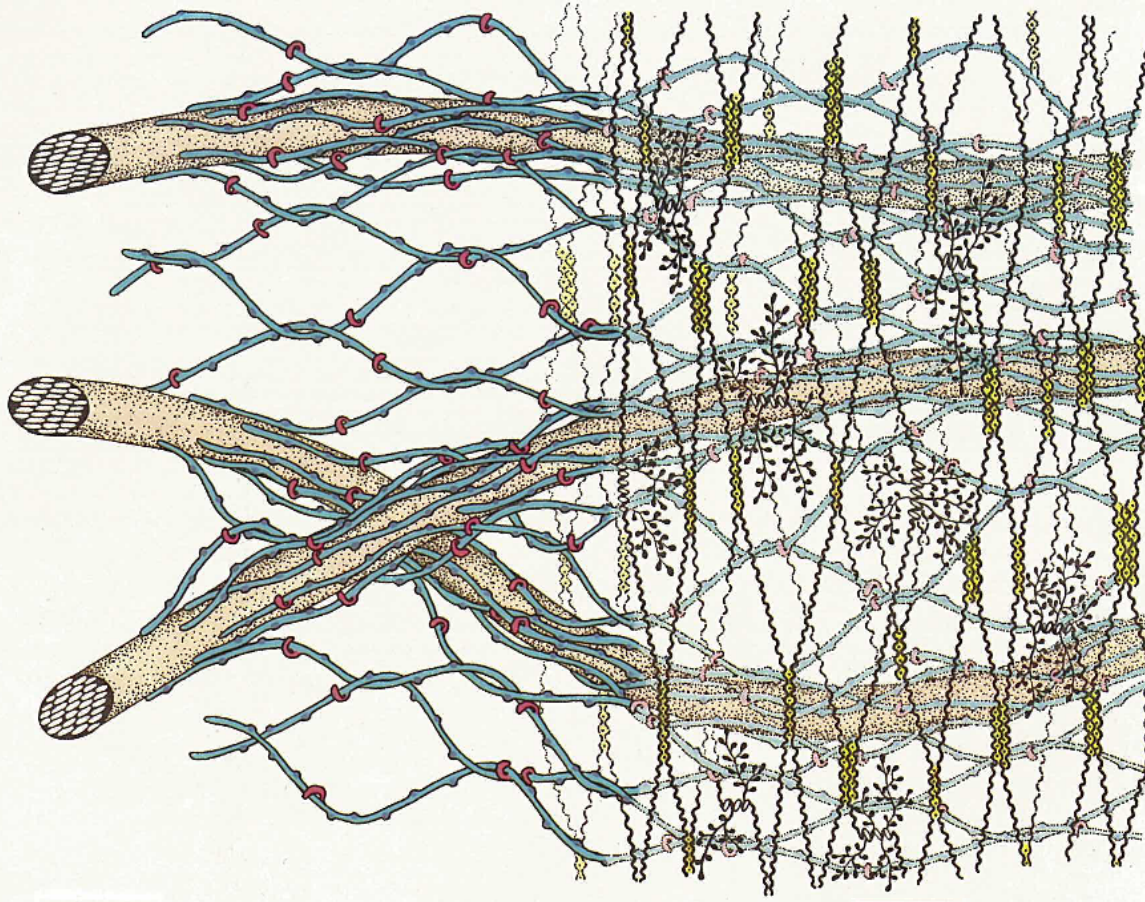
2. Encart no. 2: la cellule végétale versus la cellule animale

	Cellule végétale (taille moyenne)	Principales fonctions chez les végétaux	Cellule animale
Forme:	polygonale (10-100 µm)		elliptique 10-30 µm
Paroi:	présente	rigidité/turgescence, défense, échanges sève minérale (apoplaste)	absente
Cils et flagelles:	absents à de rares exceptions près	-	présents
Plasmalemmes:	présent (épaisseur: 9 nm)	compartimentation, régulation des échanges, synthèses enzymatiques	présent
Cytoplasme:	présent	synthèse enzymatiques, échanges intra-cellulaires	présent
Noyau:	présent (7.5-10 µm)	hérédité, régulation et expression génétique, différenciation cellulaire et activité métabolique	présent
Centrioles:	absents	-	présents
Vacuole:	une ou quelques vacuoles occupant jusqu'à 50-90 % du volume cellulaire	turgescence (croissance, nasties), stockage (eau, éléments minéraux, sucres), recyclage et détoxification cellulaire	quelques vacuoles de faible taille.
Lysosomes:	vacuoles à fonctions catalytiques	spécialisation lytique vacuolaire	présents
Plastides:	présents (2-5 µm)	synthèse et stockage de l'amidon, synthèse des acides gras, synthèse et accumulation de pigments (caroténoïdes)	absents
Chloroplastes:	présents (2-5 µm)	photosynthèse, synthèse et stockage transitoire de l'amidon	absents
Mitochondries:	présentes (0.2-1 x 3-10 µm)	catabolisme et énergie cellulaire (chimique et chaleur), métabolites primaires	présentes
Peroxisomes:	présents (3 µm)	photorespiration, détoxification cellulaire	présents
Réticulum endoplasmique	présent (épaisseur: 0.5 µm)	flux de membranes, transports intra- et inter-cellulaires, assemblage des protéines membranaires et sécrétrices, synthèse et maturation de lipides et phénols	présent
Dictyosome:	présent (1x1 µm)	maturation des substances en provenance du RE, production de mucilages pariétaux et sécrétés	présent
Ribosomes:	présents (25 nm)	traduction du mRNA en protéines (en liaison avec le RE)	présents
Microtubules / Microfilaments:	présents (diamètre: 20nm / 7 nm)	squelette cellulaire, cyclose	présents

spécificités fonctionnelles végétales: **immobilité et rigidité** / **autotrophie**

2. La paroi cellulaire (I): arrangement moléculaire

modèle de paroi primaire valable pour la majorité des angiospermes (exception: Poaceae)



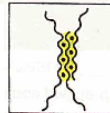
Modèle moléculaire d'un feuillet de la paroi primaire d'une cellule végétale, juste après sa formation dans une cellule d'une zone méristématique. Plusieurs feuillets de ce type sont nécessaires pour former une paroi pecto-cellulosique. Chaque feuillet est formé d'un canvas de microfibrilles de **celluloses** entrelacées de polymères d'**hémicelluloses**. Le tout est inclus dans une matrice de **pectines fibrillaires** et de **pectines branchées**. La densité des points de jonctions entre pectines, laquelle dépend du degré d'estérification des pectines, conditionne la porosité de la paroi et donc les possibilités d'échange entre la cellule et le milieu ambiant. Cette porosité joue également un rôle crucial dans les phénomènes de conduction de la sève brute (chapitre 5.1). L'obturation des pores de la paroi suite à la spécialisation fonctionnelle de la cellule (e.g. subérisation, lignification) cause la mort cellulaire, par imperméabilisation et isolation du milieu ambiant.



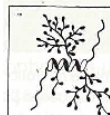
microfibrille de **cellulose**



polymères d'**hémicelluloses** (xyloglucanes)



matrice de **pectines fibrillaires** partiellement estérifiées, avec une zone de jonction par des ions Ca^{2+}



pectines branchées de type rhamnogalacturonanes I (RG-I), avec chaîne latérale d'arabinogalactanes

2. Encart no. 3: La paroi cellulaire (II): fonctions physiologiques et croissance

extension de la paroi primaire pendant l'élongation cellulaire

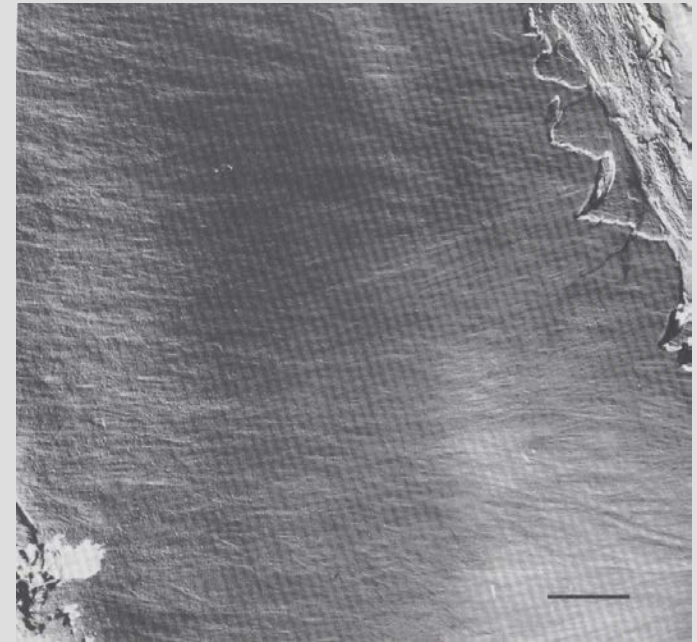
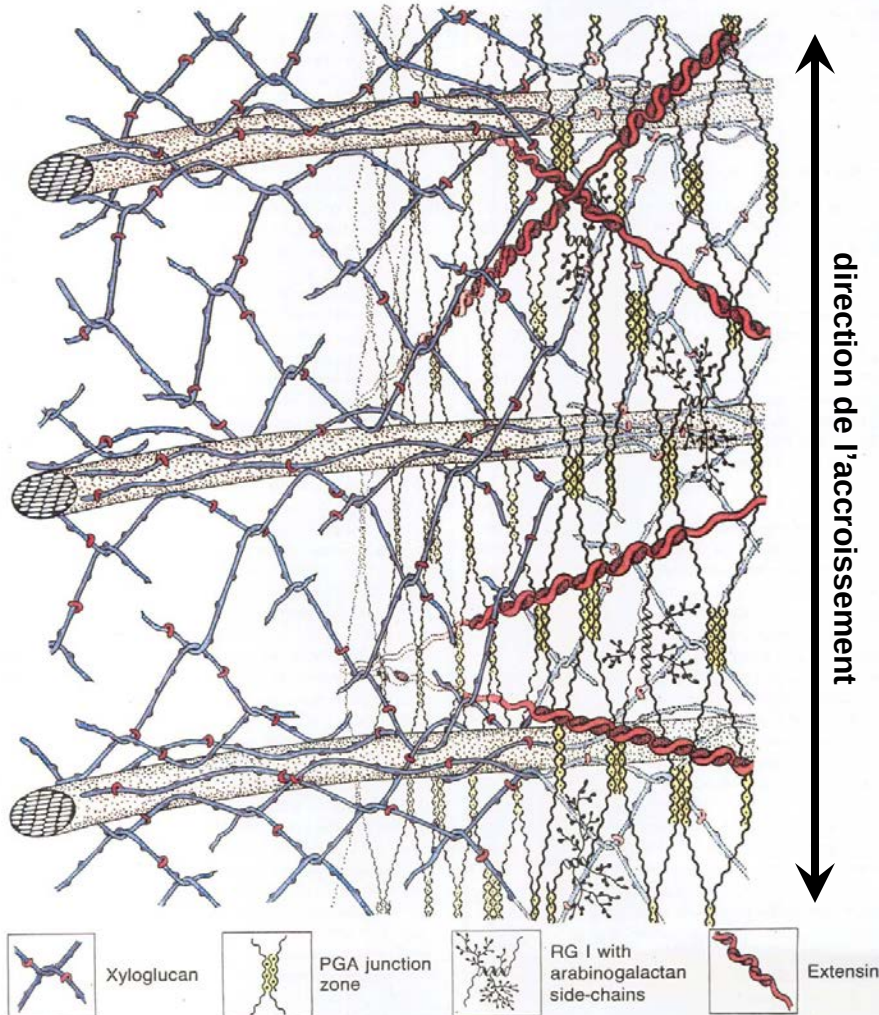


Figure 3. To reinforce a cylindrical cell against radial strain, the cellulose microfibrils are laid down in a transverse or shallow helical orientation around the cell. A freeze-etch replica of a growing root cell shows the imprint of the microfibrils through the outer leaf of the plasma membrane. By analogy, the microfibrils are arranged like the thin wires of a loose spring. While this reinforces the spring radially, there is little resistance to being pulled apart in the longitudinal axis. The long axis would still be subjected to enormous tensions of several thousand bar (Figure 2) and would require interlocking molecules to keep the cellulose microfibrils from stretching. The dissociation of these interlocking molecules governs the rate and extent of cell elongation. Bar = 200 nm. Photo courtesy of R. Malcolm Brown, Jr, The University of Texas at Austin from Mueller and Brown (1980), with permission of the Rockefeller University Press.

référence: Carpita et Gibeaut (1993). The Plant Journal 3, 1-30.

figure 7. The expanding type I cell wall. A model of possible alterations in structure that first permit microfibril separation and then lock them into form. Microfibrils of a single stratum align parallel in a helical arrangement around elongating cells. Cleavage or dissociation of xyloglucans by 'growth-relevant' hydrolases (or transglycosylases) loosens the microfibrils which separate in the long axis of the page. After displacement, extensin molecules, inserted radially, interlock the separated microfibrils to cease further stretching. Additional proteins, such as RPRPs, may also be inserted to cross-link extensin, forming a heteropeptide network (Ye and Vamer, 1991). Formation of intramolecular covalent bonds among the individual wall proteins signals the end of elongation.

2. La paroi cellulaire (III): composition structurale et réactivité

2. Encart no. 4: La paroi secondaire

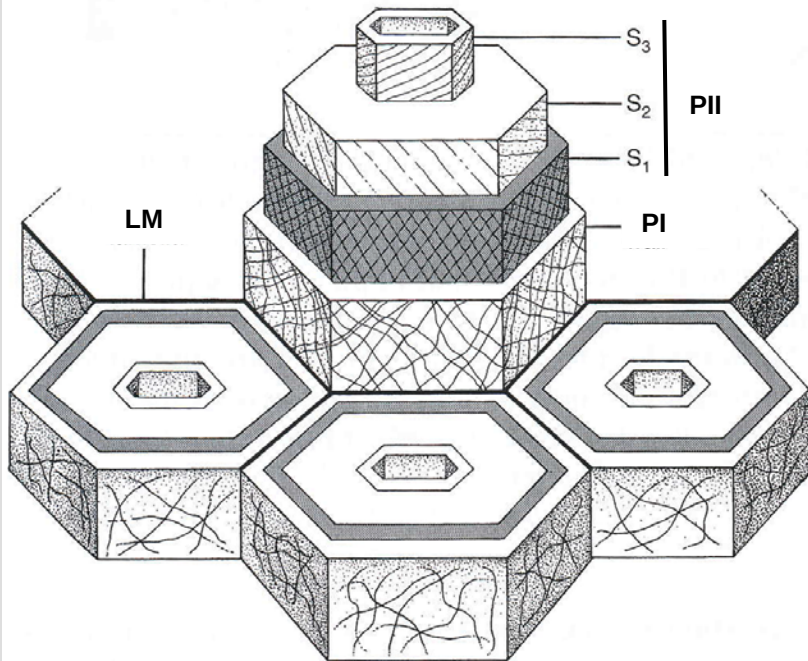
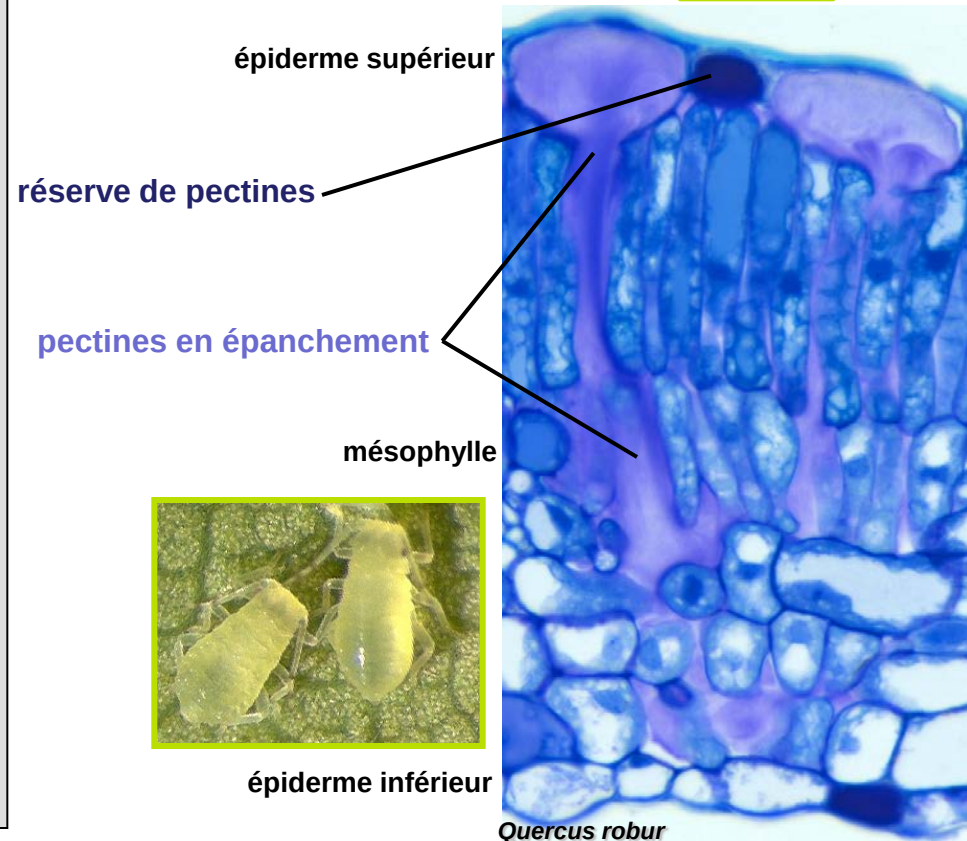


FIGURE 4.8 The layers of secondary cell walls. Diagram showing the organization of the cellulose microfibrils and the three layers (S1, S2, S3) of the secondary wall (PII). The different orientations of the three layers strengthen the secondary wall. (From Raven et al., 2005.)

référence: Evert (2006). Esau's plant anatomy. Wiley, Hoboken.

Épanchement défensif de pectines dans l'espace intercellulaire foliaire, en réponse à de l'herbivorie par des **puçerons**



couches pariétales dans le xylème

torus (épaississement de la PI dans les ponctuations des trachéides)
paroi secondaire (PII)

paroi tertiaire (PIII)

paroi primaire (PI)

lamelle moyenne (LM)

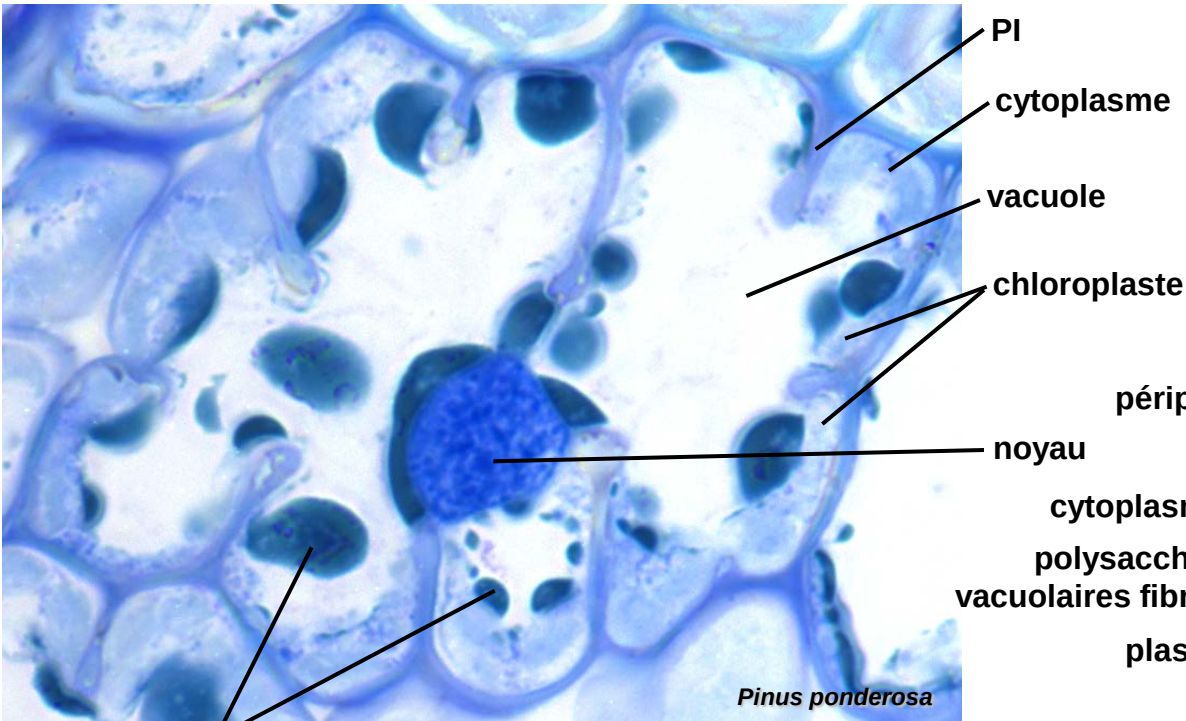
Pinus ponderosa

Quercus robur

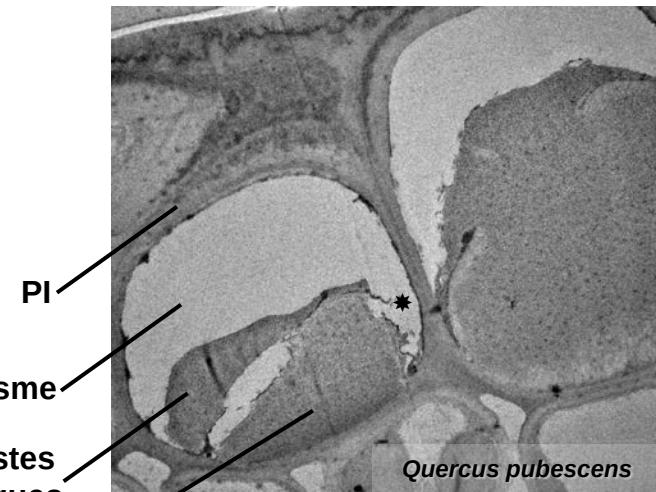


2. Le contenu cellulaire et la membrane plasmique

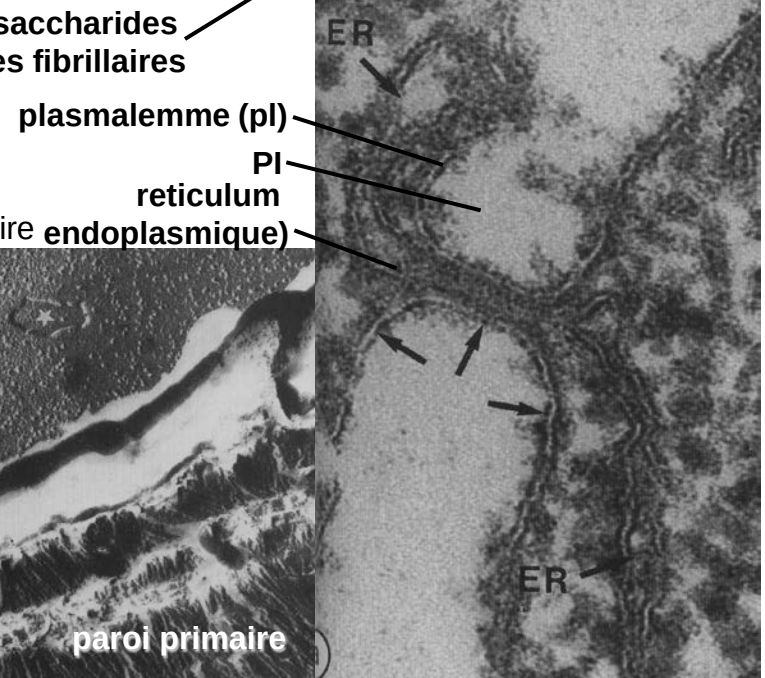
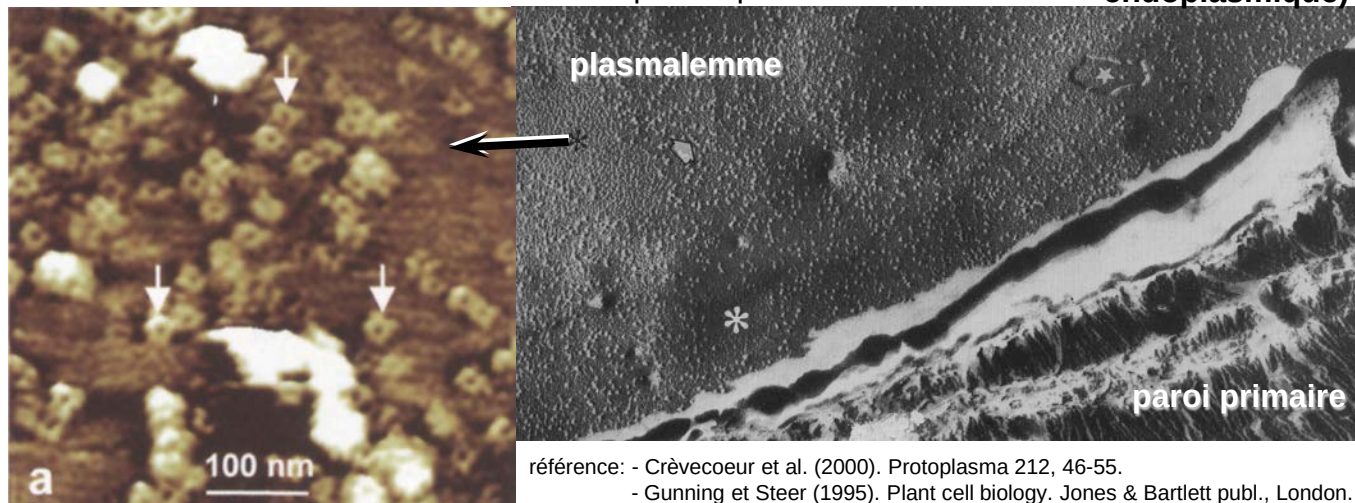
contenu cellulaire d'une cellule de mésophylle foliaire



la rupture de la membrane plasmique (*): un indicateur de mort cellulaire (cellules à mucilage épidermiques)

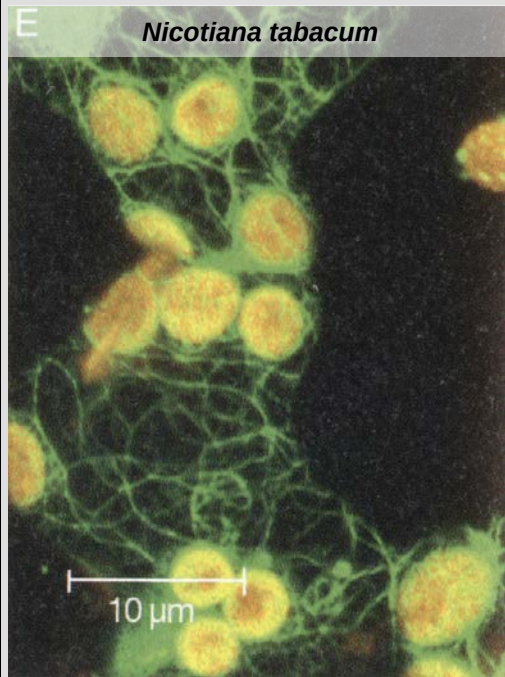


polyphénols (tannins condensés) membrane plasmique et continuité cellulaire



référence: - Crèvecoeur et al. (2000). Protoplasma 212, 46-55.
- Gunning et Steer (1995). Plant cell biology. Jones & Bartlett publ., London.

2. Encart no. 5: le cytoplasme

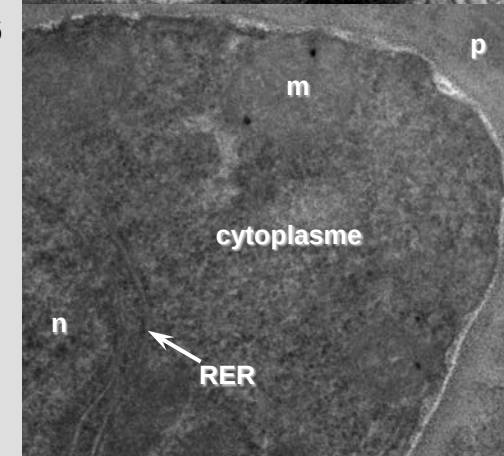
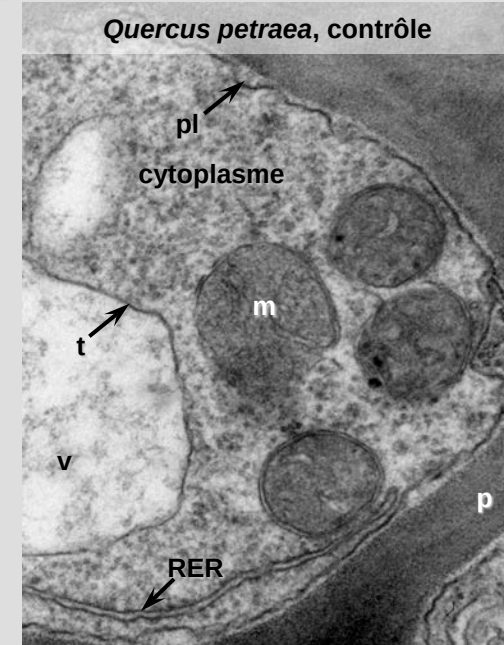


cytosquelette (vert) et chloroplastes (orange) dans une cellule de mésophile

référence:
Lüttge et al. (2005). Botanik. Wiley-CH, Weinheim

- Espace du protoplasme dans lequel se meuvent les organelles.
- Localisation en périphérie cellulaire, délimité par le plasmalemme (pl) et le tonoplaste (t).
- Le cytoplasme est composé pour 20% de son poids de protéines (essentiellement des enzymes). Il est structuré par le cytosquelette et animé par la cyclose. pH ~ 7.
- Le cytosquelette: réseau formé de micro-tubules et de micro-filaments, associé aux organelles et régulant l'architecture cellulaire et probablement aussi le mouvement cellulaire (cyclose).
- Cyclose: mouvement des organelles dans la cellule ($0.2-0.6 \text{ mm min}^{-1}$).
- Le cytoplasme est le site de multiples processus physiologiques (synthèse des nucléotides ou des acides aminés), dont certains à cheval sur les organelles (ex: avec le reticulum: transcription du mRNA; avec les mitochondries: dégradation oxydative des sucres).

cytoplasme normal d'une cellule de phloème

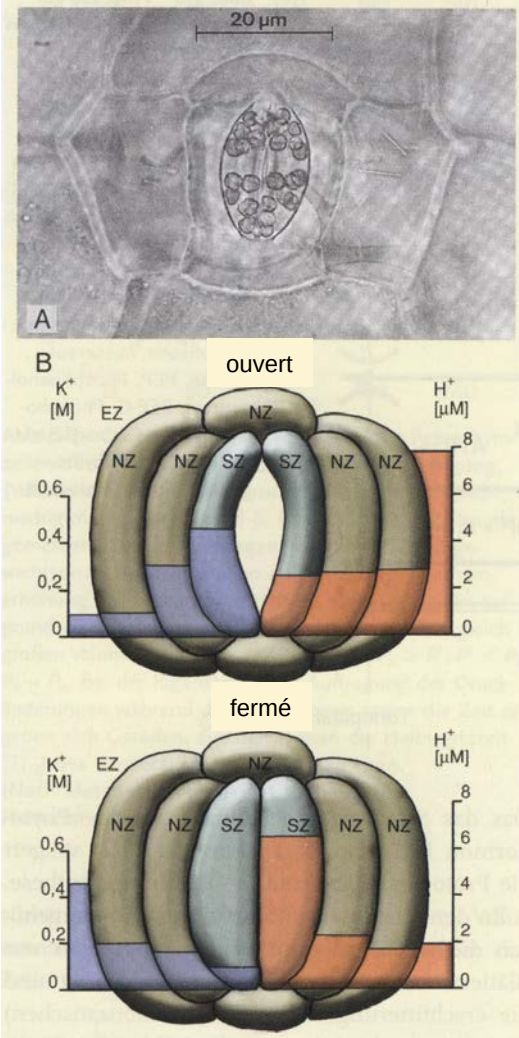


cytoplasme condensé d'une cellule nécrotique de phloème

m: mitochondrie; n: noyau; v: vacuole; RER: reticulum endoplasmique rugueux; p: paroi; pl: plasmalemma; t: tonoplaste

2. Le vacuome: contributions à l'homéostasie cellulaire

contrôle de la turgescence cellulaire



Autophagie et adaptation environnementale:
réarrangement de la machinerie cellulaire / récupération de substrats carbonés et de nutriments / adaptation osmotique / détoxification / sénescence

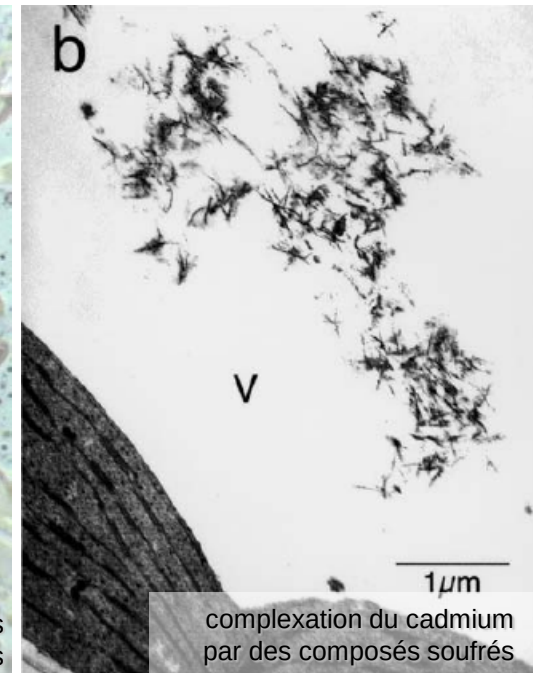
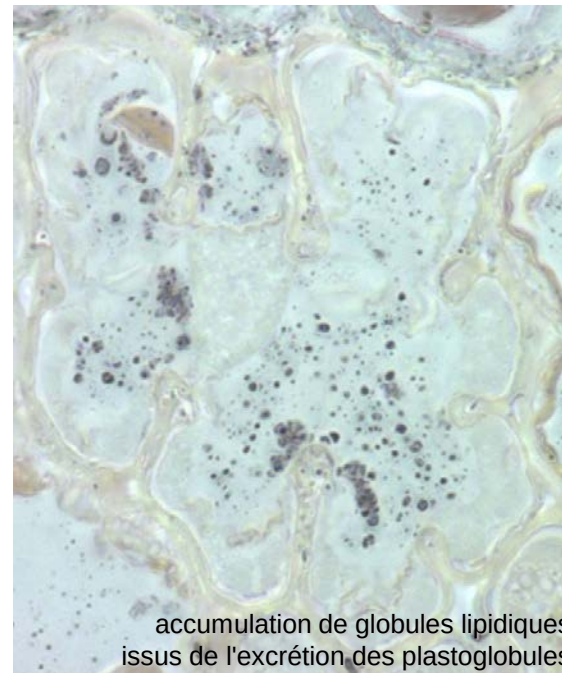
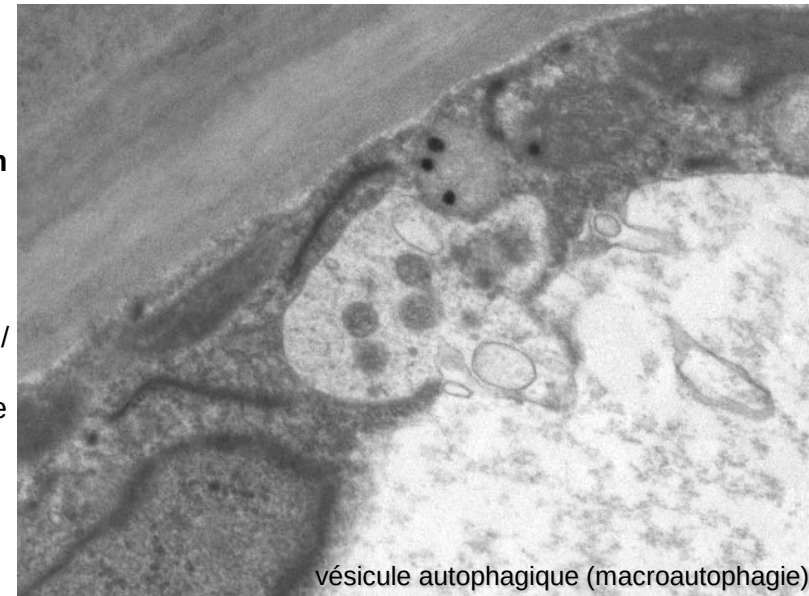
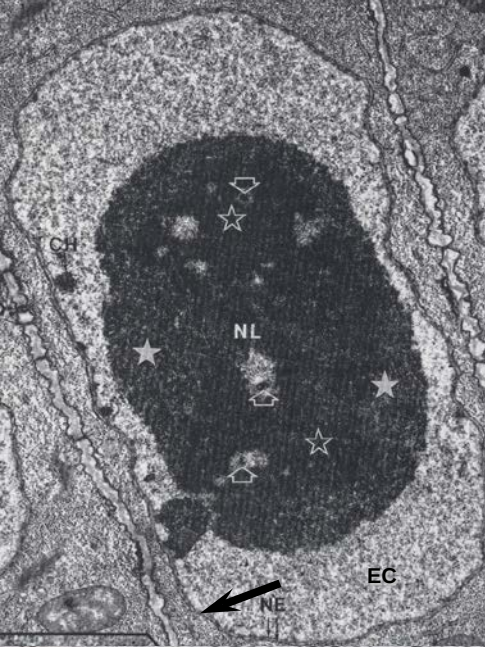


Fig. 5-9 (A) Appareil stomatique vu de face, chez *Commelina benghalensis*. Les cellules de garde chlorophylliennes sont entourées de cellules annexes. (B) Gradients de K^+ et H^+ (colonnes bleues et rouges dans les cellules) dans l'appareil stomatique de *Commelina communis*, lorsque le stomate est ouvert ou fermé. (Résultats de PENNY und BOWLING, *Planta* 119: 17, 1974; 122: 209, 1975.) EZ, cellule épidermique; NZ, cellule annexe; SZ, cellule de garde.

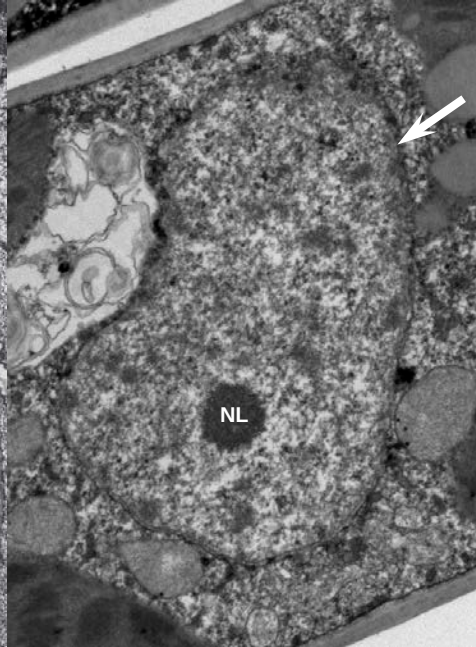
référence: - Lüttge et al. (2005). Botanique. Tec&Doc-Lavoisier
- Carrier et al. (2003). *Planta* 216, 939-950.

2. Le noyau: variabilité structurale et activité physiologique

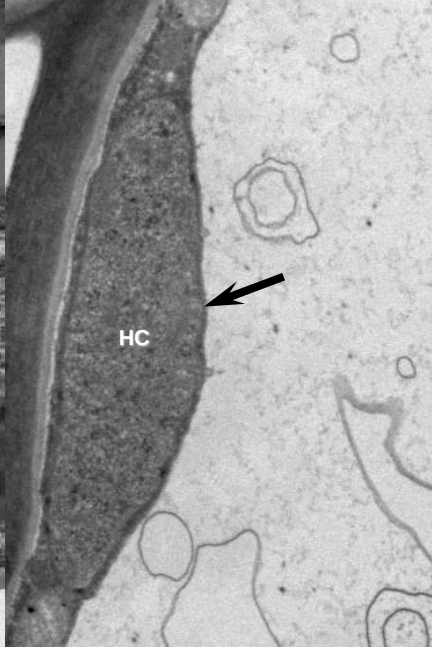
noyau très actif - méristème racinaire



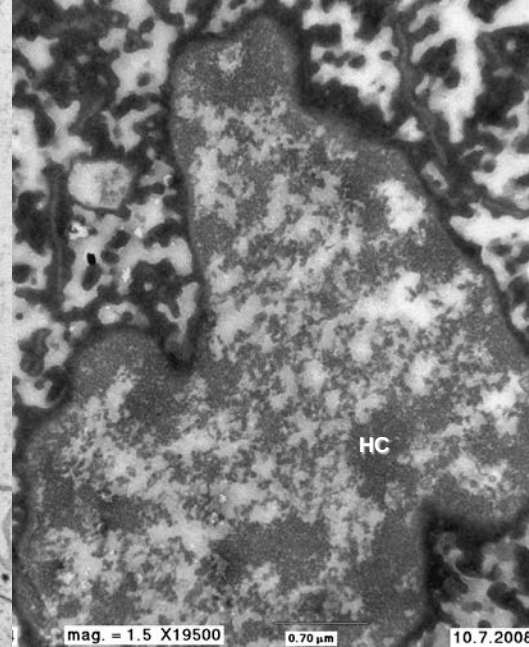
noyau peu actif - parenchyme foliaire



noyau sénescant - épiderme foliaire

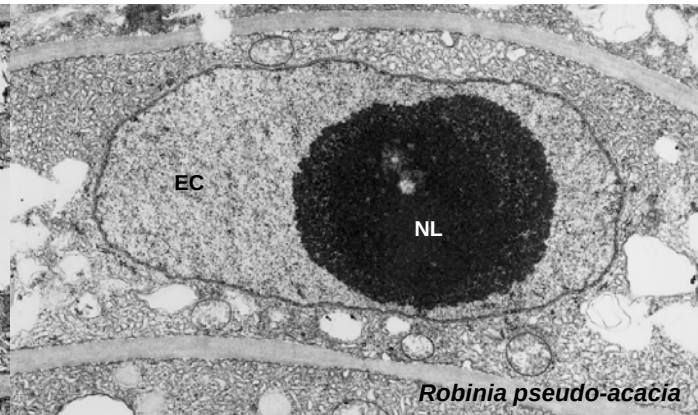
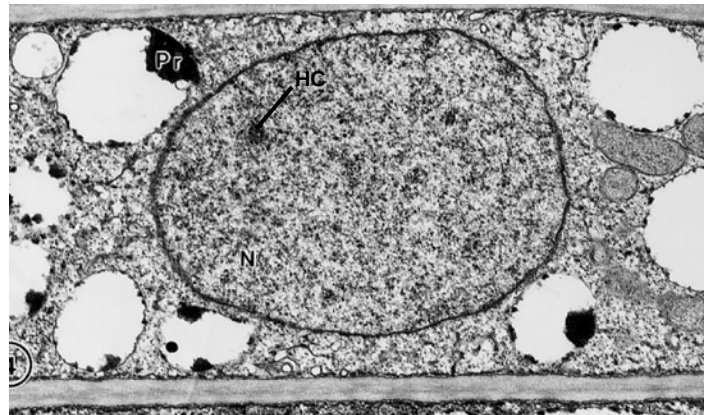
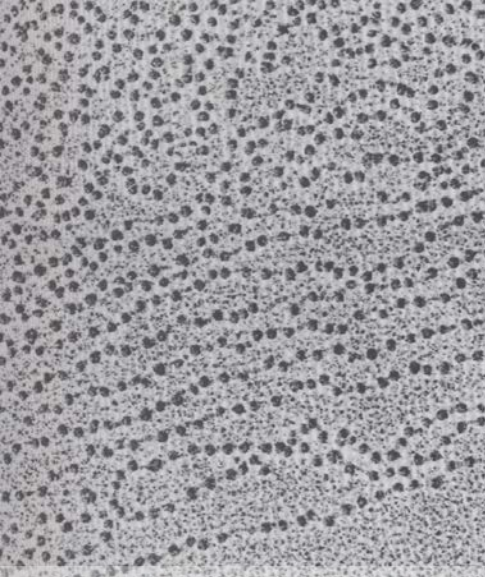


noyau pycnotique (nécrotique) - parenchyme



NL: nucléole, EC: euchromatine, HC: hétérochromatine, flèche: double membrane nucléaire

variabilité structurale du noyau dans le cambium en fonction de l'activité saisonnière:
dormance (24 novembre) réactivation cambiale (3 avril)



Robinia pseudo-acacia

référence: - Gunning et Steer (1995). Plant cell biology. Jones & Bartlett publ., London.
- Farrar et Evert (1997). Trees 11, 191-202.

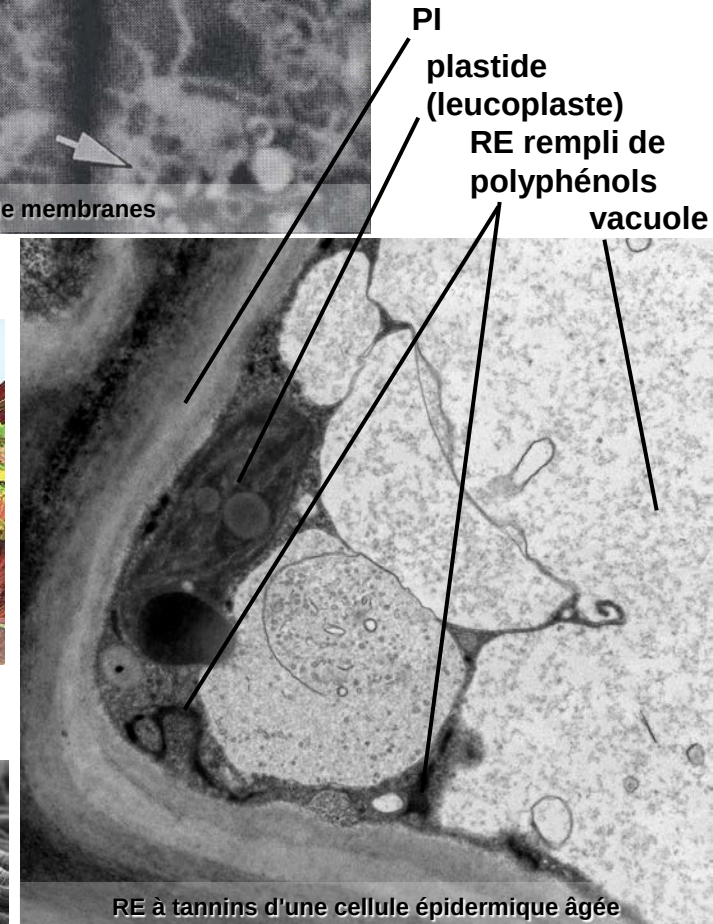
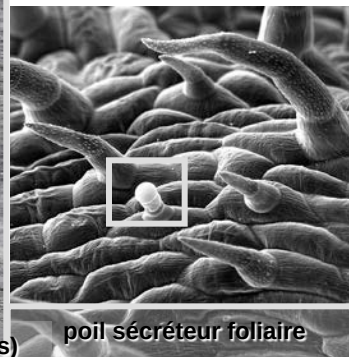
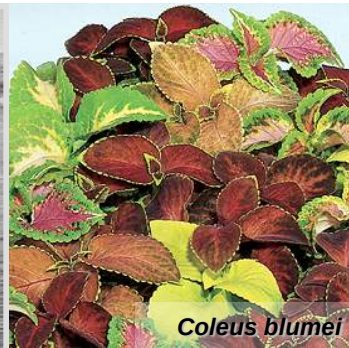
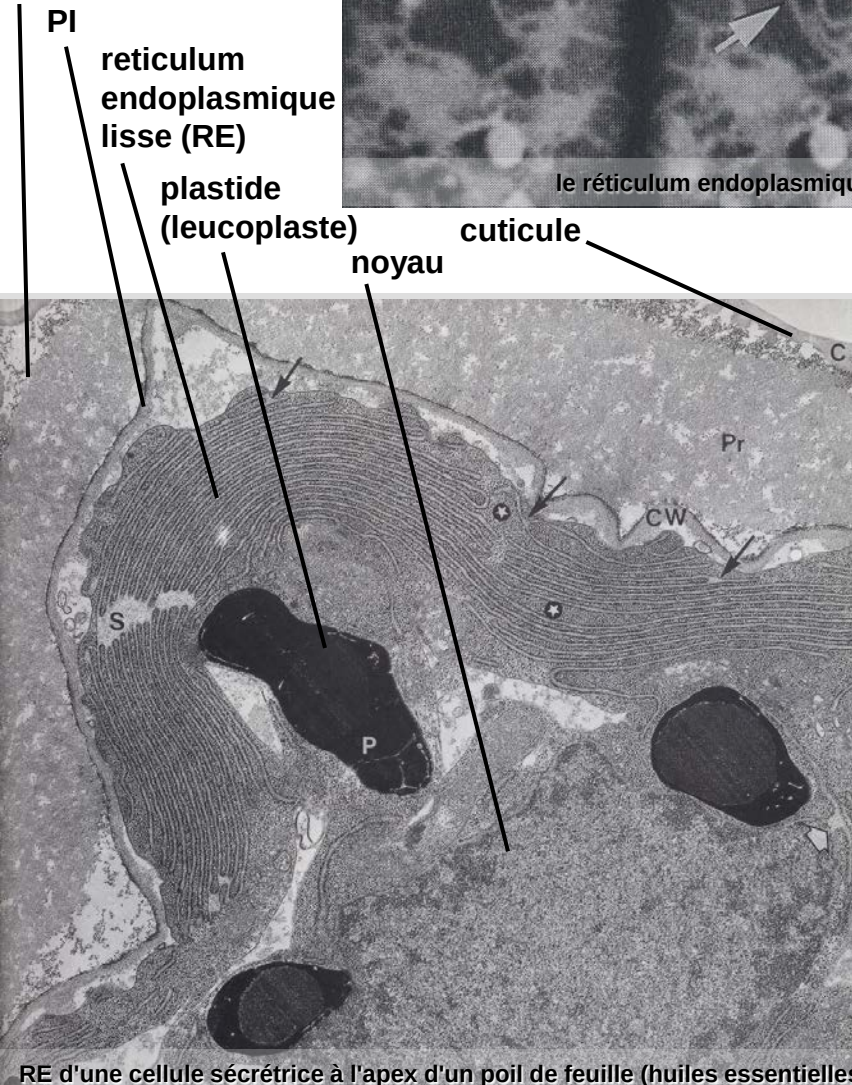
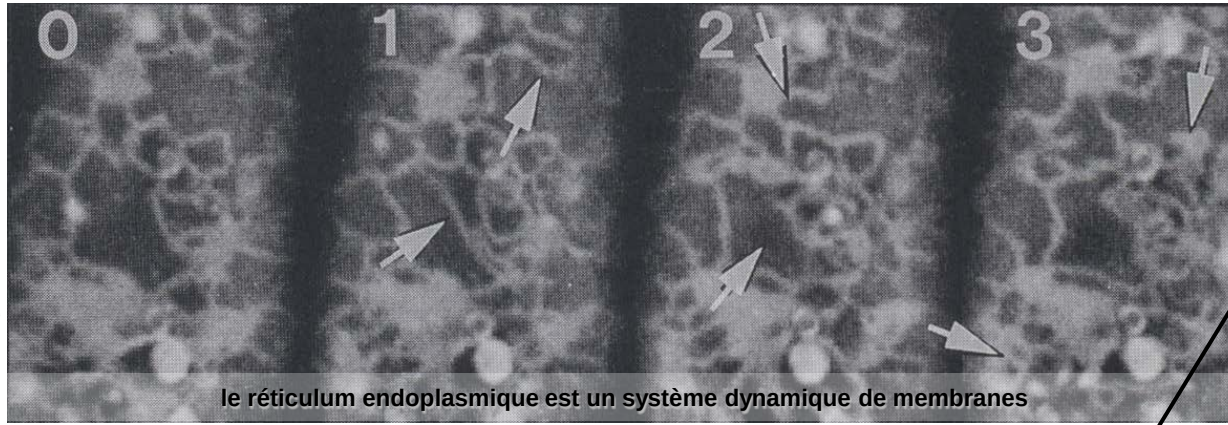


P. Vollenweider
AEF-Cours 2, page 2/18

2. Le réticulum endoplasmique: synthèses biochimiques cellulaires

référence: Gunning et Steer
(1995). Plant cell biology.
Jones & Bartlett publ., London.

produits de sécrétion
(huiles essentielles)



Microscope Magnification: 15000x
Filename: 482 C asy disc1 upEp det12
27.11.2009

0.5 μ m

Zentrum für Mikroskopie und Bildanalyse
Universität Zürich



P. Vollenweider
AEF-Cours 2, 2/19

2. L'appareil de Golgi ou dictyosome

schéma fonctionnel de l'appareil de Golgi. Les vésicules en provenance du RE (transport vesicle) fusionnent avec les cisternes du dictyosome et les produits sont maturés par transfert de vésicules des cisternes *cis* aux cisternes *trans* et au TGN (Trans Golgi Network). Les produits maturés sont exportés vers leurs destinations (e.g. vacuole, paroi) par des vésicules avec une couverture protéique (protein coat) spécifique.

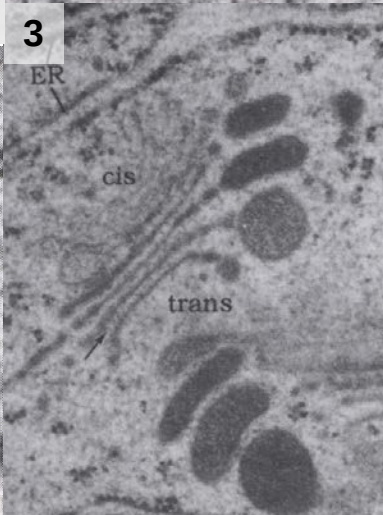
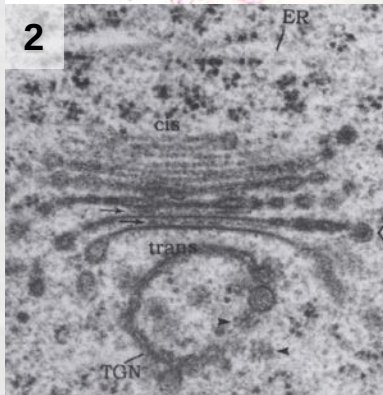
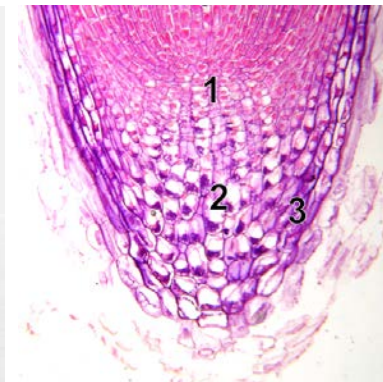
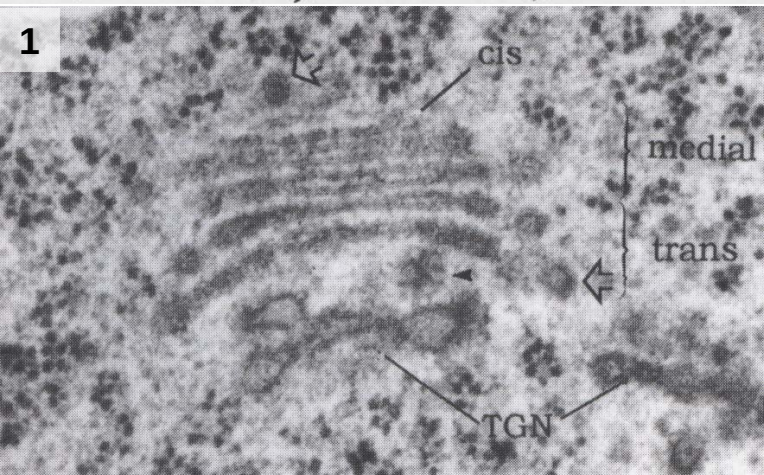
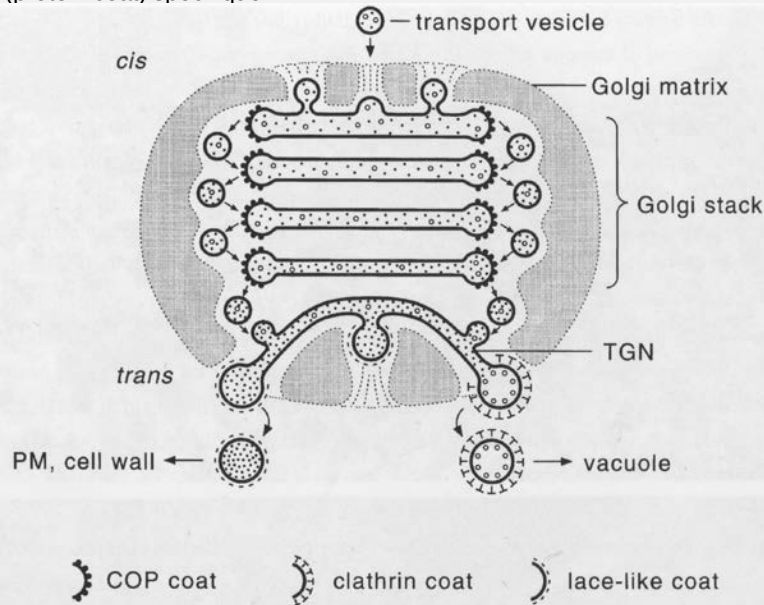


Figure 1-3. Développement ontologique de l'appareil de Golgi dans l'apex racinaire de cellules de tabac. (1) Cellule méristématique. Les cisternes *cis*, *medial*, et *trans* sont peu différenciées. (2) Dans la columelle, les domaines de cisternes montrent de nettes différences structurales. (3) Dans les cellules de la coiffe, les Golgi montrent une différenciation et une spécialisation claires du domaine *trans*, avec production massive de mucilages racinaires et exportation de grosses vésicules en direction des parois. La disparition du TGN indique une réduction des transports vers la vacuole.

les gels polysaccharidiques gluants servant à immobiliser les insectes à la surface des plantes carnivores résultent eux aussi d'une spécialisation fonctionnelle des dictyosomes



Rossolis à longues feuilles (*Drosera anglica*),
Türndliwald/Lu, août 2017

Remarque: que ce soient des mucilages racinaires ou des polysaccharides gluants de poils absorbants, les spécialisations fonctionnelles - i.e. des dictyosomes – contribuent aux **effets environnementaux fonctionnels** par lesquels les végétaux conditionnent leur environnement.

2. Encart no. 6: Les plastides (I): de la diversité structurale en vue de différentes fonctions

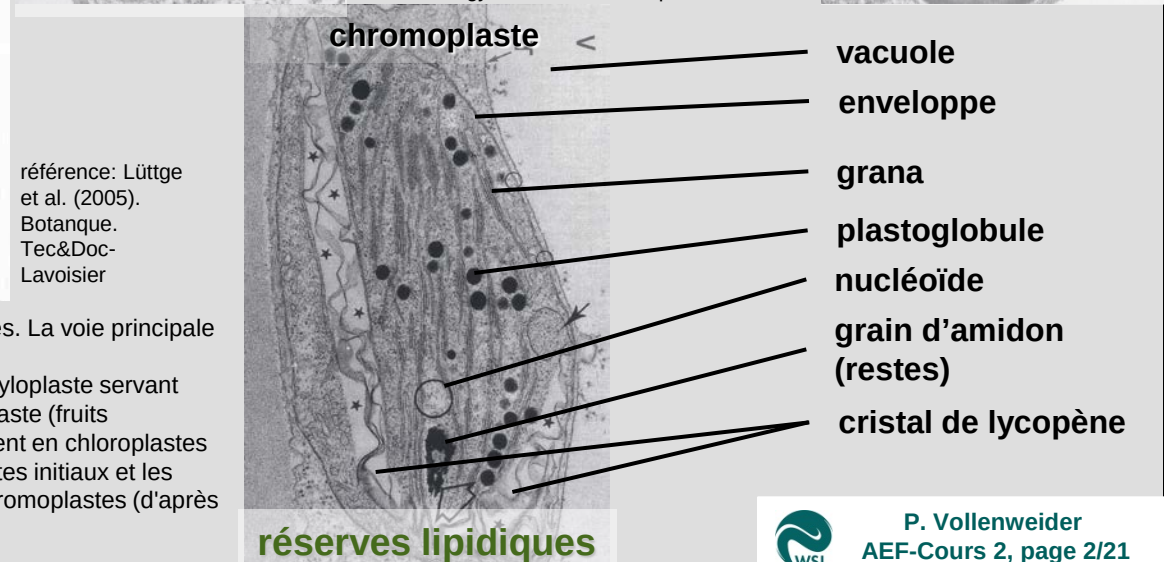
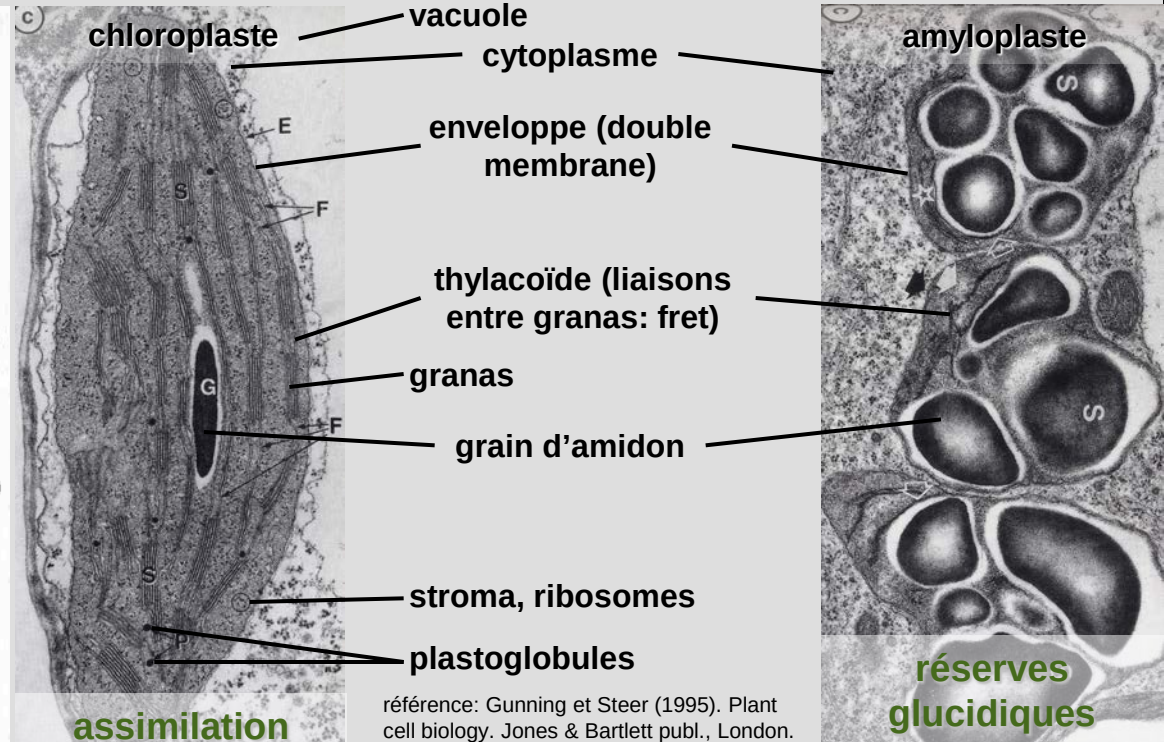
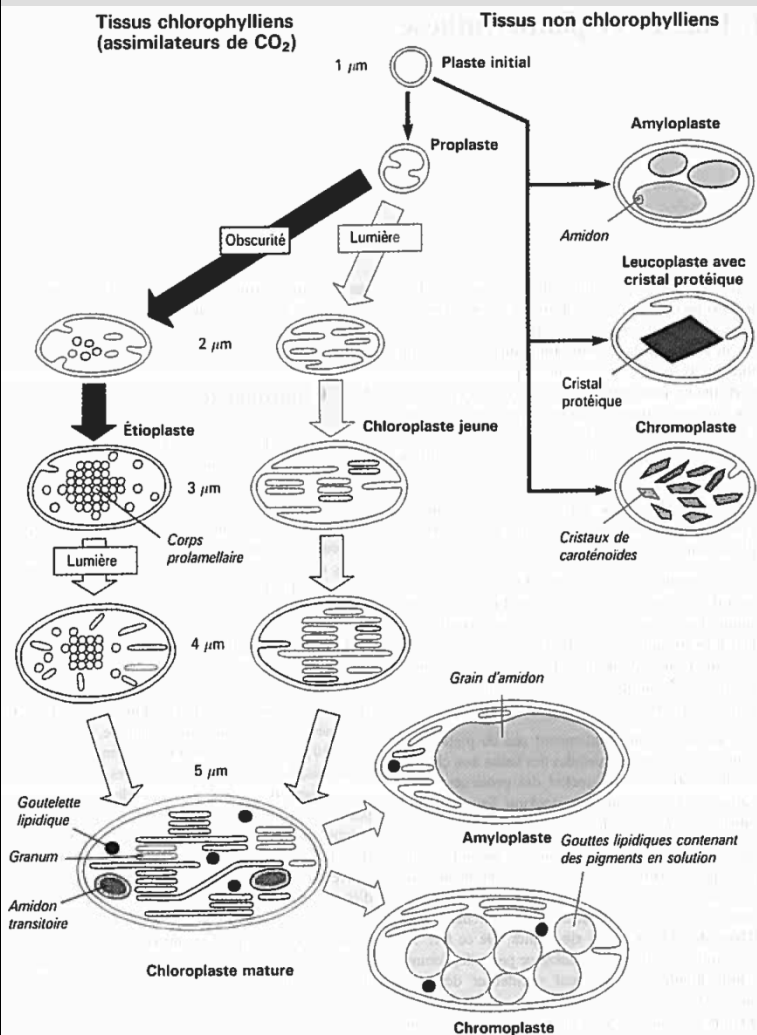


Figure 8-1. Schéma du développement des différents types de plastides. La voie principale est le développement du proplaste et du plaste initial en chloroplaste photosynthétiquement actif. Ce dernier peut être transformé en un amyloplaste servant surtout au stockage de l'amidon. Il peut aussi dégénérer en chromoplaste (fruits mûrissants). À l'obscurité, il se forme des étioplastes qui se transforment en chloroplastes en présence de lumière. Dans les tissus non chlorophylliens, les plastides initiaux et les proplastides évoluent directement en amyloplastes, leucoplastes ou chromoplastes (d'après LICHTENTHALER).

2. Encart no. 7: les plastides (II): structure moléculaire des chloroplastes et photosynthèse

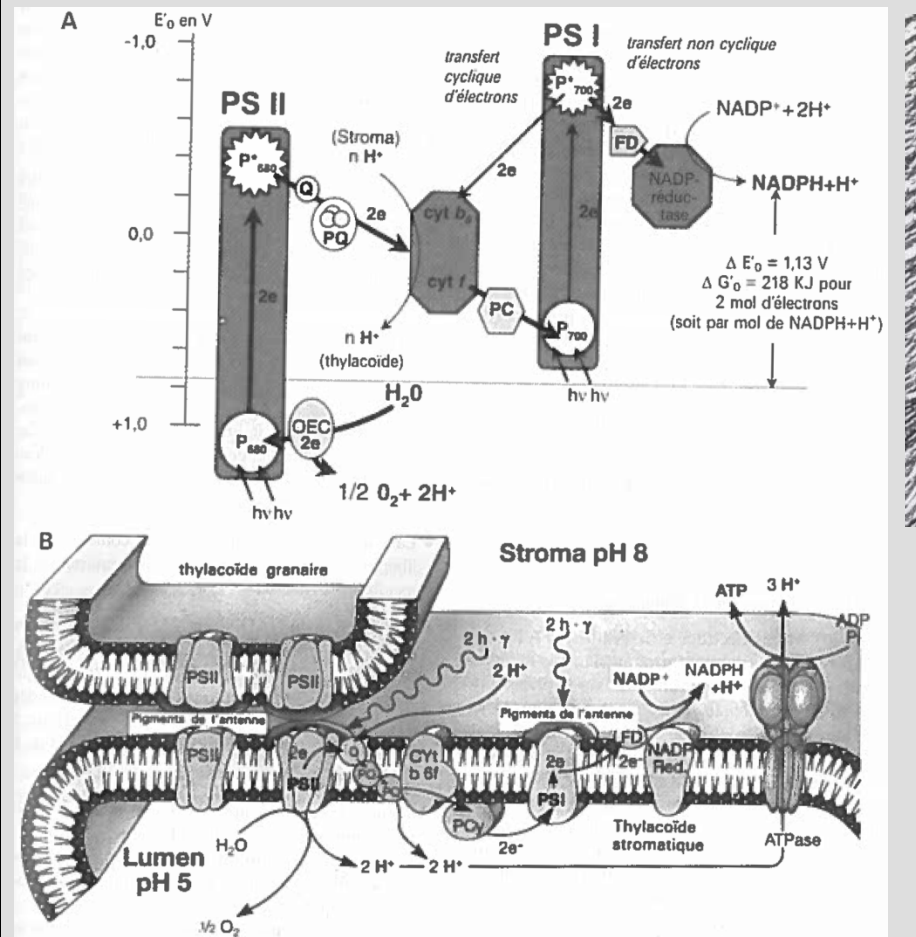


Figure 8-9. Transfert des électrons au cours des réactions claires de la photosynthèse. (A) Schéma énergétique du transfert des électrons (2e) au cours de la photosynthèse avec les quatre complexes protéiques (blocs grisés; de gauche à droite, PSII, Photosystème II; cyt_b_6/f , Complexe cytochrome b_6/f ; PSI, Photosystème I; NADP réductase) participant au transfert photosynthétique des électrons P_{680}^* et P_{700}^* , état stimulés des pigments récepteurs (pigments pièges). Autres systèmes redox impliqués: Q, quinone lié aux membranes, PQ, réservoir de plastoquinone; OEC, Complexe producteur d'oxygène (en anglais Oxygen Evolving Complex); Pcy, Plastocyanine; FD Ferredoxine. (B) Modèle de la compartimentation des composants du transfert photosynthétique des électrons et de l'ATPase dans la membrane thylacoïdale. La figure présente une coupe de thylacoïde stromatique (à droite) et celle d'un thylacoïde granaire (à gauche). Notez que les complexes du photosystème II sont localisés dans une portion de membrane en contact avec les thylacoïdes granaires.

référence: Lüttge et al. (2005). Botanique. Tec&Doc-Lavoisier



face externe d'un thylacoïde recouverte de granules protéiques

face interne d'un thylacoïde recouverte de granules protéiques faisant partie d'unités de photosystème II (PSII)

référence: Gunning et Steer (1995). Plant cell biology. Jones & Bartlett publ., London.

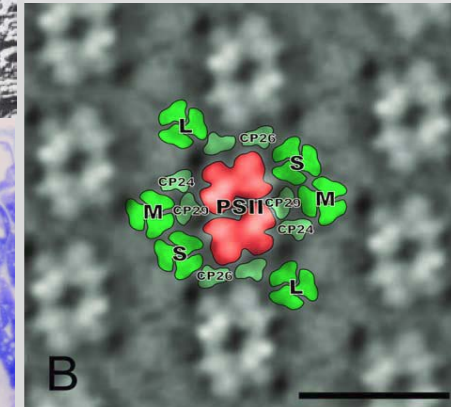
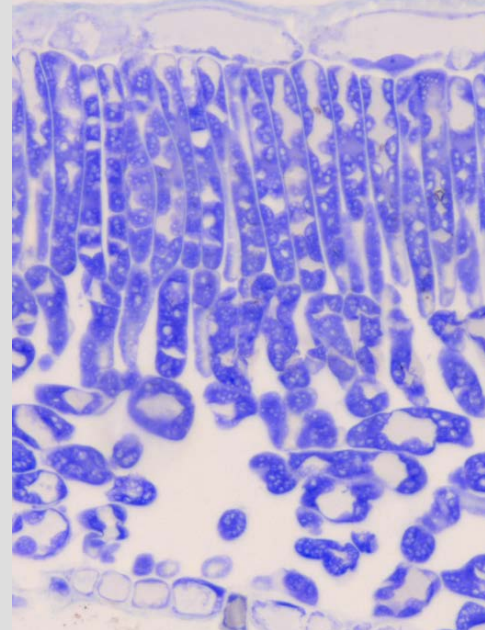


Fig. 3. Image analysis of the ordered supermolecular organization of Photosystem II complex with associated light-harvesting antenna (LHCII) in isolated thylakoid membrane fragments of *Arabidopsis thaliana*. (B) Contour version of the image with proposed position of various types of major trimeric LHCII complexes (S, M, L), and minor chlorophyll protein (CP) antennae CP29, CP26, and CP24 subunits. The scale bar is 20 nm.

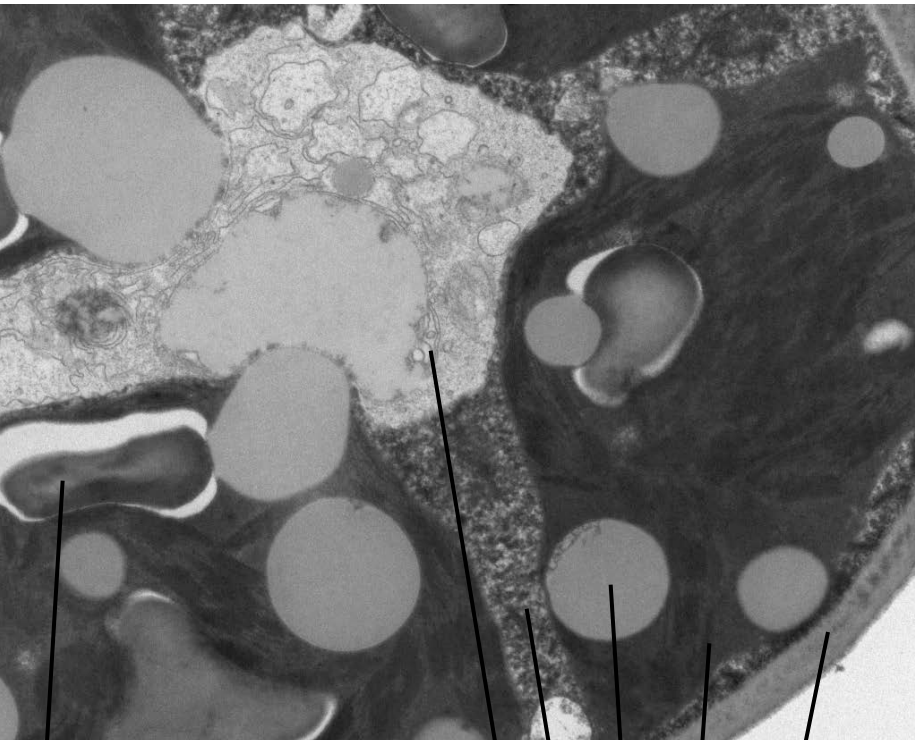
Révélation des protéines dans le limbe foliaire du hêtre. C'est dans les chloroplastes que se trouve la plus grosse fraction protéique, en raison de l'abondance de la rubisco (protéine la plus abondante au monde). Corrélation: [rubisco] ~ [protéines] ~ [azote]

référence: Vacha et al. (2005). Microscopy and single molecule detection in photosynthesis. Micron 36, 483-502.

2. Les plastides (III): modifications structurales des chloroplastes pendant la saison de végétation

référence: Tevini et Stegmüller (1985). Planta 163, 91-96. **Table 2. Composition of plastoglobuli (µg) isolated from beech leaves at four stages of senescence based on 1 mg plastoquinone (total).**

excrétion de plastoglobules dans la vacuole d'une feuille de hêtre
échantillonnée au mois de septembre



Microscope Magnification: 11500x
Filename: 415 sy7 lppal1,2 det13
16.12.2009

Zentrum für Mikroskopie und Bildanalyse
Universität Zürich

grain d'amidon

vacuole
cytoplasme
plastoglobule

PI
chloroplaste

Component	I (August)	II (September)	III (October)	IV (November)
Plastoquinone (tot.)	1000	1000	1000	1000
Plastohydroquinone	705	617	560	313
α-Tocopherol	850	780	700	720
α-Tocoquinone	22	58	73	98
Phylloquinone K1	12	13	11	100
Chlorophylls	18	22	10	trace
Carotenoids	5	96	230	390
Carotenoid esters	-	23	521	1253
Triacylglycerols	1460	963	385	150
Free fatty acids#	28	15	127	420
Glyco- & phospholipids	140	130	80	55
Proteins	160	200	140	105

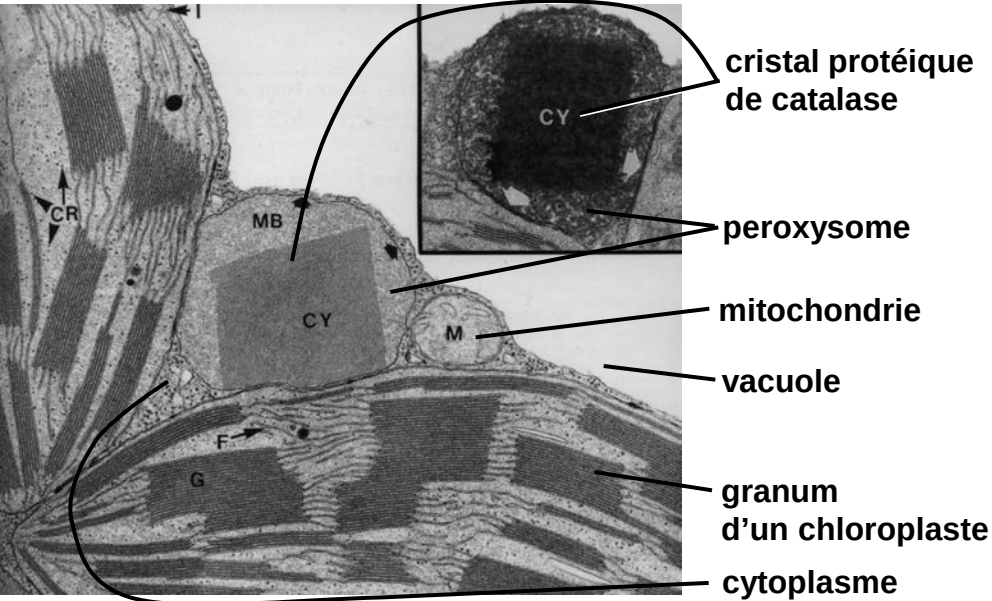
Hydroxy fatty acids not included



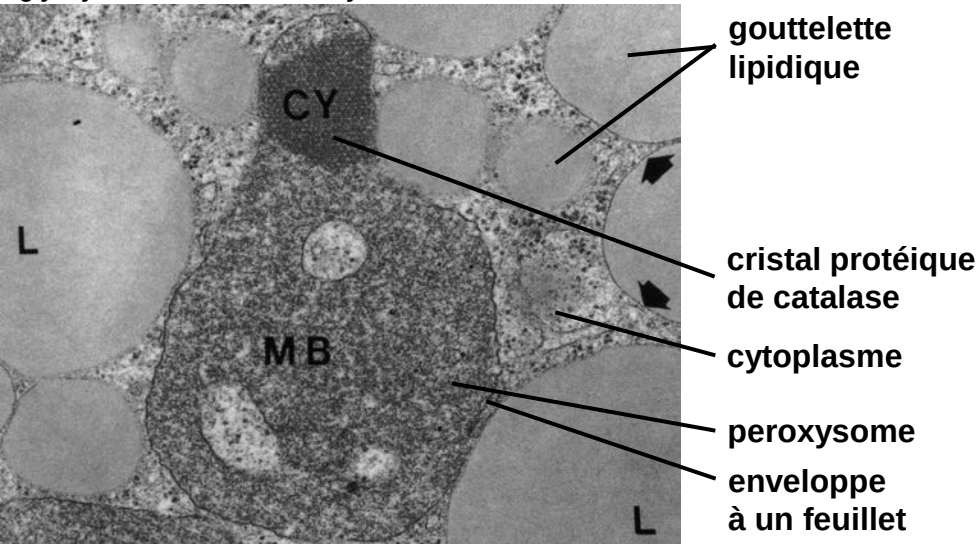
photoinhibition hivernale: gradient de dégradation des chlorophylles dans les parties
moins bien irriguées du limbe foliaire

2. Les peroxysomes (microbodies): variabilité fonctionnelle selon le type et la localisation cellulaire

peroxysome d'une feuille de tabac et activité catalasique



glyoxysome d'une feuille cotylédonaire de tournesol



Encart no. 8: la photorespiration

photorespiration: implication respective des peroxysomes, des chloroplastes et des mitochondries et échanges entre les organelles

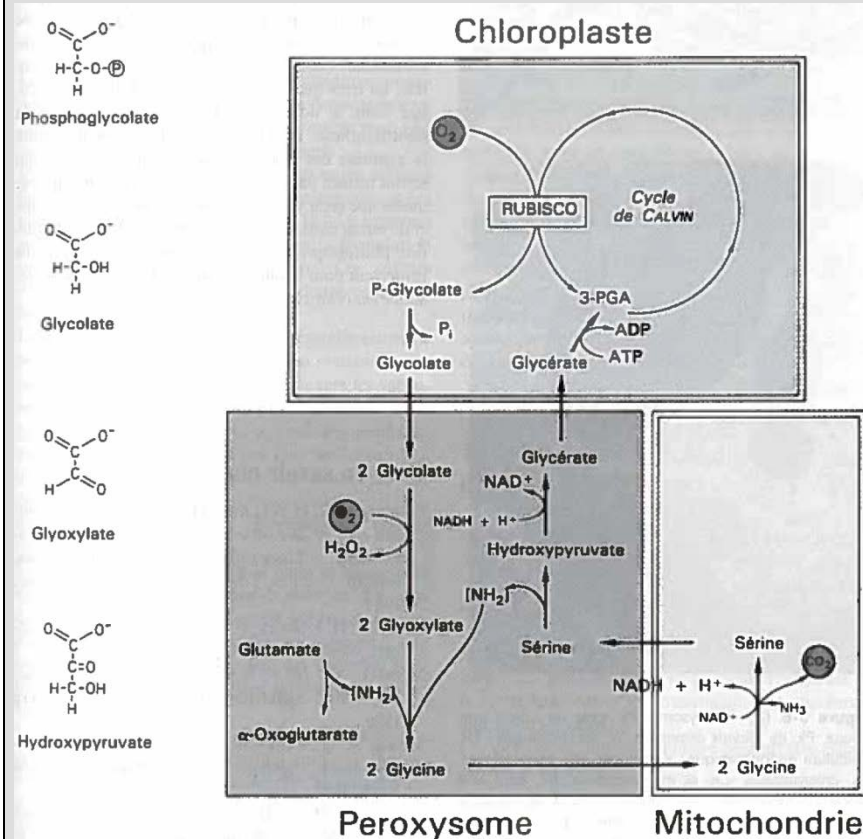
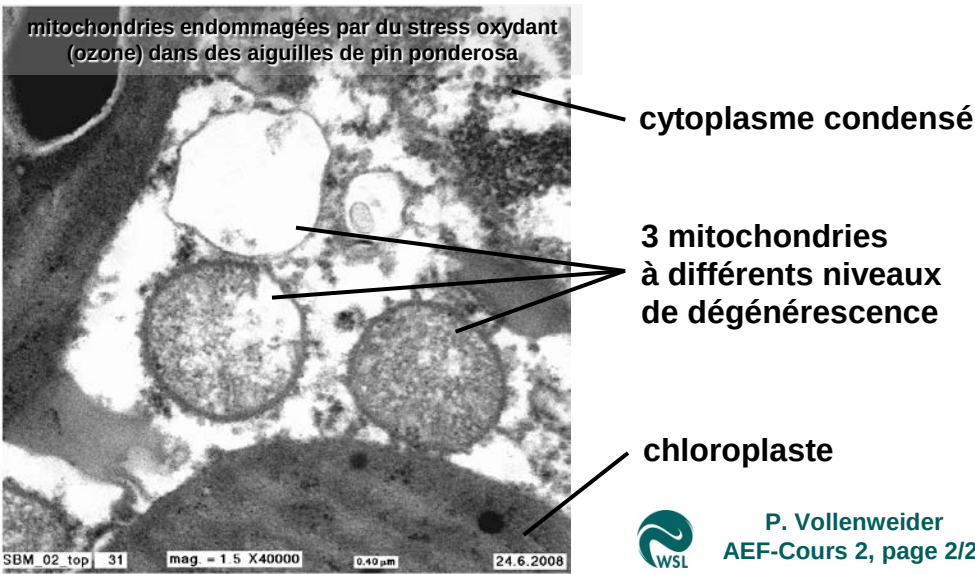
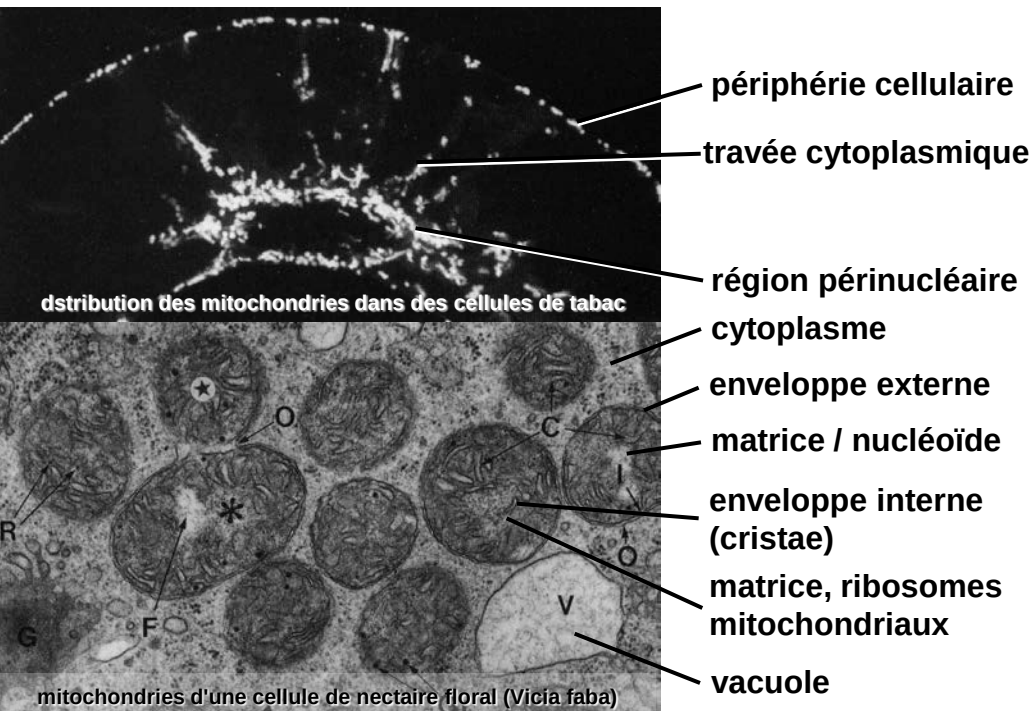


Figure 9-5. Voies métaboliques de la photorespiration (voie du glycolate). La figure montre la répartition des différentes étapes dans les chloroplastes, les peroxysomes et les mitochondries. À gauche, formules développées de quelques métabolites-clés de la voie du glycolate.

référence: Lüttge et al. (2005). Botanique. Tec&Doc-Lavoisier

2. Les mitochondries: production d'énergie et stress oxydant



Encart no. 9: Diagramme énergétique et modèle moléculaire de la chaîne respiratoire

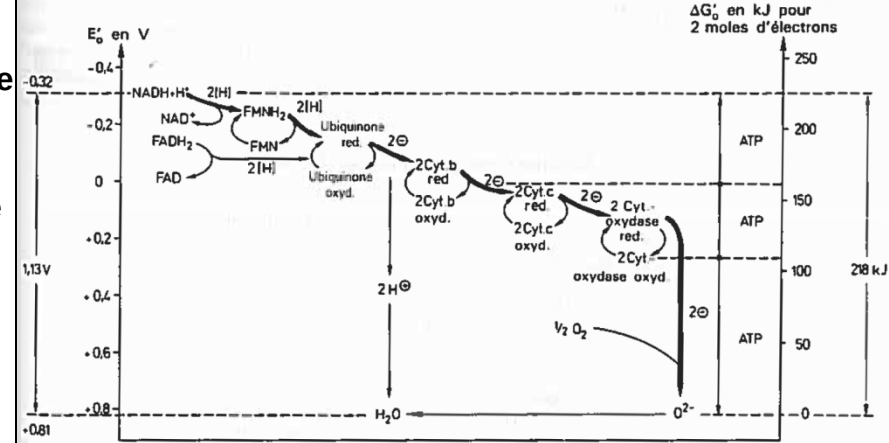
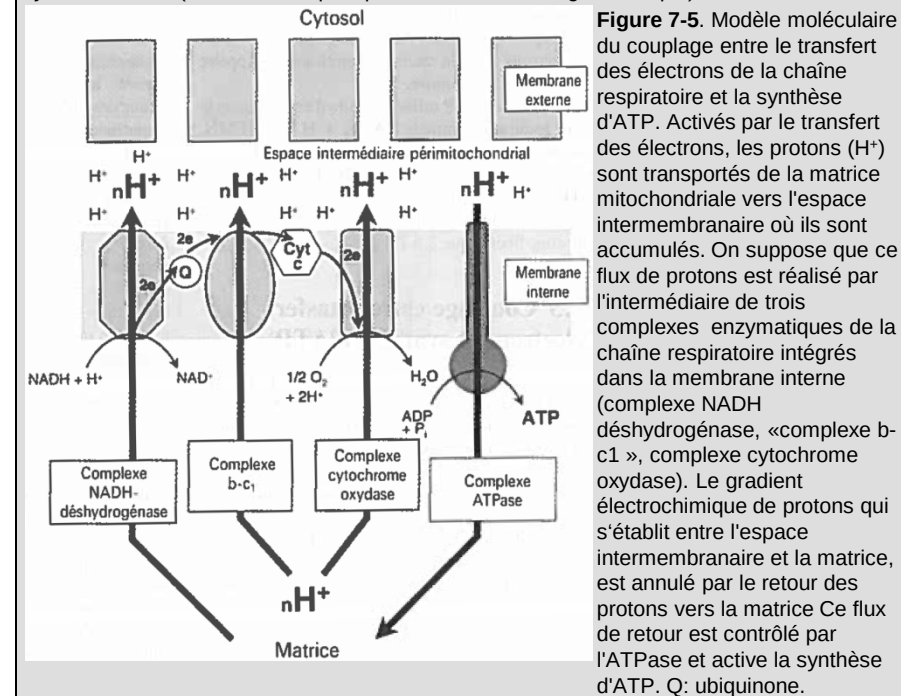


Figure 7-4. Schéma et diagramme énergétique de la chaîne respiratoire. Les lignes horizontales en tirets délimitent les étapes de la chaîne respiratoire associées à une synthèse d'ATP (Adénosine Triphosphate; réserve d'énergie chimique).



référence: Lüttge et al. (2005). Botanique. Tec&Doc-Lavoisier

2. Références

Remarque : les micrographies non référencées proviennent des activités de recherche passées et en cours de notre laboratoire de microscopie au WSL.

Principaux ouvrages et articles de référence utilisés:

Carpita, N.C., Gibeaut, D.M., 1993. Structural models of primary cell walls in flowering plants: consistency of molecular structure with the physical properties of the wall during growth. *The Plant Journal* 3(1), 1-30.

Carrier, P., Barylà, A., Havaux, M., 2003. Cadmium distribution and microlocalization in oilseed rape (*Brassica napus*) after long-term growth on cadmium-contaminated soil. *Planta* 216, 939-950.

Crèvecoeur, M., Lesniewska, E., Vié, V., Goudonnet, J.P., Greppin, H., Le Grimellec, C., 2000. Atomic-force microscopy imaging of plasma membranes purified from spinach leaves. *Protoplasma* 212, 46-55.

Driouich, A., Staehelin, L.A., 1997. The plant Golgi apparatus: structural organization and functional properties. In: Berger, E.G., Roth, J., (eds). *The Golgi apparatus*. Birkhäuser Verlag, Basel.

Evert, R.E., 2006. *Esau's plant anatomy*. Wiley, Hoboken.

Farrar, J.J., Evert, R.E., 1997. Seasonal changes in the ultrastructure of the vascular cambium of *Robinia pseudo-acacia*. *Trees* 11, 191-202.

Gunning, B.E.S., Steer, M.W., 1996. *Plant cell biology*. Jones & Bartlett Publishers, Sundbury Massachusetts.

Lüttge, U., Kluge, M., Bauer, G., 2002. *Botanique : Traité Fondamental* (3ème Édition). Éditions TEC & DOC - Lavoisier

Tevini M, Steinmüller D., 1985. Composition and function of plastoglobuli. *Planta*, 163: 91-96.

Vacha, F., Bumba, L., Kaftan, D., Vacha, M., 2005. Microscopy and single molecule detection in photosynthesis. *Micron* 36, 483-502.

Vollenweider, P., Günthardt-Goerg, M. S., Menard, T., Baumgarten, M., Matyssek, R., & Schaub, M., 2019. Macro- and microscopic leaf injury triggered by ozone stress in beech foliage (*Fagus sylvatica* L.). *Annals of Forest Science*, 76(3), 71 (17 pp.). <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0856-5>

Ouvrages de référence en Botanique

Lüttge, U., Kluge, M., Bauer, G., 2002. *Botanique* 3. édition. Éditions Tec et Doc / Lavoisier

Boullard, B., 1988. *Dictionnaire de Botanique*. Ellipses, Paris.

Glossaire de Botanique en ligne: https://fr.wikipedia.org/wiki/Glossaire_de_botanique