

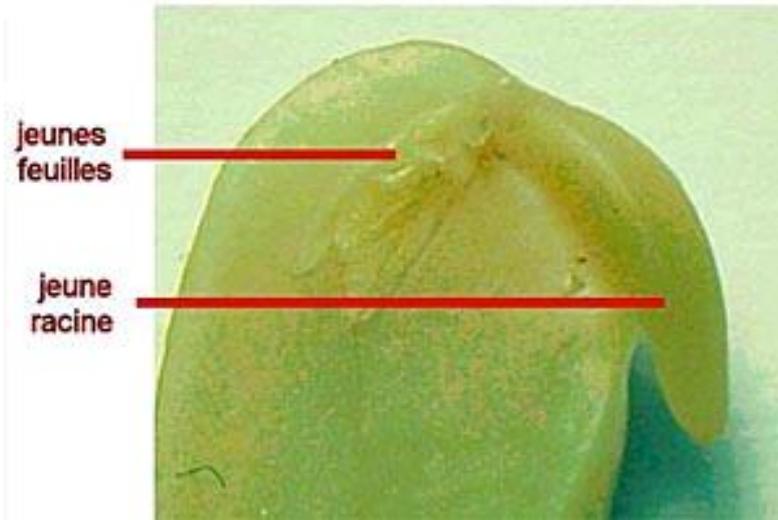
SV-B-3 Le développement des angiospermes : adaptations et plasticité phénotypique



<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7205470/>

C. PERRIER
F.CELLE

Le développement post-embryonnaire des angiospermes: De la jeune plante à la plante différenciée



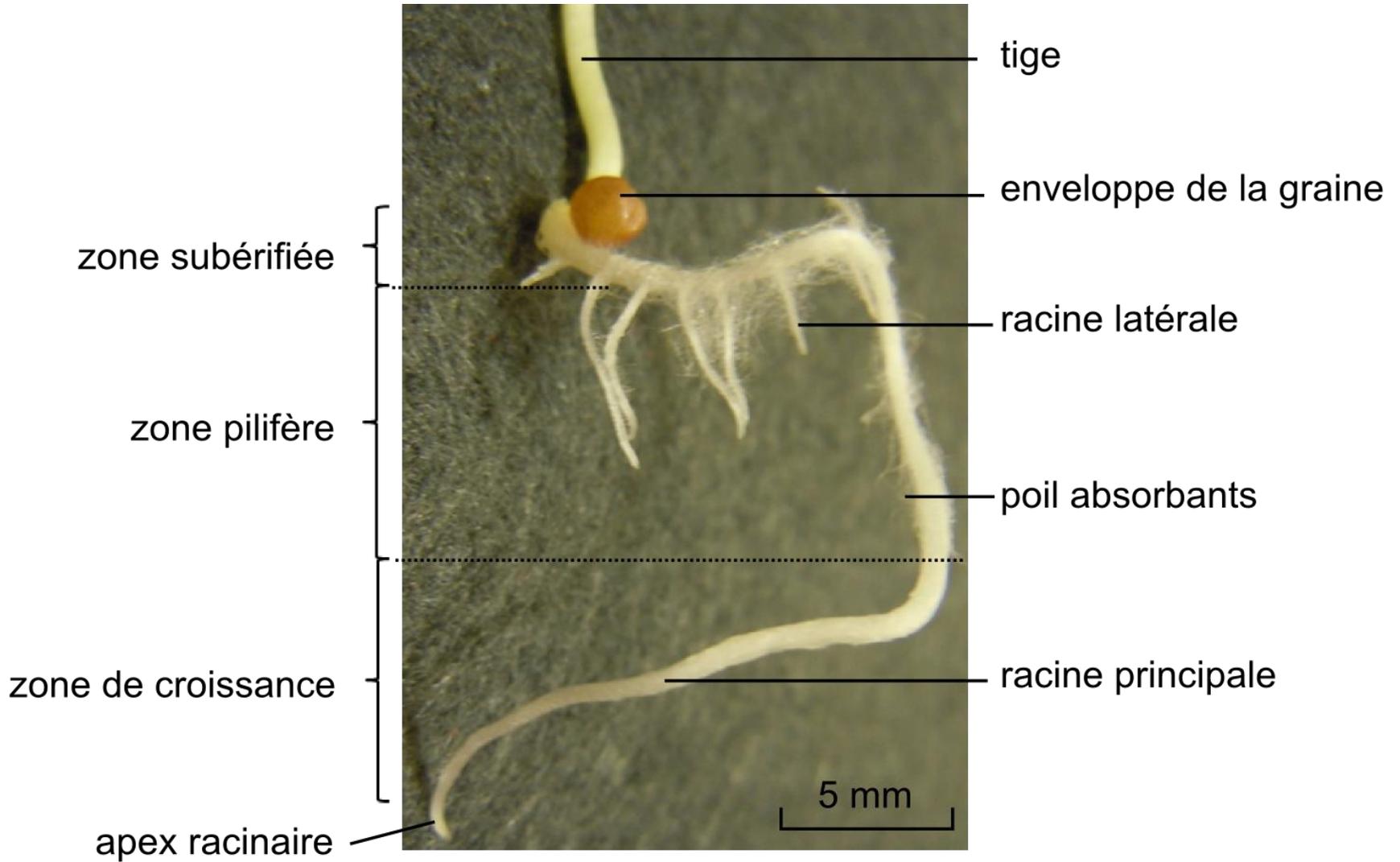
www.ac-nancy-metz.fr/.../haricot2/har3.ino

Jeune plantule de haricot



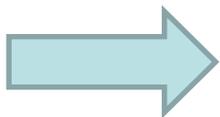
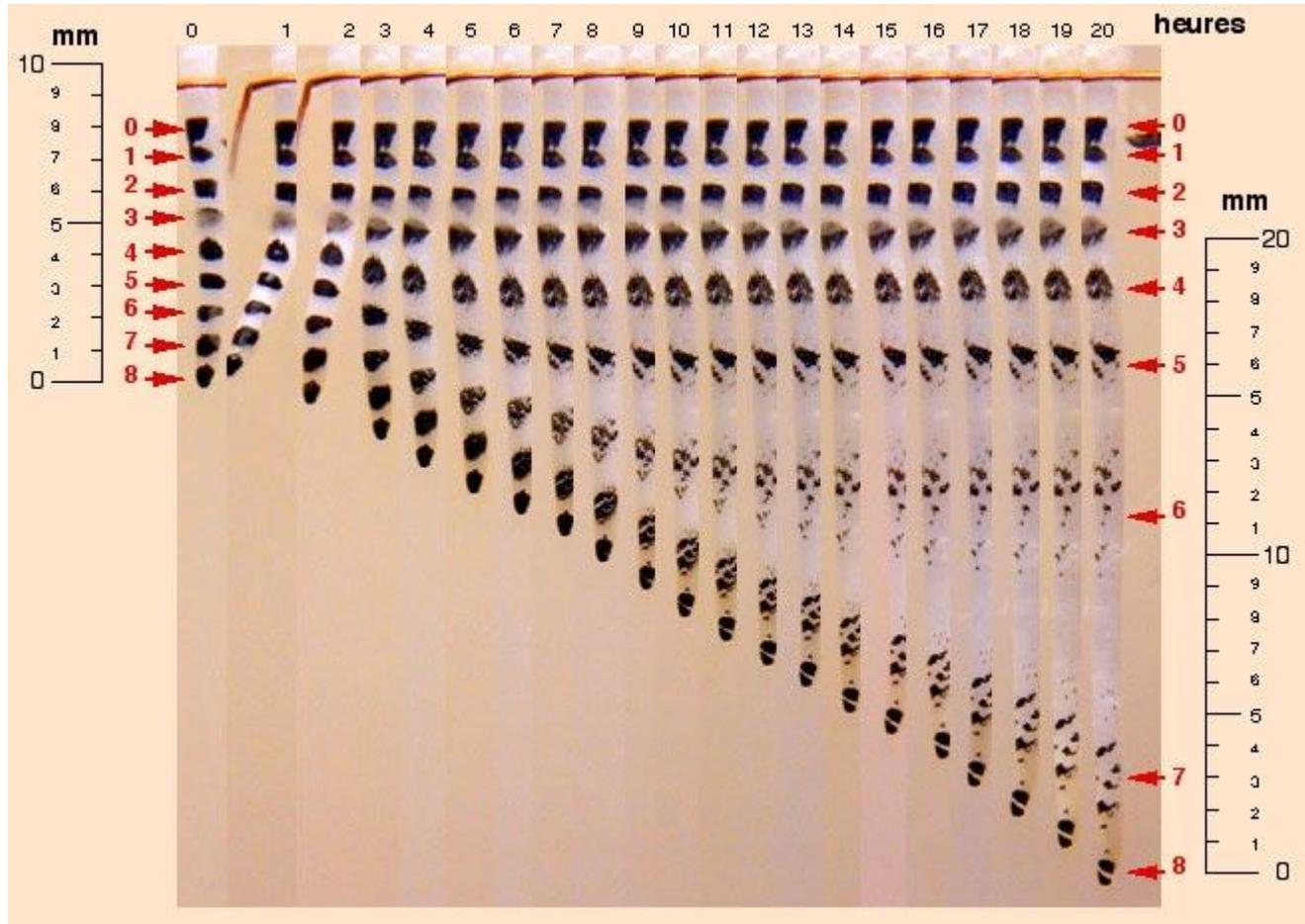
lamap.inrp.fr/bdd_image/plantule_haricot.jpg

Zonation fonctionnelle d'une jeune racine (maïs)



L'expérience de Sachs

<http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/racine/01-sachs.htm>

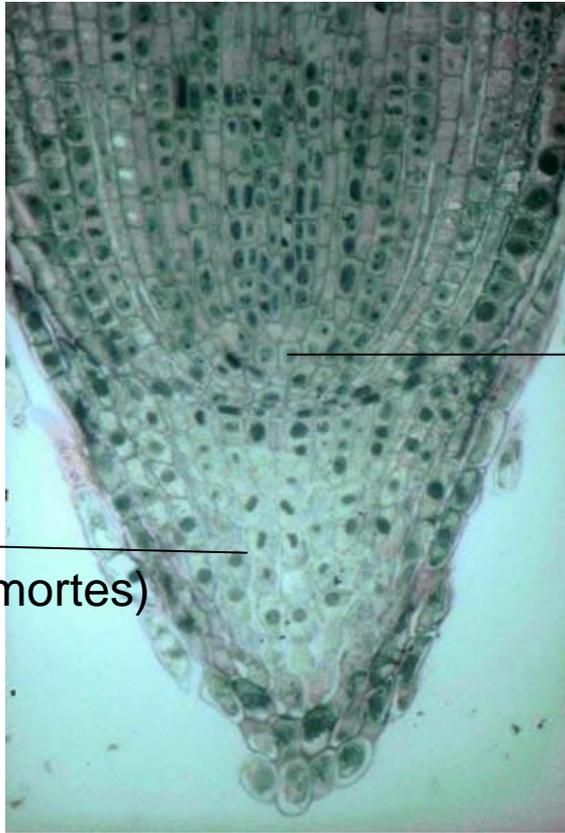


Au niveau de la racine , la croissance est subapicale

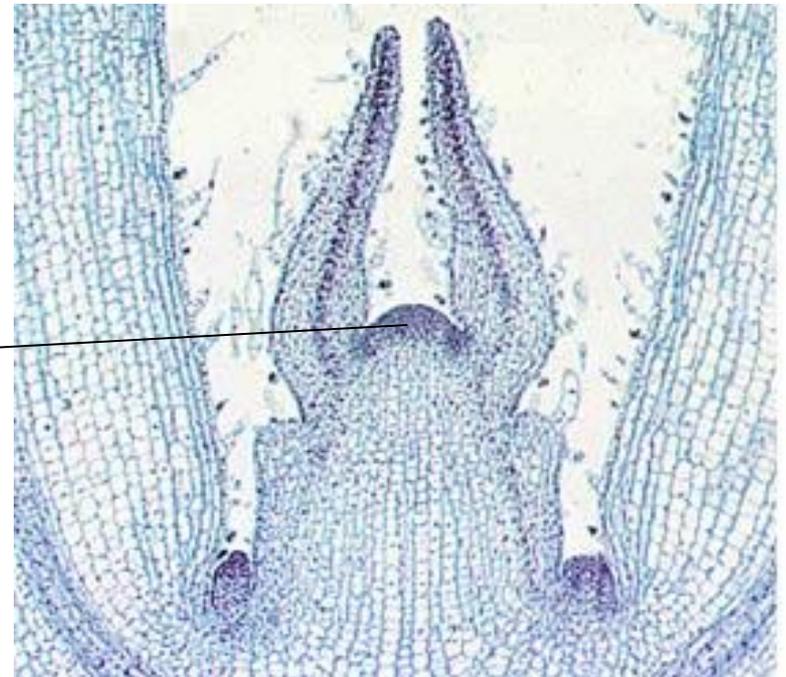
Méristèmes primaires

<http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/>

Apex racinaire



Apex caulinaire



méristème

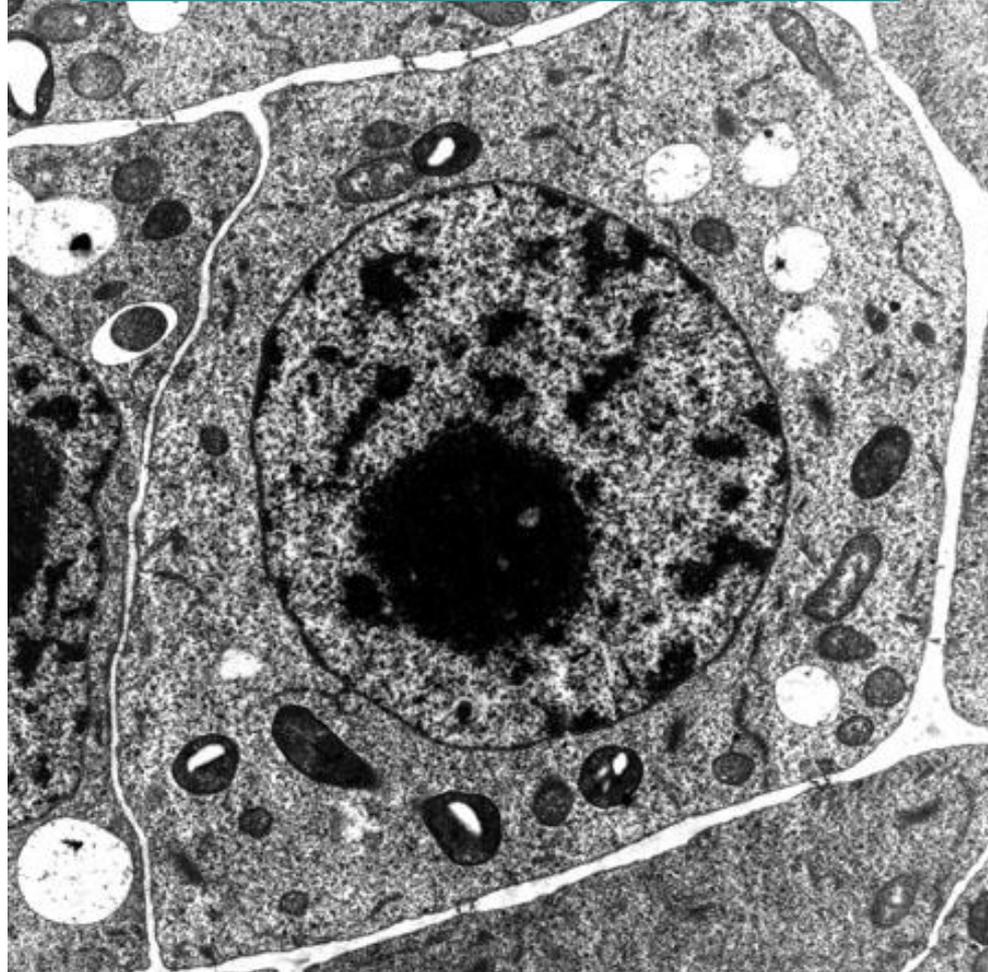
coiffe
(cellules mortes)



- Protection
- Perception de la gravité

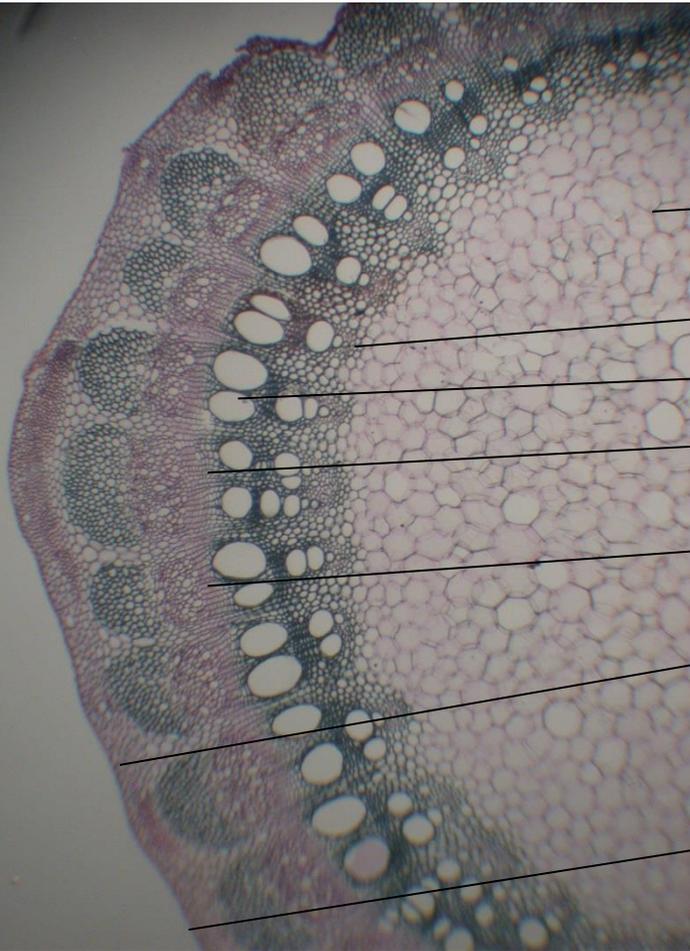
Cellule méristématique (MET)

<http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/protoplastes/3-protoplaste-paroi.htm>



20 μm

Tiges à structure secondaire



a) tige de vigne



b) tige de tilleul

parenchyme
médullaire

xylème I

bois

emplacement
du cambium

liber

parenchyme
cortical

tissu
protecteur

CT de tige de sureau

Paroi mince,
fragile , facile à repérer

cambium

tissu de protection

collenchyme

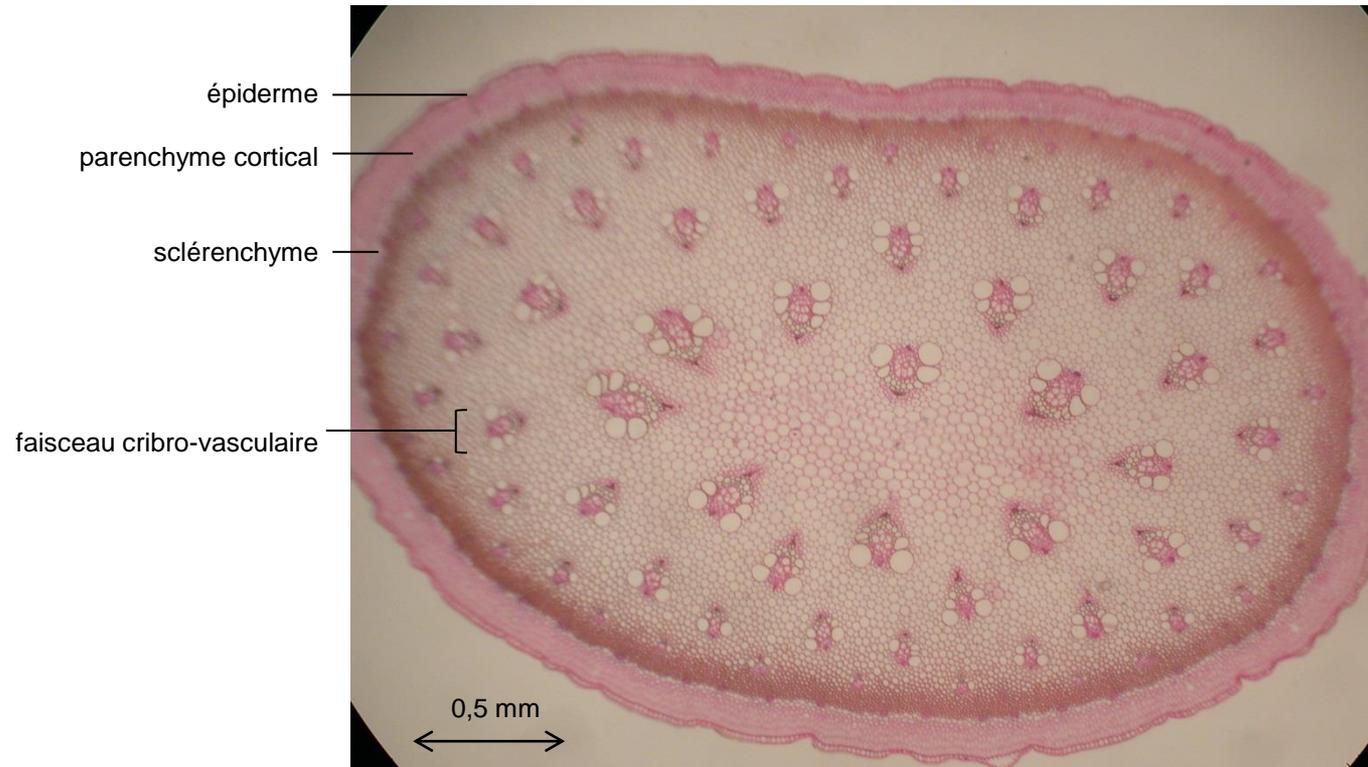
parenchyme liber

bois

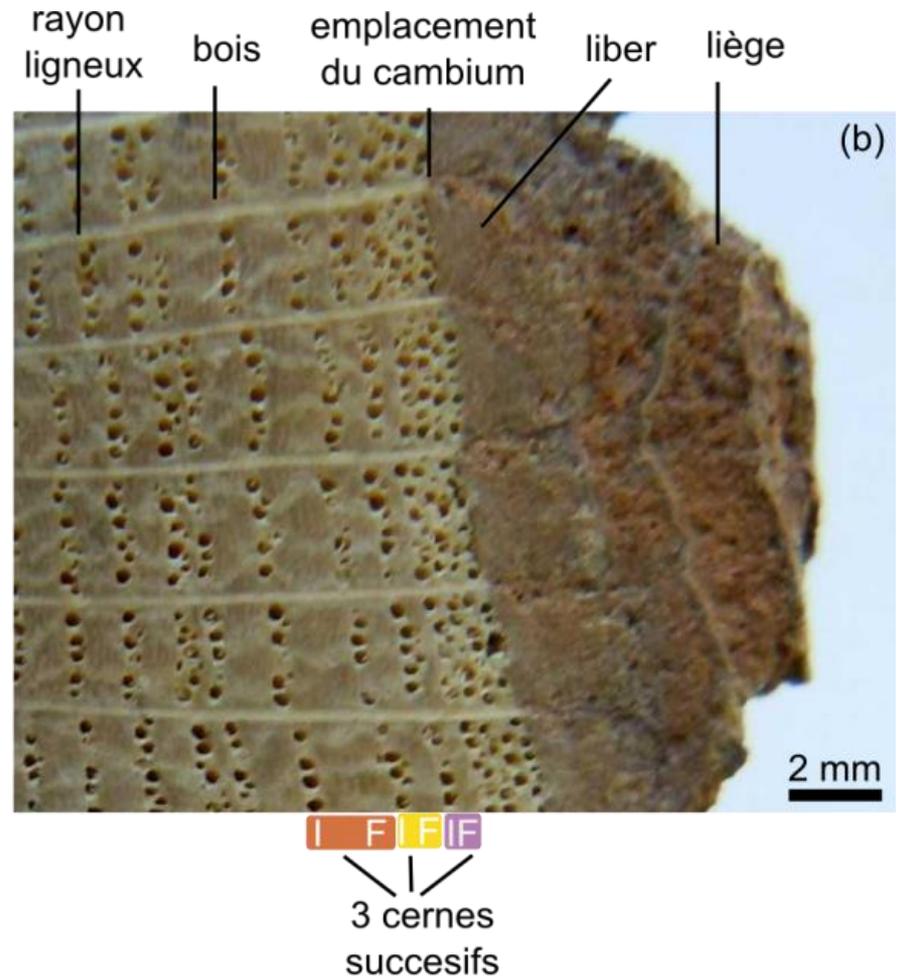


CT de tige d'asperge

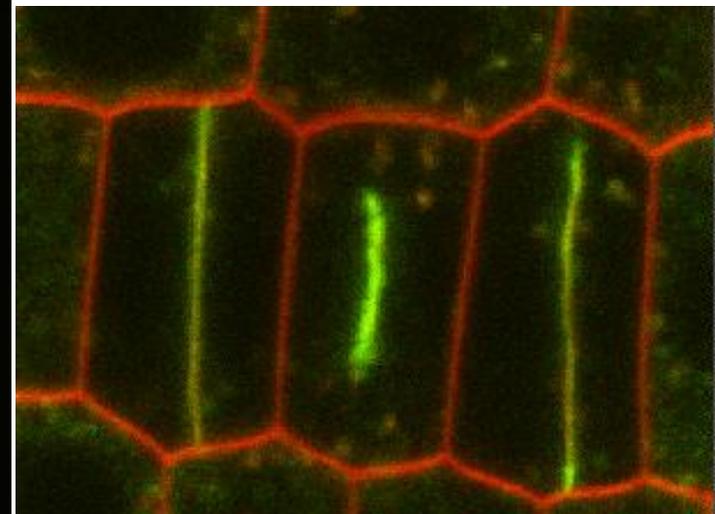
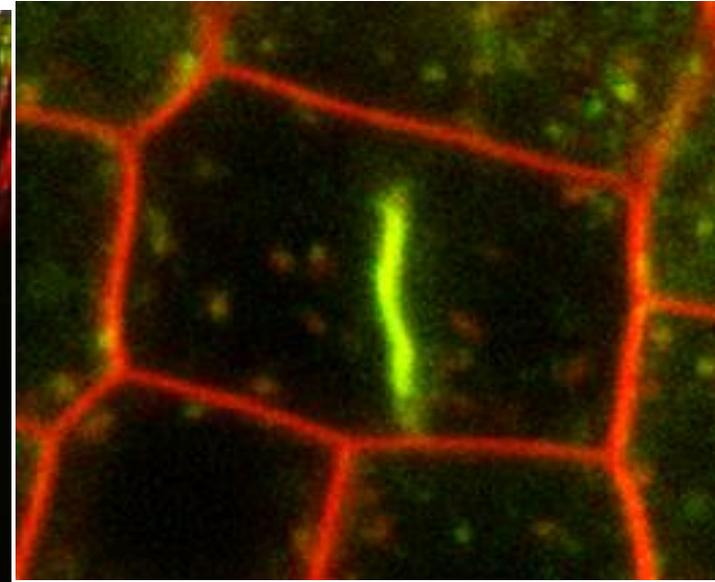
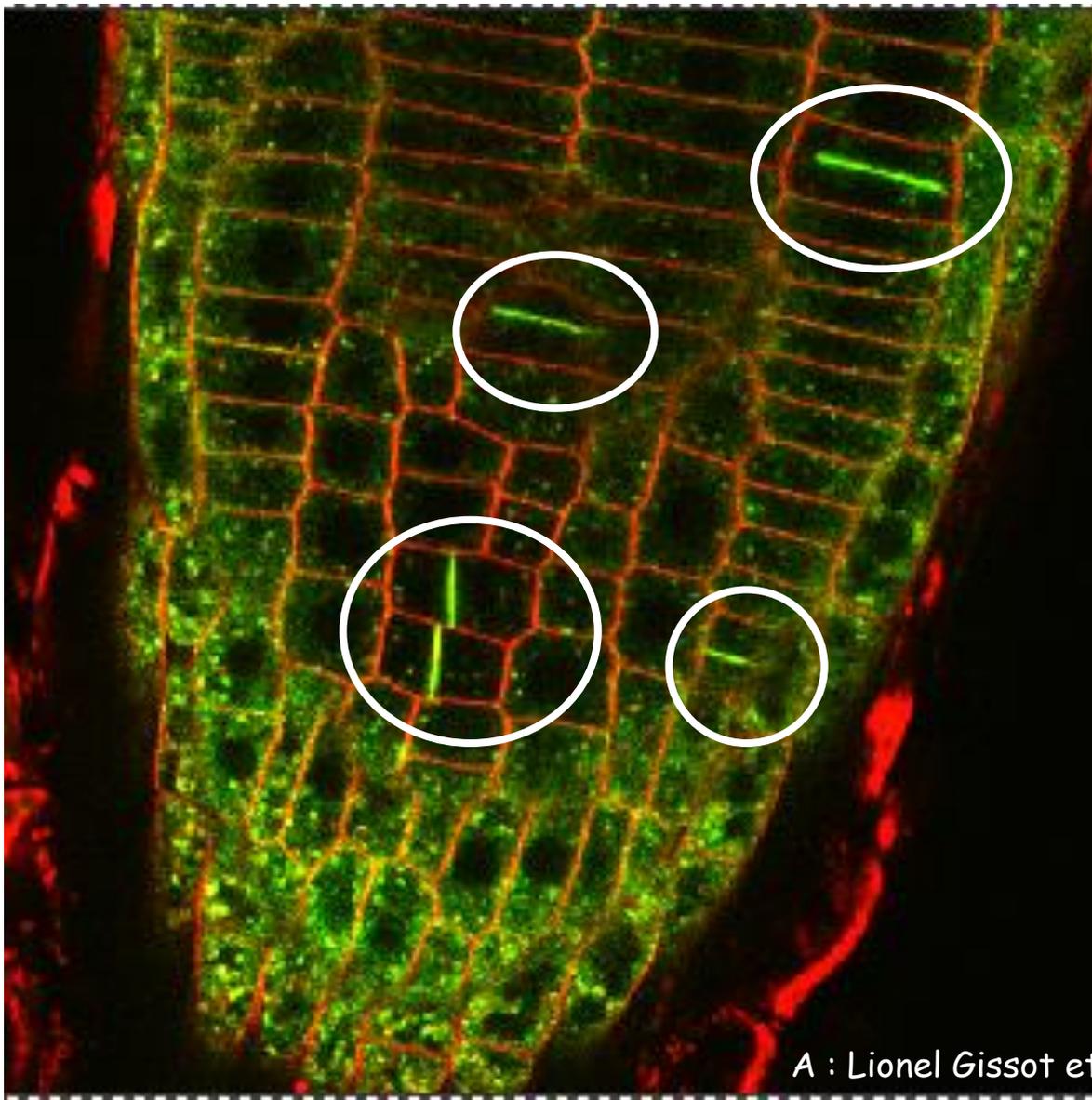
Pas de tissus secondaires : croissance en épaisseur limitée



. Croissance en diamètre indéfinie d'un tronc de chêne



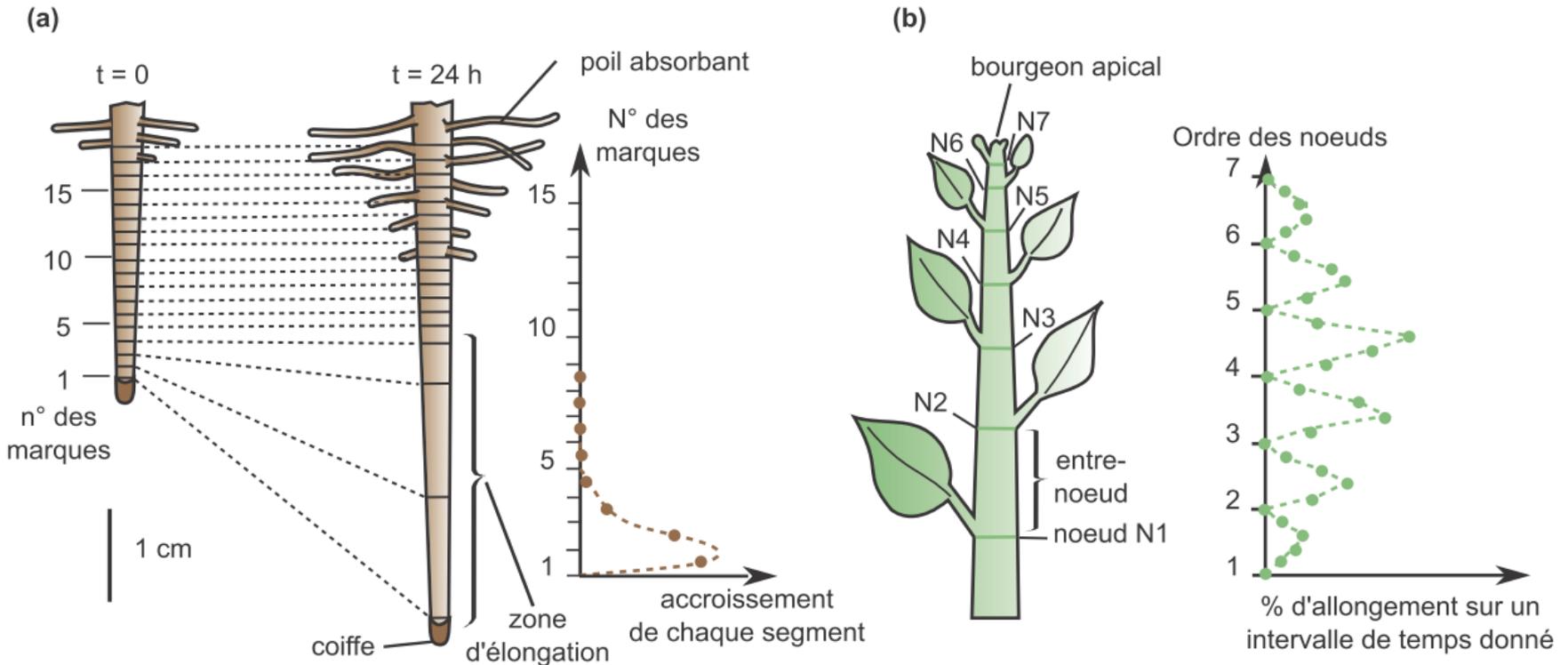
Visualisation par microscopie confocale de cellules en division (utilisation de marqueur Membranaires verts (endomembranes) et rouge (membrane plasmique))

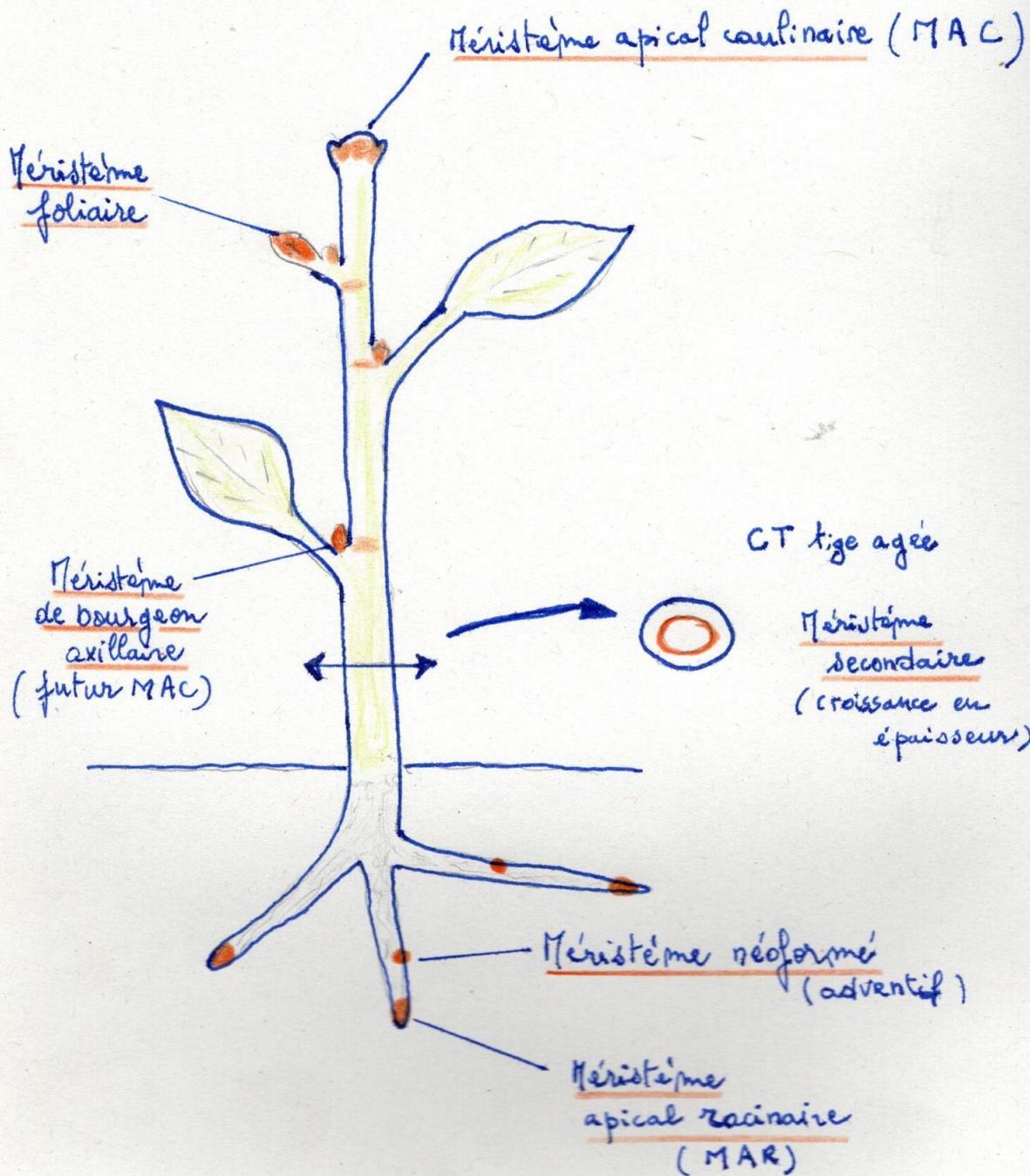


A : Lionel Gissot et Jean-Denis Faure, C : Jean-Denis Faure

Doc 1 - Localisation expérimentale des zones de croissance en longueur des racines (a) et des tiges (b)

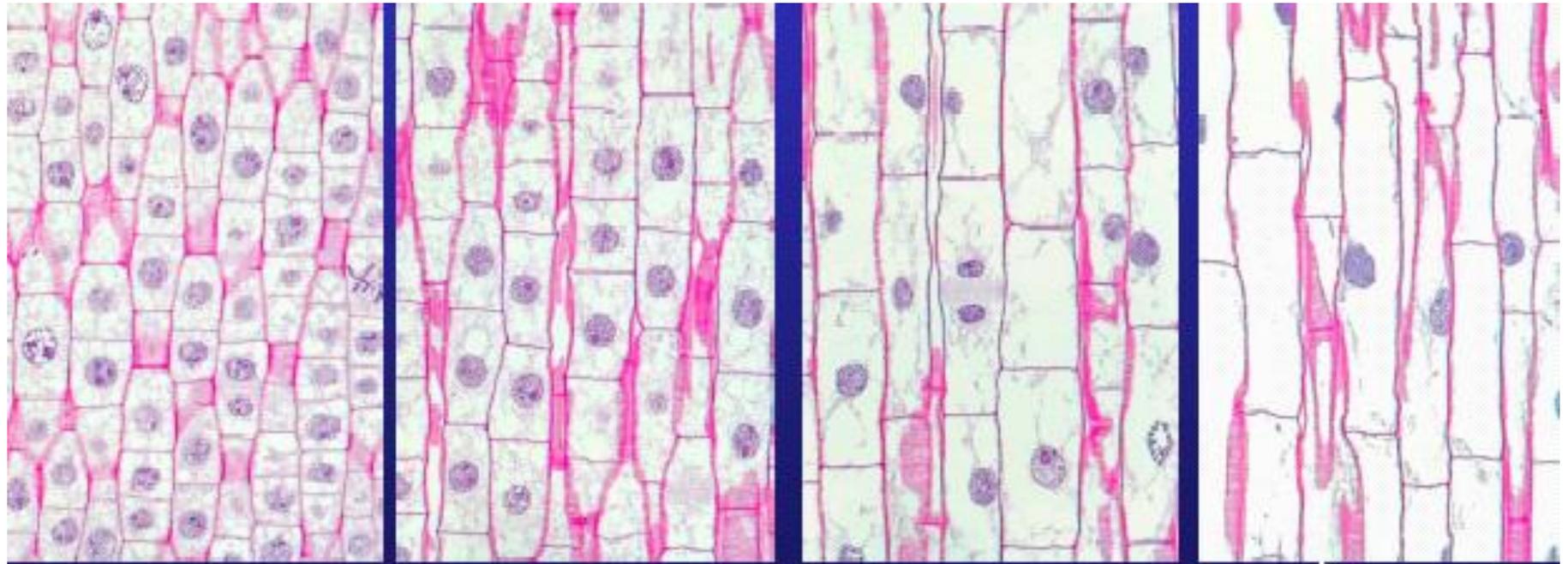
Peycru & al. Biologie BCPST2. Dunod 2014



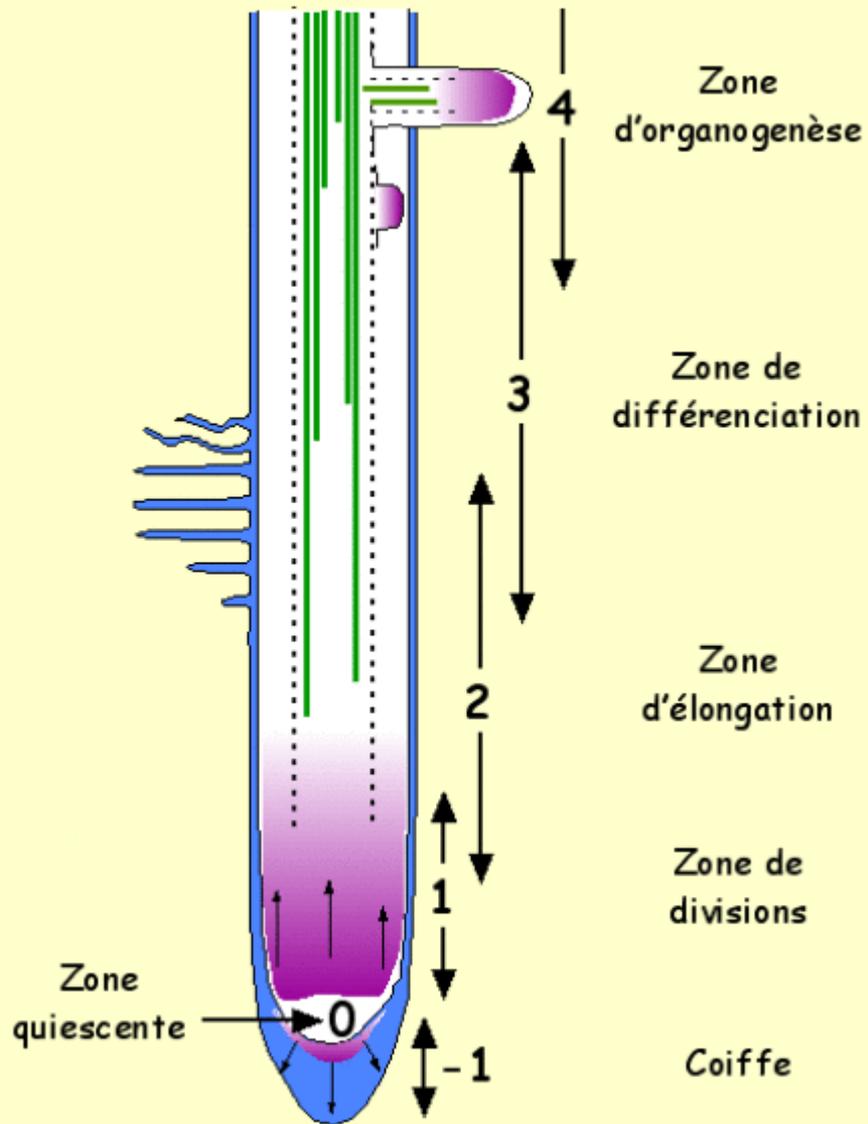


Doc- 2

Localisation des méristèmes chez le végétal angiosperme



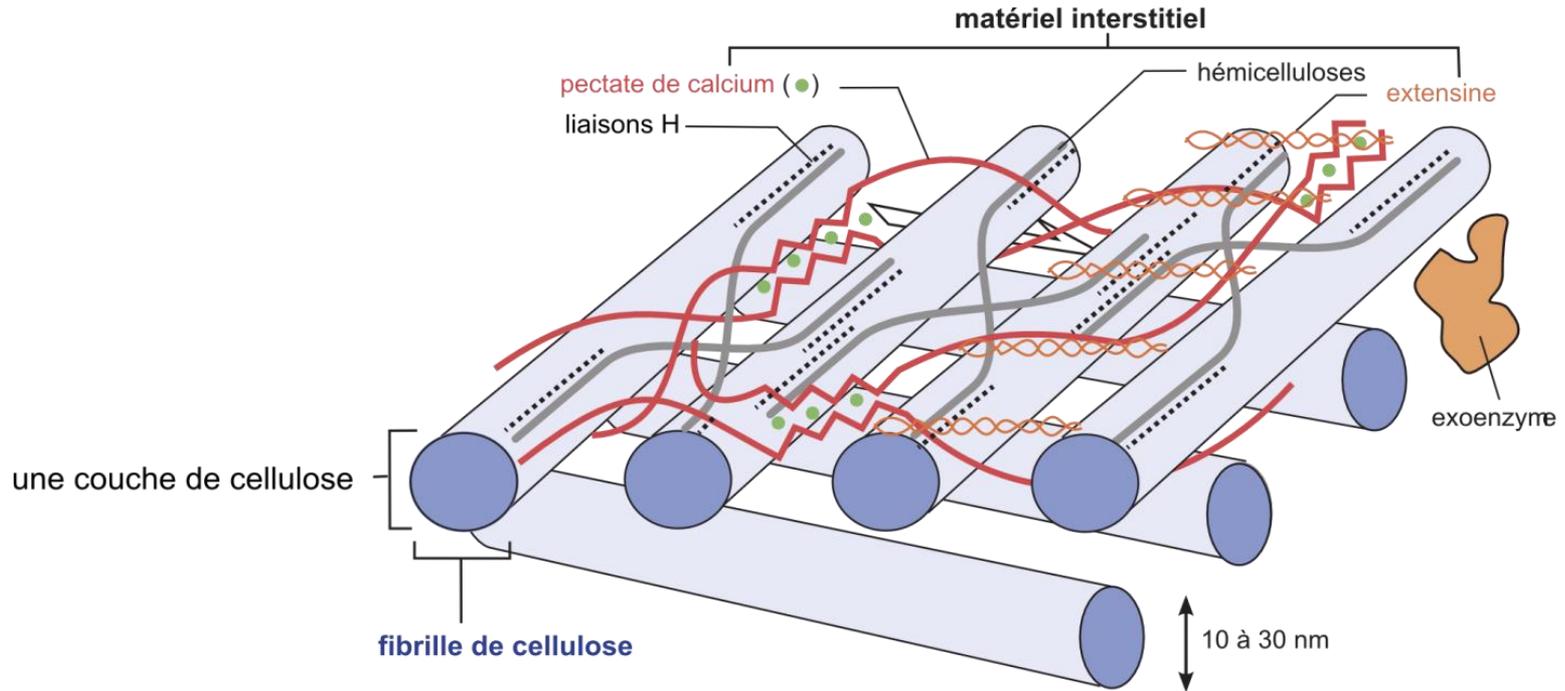
Éloignement progressif de l'apex (racine)



<https://uel.unisciel.fr/biologie/module1>

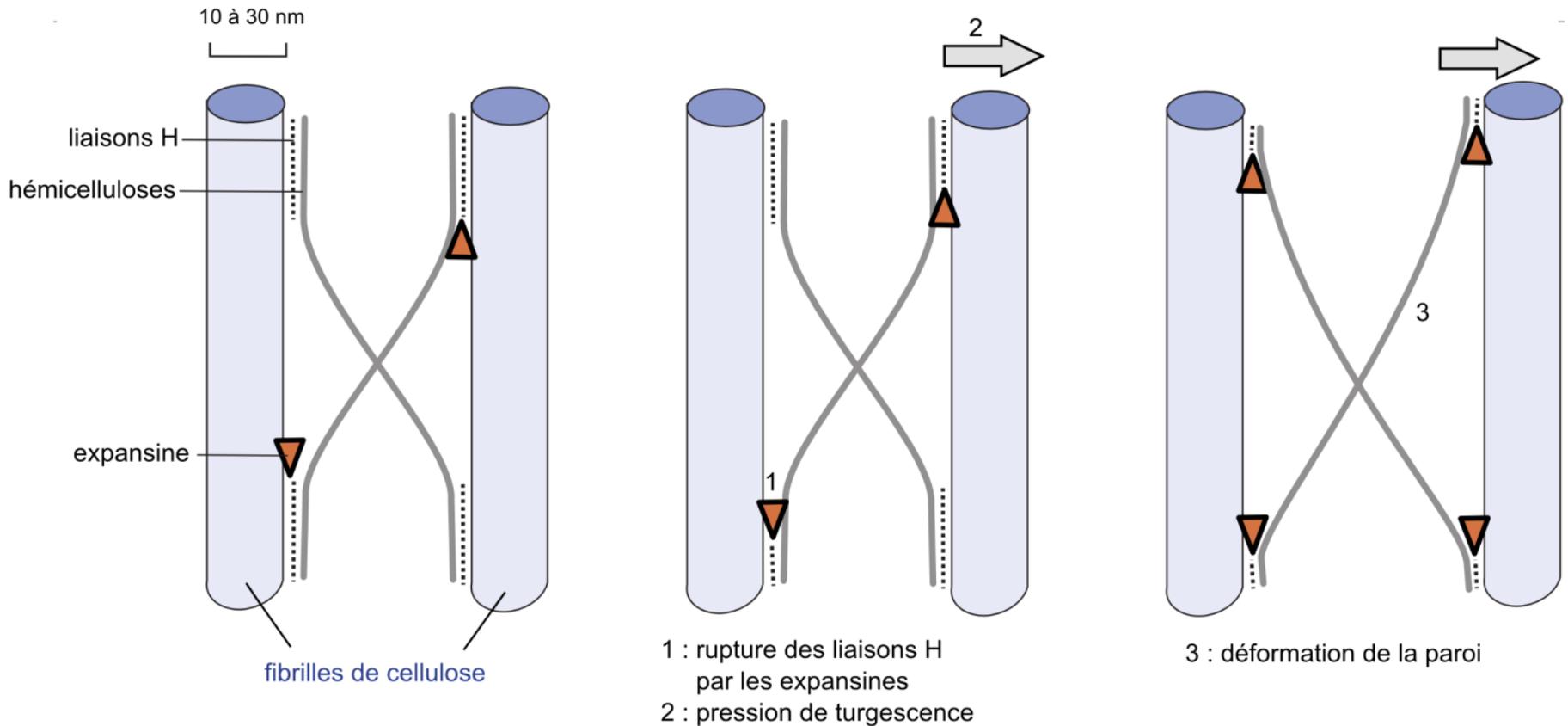
Doc-8 Croissance et différenciation de la racine

Doc- 3: Architecture de la paroi primaire



Doc4a - Deux mécanismes contribuant à la déformation pariétale lors de l'auxèse

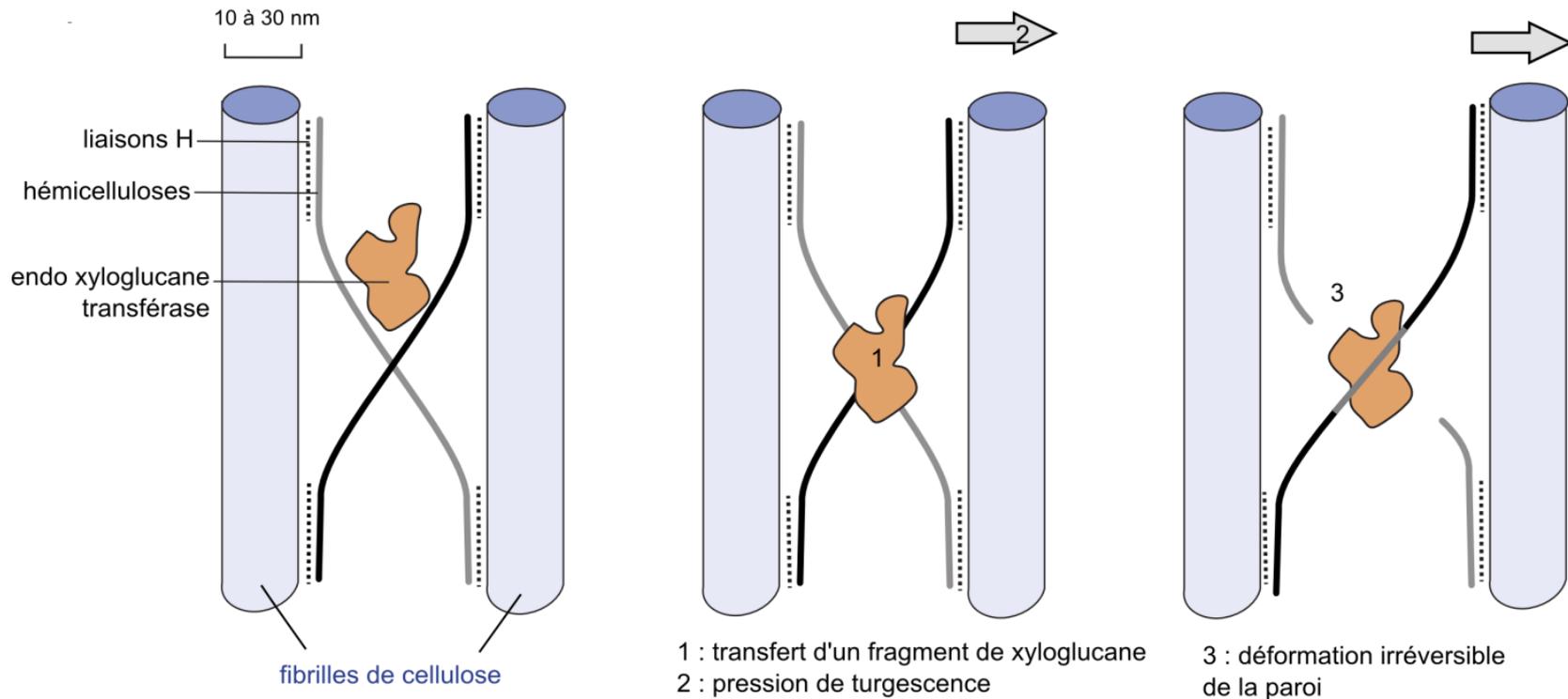
d'après <http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/cell/08hypothese.htm>



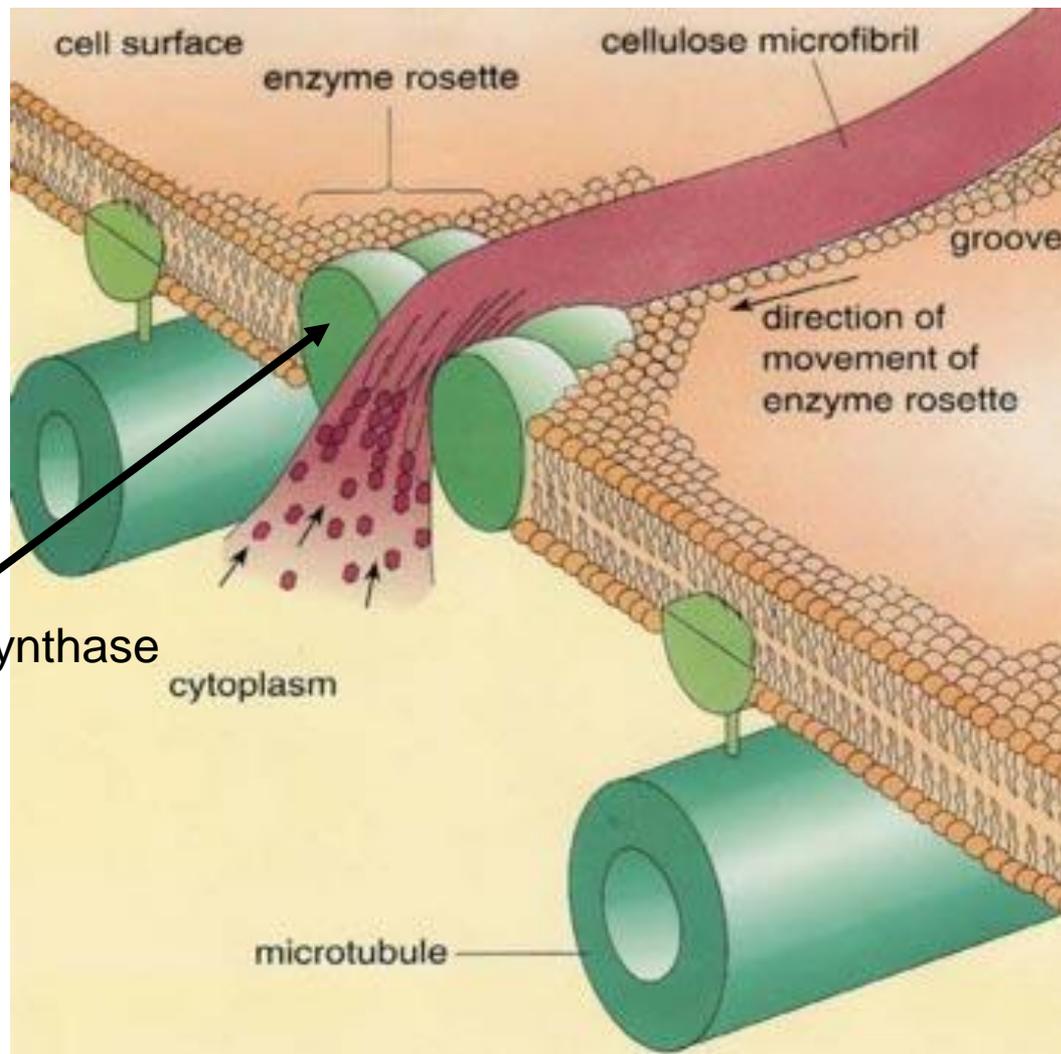
a - Représentation schématique du rôle possible des expansines dans l'auxèse

Doc4b- Deux mécanismes contribuant à la déformation pariétale lors de l'auxèse

d'après <http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/cell/08hypothese.htm>



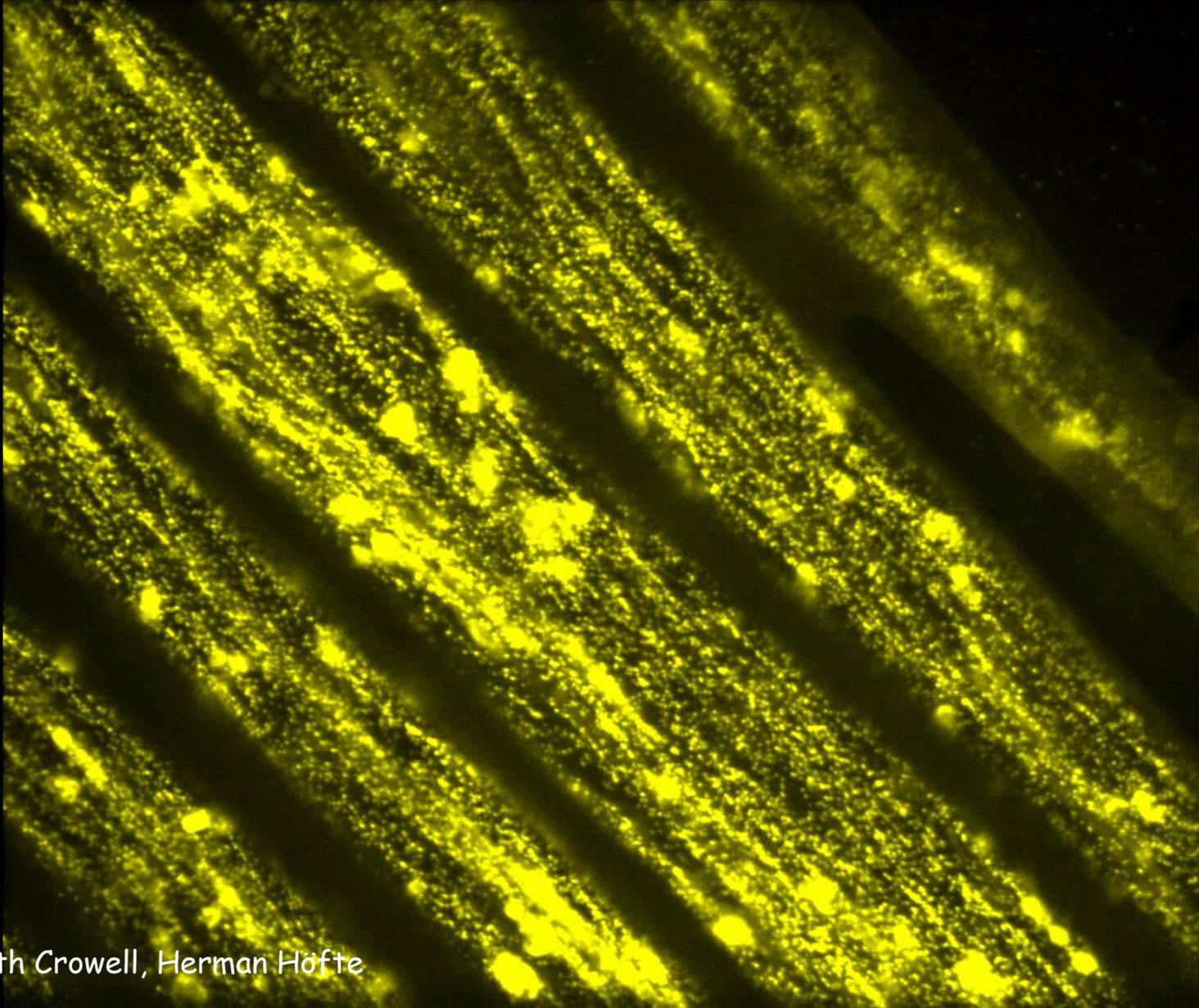
b - Représentation schématique du rôle endo xyloglucane transférases dans l'auxèse



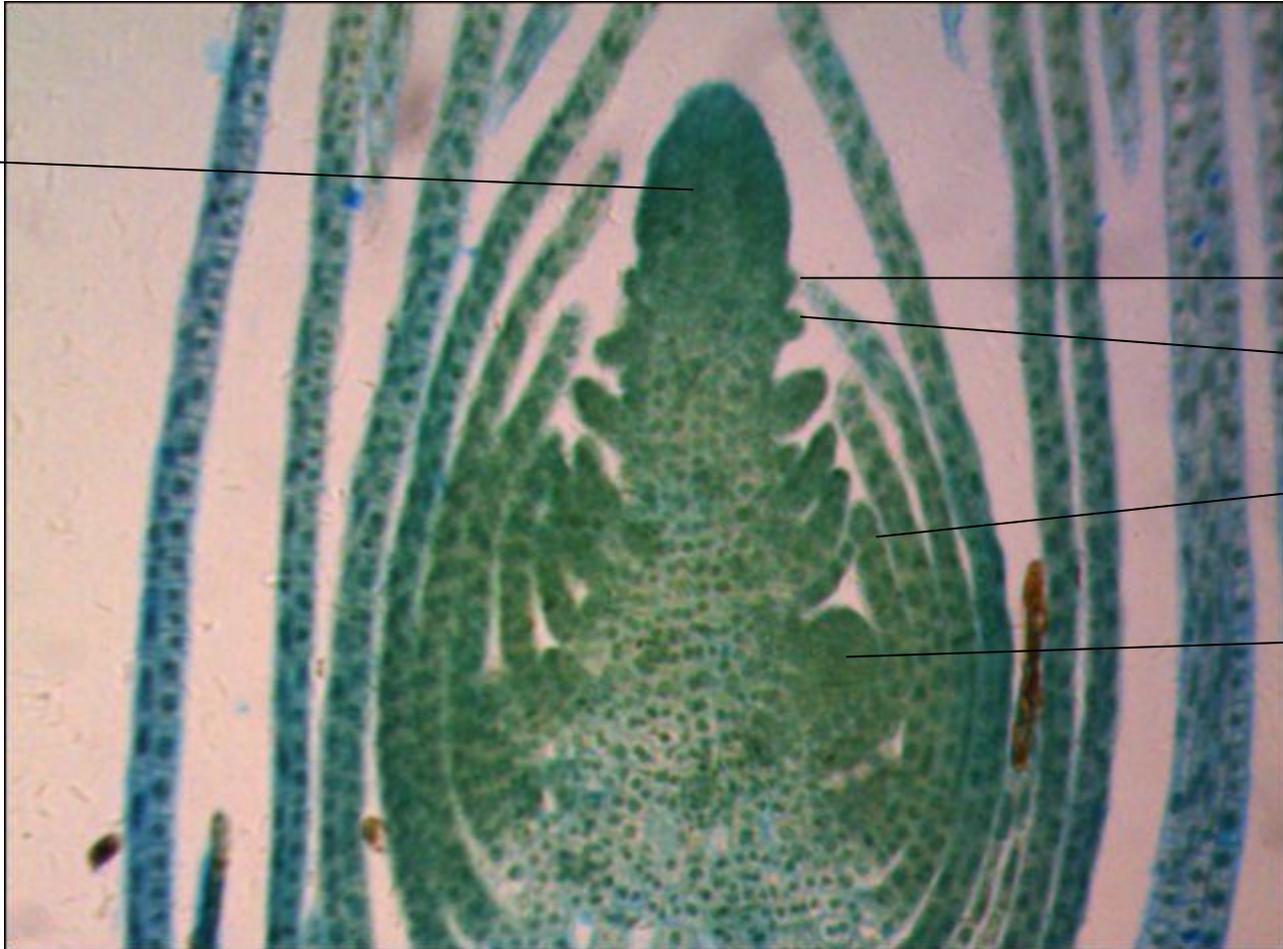
Complexe cellulose synthase

Mise en place des microfibrilles de cellulose par les complexes en rosette (cellulose synthase) de la membrane plasmique

*Parcours de la **cellulose synthase** le long des
microtubules du cytosquelette*



Coupe longitudinale d'un bourgeon d'élodée



Méristème apical

Initium foliaire

primordium

ébauche foliaire

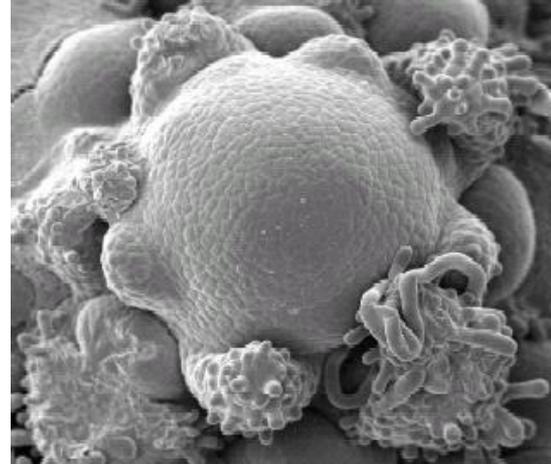
bourgeon axillaire



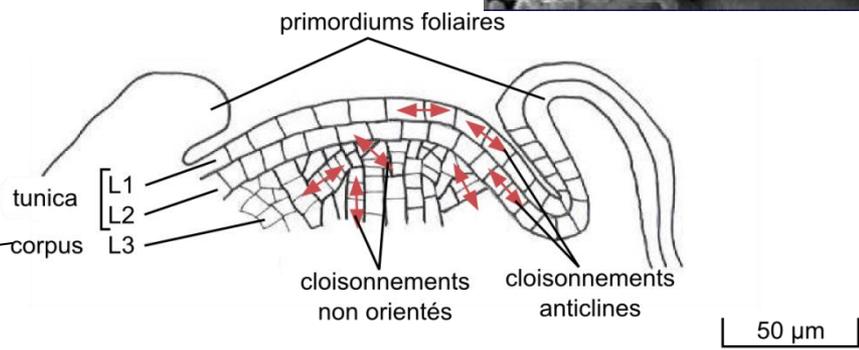
L'arabette des dames
Arabidopsis thaliana (Brassicacées)

Méristème apical caulinaire d'*Arabidopsis thaliana*

Coupe longitudinale

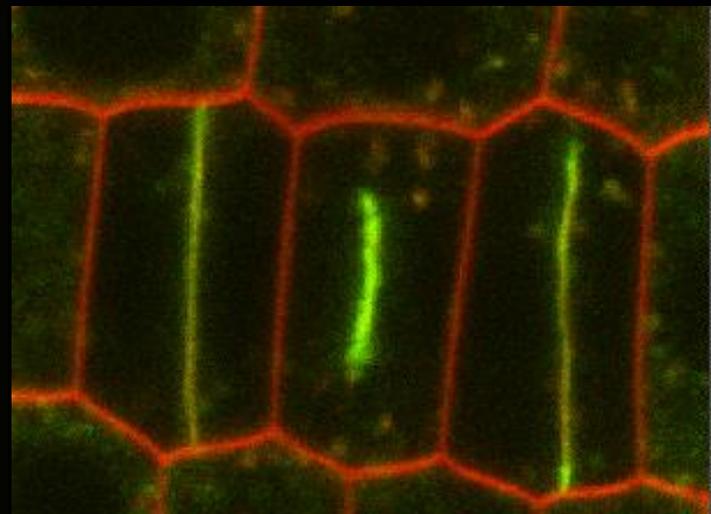
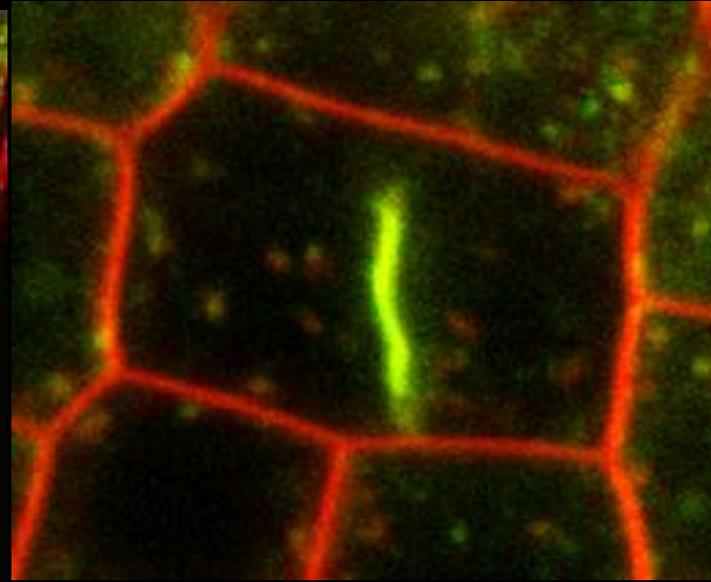
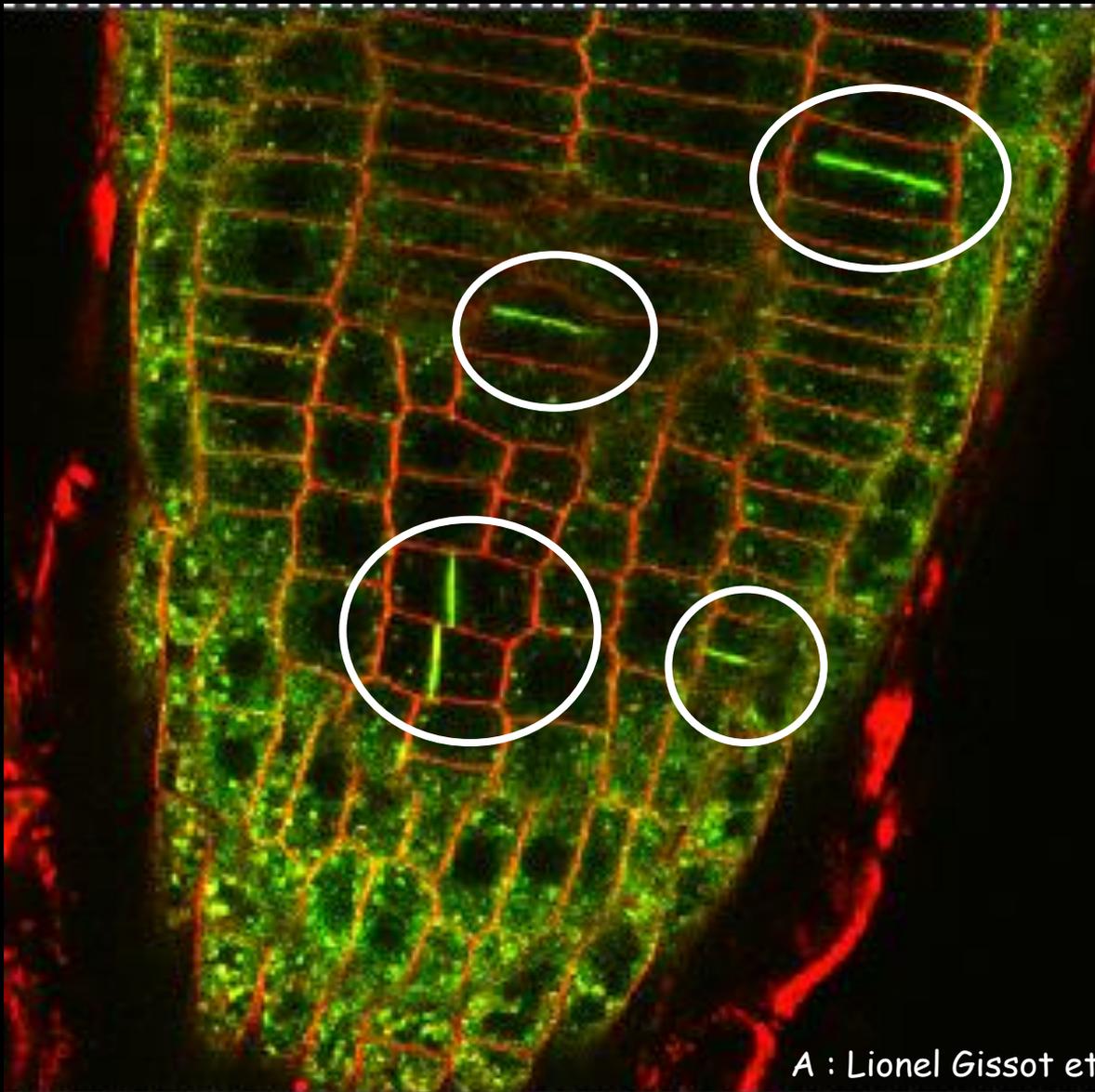


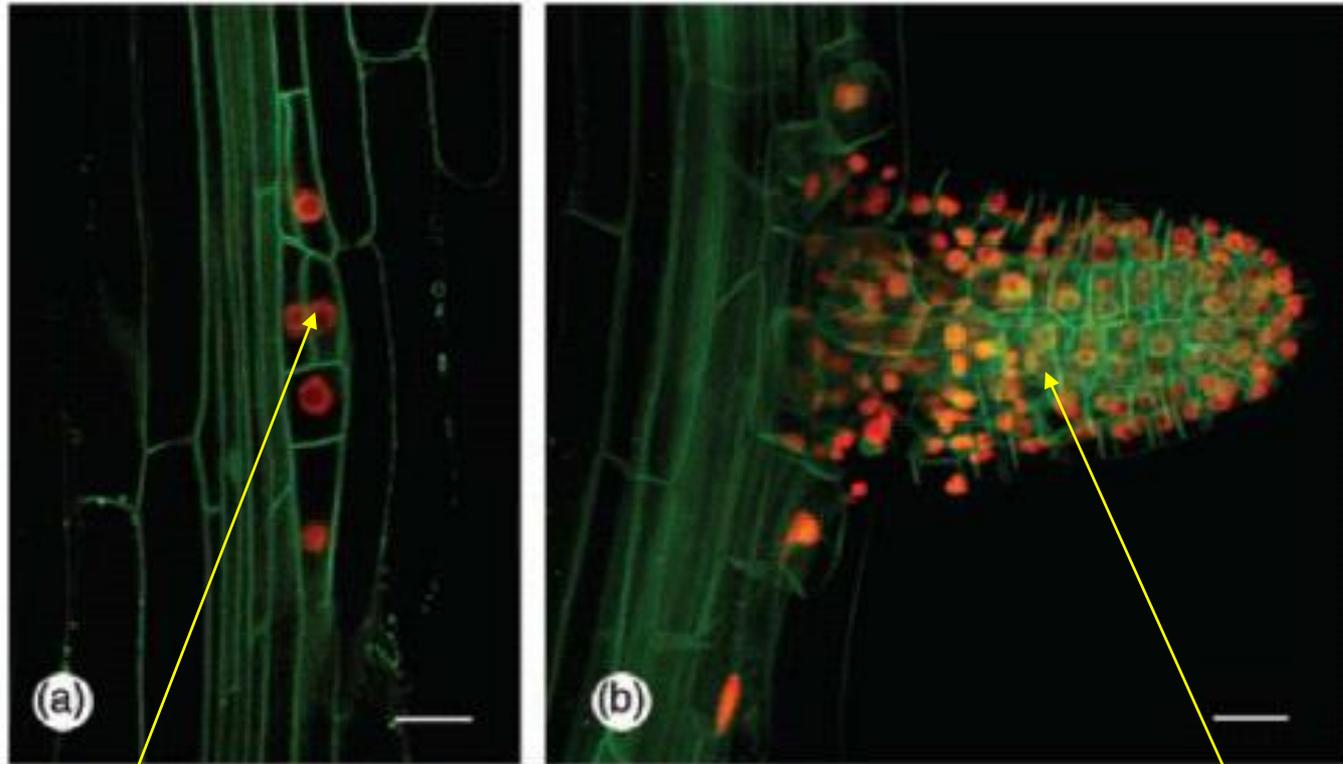
<http://www.csrs.riken.jp/en/labs/cfurt/index.html>



a) zonation fonction de l'orientation des cloisonnements cellulaires

Pointe racinaire : cellules en division



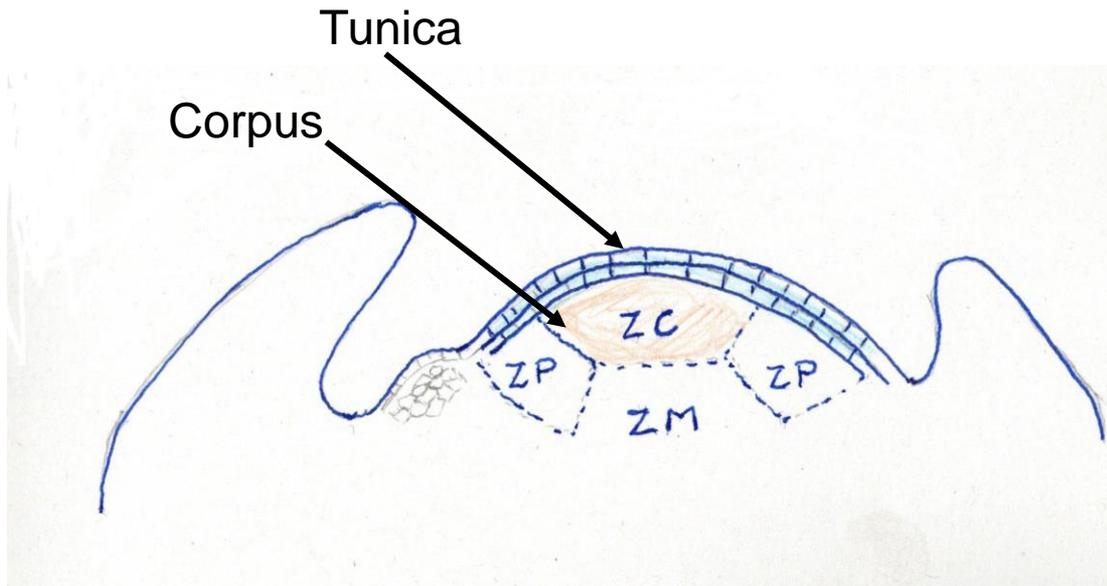


Primordium radulaire

Dédoublement (cloisonnement péricline) des cellules du péricycle

Attention , ici au niveau d'une racine

Doc 5 -Organisation du méristème apical caulinaire



Stratification horizontale :

Tunica : 2-3 assises cellulaires, les divisions sont exclusivement anticlines

Corpus : cellules plus profondes, pas d'orientation préférentielle des divisions

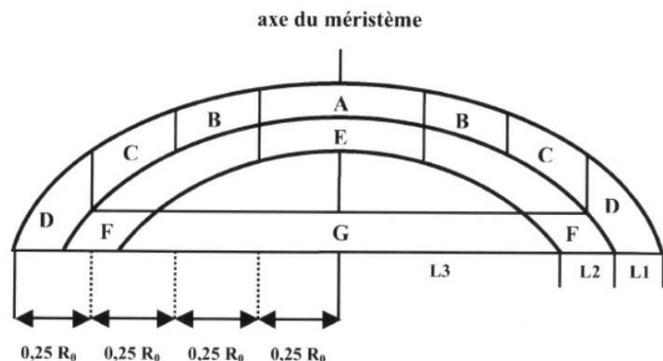
Organisation radiale:

ZC zone centrale faible taux de division

ZP zone périphérique annulaire taux de division plus fort, zone de formation des primordiums foliaires

ZM zone médullaire cellules plus grandes qui produisent les parties internes de la tige

Conclusions: la zone centrale permet le maintien des cellules souches, la zone périphérique permet la mise en place des organes latéraux.



Définition des domaines du MAC d'*Arabidopsis thaliana*. Sept domaines ont été définis (A à G). La couche L1 comprend quatre domaines concentriques (A à D) qui, lorsqu'ils sont projetés sur la base du méristème, correspondent à quatre domaines circulaires de largeur $0,25 R_0$, où R_0 est le rayon de la base du méristème. Les cellules de la couche L2 qui sont au-dessous du domaine A forment le domaine E. Sur la base du méristème, les cellules de la couche L2 et de la couche L3 forment respectivement les domaines F et G.

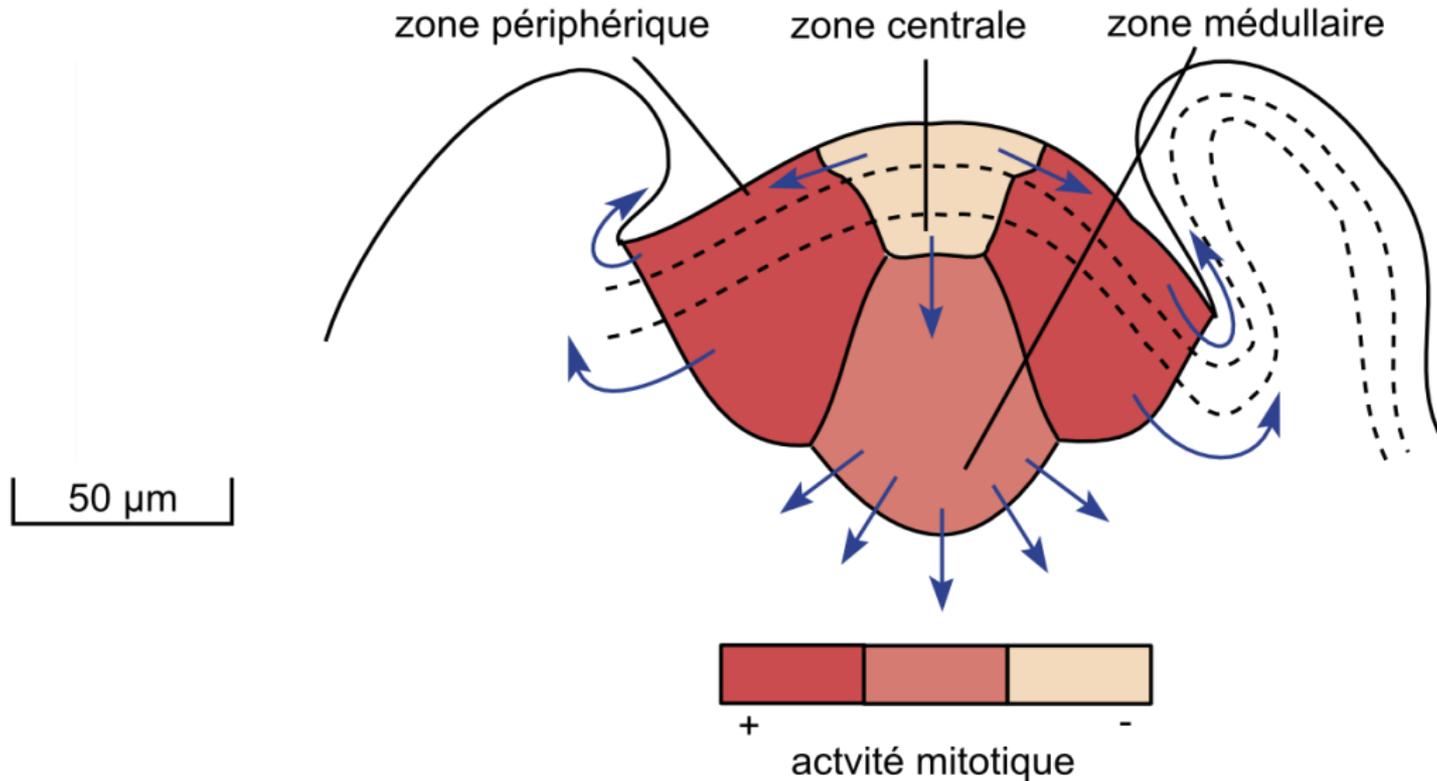
Tableau 1. Index mitotique et taille des cellules méristématiques dans le MAC d'une population sauvage d'*Arabidopsis thaliana*. Le diamètre de la base du méristème est de $52 \mu\text{m}$. Les nombres entre parenthèses correspondent aux marges d'erreur standards.

Zones méristématiques	Nombre de méristèmes ^a (n)	Nombre de cellules ^a	Nombre de mitoses ^a	Index mitotique	Taille ^b en μm
Couche L1					
Domaine A	50	280	5	1,8 % (0,6)	5,1 (0,2)
Domaine B	50	329	14	4,3 % (0,5)	4,5 (0,1)
Domaine C	50	377	17	4,5 % (0,5)	4,6 (0,1)
Domaine D	50	373	18	4,8 % (0,5)	4,5 (0,3)
Couche L2					
Domaine E	50	545	9	1,7 % (0,7)	5,2 (0,2)
Domaine F	50	1183	48	4,1 % (0,6)	4,6 (0,1)
Couche L3					
Domaine G	30	1652	40	2,4 % (0,4)	5,8 (0,1)

^a En raison du faible nombre de cellules par domaine, les mesures des nombres de cellules et de mitoses ont été effectuées sur un nombre n de méristèmes.

^b La taille cellulaire a été déterminée en mesurant la distance entre les noyaux des cellules dans les différents domaines de 12 méristèmes sauvages. Les valeurs données correspondent aux tailles cellulaires moyennes.

- Organisation fonctionnelle du méristème apical caulinaire suivant une coupe longitudinale



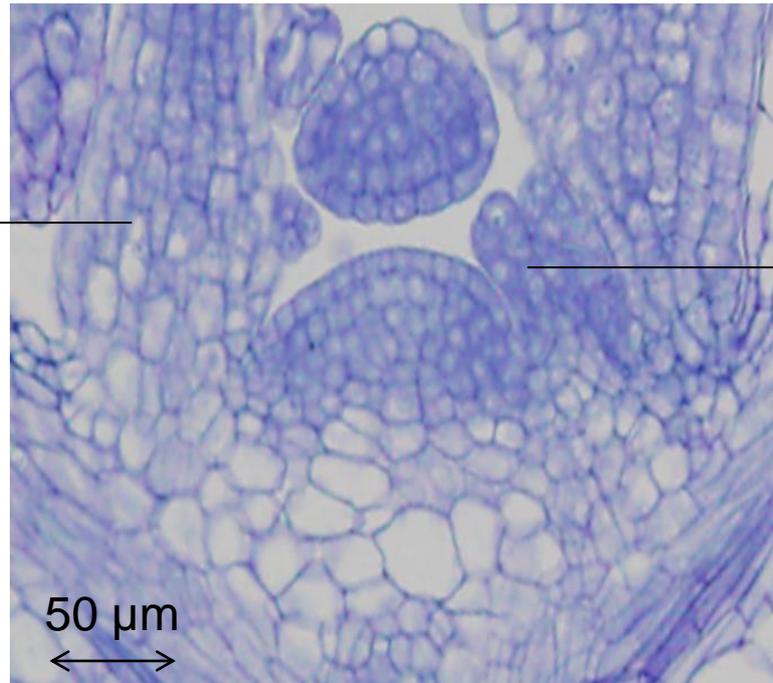
b) zonation suivant l'activité mitotique

Méristème apical caulinaire d'*Arabidopsis thaliana*

Coupe longitudinale

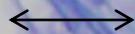
<http://www.csrs.riken.jp/en/labs/cfurt/index.html>

ébauche



primordium

50 μm



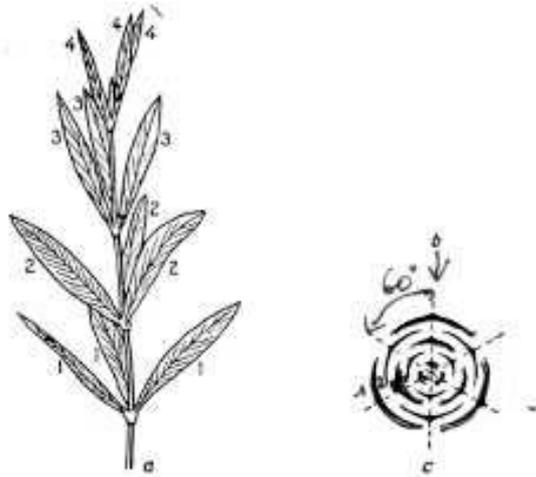


© Roland Cattaneo

Feuilles opposées décussées
(gentiane)

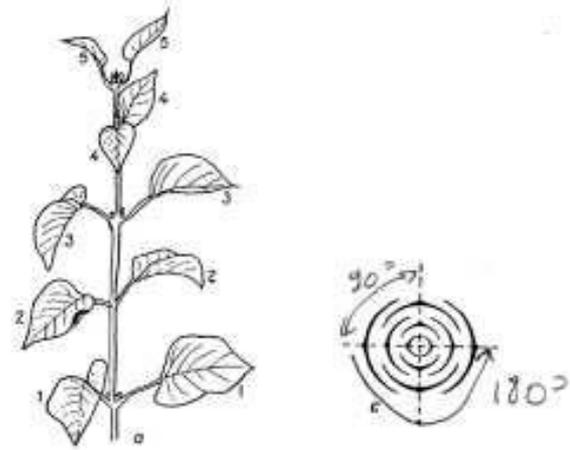


Feuilles alternes (Orme)



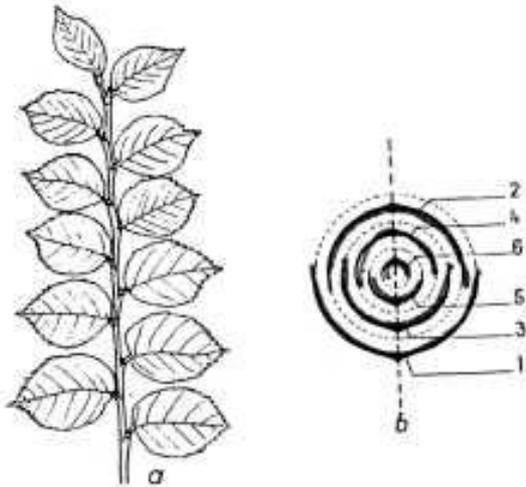
Phyllotaxie verticillée par 3

Laurier rose



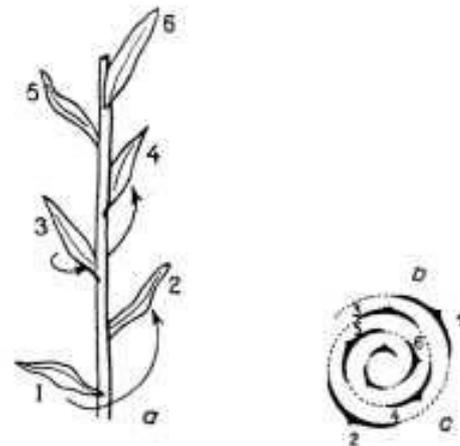
**Phyllotaxie verticillée par 2 = opposée
décussée**

Lilas



Phyllotaxie alterne distique

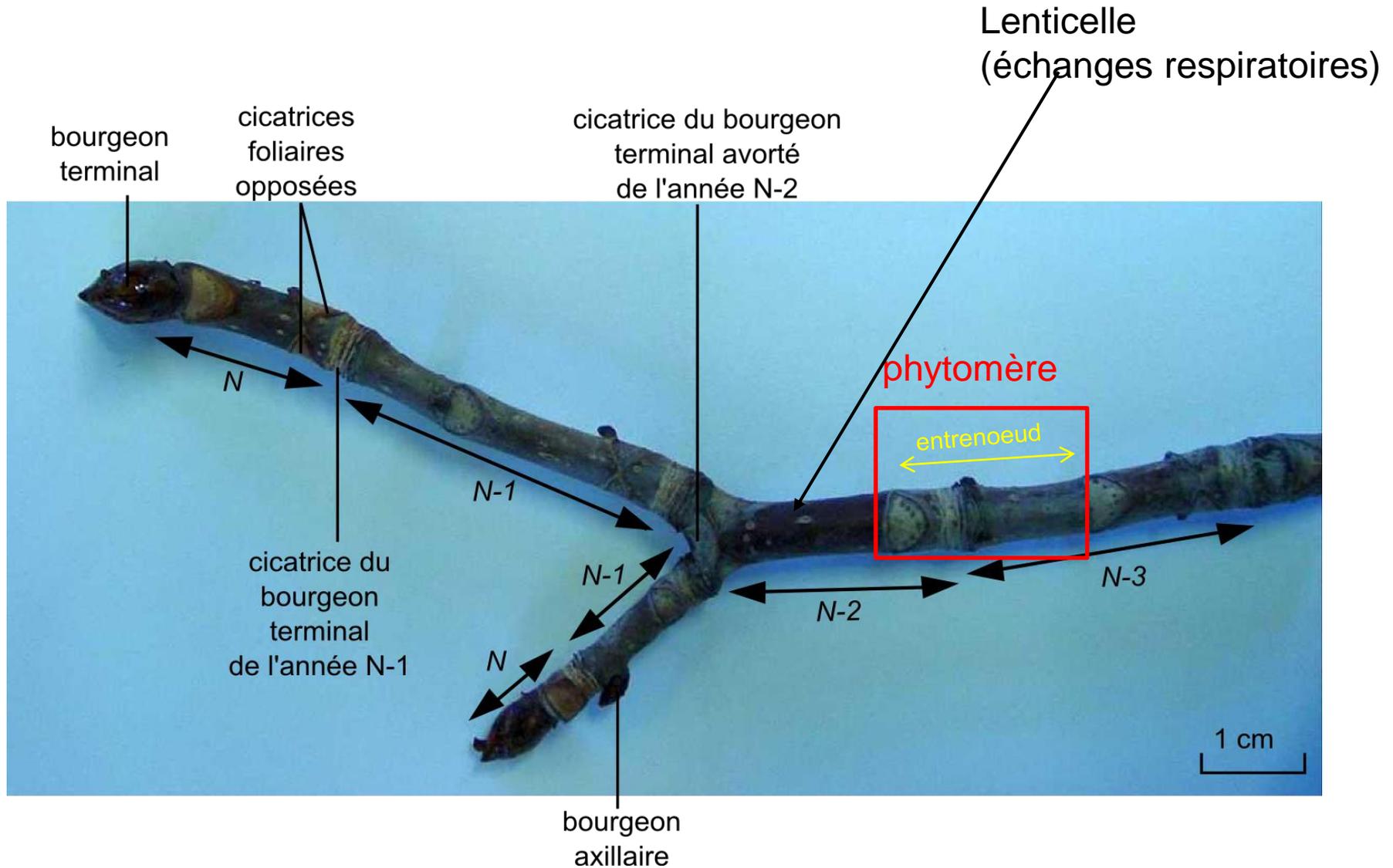
Orme



Phyllotaxie alterne quinconcial

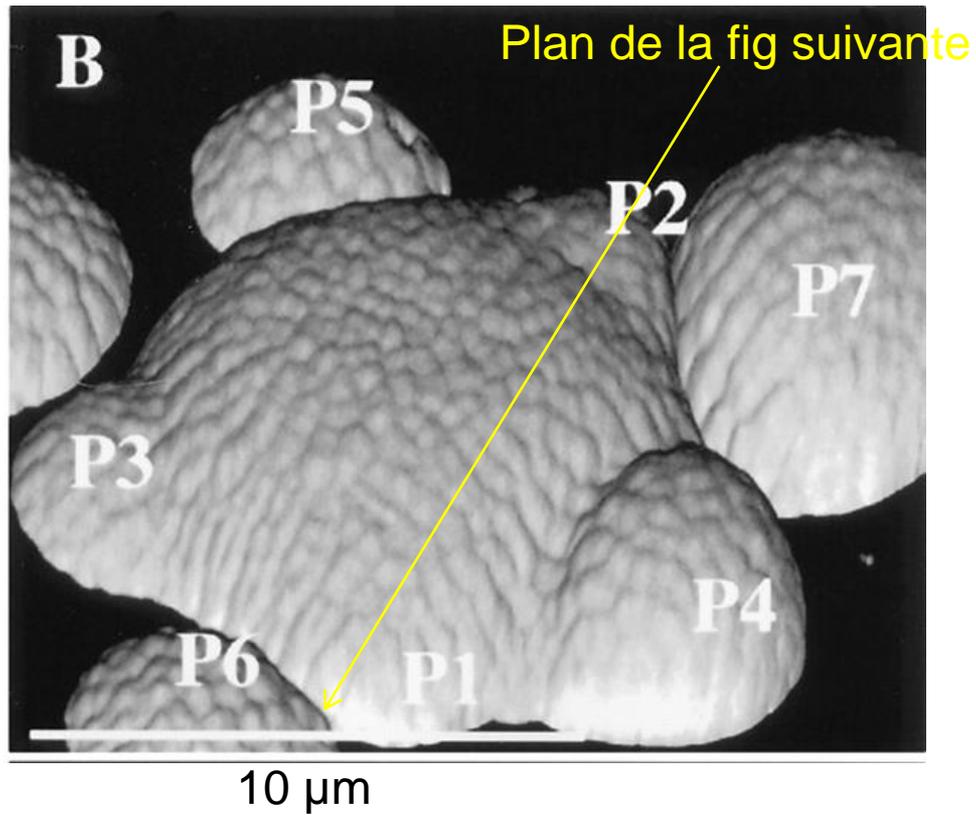
Lin

Unités annuelles de croissance d'un rameau de marronnier

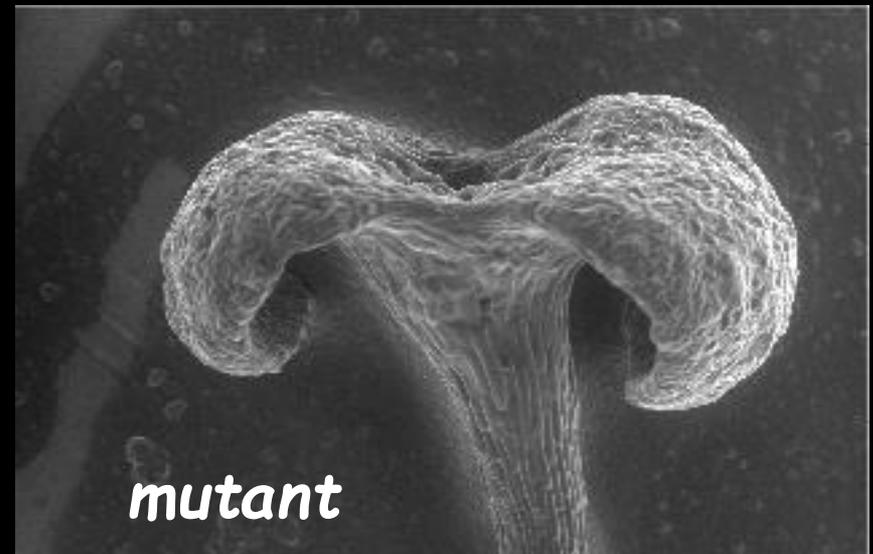
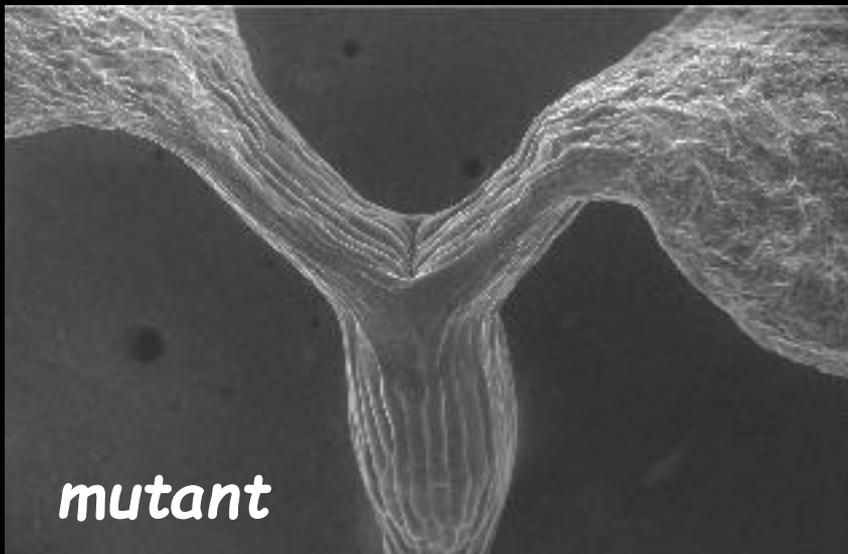
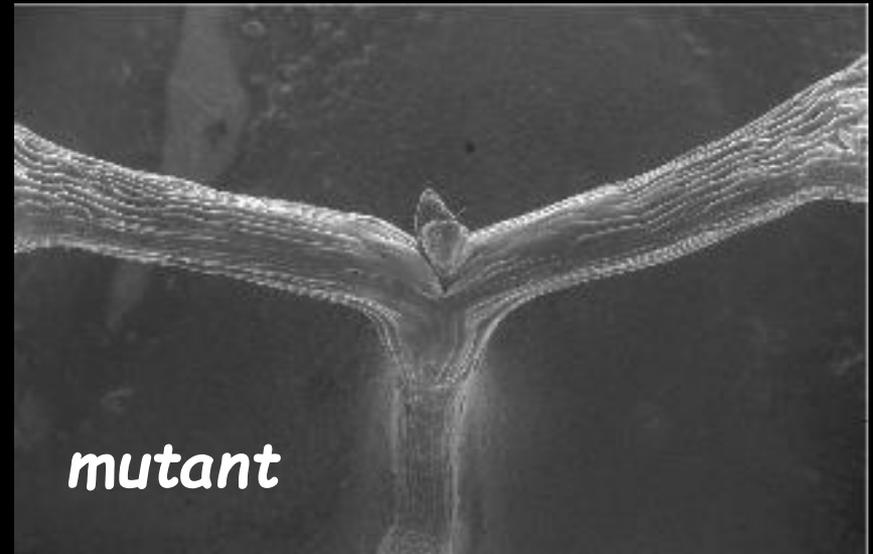
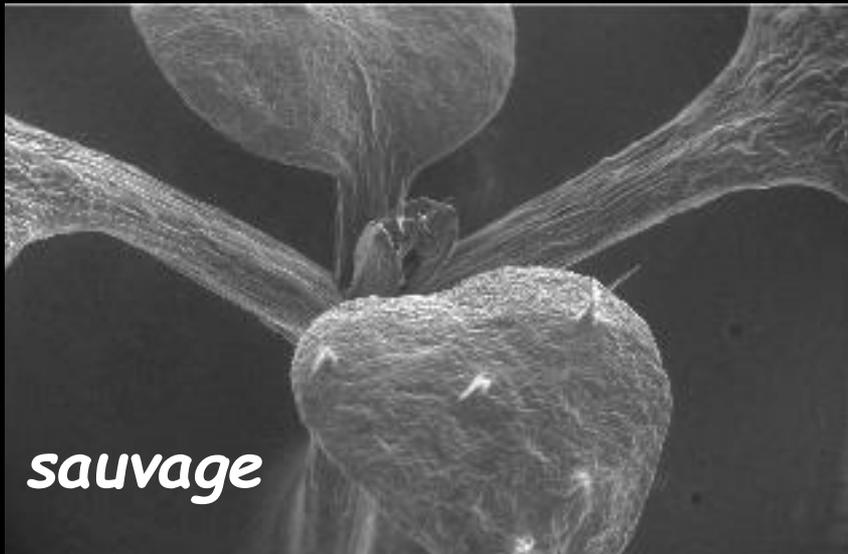


Méristème apical caulinaire d'*Arabidopsis thaliana* Vue de dessus

P. Laufs & al. <https://doi.org/10.1105/tpc.10.8.1375>

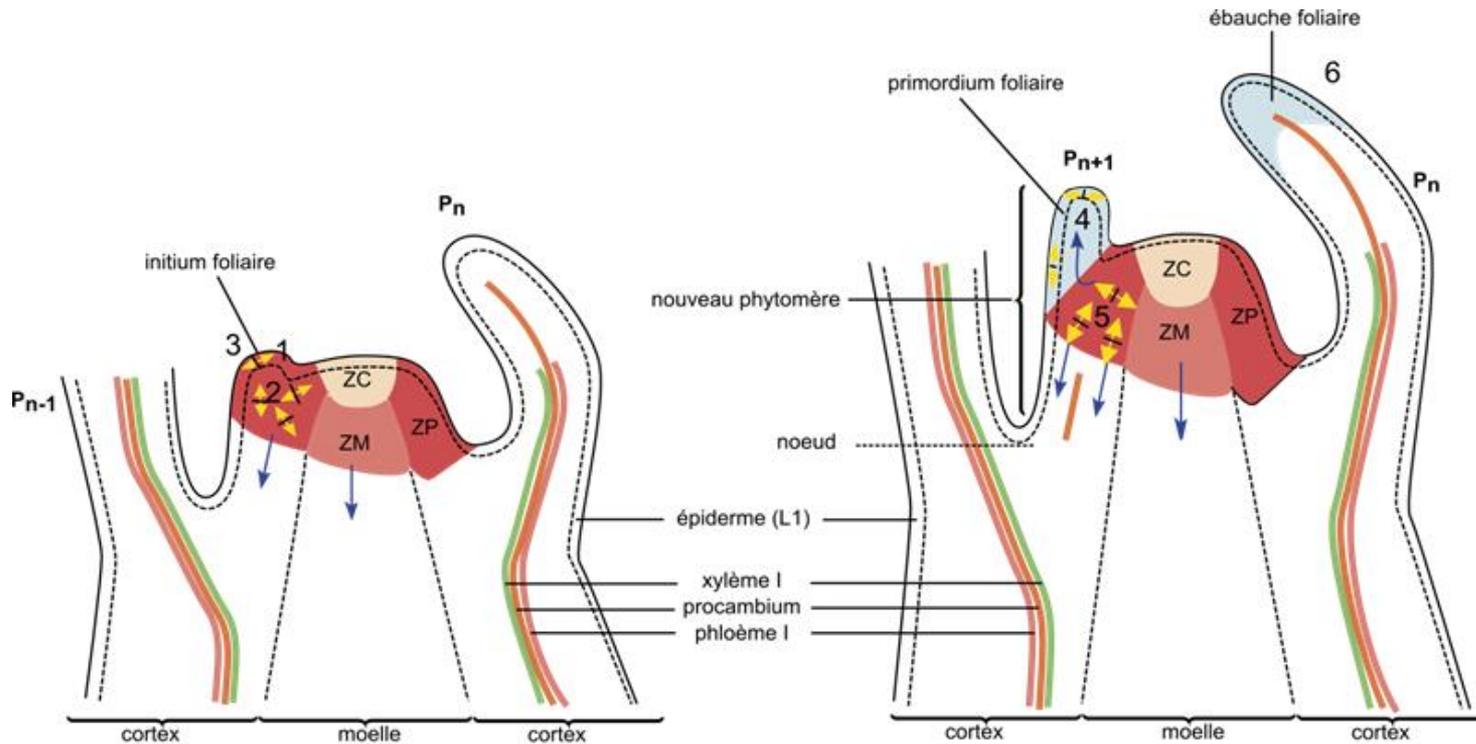


Quelques mutants d'*A. thaliana* présentant des dysfonctionnements du MAC



- Deux étapes de la mise en place d'un phytomère d'une tige à feuilles alternes

ZC : zone centrale ; ZM : zone médullaire ; ZP : zone périphérique



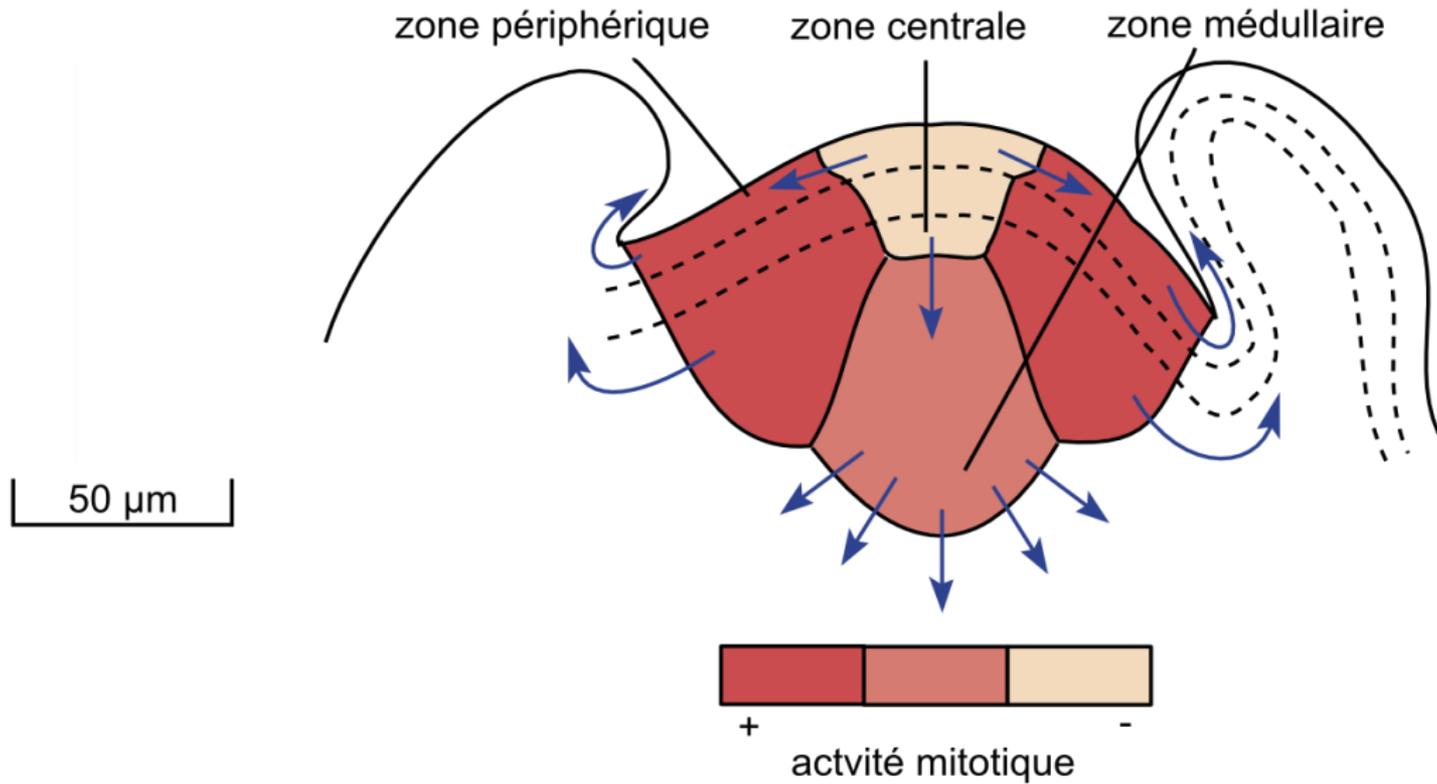
a) aire maximale de la zone périphérique

- 1: divisions anticlines de la tunica
- 2 : divisions de L3
- 3 : bombement d'un initium foliaire

b) aire minimale de la zone périphérique

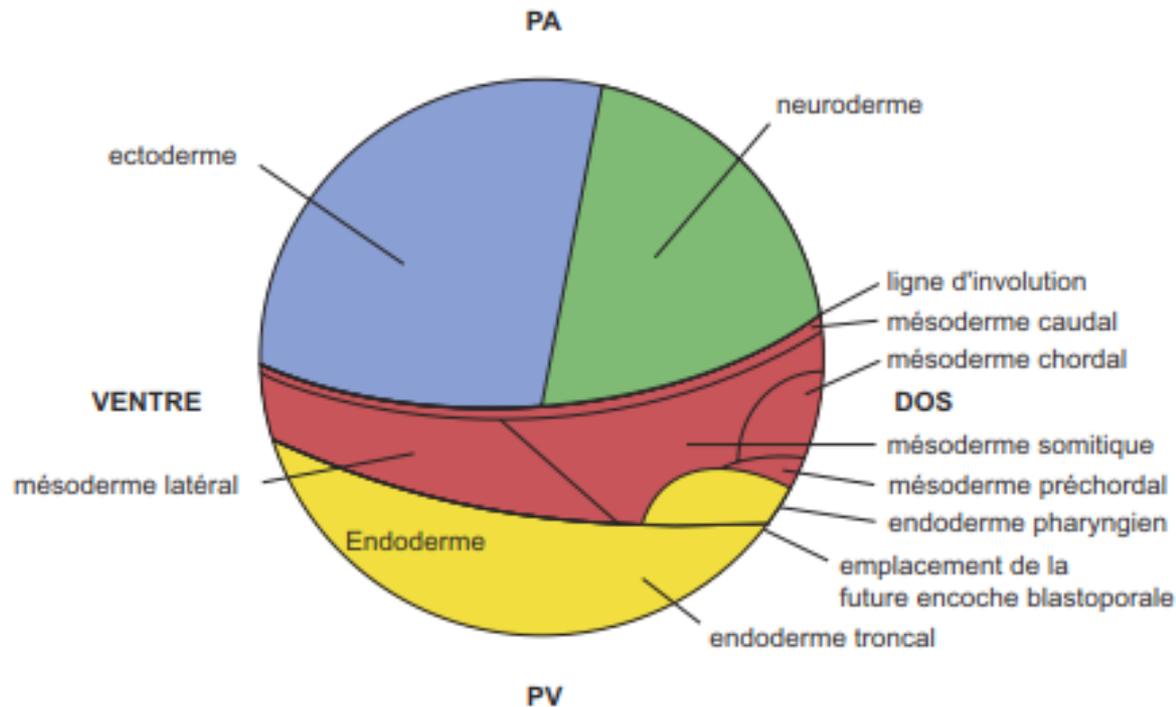
- 4: individualisation du primordium foliaire
- 5 : reconstitution de ZP
- 6 : croissance des ébauches foliaires

Organisation fonctionnelle du méristème apical caulinaire suivant une coupe longitudinale



Carte des territoires présomptifs sur une blastula d'amphibien

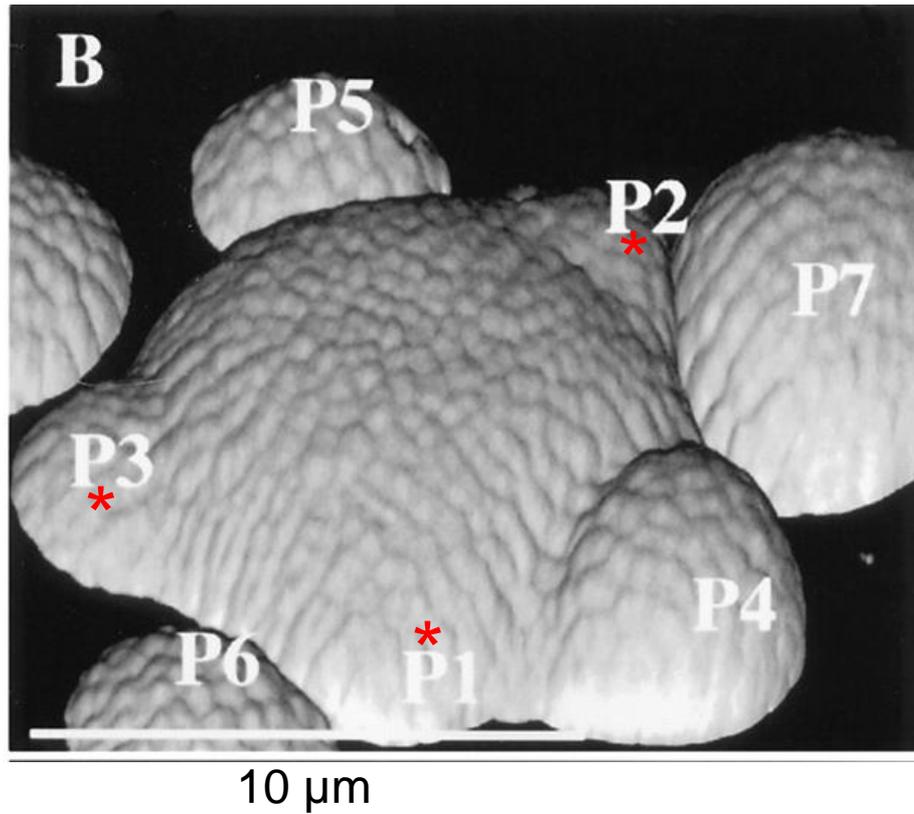
Vue latérale

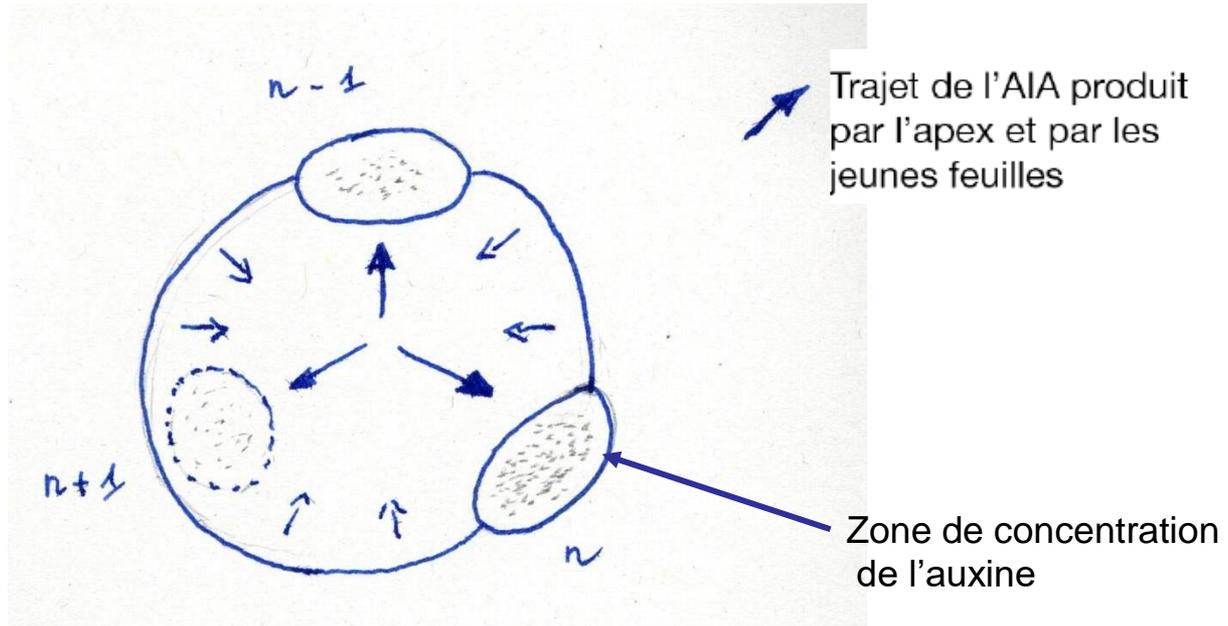


Pour comparer avec la détermination des cellules de la blastula d'amphibien

Méristème apical caulinaire d'*Arabidopsis thaliana* Vue de dessus

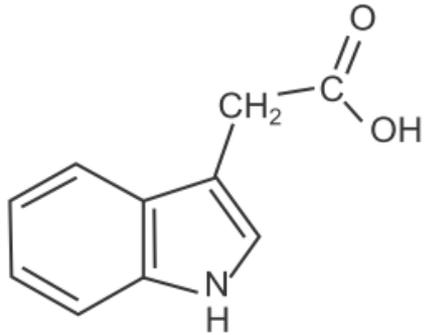
P. Laufs & al. <https://doi.org/10.1105/tpc.10.8.1375>





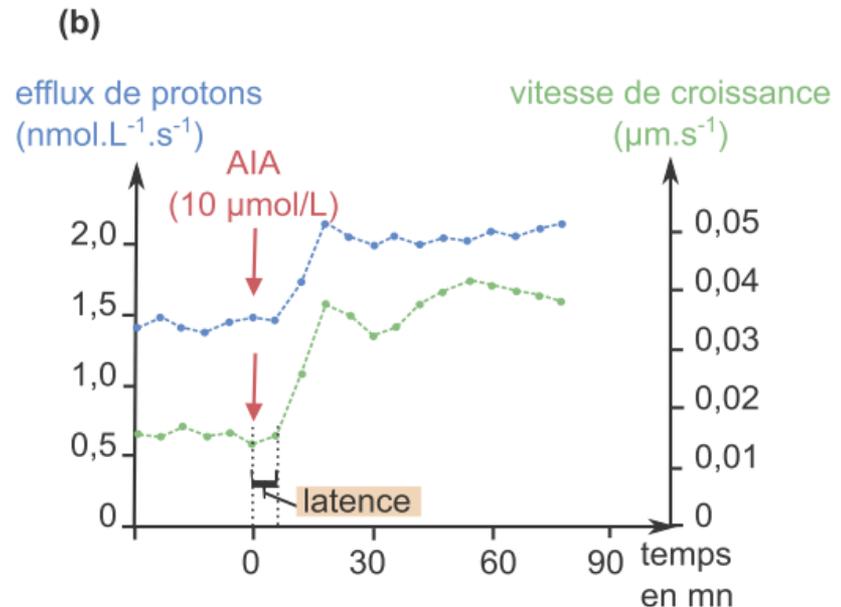
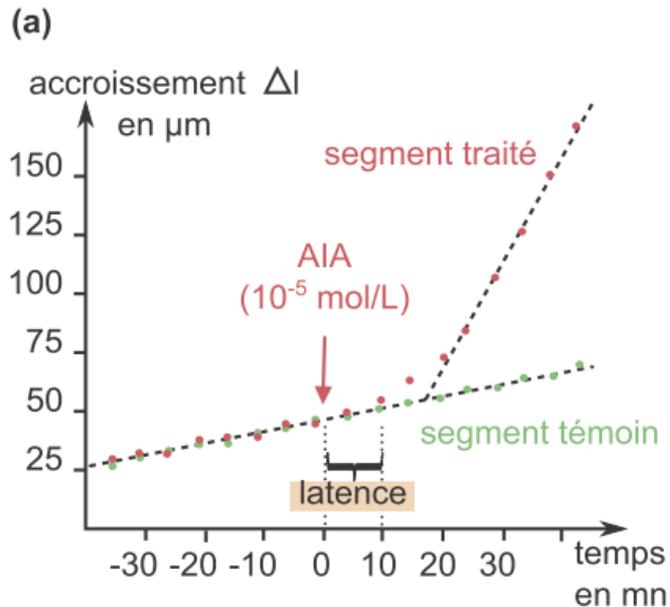
L'auxine fournit une information de position

Doc 7 - Effet d'un traitement à l'auxine de jeunes segments de coléoptiles d'avoine



L'auxine : acide indol-acétique (AIA)

Un composé lipophile pouvant être ionisé



Mycorhizes (vue externe)

Racine longue

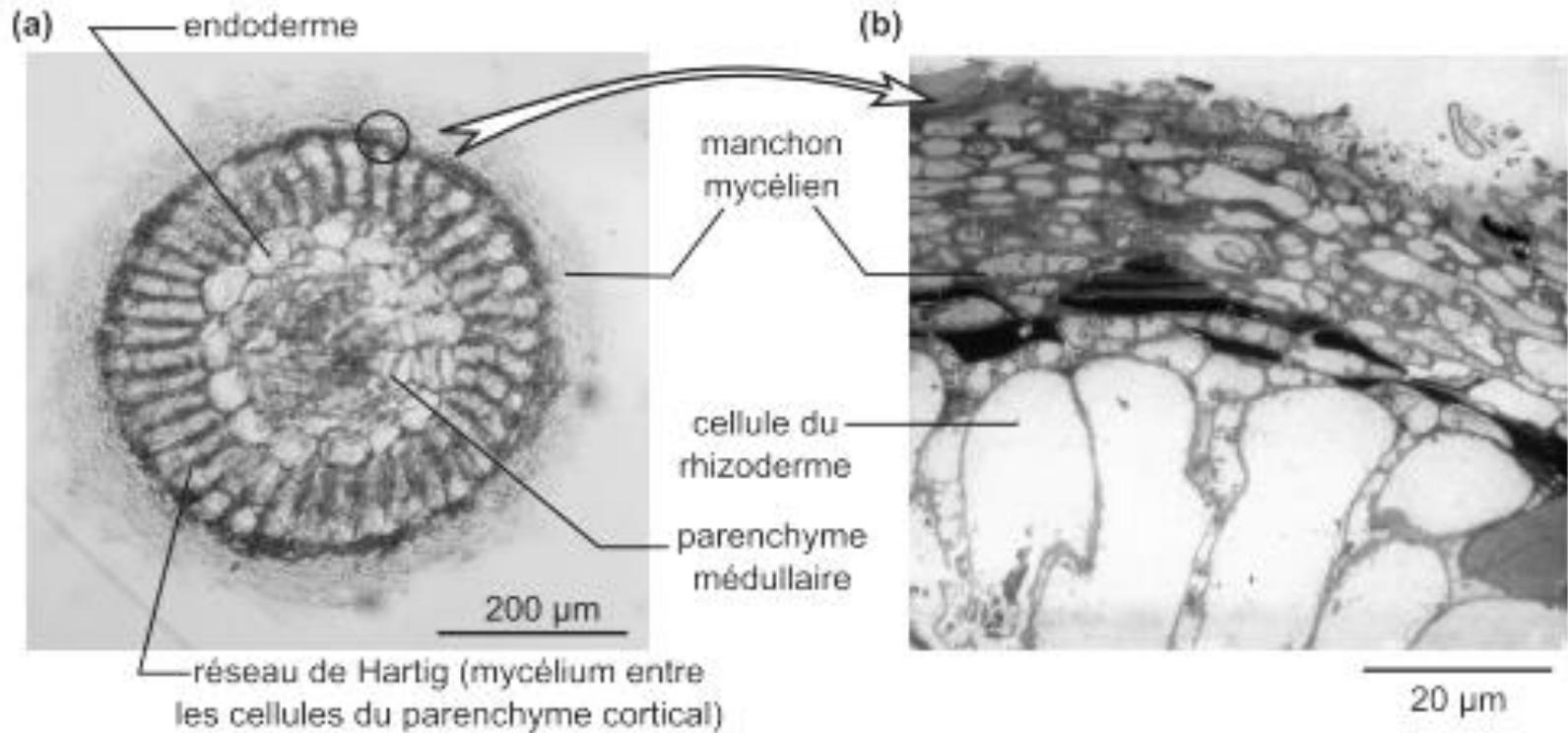


0,1 mm

Hyphes
extra-racinaires

Racine latérale courte
recouverte d'un manchon

Coupe transversale d'une racine mycorhizée

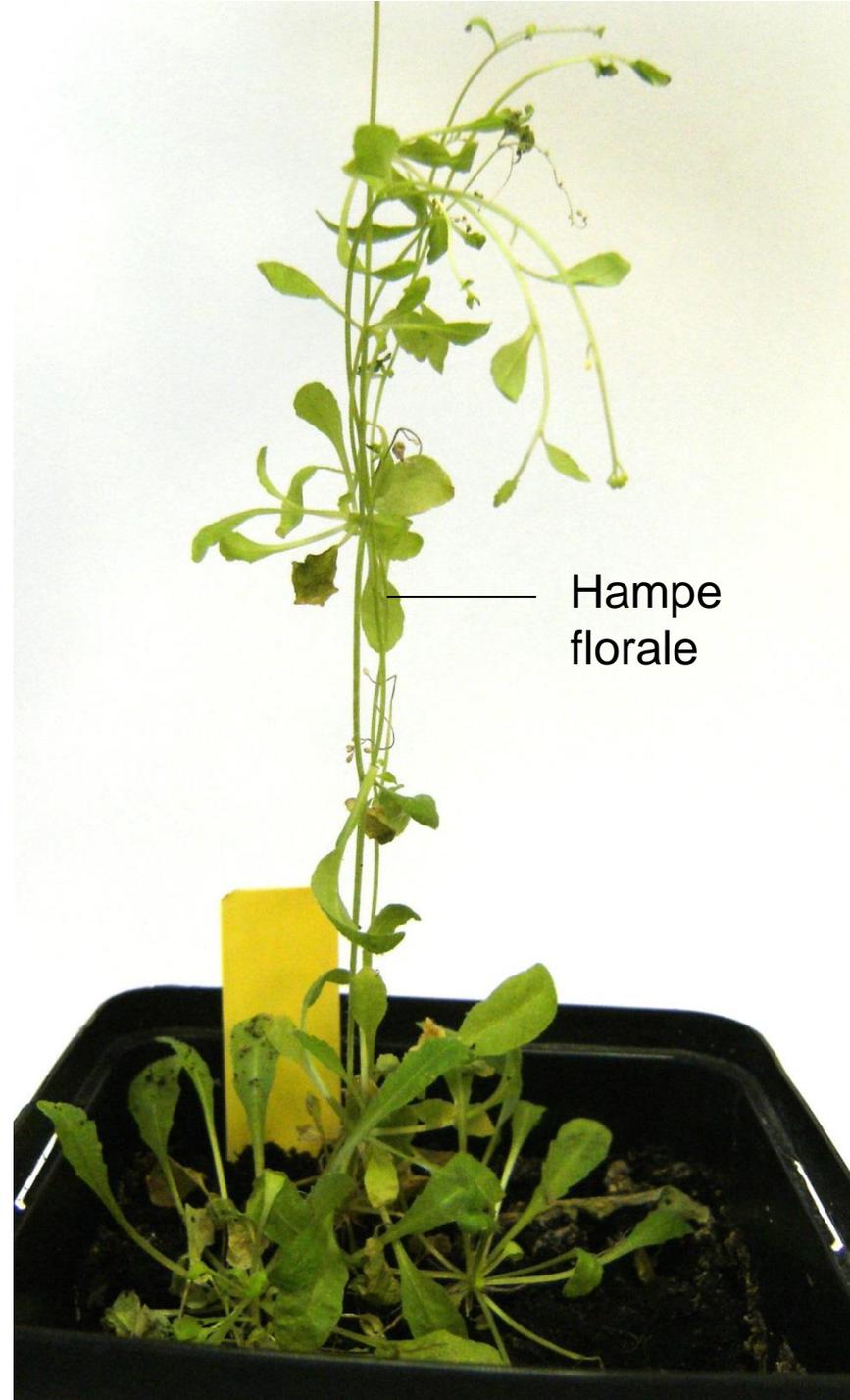


Conclusion I. **Comparaison développement animal et végétal**

- - Mêmes processus à l'échelle de l'organisme (croissance ; modifications qualitatives) et à l'échelle cellulaire (mitose, grandissement cellulaire ; différenciation). Plus grande importance du grandissement cellulaire chez les végétaux. Pas de mouvements cellulaires.
- - Croissance définie chez les animaux ; indéfinie chez les végétaux (compense leur vie fixée)
- - Le plan d'organisation des Angiospermes est mis en place comme celui des Vertébrés = individualisation progressive de territoires de plus en plus déterminés. Mais une différence majeure : plus grande aptitude à la dédifférenciation des cellules végétales.
- - Contrôle par communication intercellulaire relayée par une communication intracellulaire + contrôle par l'environnement (facteurs abiotiques et biotiques, y compris chez les vertébrés). Davantage de plasticité chez les végétaux
- Ces caractéristiques permettent au végétal, organisme fixé, une exploration de son milieu, une adaptation aux modifications environnementales.

Arabette des dames
Arabidopsis thaliana (Brassicacée)

Stade végétatif : rosette



Hampe
florale

L'inflorescence d'*Arabidopsis thaliana* (Brassicacée)

Peycru & al. Biologie BCPST2. Dunod 2014

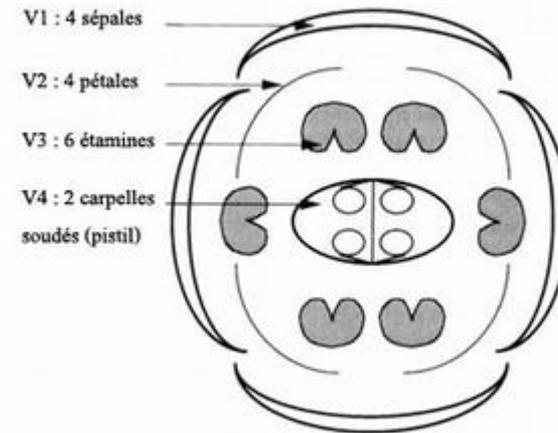
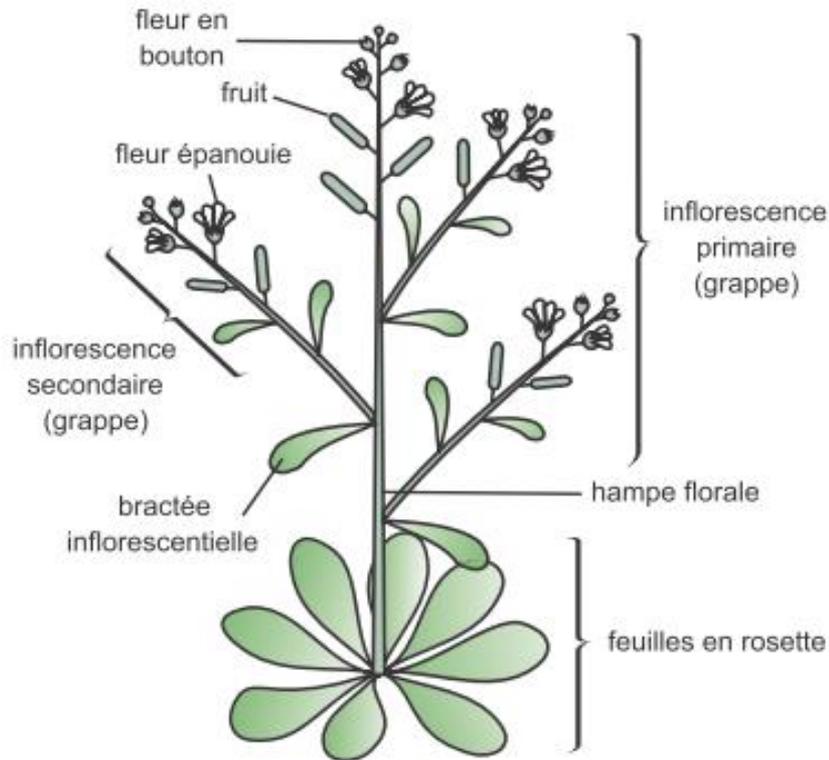
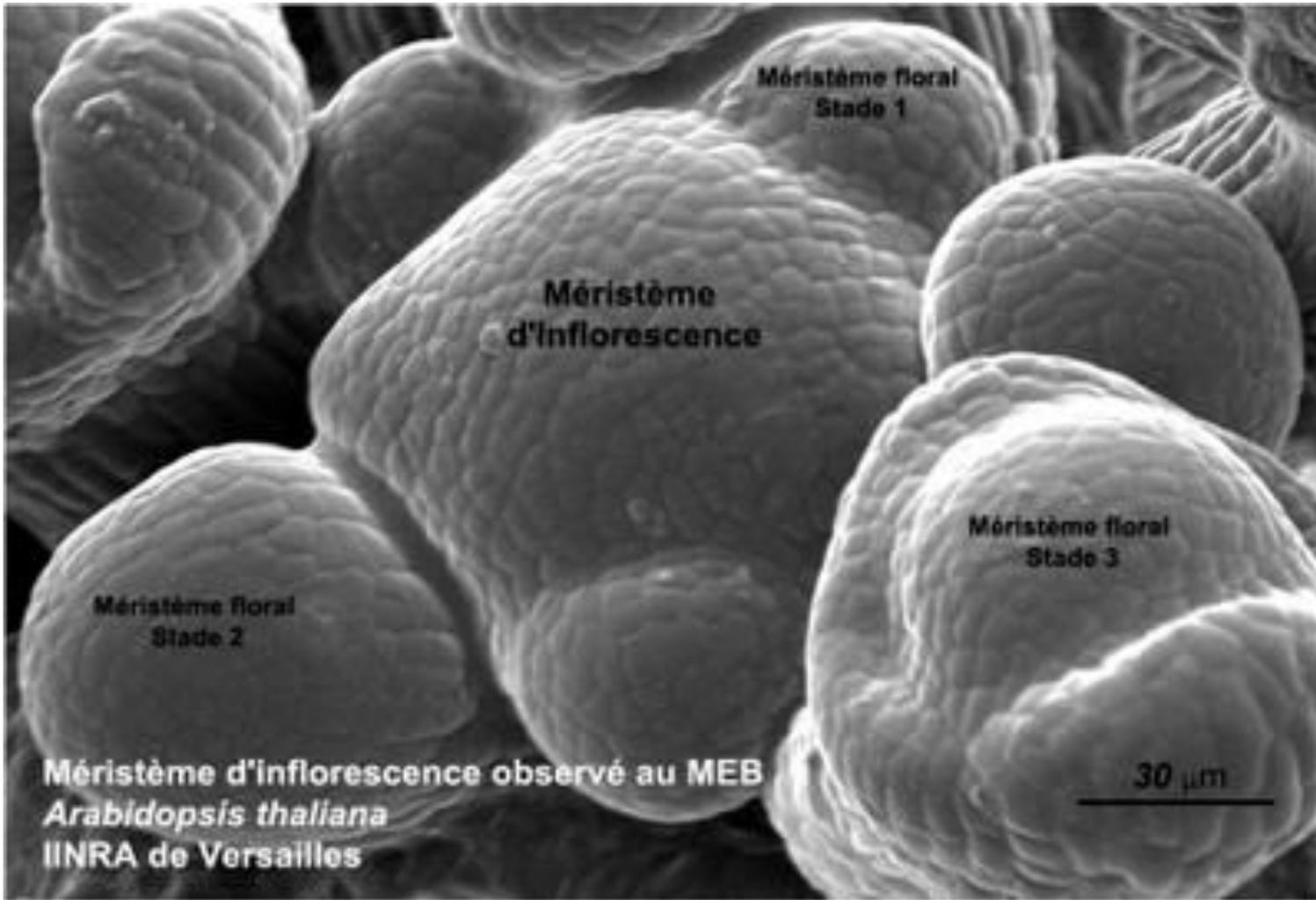


Diagramme floral d'*Arabidopsis thaliana*

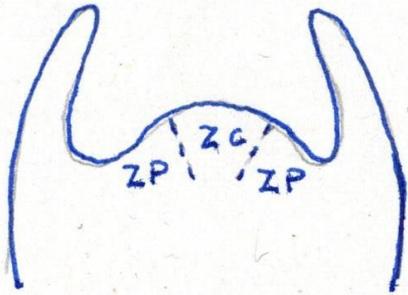
⊖ 4S, 4P, 4+2 E, (2C)

Inflorescence en grappe: observez la succession des fleurs sur la tige

Méristème inflorescentiel d'Arabidopsis



zone centrale
peu active

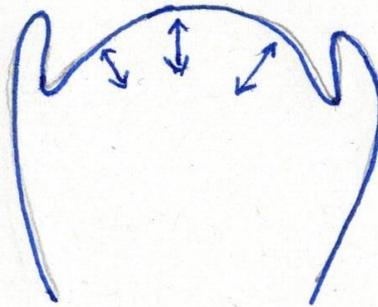


Virage floral



facteurs environnementaux

zone centrale
active



Initiation
florale



facteurs
génétiques

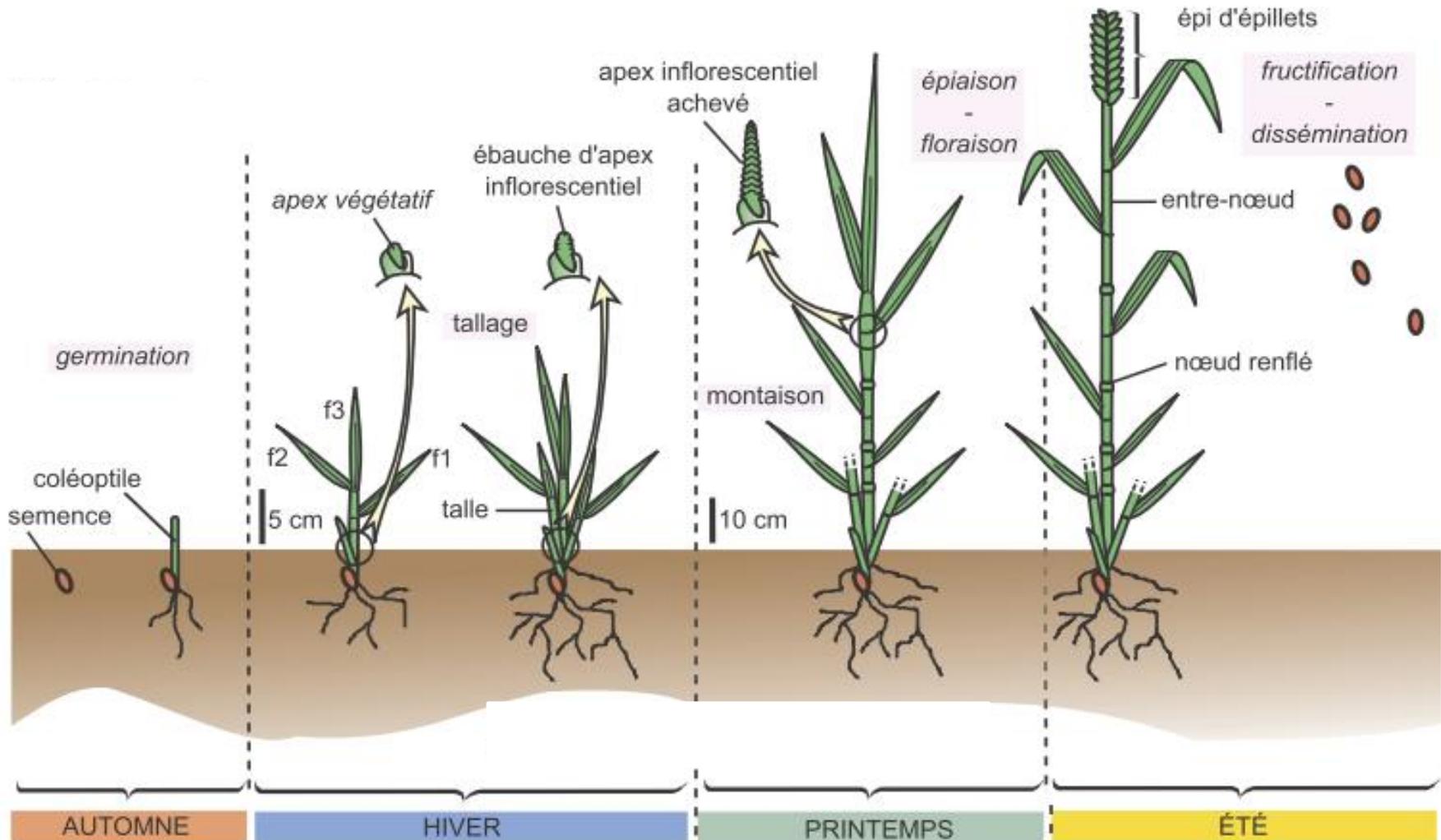
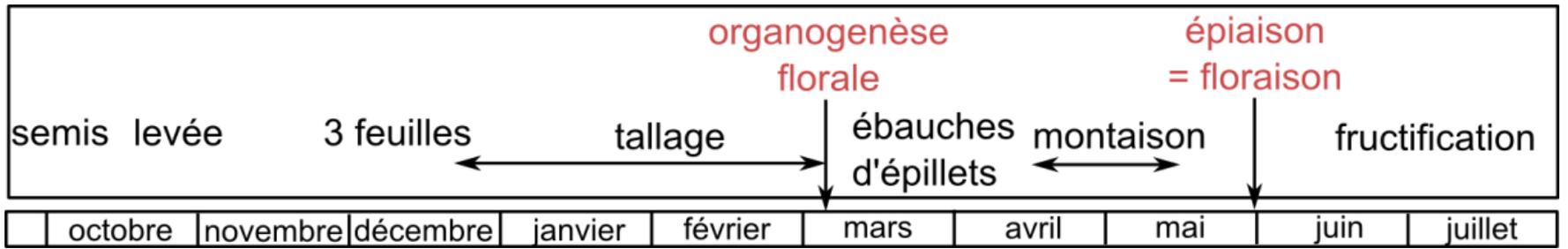
ébauche des
pièces florales

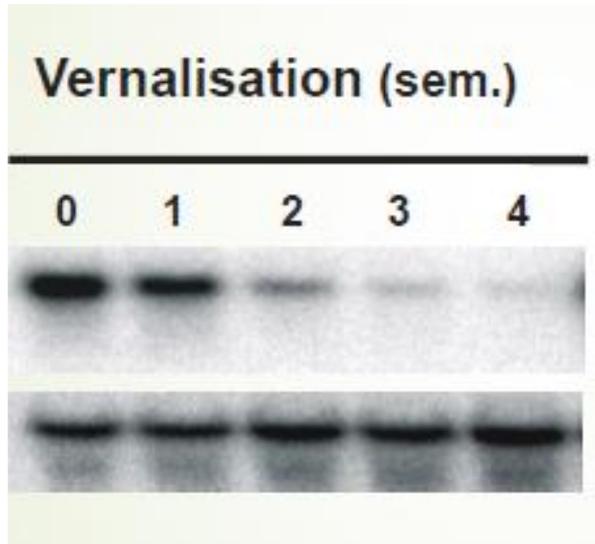


Morphogenèse
florale

Bouton floral

- Cycle du blé d'hiver

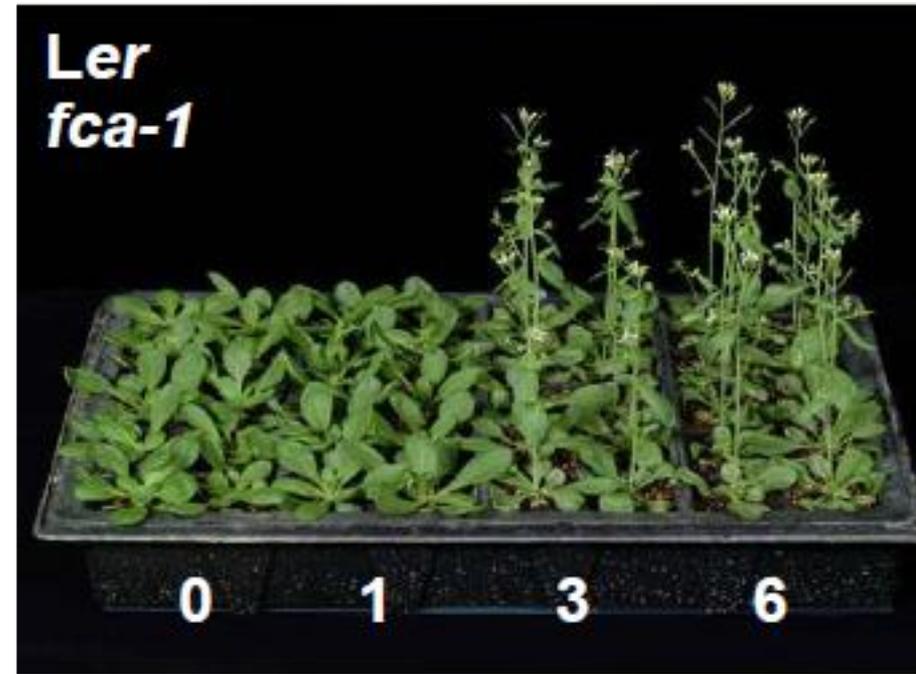




FLC

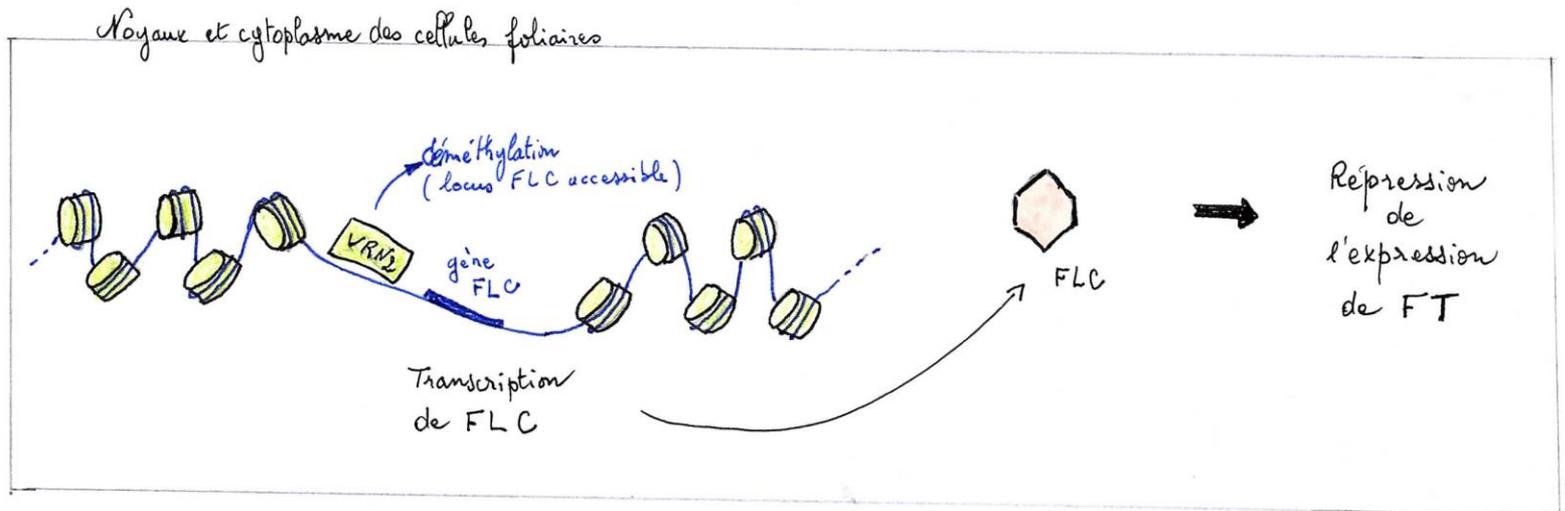
Tubuline β

Northern blot de plants soumis à des séjours au froid de différentes durées



Le froid diminue le niveau d'expression de l'ARN du FLC (répresseur de la floraison)

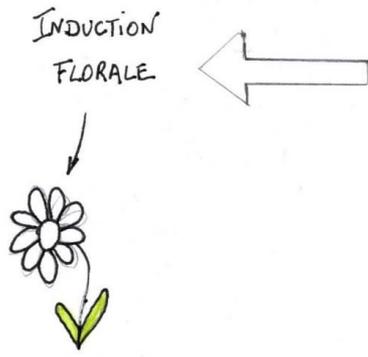
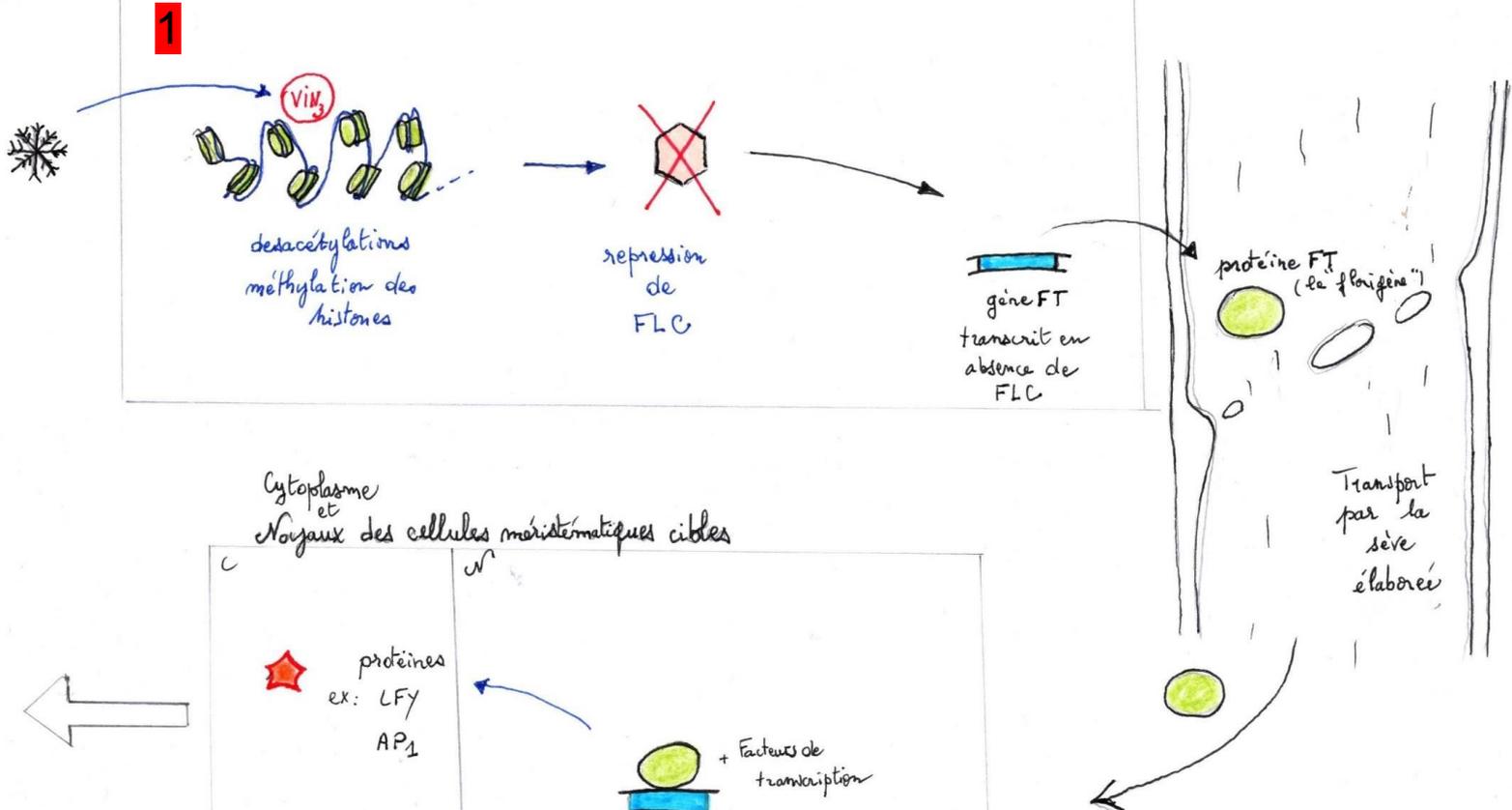
Absence de passage au froid



En absence de froid, le gène FLC est exprimé et la protéine FLC réprime l'expression de FT

- La vernalisation -

Noyaux des cellules foliaires



Le froid en inhibant l'inhibiteur FLC stimule la floraison

A retenir sur la vernalisation et le déclenchement de la floraison:

- Un ensemble de modifications déclenchent peu à peu la répression du gène *FLC* (exprimé dans le MAC) et l'activation d'autres gènes dont le gène *FT*, l'activateur du devenir floral du MAC : le gène *FT* code la protéine FT.

parmi les modifications, un séjour au froid provoque l'expression du gène *VIN3*

Arguments expérimentaux **(1)**: mutant *vin3*, l'expression de *FLC* demeure inchangée après traitement par le froid. Des expériences d'immunoprécipitation de la chromatine ont par ailleurs montré que la répression de *FLC* par *VIN3* implique des modifications profondes de la chromatine au niveau du locus cible, qui passe d'un état « euchromatinien », caractérisé par une hyperacétylation des histones H3 et H4 ainsi qu'une triméthylation de la lysine 4 de l'histone H3 (H3K4me₃), à un état « hétérochromatinien », marqué par une désacétylation des histones H3 et H4 et une méthylation des lysines 9 et 27 de l'histone H3 (H3K9me₂ et H3K27me₃)

- La stabilisation de la répression de *FLC* au delà de la période de froid est assurée par 2 protéines: *VRN1* et *VRN3* qui sont responsables du « profil histone » du gène *FLC*. Ainsi ce profil histone est transmis au cours des mitoses qui affectent le développement du méristème et la transformation du MAC en méristème inflorescentiel. Mais, à la méiose, cette répression est levée au sein des organes fertiles et le gène s'exprimera à nouveau chez l'embryon et chez la jeune plante...

Rappel sur les contrôles épigénétiques

Etude des changements, induits par l'environnement, dans l'activité des gènes, n'impliquant pas de modification de la séquence d'ADN et pouvant être **transmis** lors des divisions cellulaires. Contrairement aux mutations qui affectent la séquence d'ADN, les modifications épigénétiques sont **réversibles**.

Marqueur épigénétique de l'inactivation du gène:

. au niveau de l'ADN : méthylation des cytosines ce qui rend la molécule d'ADN moins accessible

Au niveau des histones : méthylation des lysines , désacétylation des histones (la chromatine devient moins accessible)

Modifications permettant l'activation d'un gène:

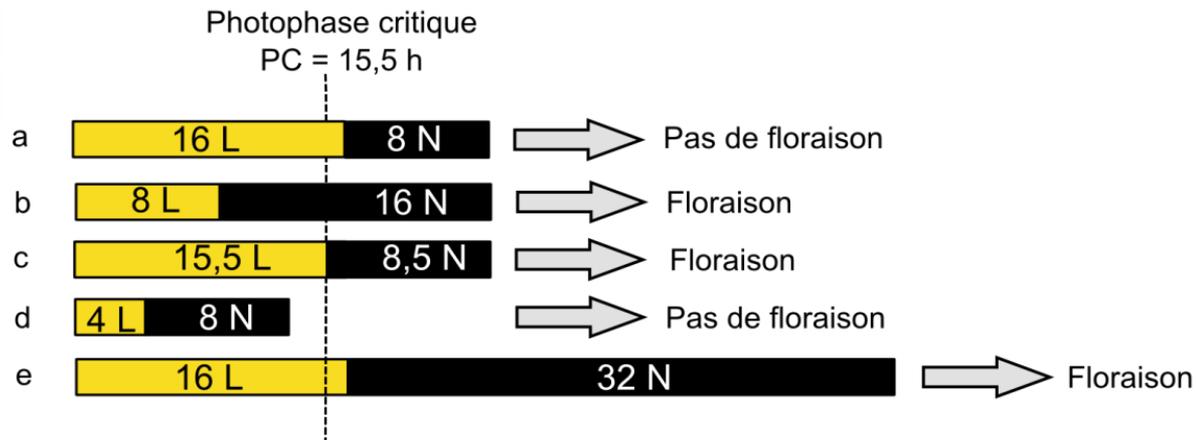
au niveau de l'ADN : déméthylation des cytosines ce qui rend la molécule d'ADN plus accessible aux facteurs de transcription.

Au niveau des histones : déméthylation des lysines , acétylation des histones (la chromatine devient plus accessible)

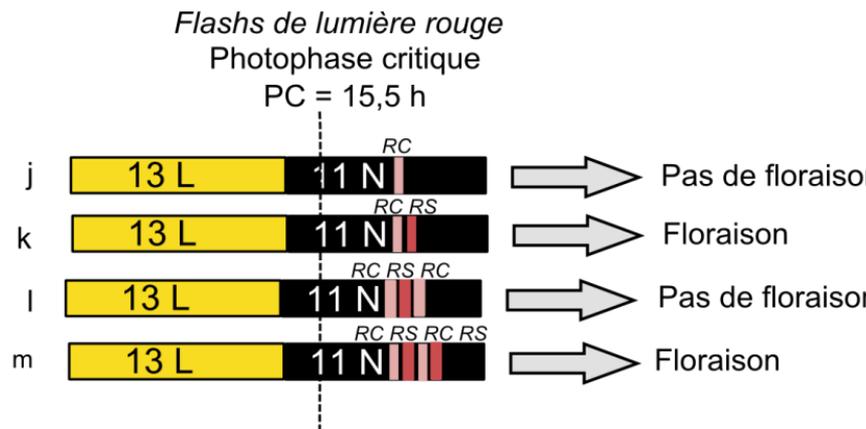
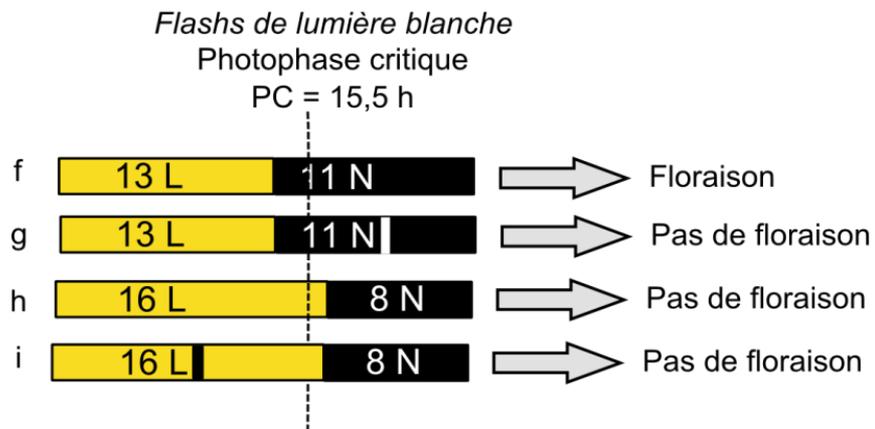


- Effets des conditions photopériodiques sur la floraison de la lamourde (Xanthium)

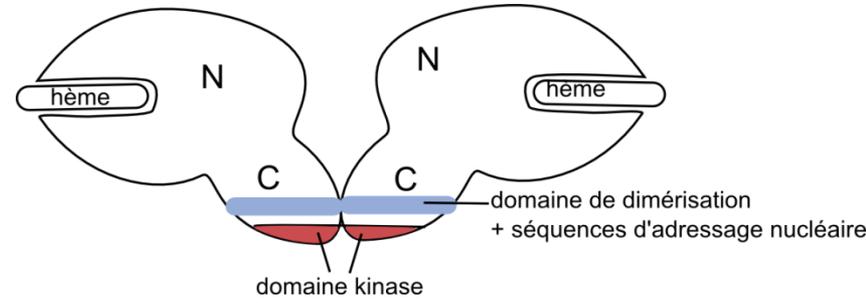
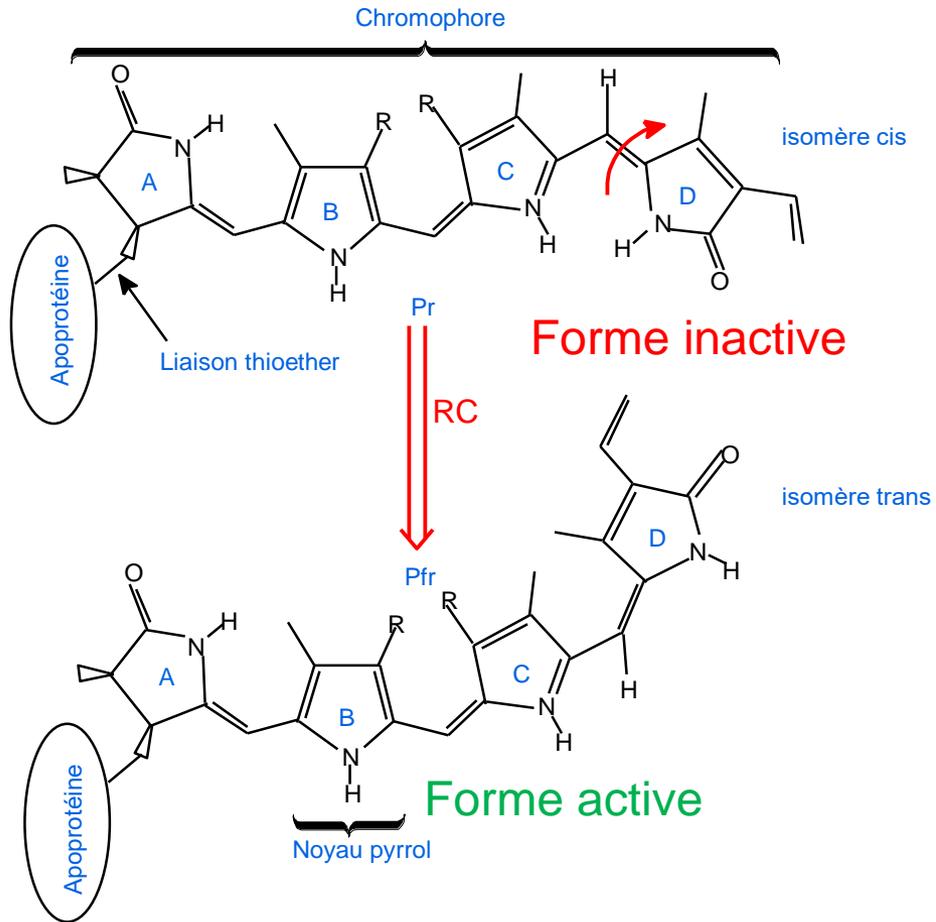
Déterminations des conditions inductrices



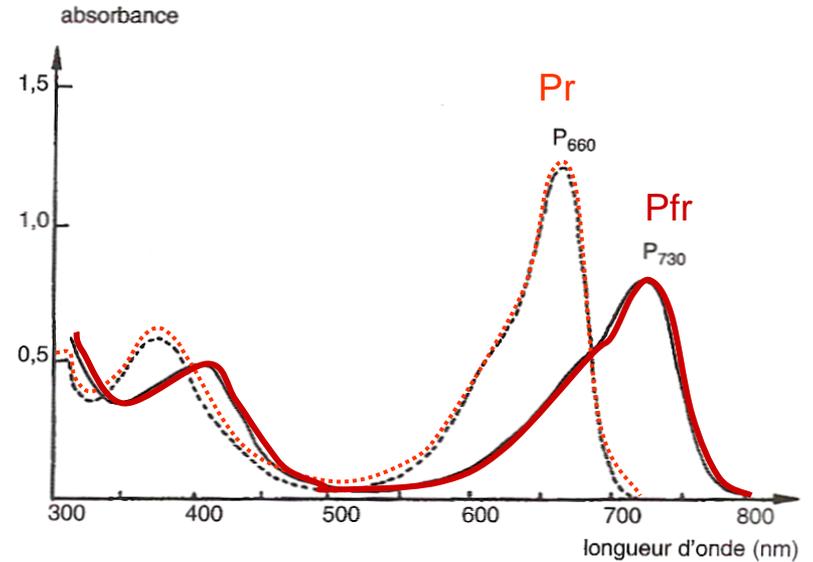
Interruption de la scotophase par des flashes lumineux



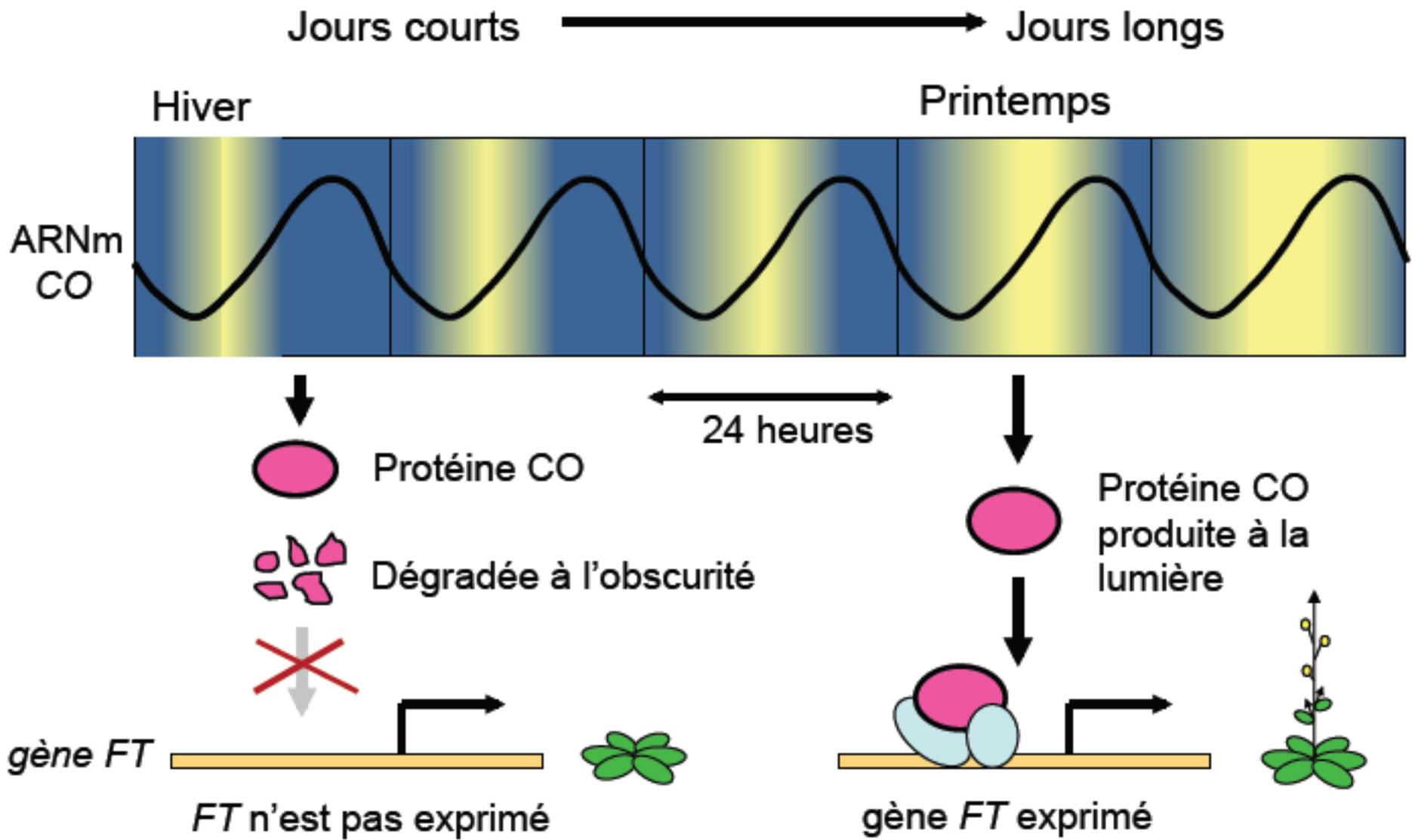
Effet de la lumière rouge sur un phytochrome



Structure schématique d'un phytochrome



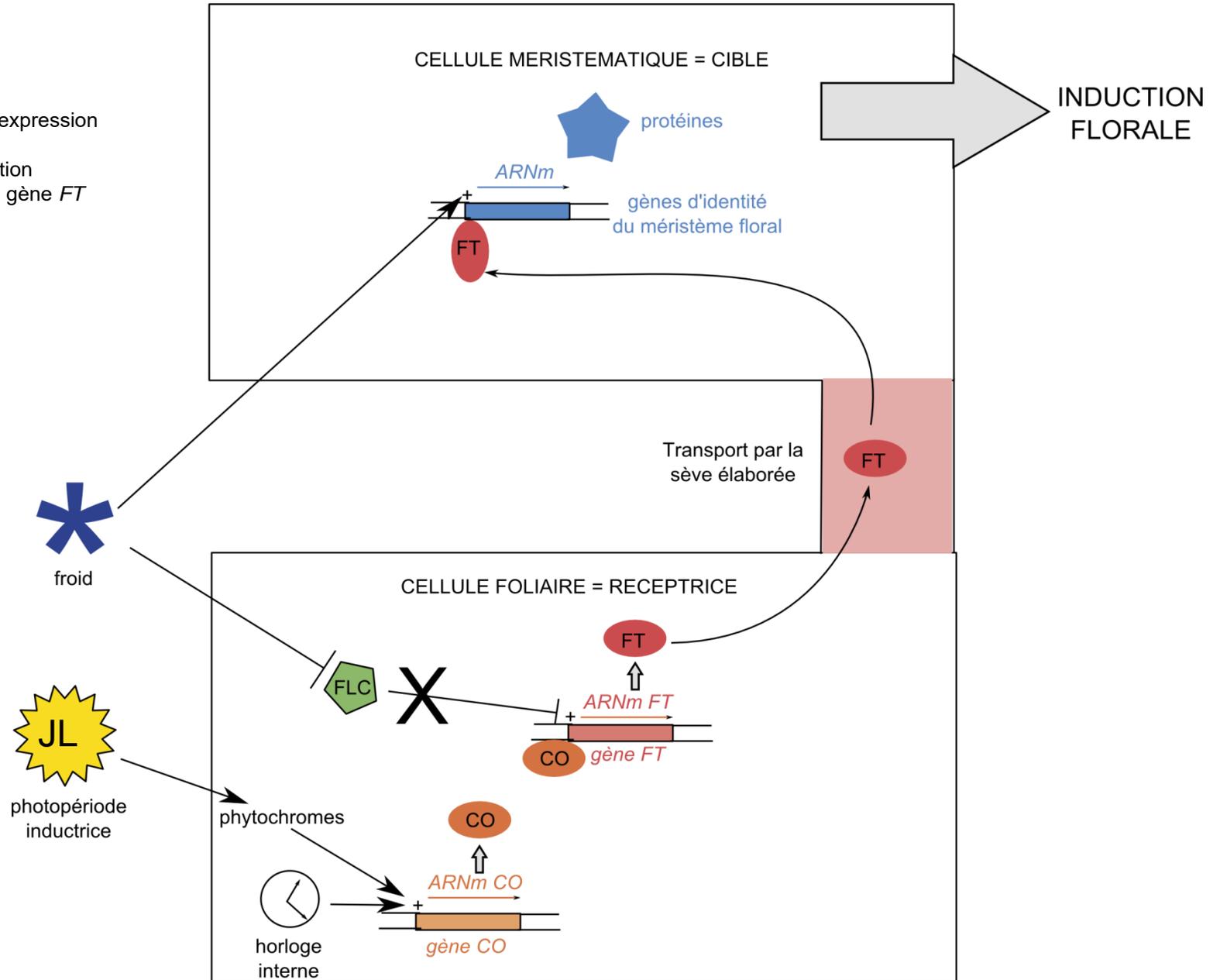
Spectre d'absorption des deux formes d'un phytochrome



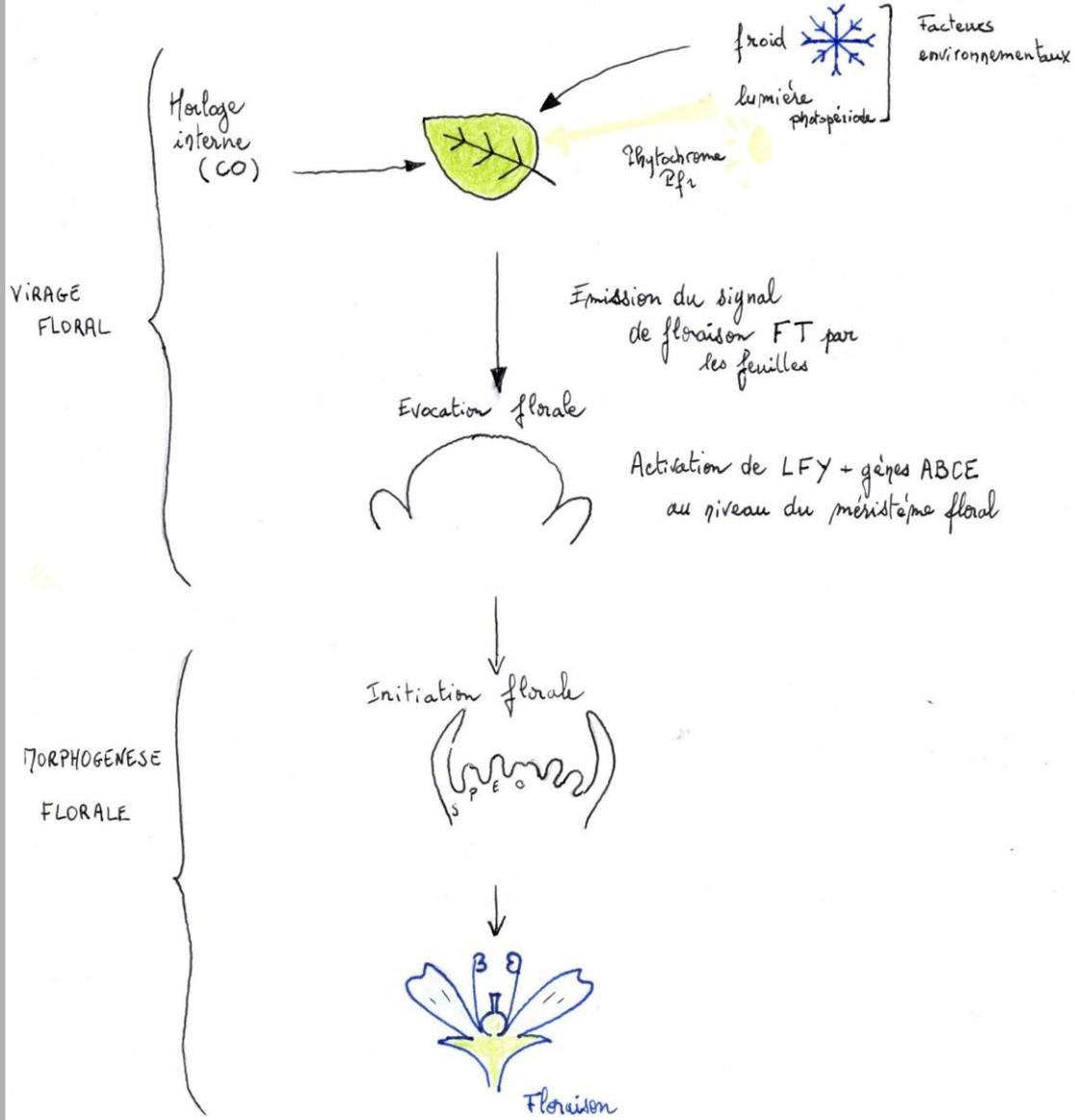
Modèle de l'action de la photopériode sur l'expression du gène CO et conséquences sur la protéine CO

- Contrôle de la floraison par les facteurs environnementaux (*Arabidopsis*)

FT : hormone florigène
FLC : protéine inhibant l'expression du gène *FT*
CO : facteur de transcription stimulant l'expression du gène *FT*



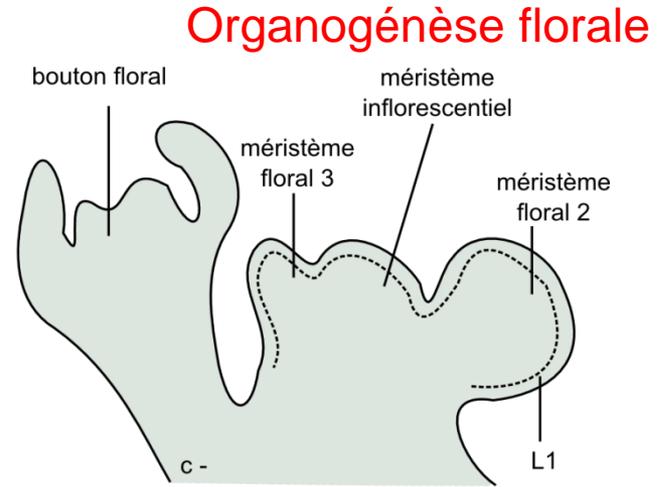
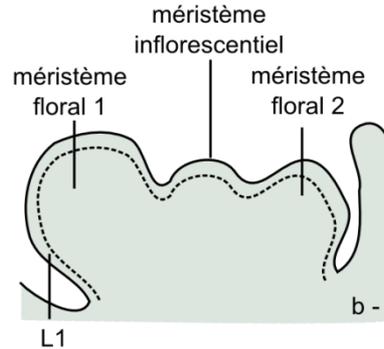
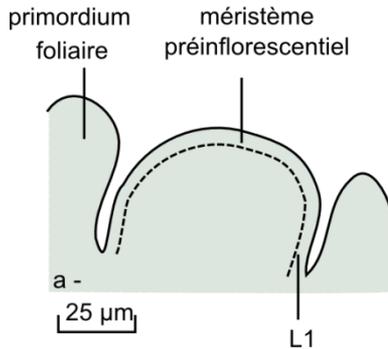
Plante végétative



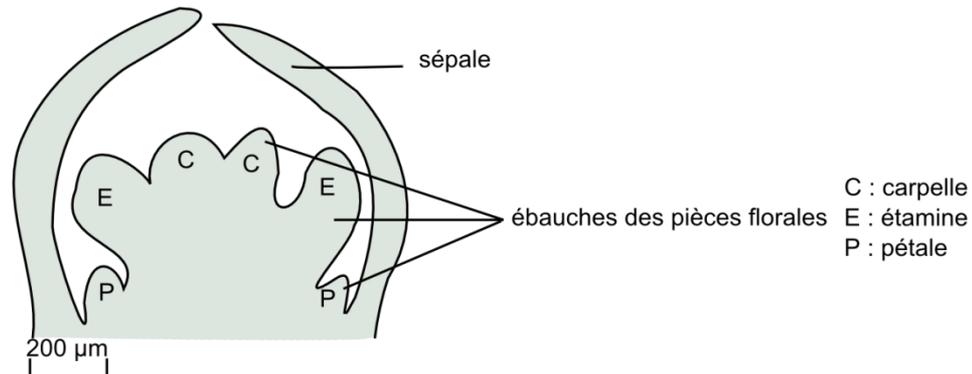
Les étapes du passage à l'état reproducteur

- La transformation du méristème apical caulinaire lors de la transition de l'état végétatif à l'état reproducteur chez *Arabidopsis*.

Virage floral



a à c : coupes longitudinales à 3 stades successifs



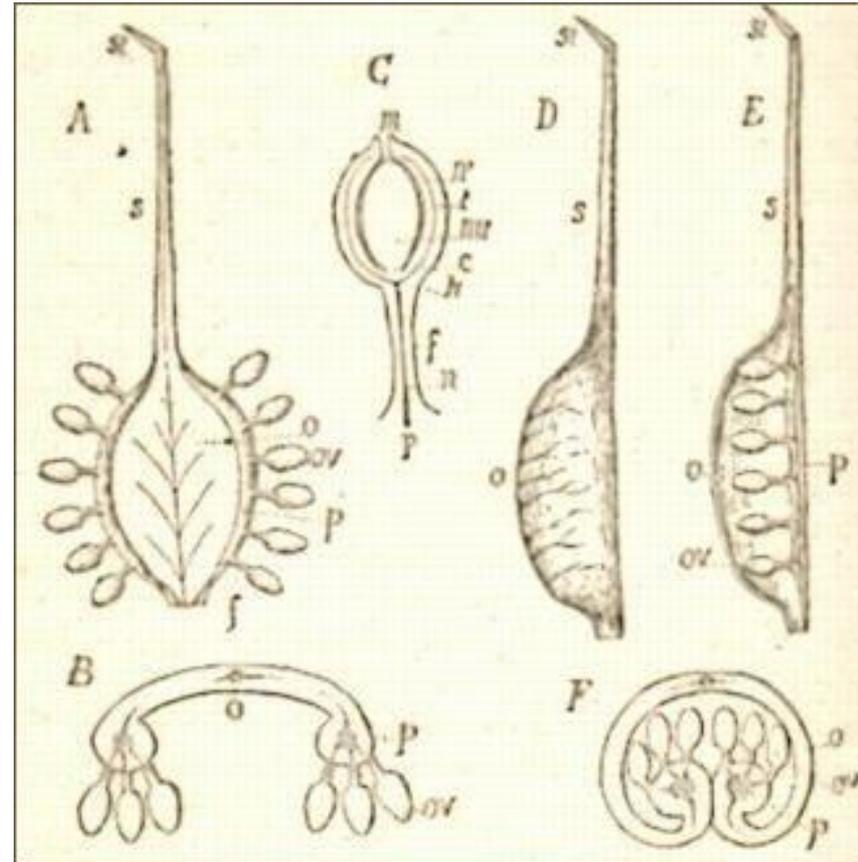
d - coupe longitudinale d'un bouton floral

« La théorie de la métamorphose » Goethe

"La parenté secrète des différentes parties externes de la plante, à savoir des feuilles, du calice, de la corolle, des étamines, qui se forment successivement et comme naissant les unes des autres, a été reconnue depuis longtemps par les savants. On a nommé métamorphose des plantes l'action par laquelle un seul et même organe se montre à nous diversement transformé."
GOETHE Johann-Wolfgang (1790)



Ci-contre, dessin paru dans *Éléments de Botanique* de Van TIEGHEM (1898) montrant l'origine foliaire des carpelles

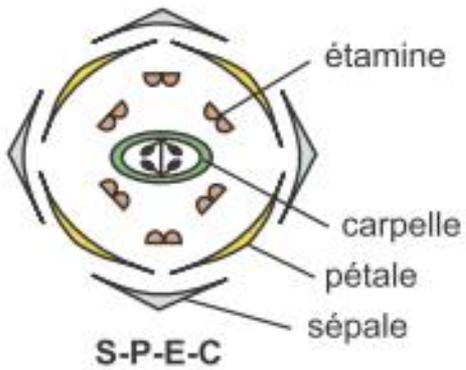


Architecture des fleurs de type sauvage et de divers mutants des gènes des classes (A, B et C)

Photographies de C. Carles, Université Joseph Fourier, Grenoble (UGA)



type sauvage



mutant de classe A
(*apetala1 / apetala2*)

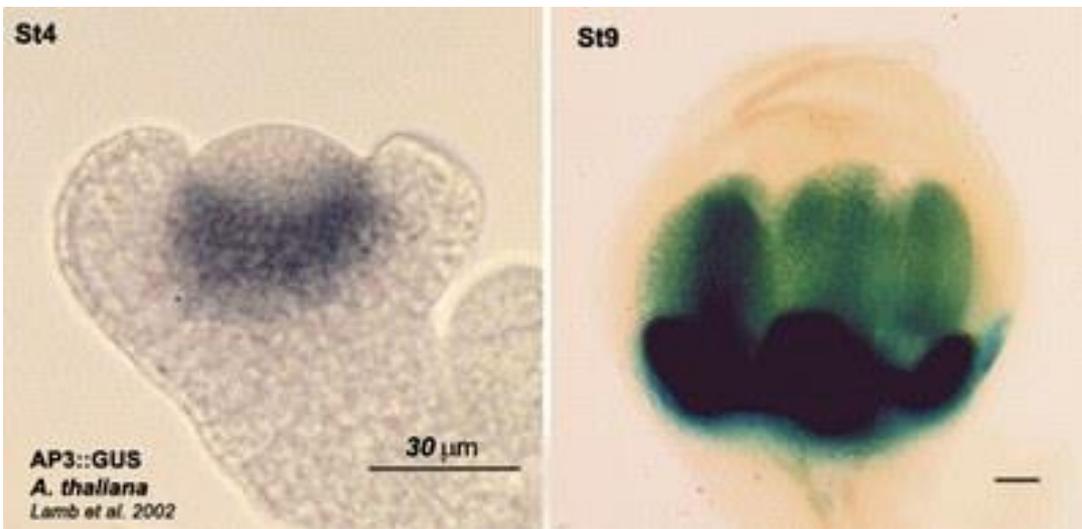


mutant de classe B
(*apetala3 / pistillata*)



mutant de classe C
(*agamous*)

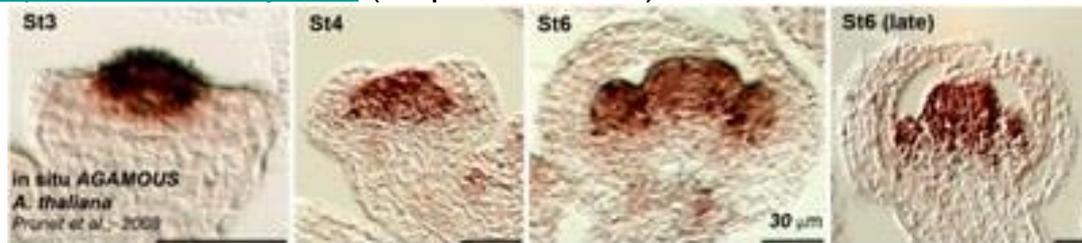




La protéine codée par le gène GUS est capable de transformer un substrat incolore en un produit bleu. La présence cette protéine est ici révélée sur des méristèmes entiers, observés en microscopie optique. Les parties bleues correspondent aux zones où le gène *apetala3* est transcrit. D'après Lamb. et al., 2002 *development* 129:2079-2086

Détermination des domaines d'expression des gènes de classe A,B et C (utilisation des gènes rapporteurs)

<http://aces.ens-lyon.fr> (stéphanie breuil)



Les gènes de classe C s'expriment au centre du méristème floral pour les stades 3 et 4 (st3 et st4) du centre du méristème floral puis précisément dans les verticilles 3 et 4 à partir du stade 5.

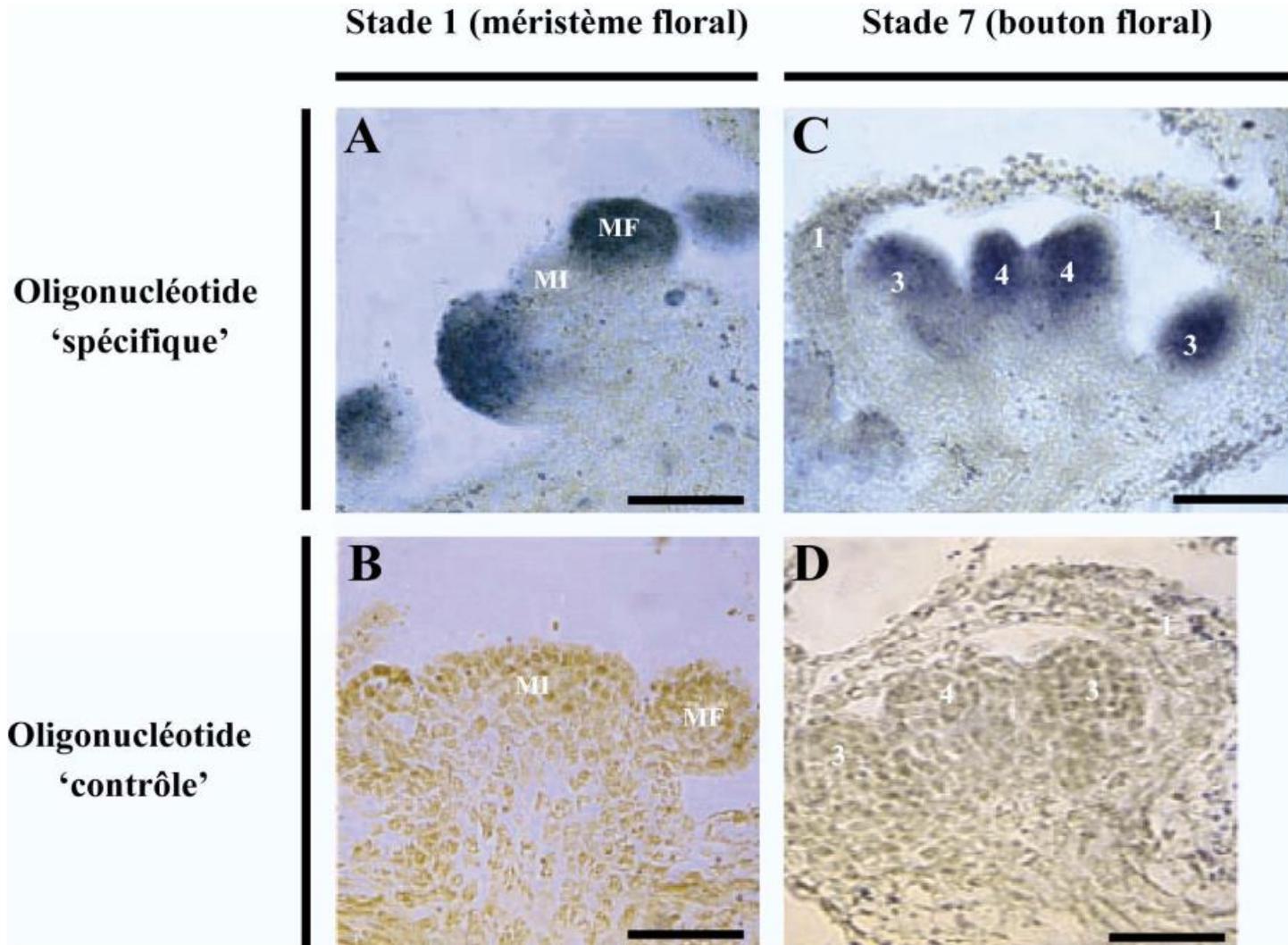


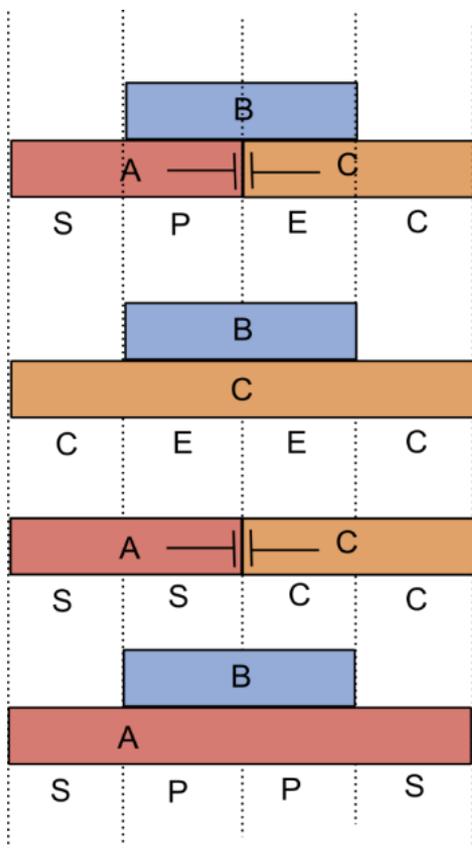
Figure 5. Profils d'expression de l'ARN *MIR172* obtenus par hybridation *in situ* sur des coupes longitudinales réalisées au stade 1 (A et B) et au stade 7 (C et D) du développement floral de plantes sauvages d'*Arabidopsis thaliana*.

L'hybridation *in situ* pour localiser les domaines d'expression

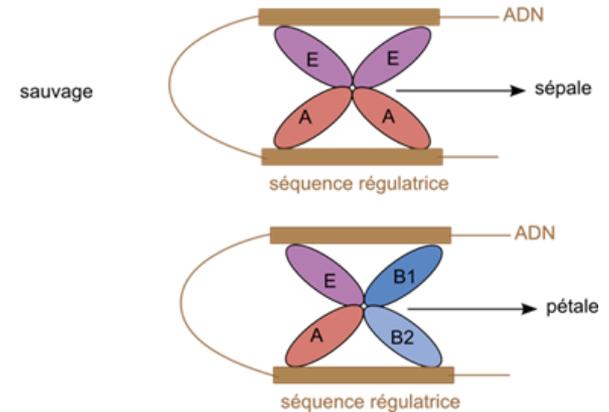
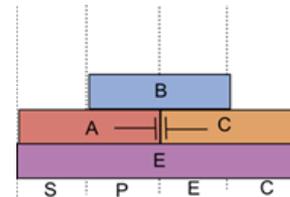
Triple mutant *sepallata* (gènes de classe E)

https://www.researchgate.net/figure/7663453_fig2_Fig-3-sep-triple-mutant-phenotype-and-35SAP1AP3PISEP-phenotype-A-The-sepallata





sauvage
 mutant classe A
 mutant classe B
 mutant classe C

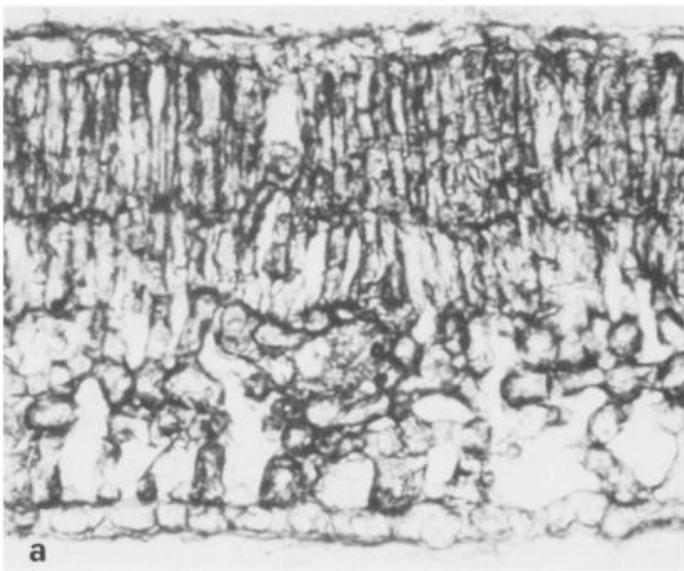


Document 14 : Détermination de l'identité florale dans le modèle ABCE (formation de tétramères)
 (Biologie BCPST2. Peycru & al. Dunod 2014)

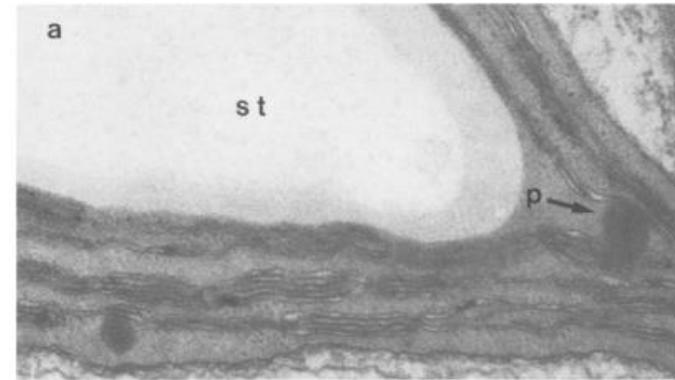
Conclusion et bilans:

Bilan 4: *L'identité des organes floraux est déterminée par la combinaison de gènes homéotiques.*

Bilan : *Chez de nombreux végétaux angiospermes, la floraison est induite par la longueur du jour interagissant avec le rythme circadien endogène d'expression des gènes. La température est un facteur environnemental pouvant intervenir également. De cette interaction résulte l'activation d'un gène à l'origine d'un signal de floraison transporté jusqu'au méristème. Ce signal active à son tour des gènes impliqués dans l'identité du méristème et sa conversion en méristème inflorescentiel. La combinaison d'expression de gènes homéotiques détermine l'identité des organes ou pièces florales. Contrairement aux animaux, les végétaux Angiospermes ne mettent pas en réserve des cellules germinales, celles-ci et les cellules reproductrices qui en découlent seront spécifiées lors du développement de la fleur.*



Coupe transversale de feuilles de Hêtre (*Fagus sylvatica*) placées au soleil (a) et à l'ombre (b)



Ultrastructure de chloroplastes de cellules foliaires placées au soleil (a) et à l'ombre (b)

Source: Photosynthetic activity, chloroplast ultrastructure, and leaf characteristics of high-light and low-light plants and of sun and shade leaves <https://www.researchgate.net/profile/Hartmut-Lichtenthaler>

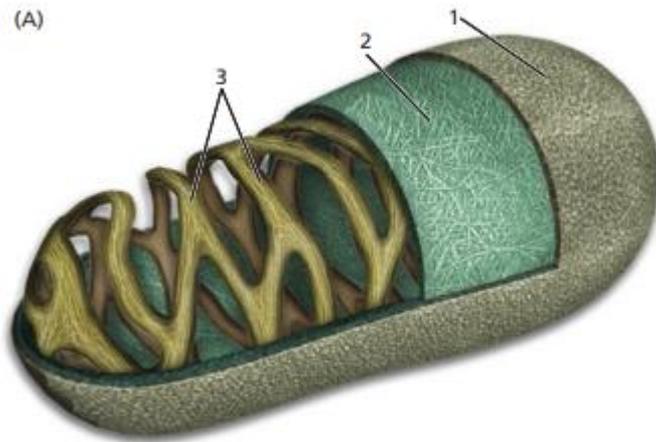
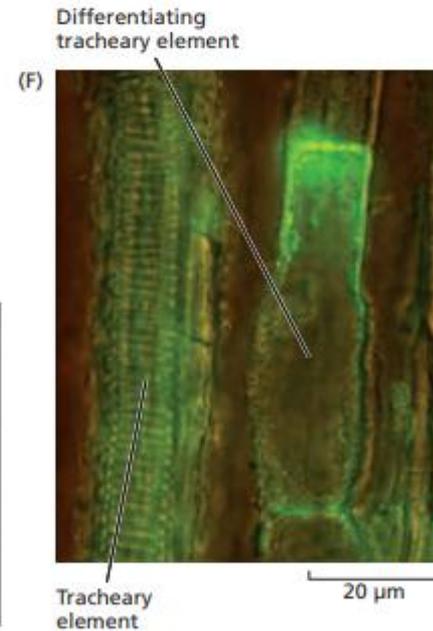
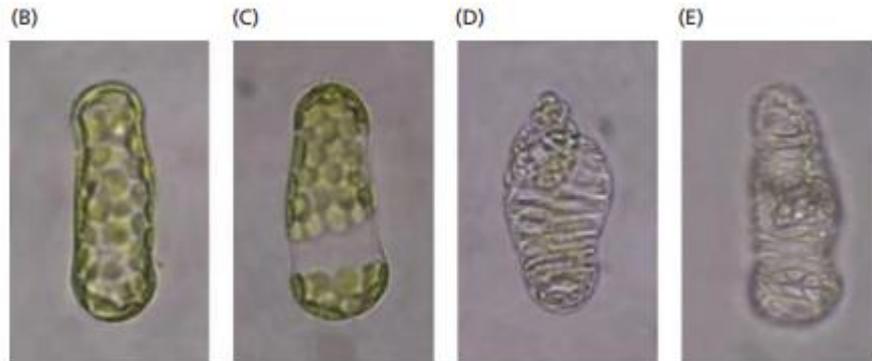
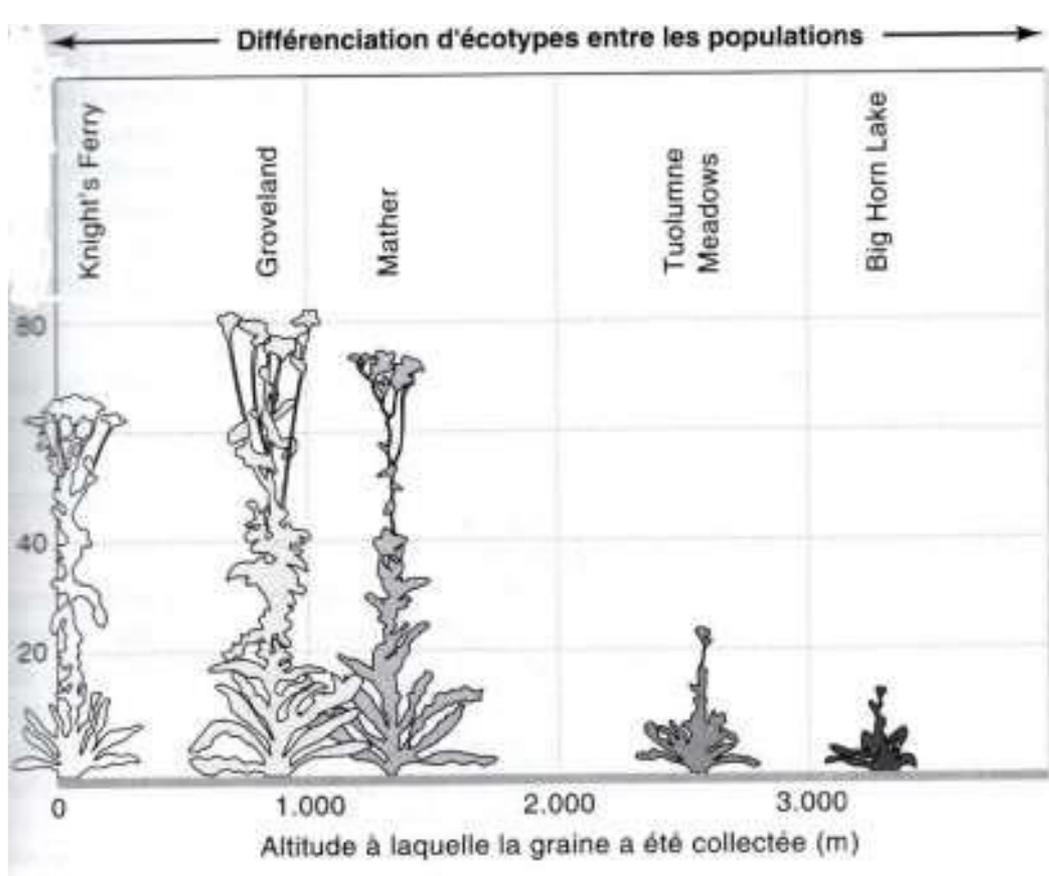


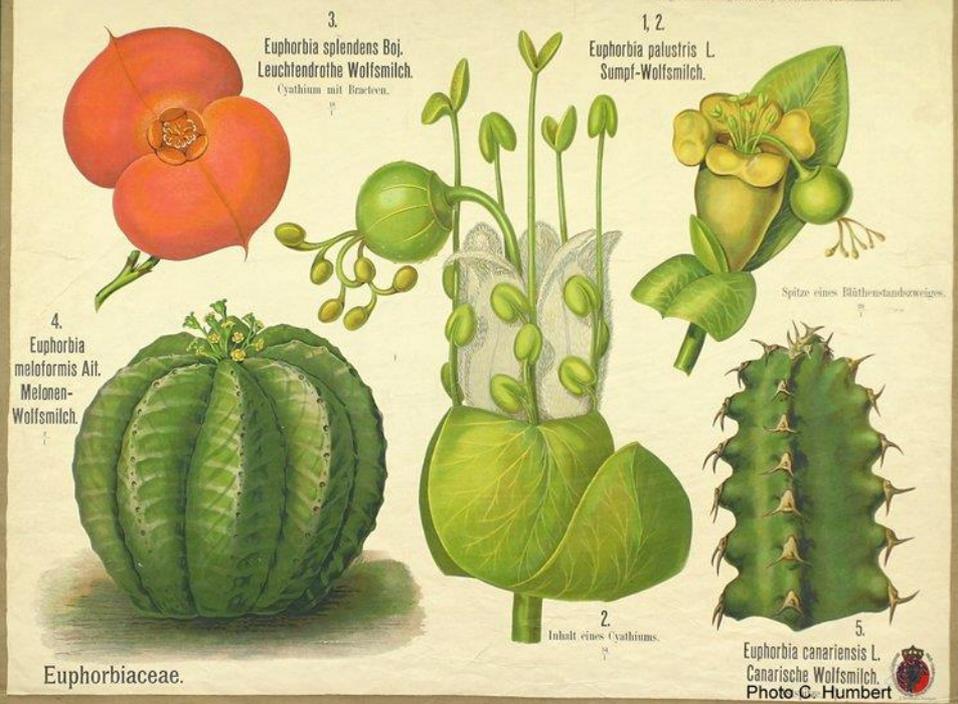
Figure 18.33 Xylem formation in *Zinnia* in the plant and in cell culture. (A) *Zinnia* xylem cell walls have three main layers: (1) an outer granular matrix, (2) a primary cell wall, and (3) a secondary cell wall. (B–E) Sequence showing *Zinnia* tracheary element differentiation in mesophyll cell suspension culture. (F) Xylogen localization in a 14-day-old *Zinnia* seedling. (A from Lacayo et al. 2010, art by Sabrina Fletcher; B–E from Novo-Uzal et al. 2013; F from Motose et al. 2004.)





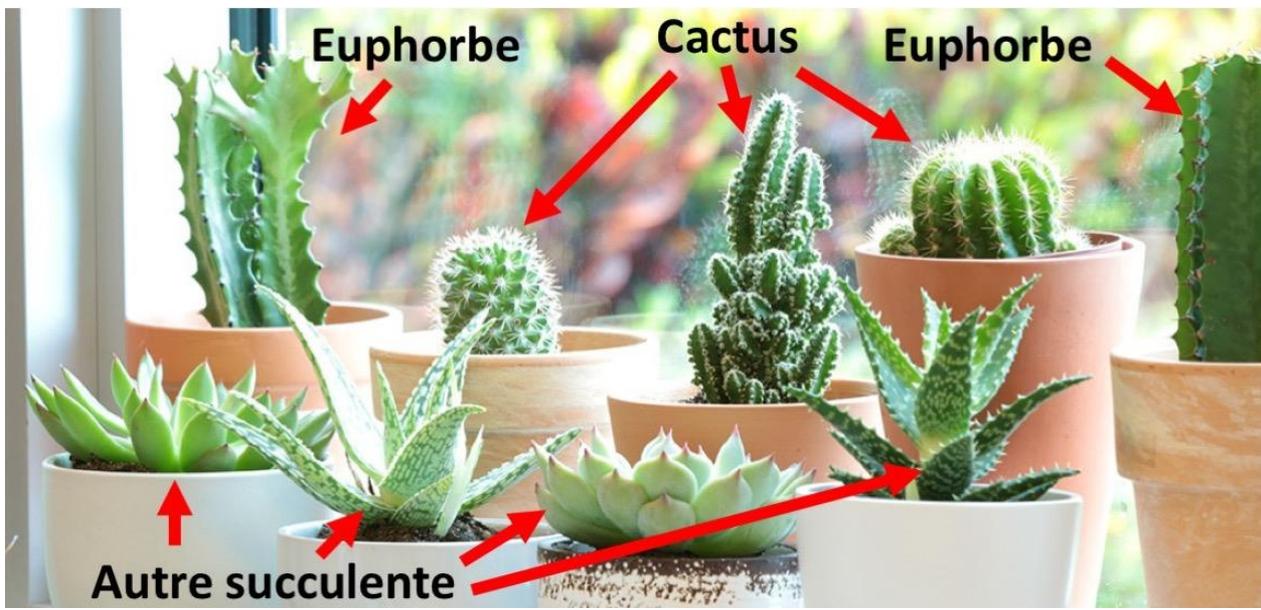
Différenciation d'écotypes dans les populations d'*Achillea millefolium*. Les graines provenant de fruits de plantes ayant poussé à diverses altitudes ont été cultivées dans un même jardin situé en Californie au niveau de la mer.
(Ricklefs et Miller, Ecologie, de Boeck)

L'adaptation : une réponse aux caractéristiques du milieu inscrite dans le génome



Cactacées et euphorbiacées un exemple de convergence évolutive

<https://jardinierparesseux.com/2018/09/19/cactus-ou-euphorbe>





Anémomorphose extrême !!!