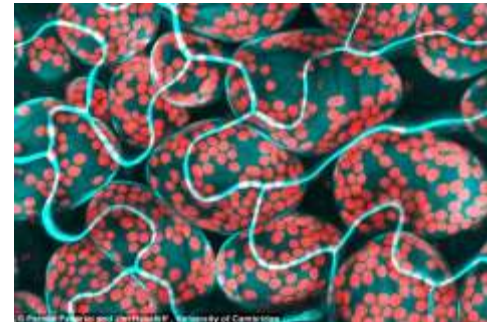
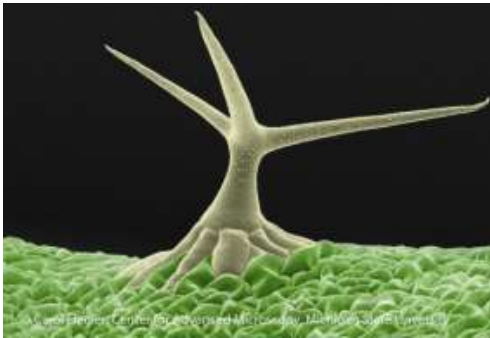


Licence 3 Biologie Santé – 2024/2025
UE de Développement

Biologie du Développement des Plantes



Marianne Delarue
marianne.delarue@universite-paris-saclay.fr
IPS2- bât. 630

Plan du cours

Introduction : particularités du développement végétal

- 1 – Pourquoi étudier le développement des plantes?
- 2 – Particularités du règne végétal
- 3 – Différenciation et divisions asymétriques
- 4 - Les voies de communication

Thème I: Programmes de Développement

- 1 – Mise en place des axes de polarités
- 2 – Croissance racinaire
- 3 – Croissance caulinaire
- 4 – De la phase végétative à la phase reproductive

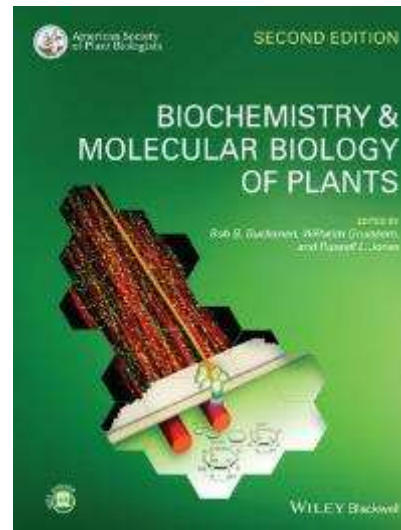
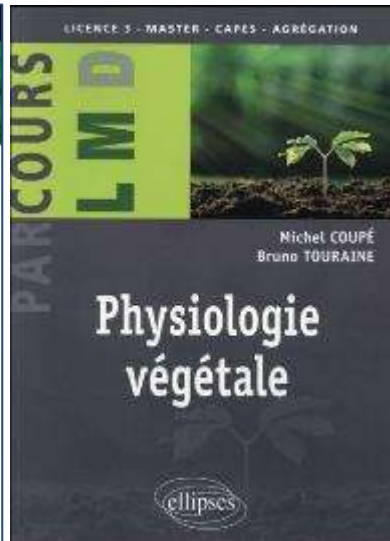
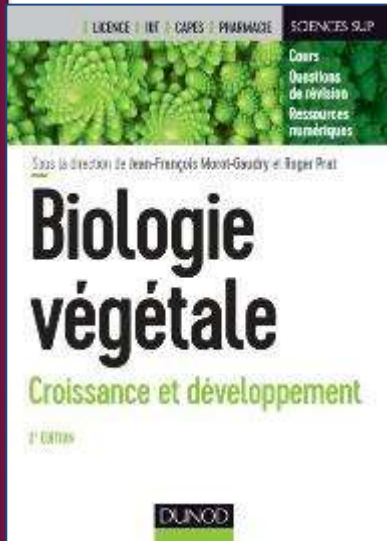
Thème II: Signalisation et Morphogenèse : La photomorphogenèse

Introduction : Caractéristiques des voies de signalisation chez les plantes

- 1 – La lumière rouge et les phytochromes
- 2 – La lumière bleue et les cryptochromes
- 3 – Les phototropines

Conclusions et Perspectives

OUVRAGES :



VULGARISATION :



<https://www.bibliotheques.universite-paris-saclay.fr/scholarvox-cyberlibris>

SITE WEB :

https://haseloff.plantsci.cam.ac.uk/education/CDB_index/CD_B_index.html



FORMATION PAR LA RECHERCHE

➡ Ecole Universitaire de Recherche « Saclay Plant Sciences »



<https://www6.inrae.fr/saclay-plant-sciences/>

➡ Master 1 International « Plant & Microbial molecular Biology »



<https://internet6-national-international-master-mpsbcustom.hub.inrae.fr/>

Introduction

① Pourquoi étudier le développement des plantes?

Développement

Ensemble des processus **ordonnés** et **coordonnés** qui contribuent à l'élaboration progressive d'un organisme pluricellulaire à partir d'un zygote unicellulaire.

→ **Croissance:**

Multiplication cellulaire et/ou Expansion cellulaire

→ **Différenciation :**

Déterminant cytoplasmique et/ou effets de position

→ **Morphogenèse:**

Acquisition de la forme des tissus et des organes

→ **Schémas de développement (« patterning »):**

Coordination des événements de différenciation entre les différents tissus et cellules

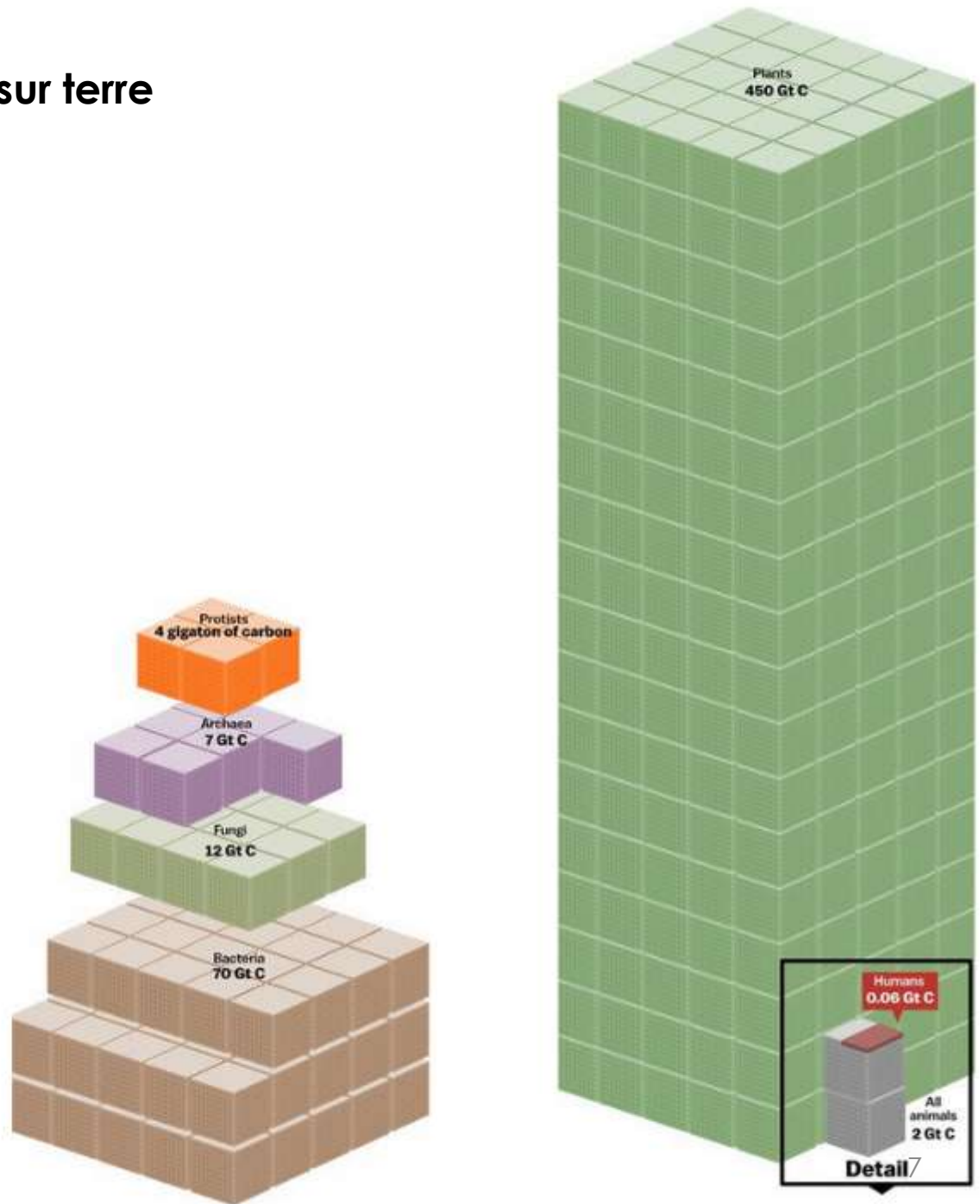
Introduction

- ① Pourquoi étudier le développement des plantes?

Sequoiadendron giganteum
Hauteur 75m
Diamètre 8m
Age 3200 ans



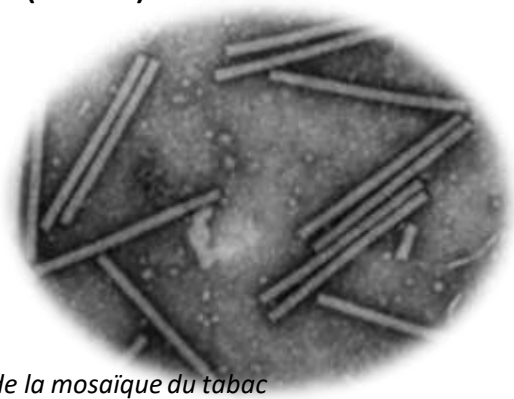
Distribution de la Biomasse sur terre (en Gt de Carbone)



Selon "The biomass distribution on Earth"
Bar-On et al. PNAS 2018

Les végétaux sont d'excellents organismes modèles !

La découverte des virus
(1892)



Virus de la mosaïque du tabac

Les lois de l'hérédité (1840)



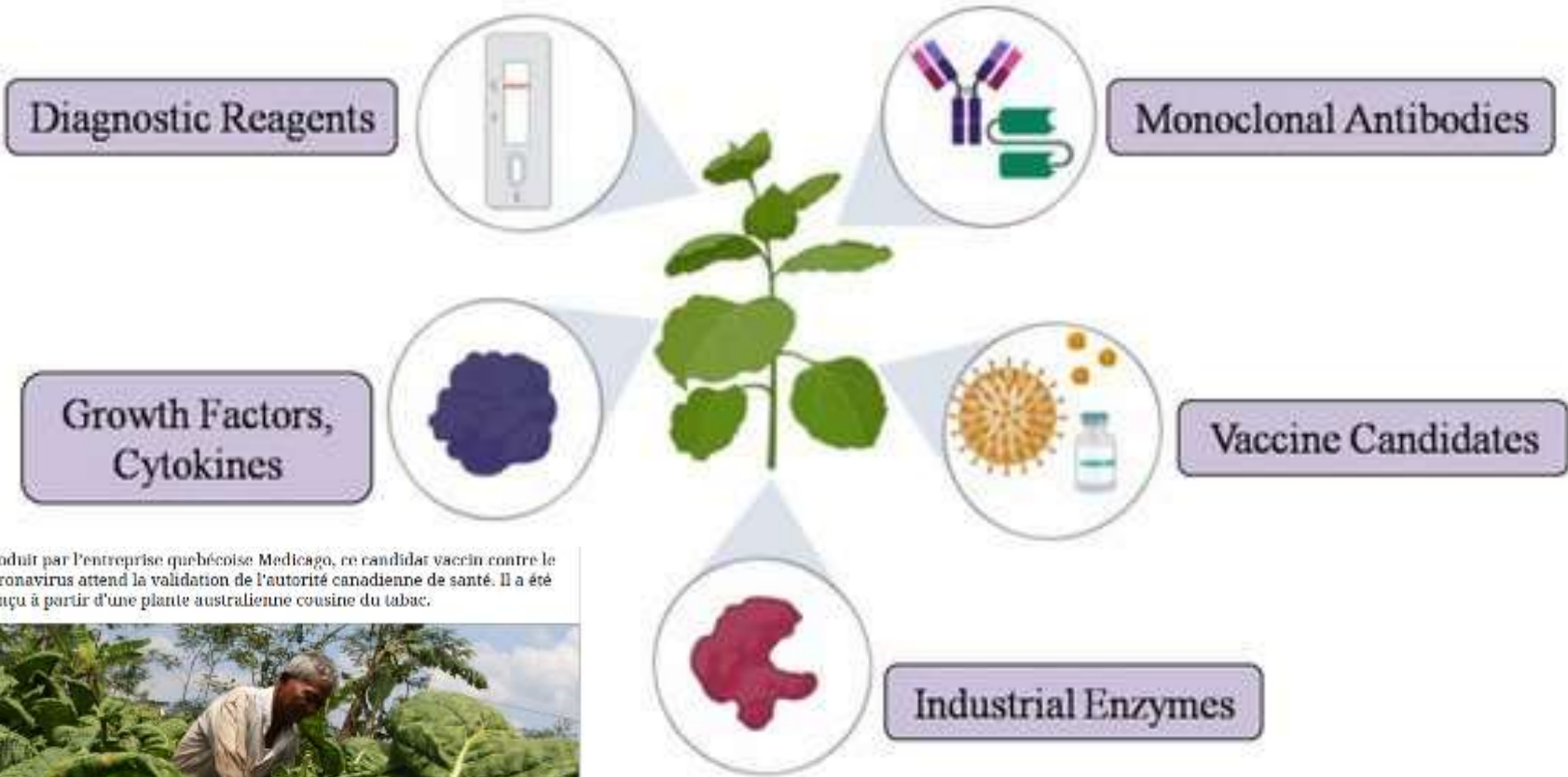
ARN interférence 2004

Transposons chez le Maïs
(Prix Nobel 1984)



B. Mc Clintock

Les végétaux sont d'excellents organismes pour des applications biotechnologiques (ex: « Molecular farming »)

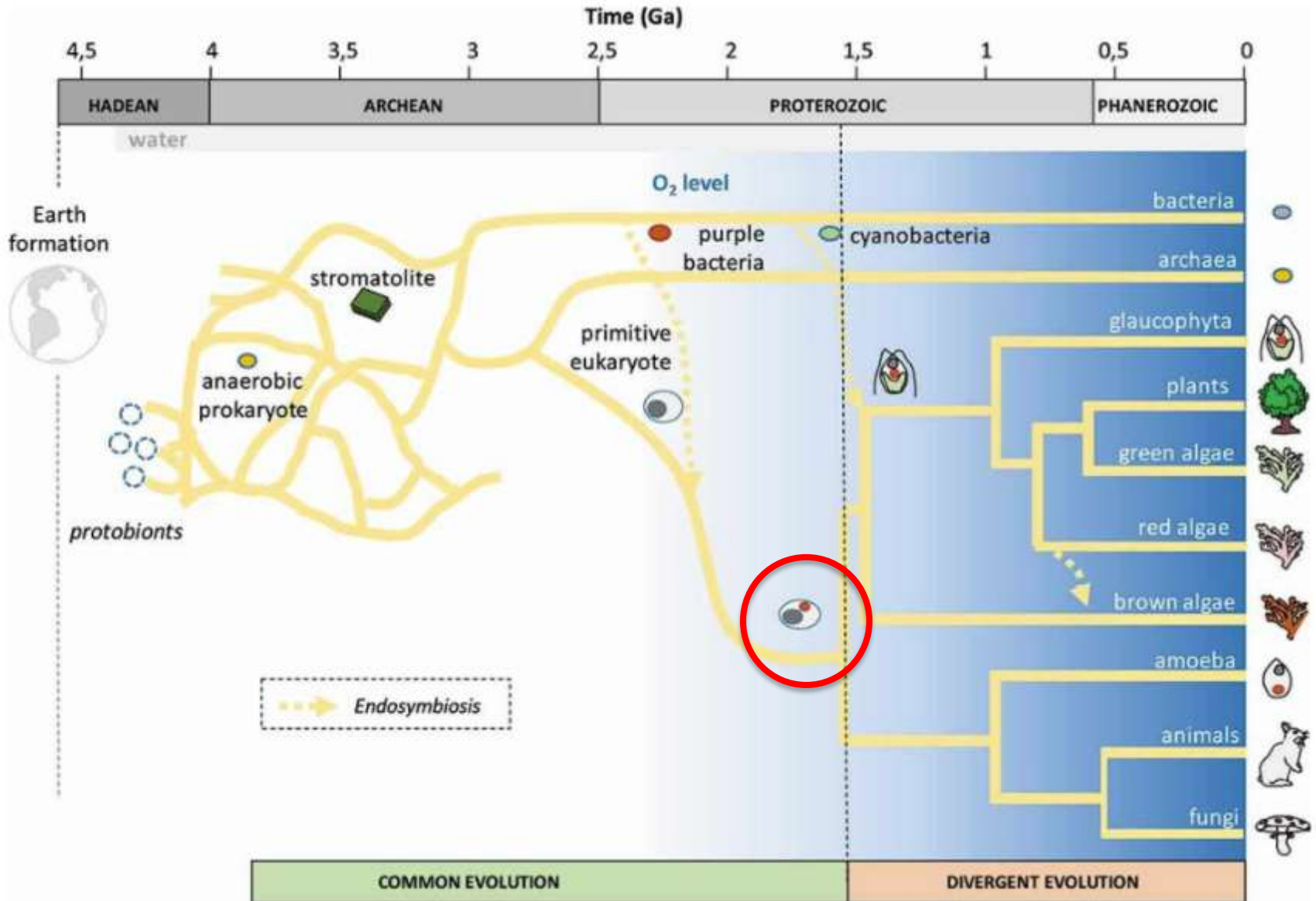


Produit par l'entreprise québécoise Medicago, ce candidat vaccin contre le coronavirus attend la validation de l'autorité canadienne de santé. Il a été conçu à partir d'une plante australienne cousine du tabac.



B. Shanmugaraj et al. 2020

Nos cousines, les plantes....



Conservation des mécanismes au niveau cellulaire

- Information génétique, réplication, transcription, traduction
- Etapes du cycle cellulaire et son contrôle
- Processus de différenciation cellulaire: déterminants cytoplasmiques
et effet de position
- Cycle digénétique: alternance de génération haploïde et diploïde
- Etc...

Du zygote à l'organisme....

zygote



Divisions
cellulaires

Formation de
pattern et
organogenèse

Différenciation et
croissance

zygote



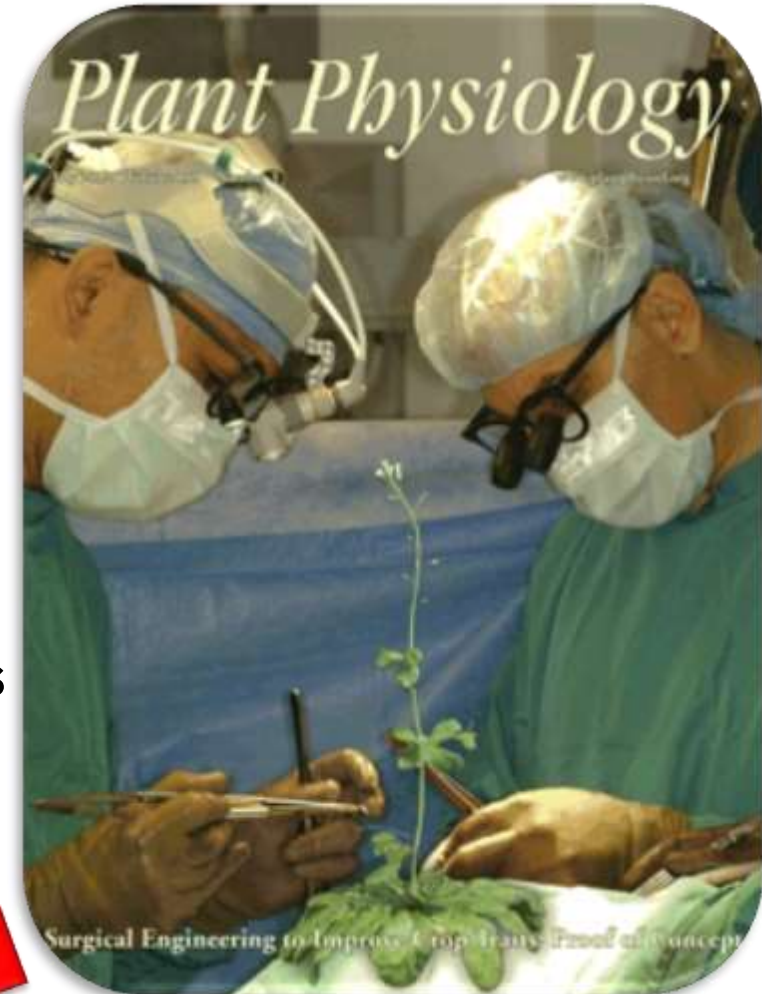
Des questions et des outils communs

- Eucaryotes pluricellulaires
- Des outils communs (approches génétiques, moléculaires, ...)
- Nécessaire de travailler sur des **modèles**

TD1

→ Connaître les avantages d' *Arabidopsis thaliana* comme plante modèle

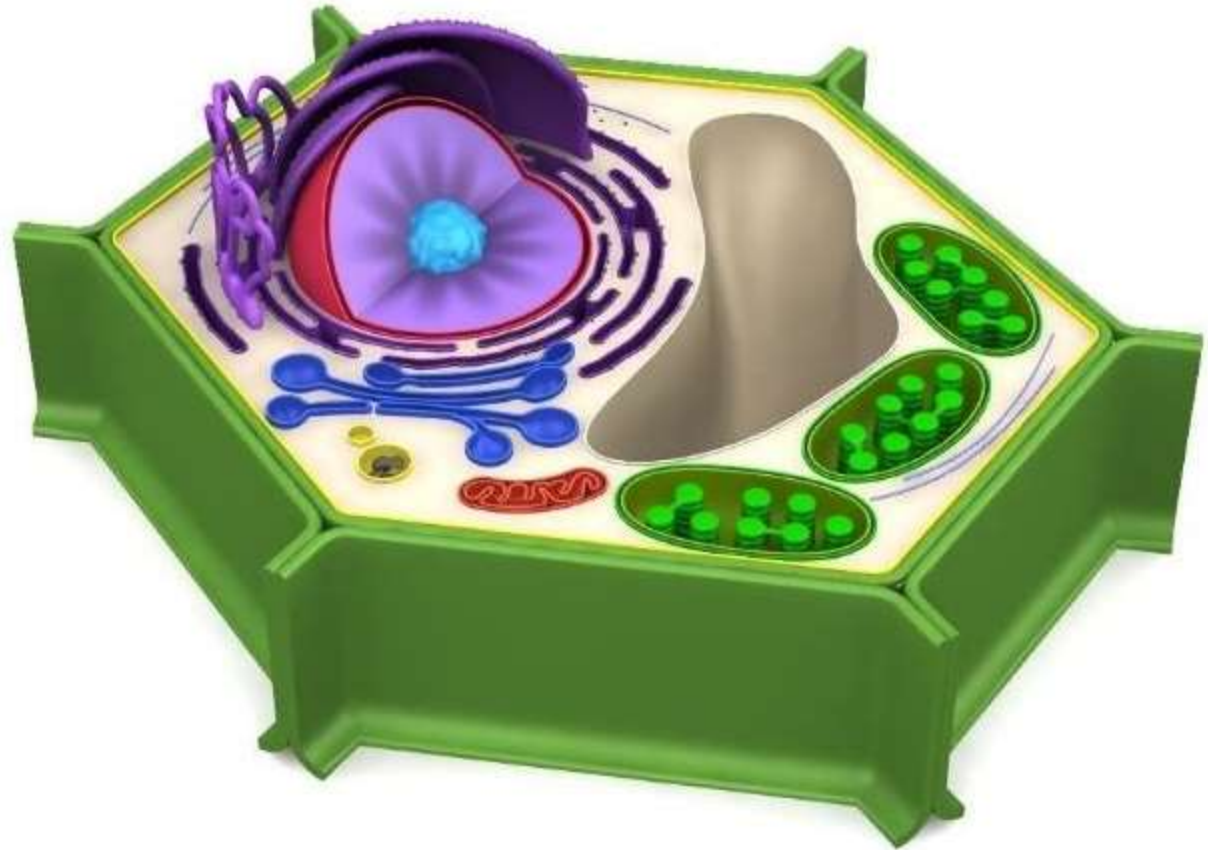
Pre-réquis



Arabidopsis thaliana

Introduction

② Particularités du règne végétal



Introduction

② Particularités du règne végétal

→ Organismes fixés adaptés à leur environnement :

→ Autotrophie

→ Développement **post-embryonnaire** continu



Pinus longaeva

> 5000 ans

Caractères de cellule
eucaryote

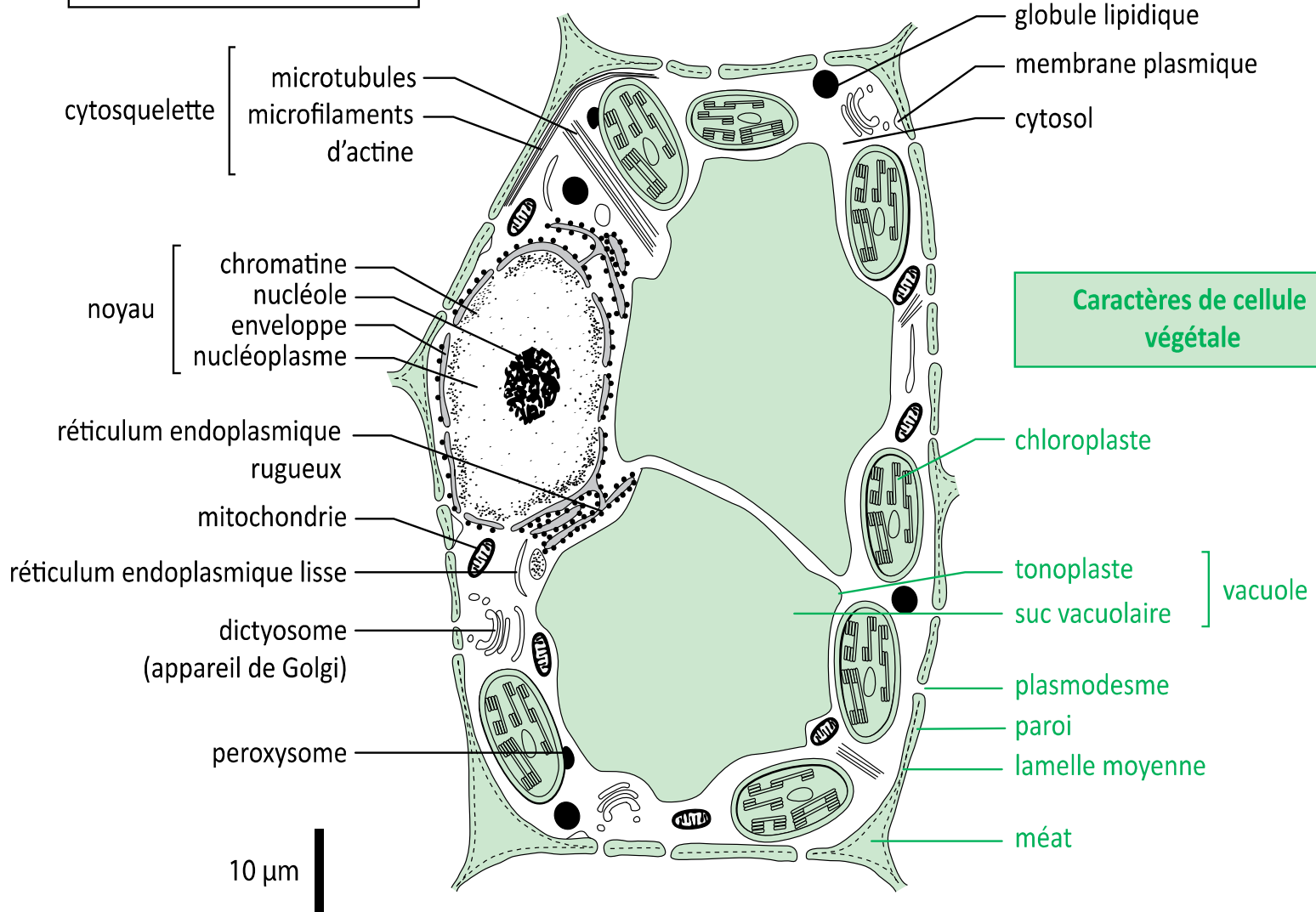


Figure 1.3 Organisation d'une cellule végétale (cellule de parenchyme chlorophyllien de feuille d'Épinard).

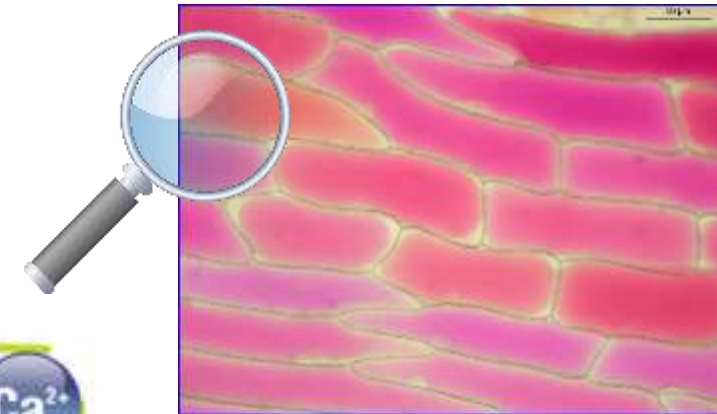
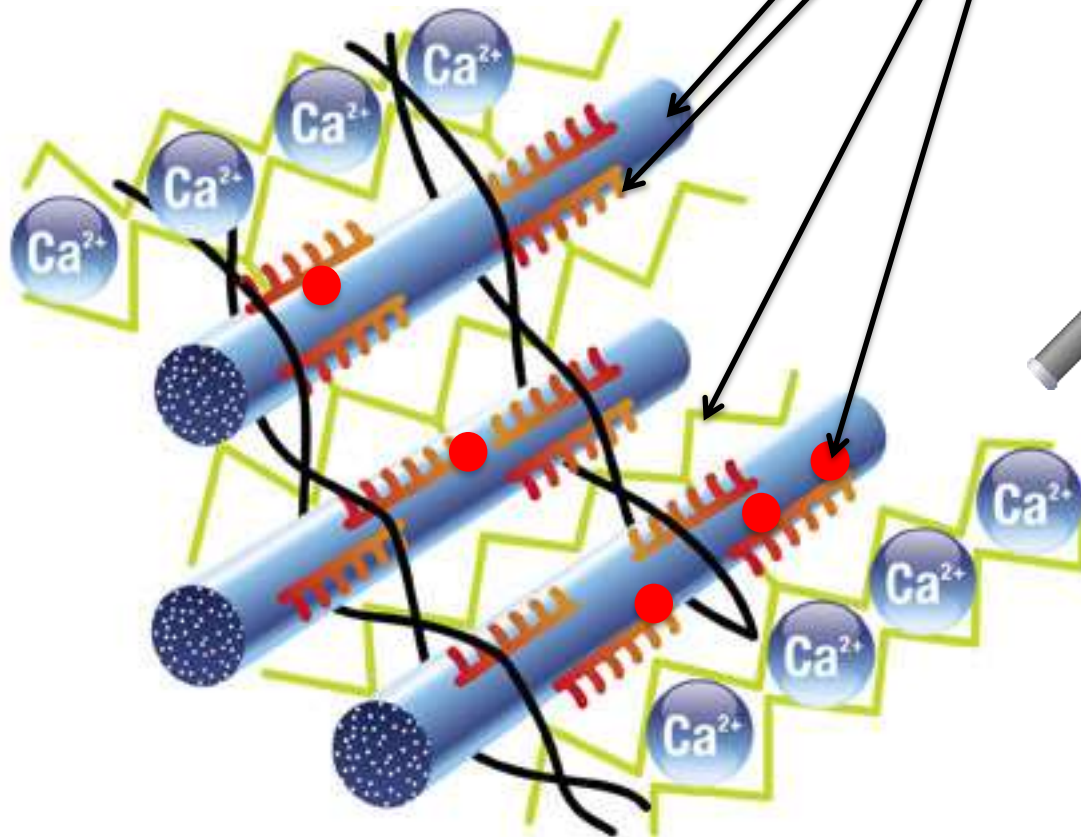
Importance de la paroi des cellules végétales

Les cellules végétales sont entourées d'une paroi primaire

La paroi primaire: 90% de polysaccharides

4 types de macromolécules:

- Cellulose
- Hémicellulose (xyloglucanes)
- Pectine
- Protéines (Expansines, Extensines)

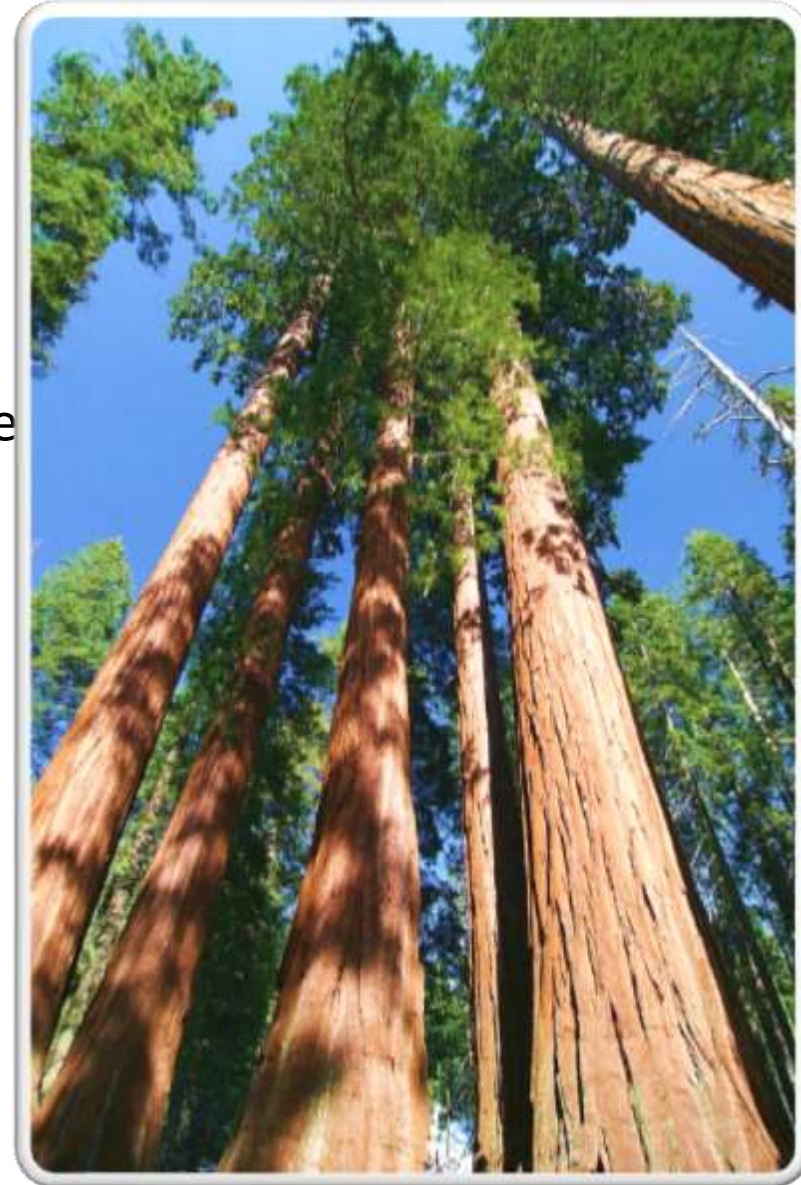


Cellules d'épiderme oignon rouge

La paroi: finesse, résistance, plasticité

- Résiste à des pressions de 15 bars
- « L'invention » de la paroi a permis d'optimiser la photosynthèse et de s'affranchir du milieu aqueux au cours de l'évolution

➡ **Chaque cellule a son propre squelette décentralisé**



Cellulose:

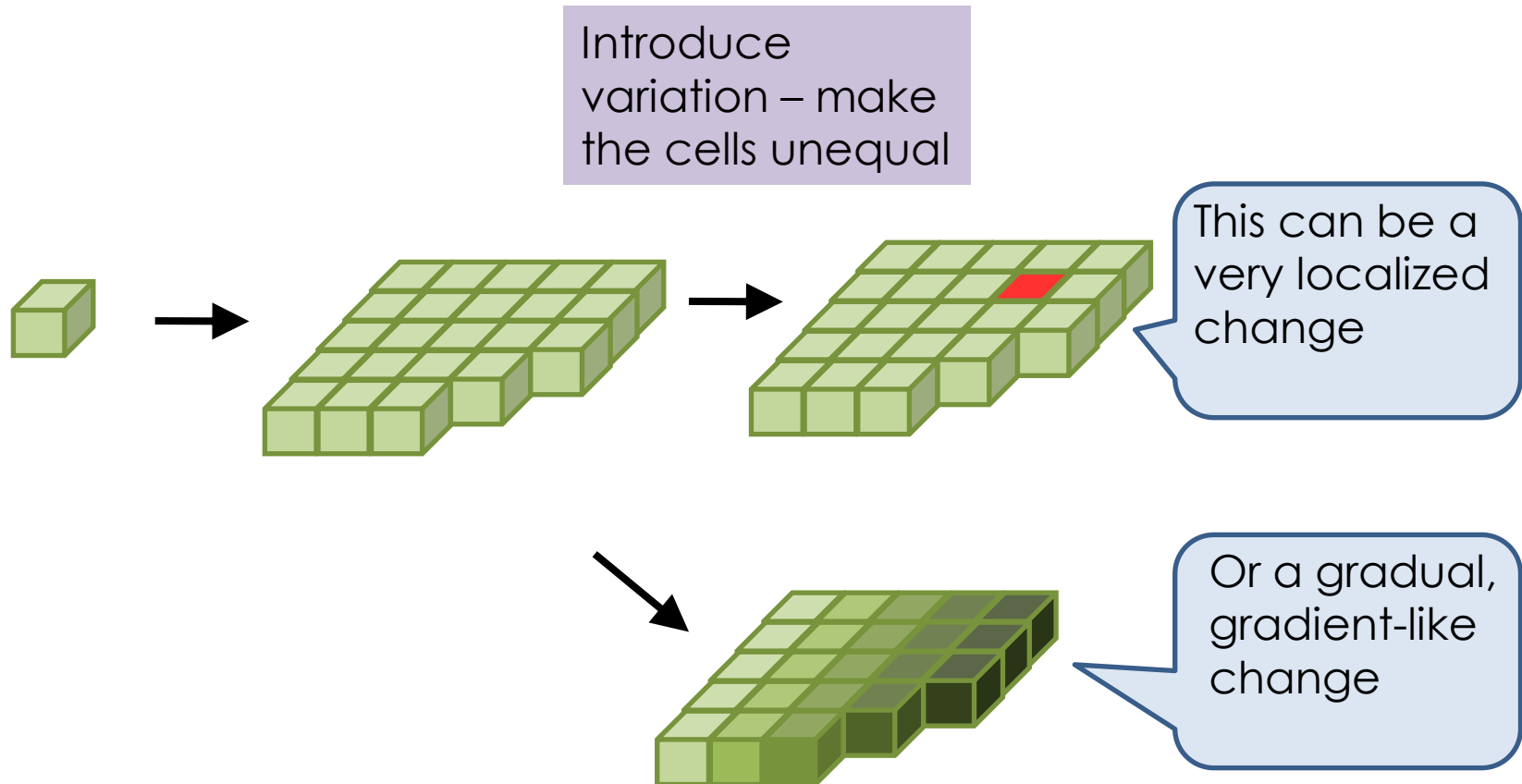
50% de la Biomasse terrestre; 1^{ère} source de Carbone renouvelable

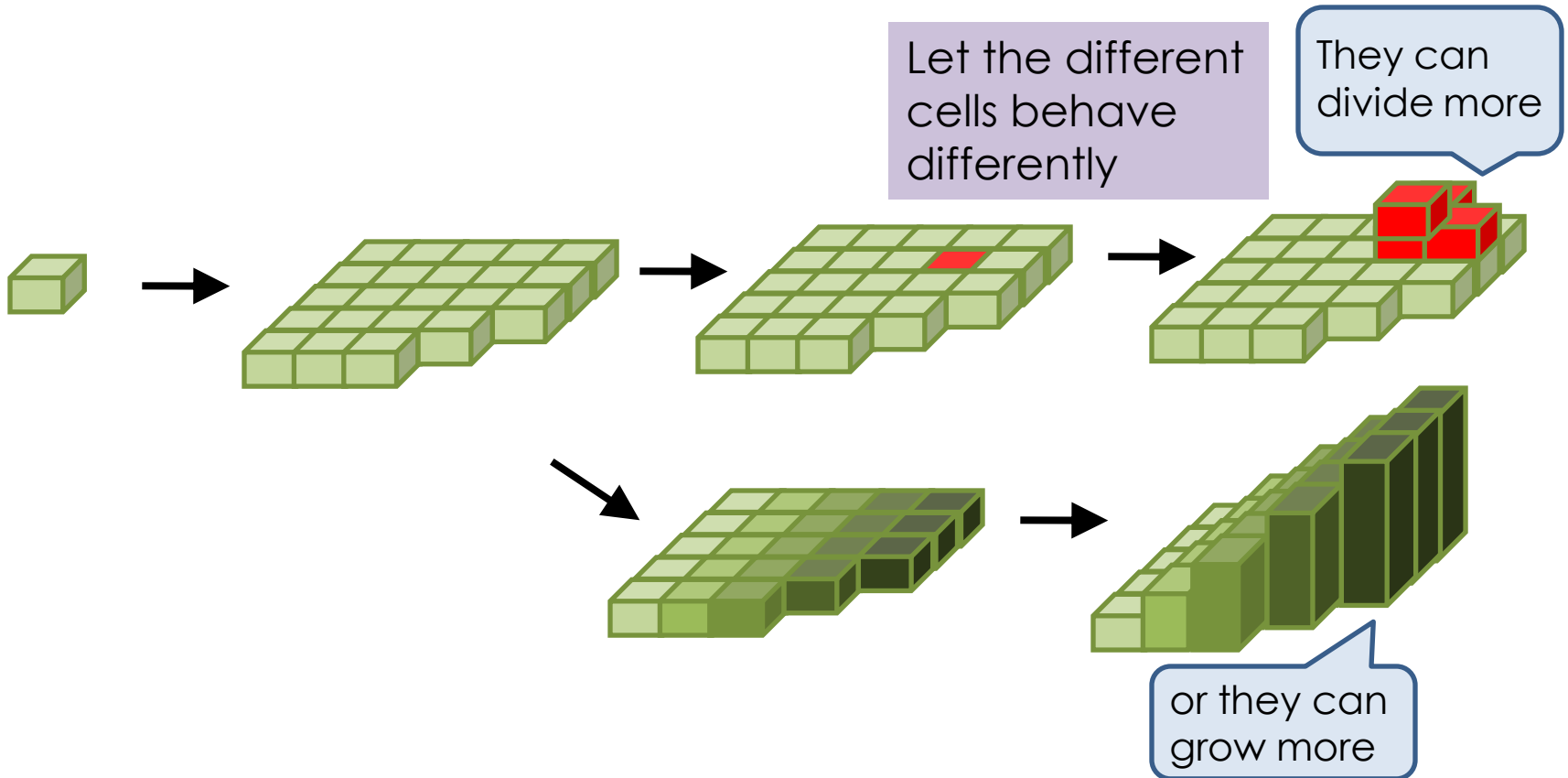


Introduction

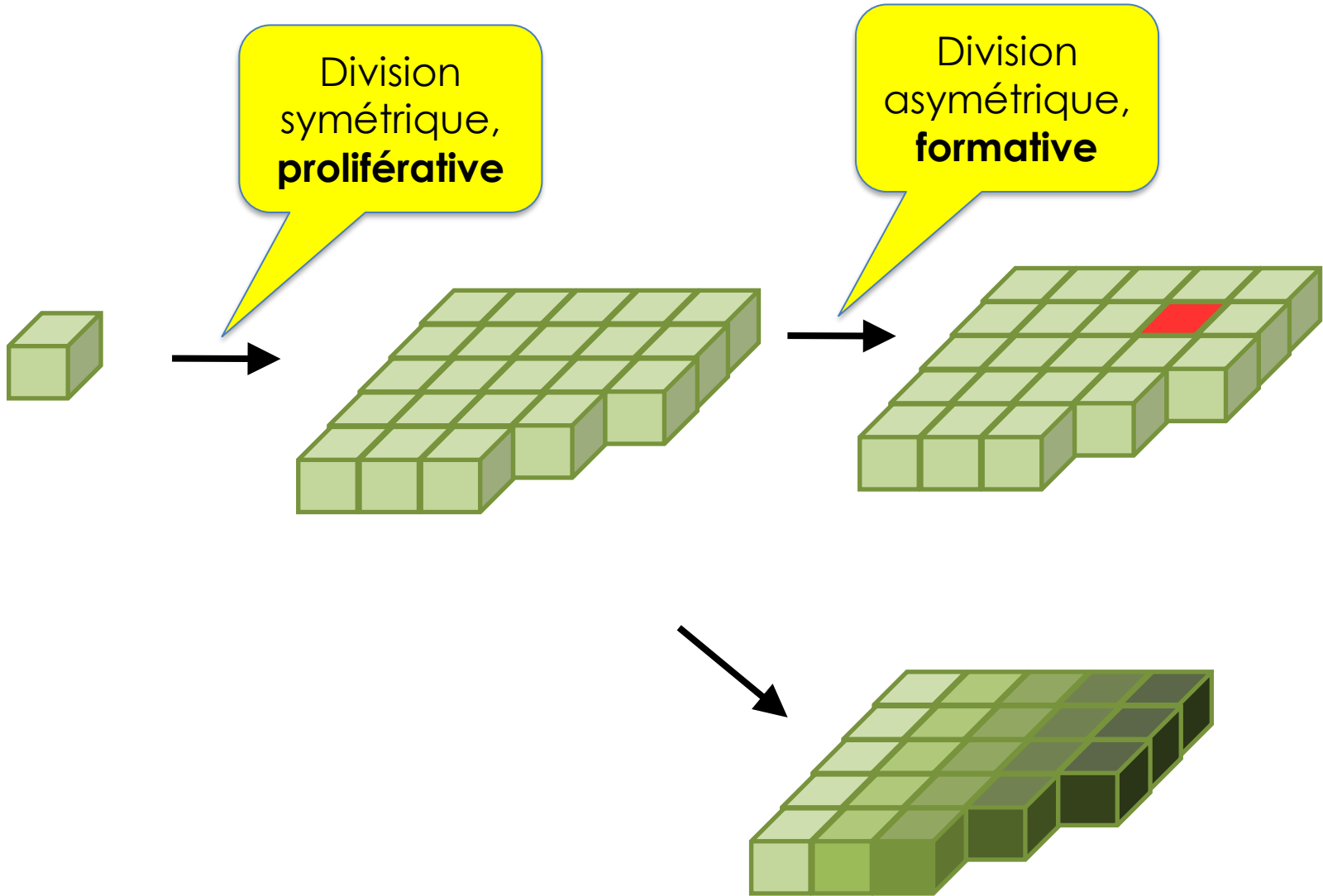
③ Différenciation et divisions asymétriques

Comment construire un organisme ?



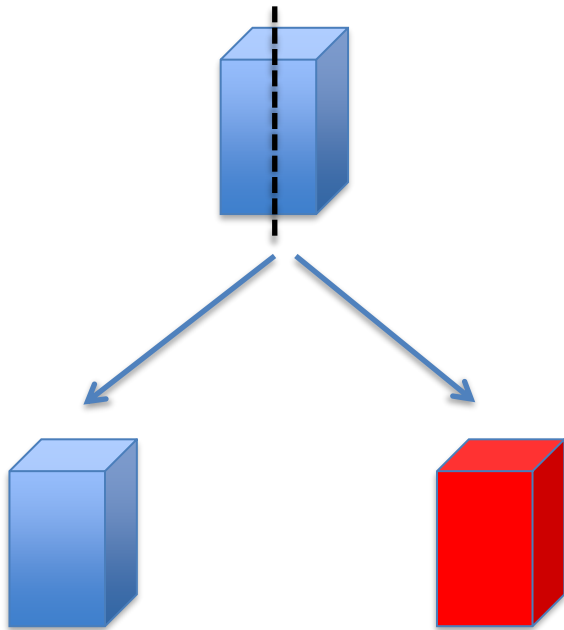


Deux types de divisions cellulaires

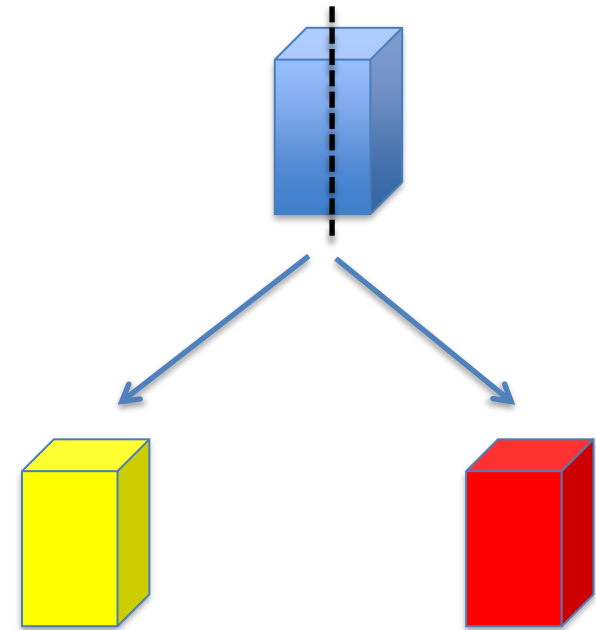


Divisions asymétriques

2 cas:



Exemple: Divisions des
cellules souches
méristématiques

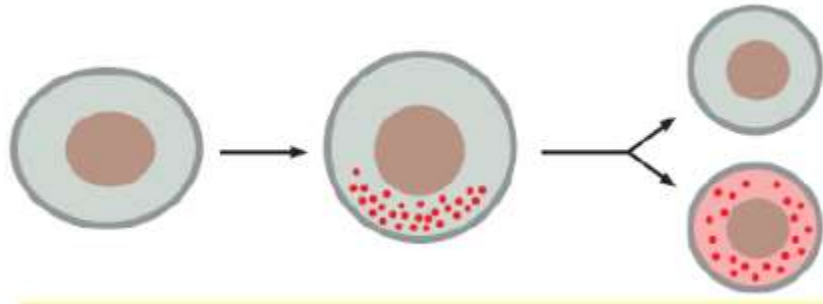


Exemple: 1^{ère}
division du zygote

Mécanismes moléculaires et cellulaires de la rupture de symétrie

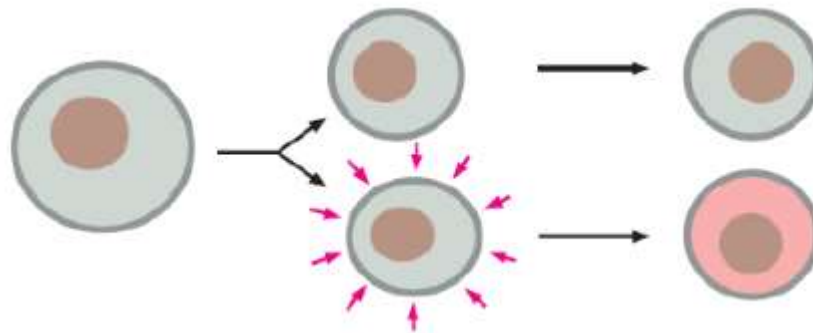
→ Lignage cellulaire

- Localisation polarisée de déterminants cytoplasmiques
- Etablissement d'un gradient cytoplasmiques (ex: calcium, auxine)
- Repositionnement du noyau de façon asymétrique

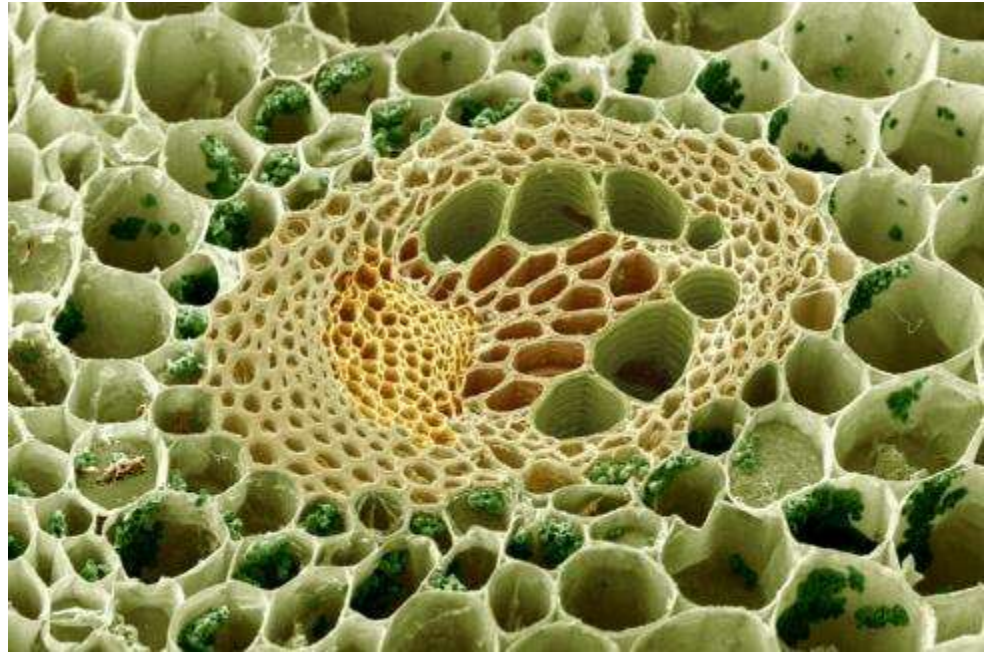


→ Effet de position

- Mouvement de facteurs de transcription agissant de façon non cellule autonome
- Communication inter-cellulaire de petites molécules (hormone, ARN, petit peptide,...)



En raison de l'existence de la paroi, **il n'existe pas de migration cellulaire** chez les plantes: **les cellules se divisent et se différencient sur place!**

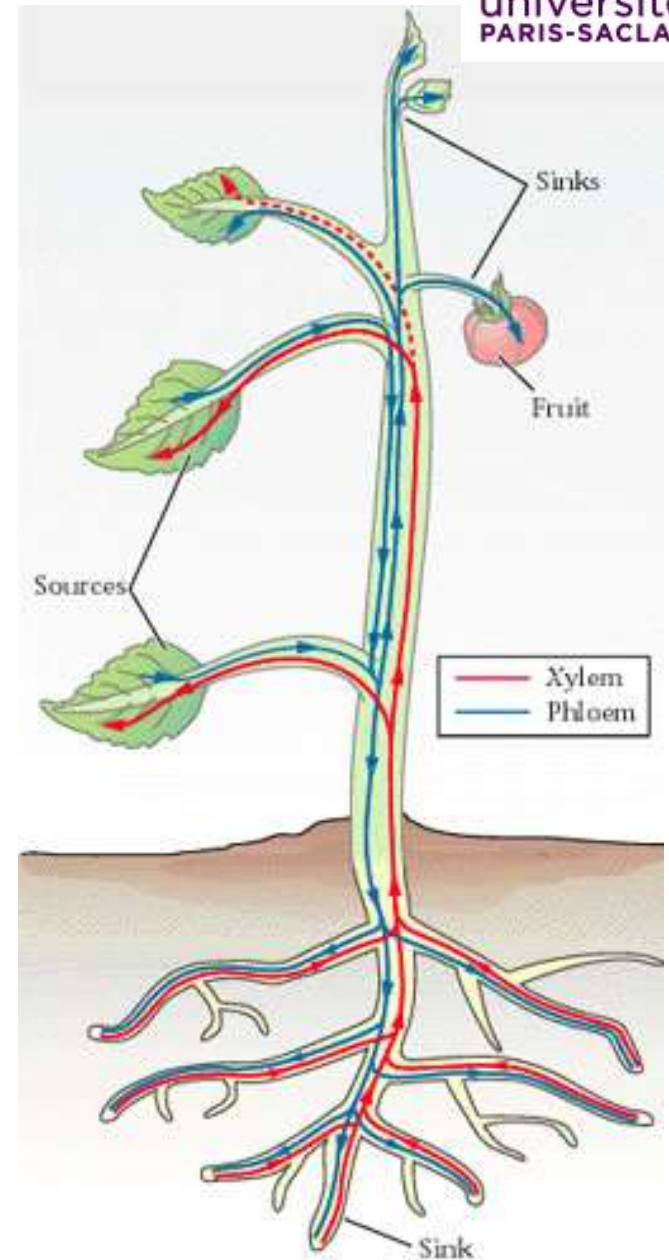


Tissu vasculaire (Power and Syred/Science Photo Library/Getty Images)

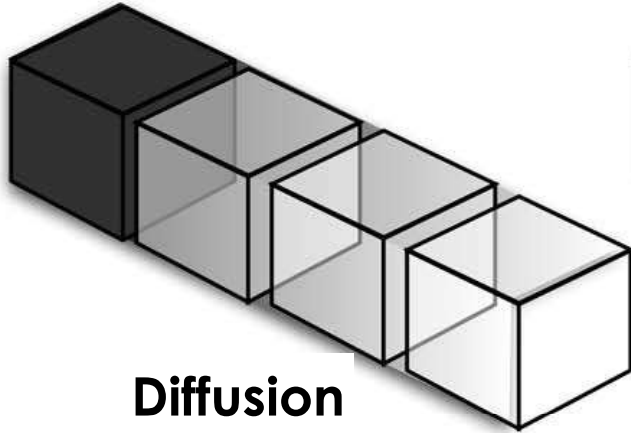
La construction en 3D d'un organe est donc établie par le contrôle très précis de **l'orientation des mitoses** et **les effets de position** qui gouvernent **l'identité des cellules filles**

Introduction

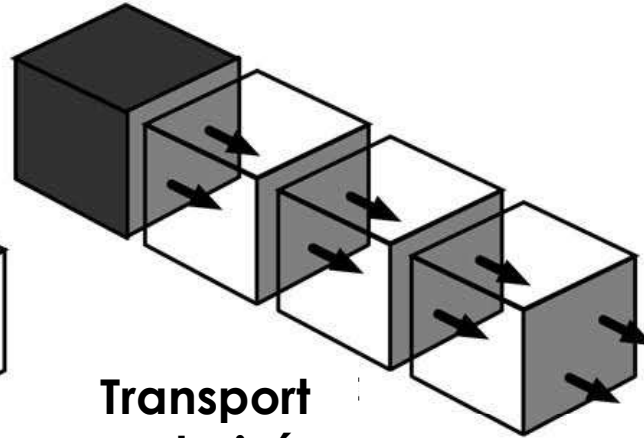
④ Les voies de communications



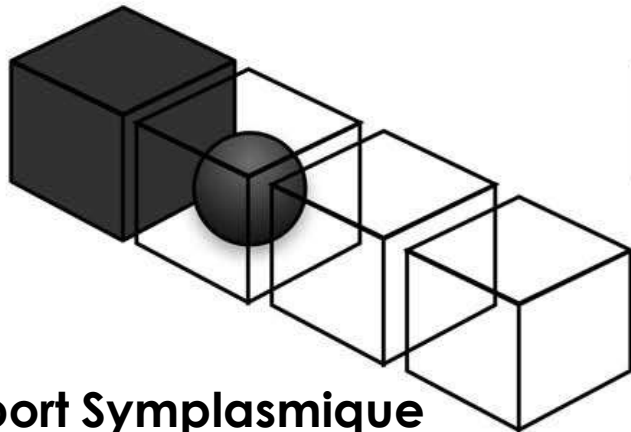
4 modalités de communication des signaux au niveau cellulaire



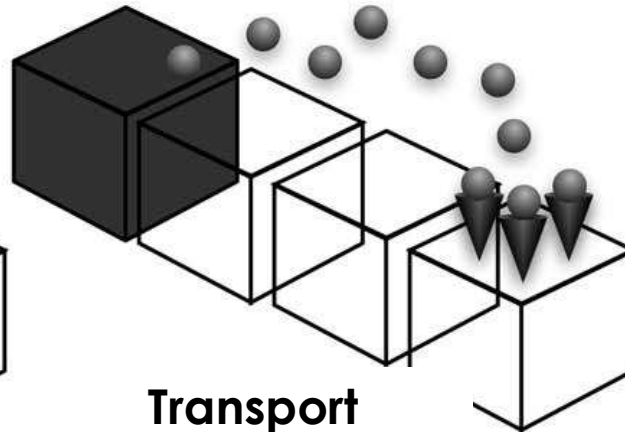
Diffusion



Transport polarisé



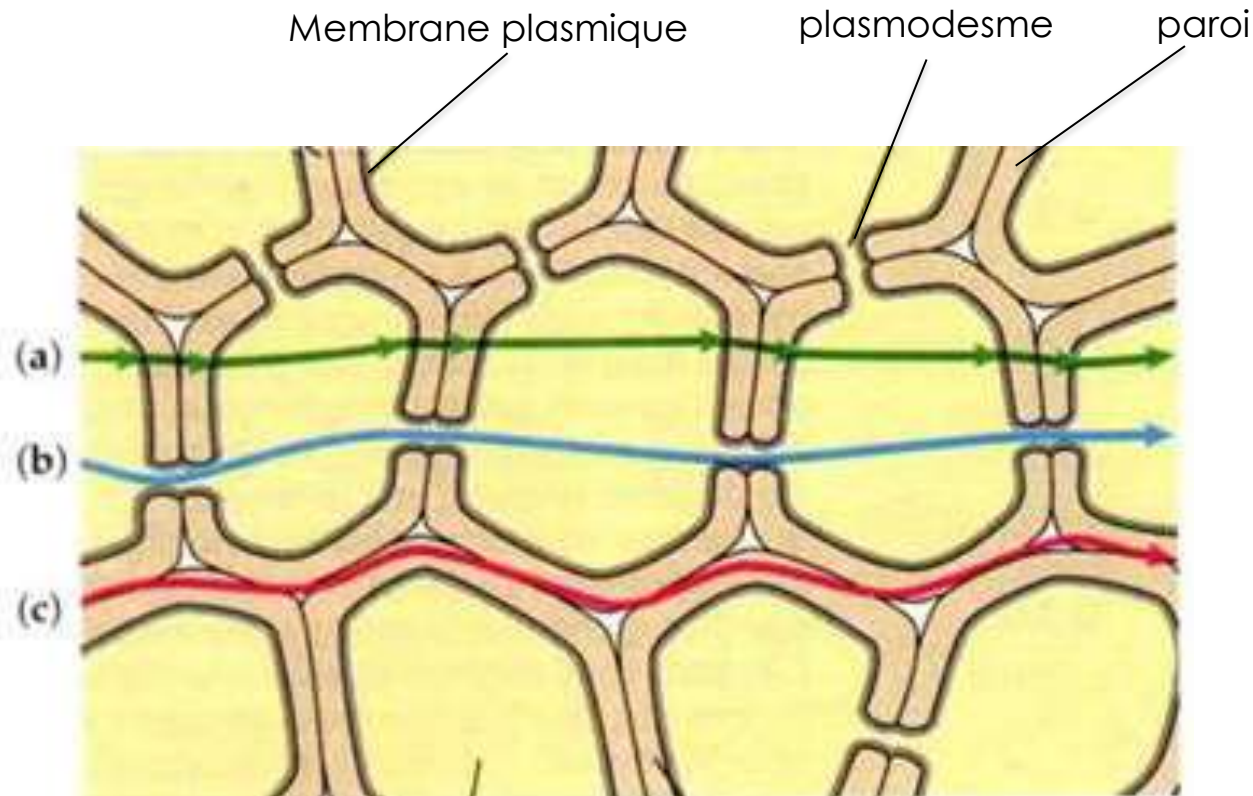
Transport Symplasmique



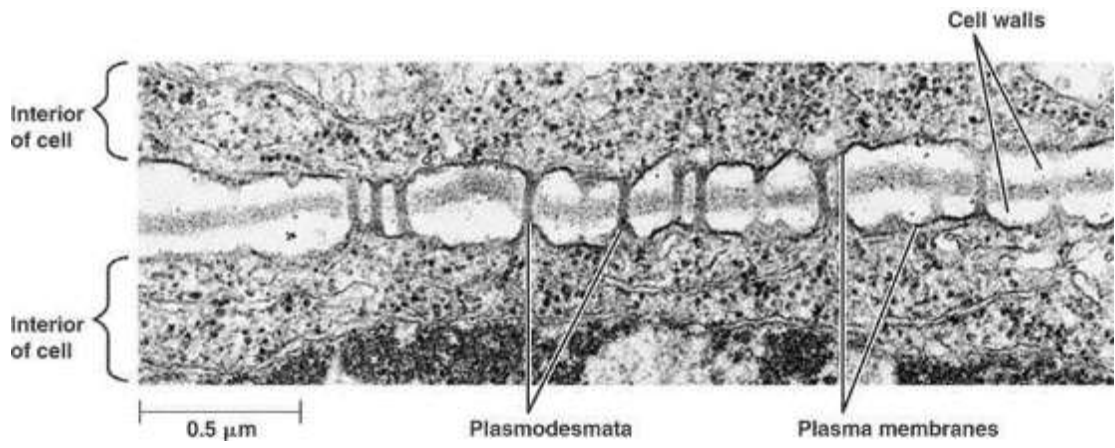
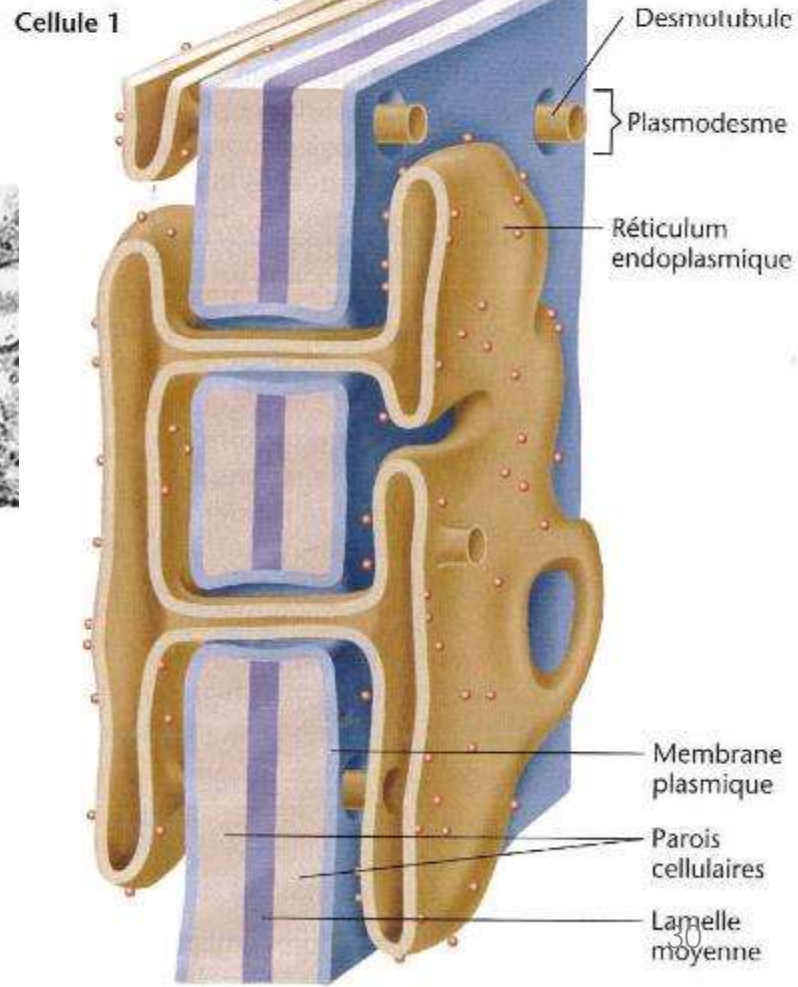
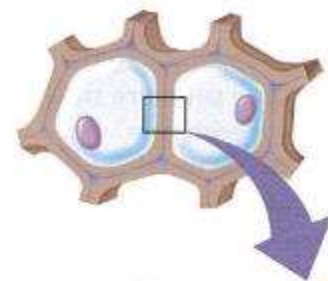
Transport Apoplasmique

Différentes voies de communication cellules à cellules:

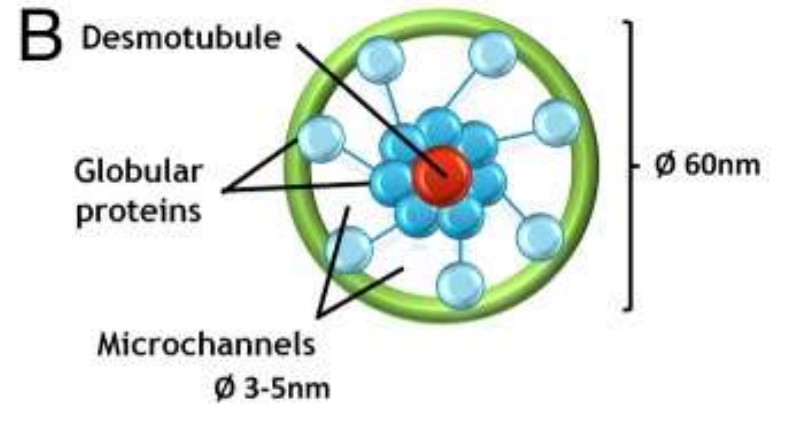
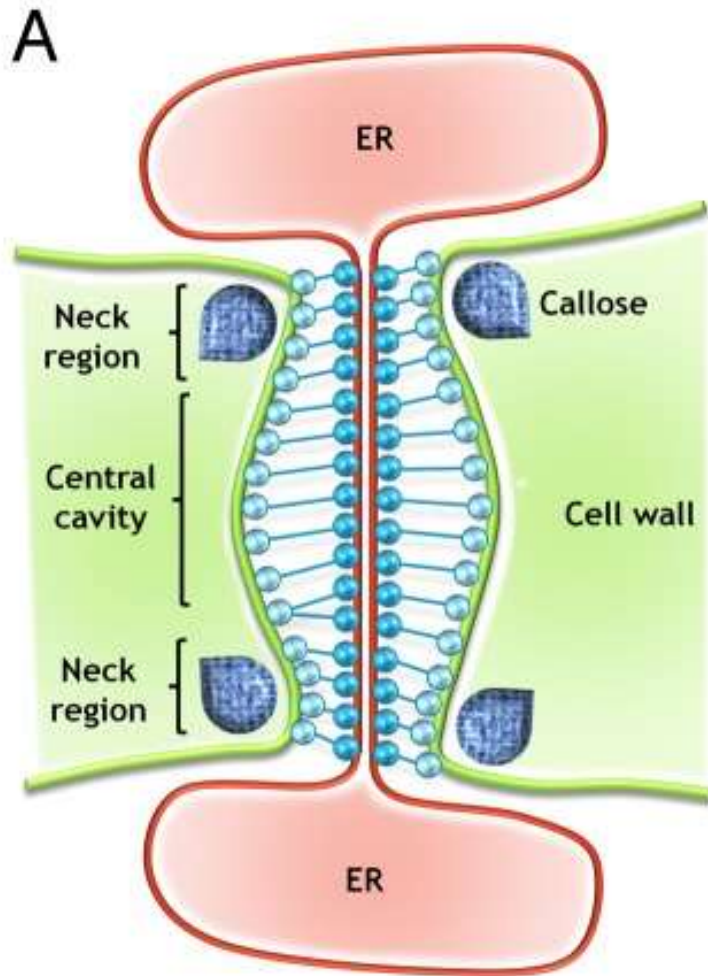
- **(a) Voie transcellulaire:** diffusion à travers les MP
- **(b) Voie Symplasmique:** à travers les plasmodesmes
- **(c) Voie Apoplasmique:** entre les cellules, au niveau des parois



Les plasmodesmes: des canaux cytoplasmiques



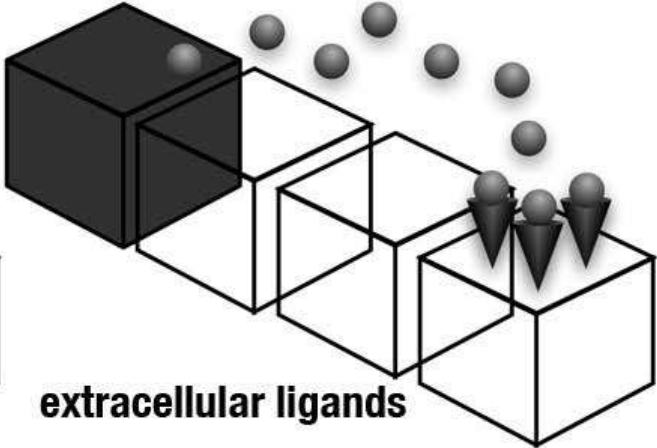
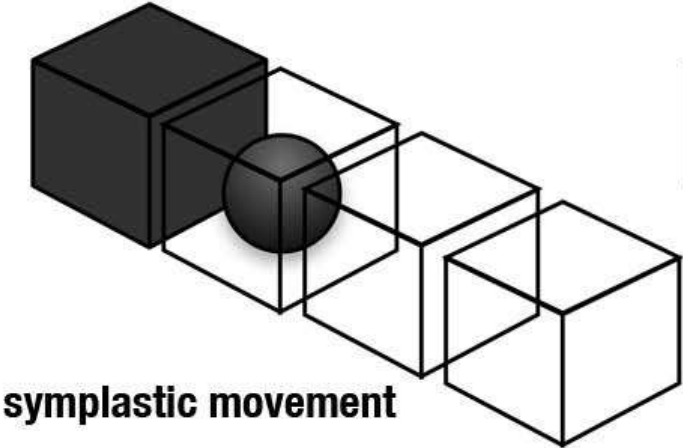
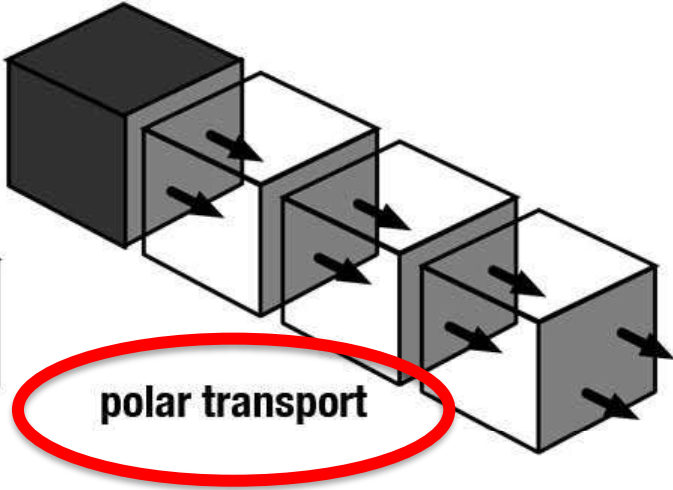
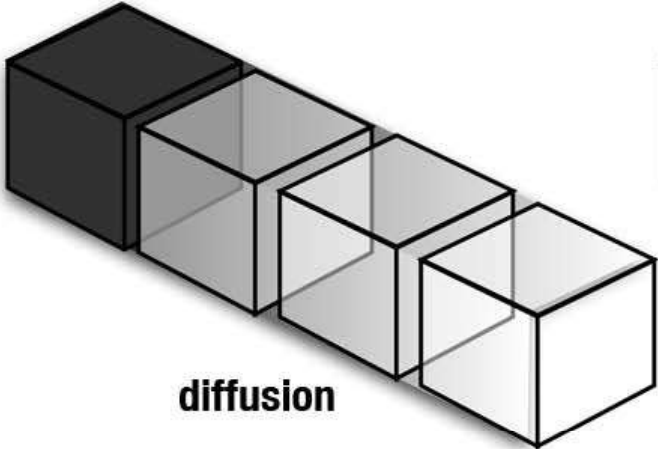
Un canal actif et sélectif



Transit de molécules variées:

- métabolites, ions (calcium, magnésium), hormones, messagers secondaires, ARN, peptides, etc...
- Particules virales !
- Diffusion limitée par la **taille d'exclusion limite du plasmodesme (en moyenne 800-1200 Da)**

Autres modalités de transport

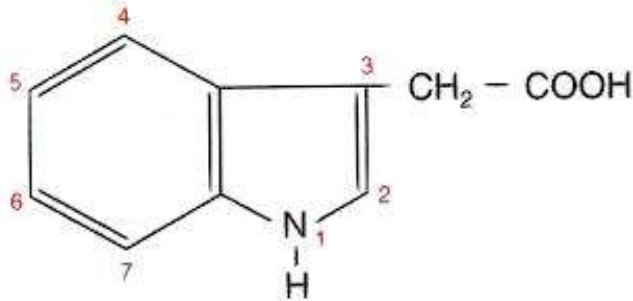


Exemple du transport polarisé de l'auxine

L'auxine:

Acide Indole 3 Acétique (AIA)

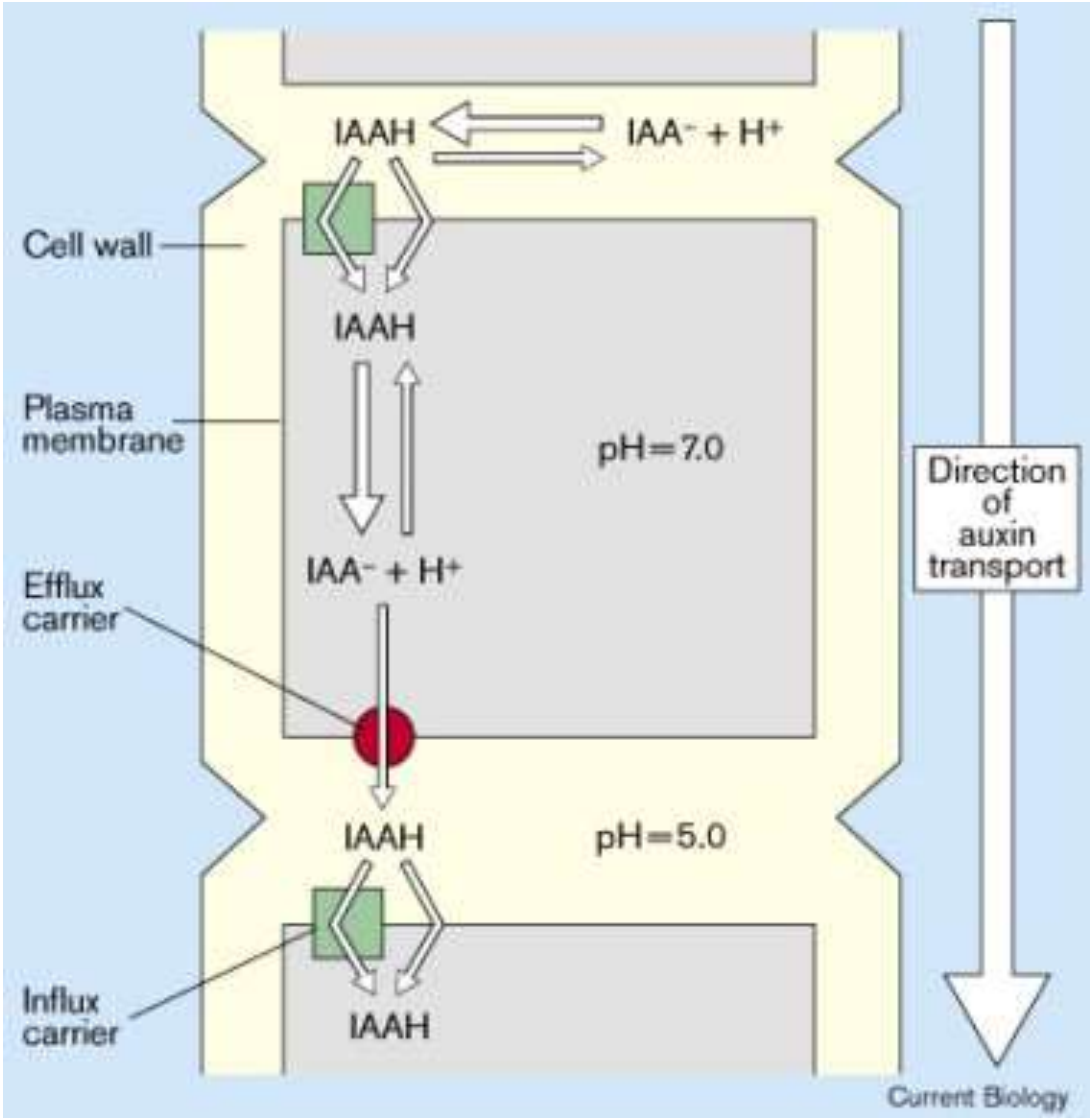
Pre-réquis



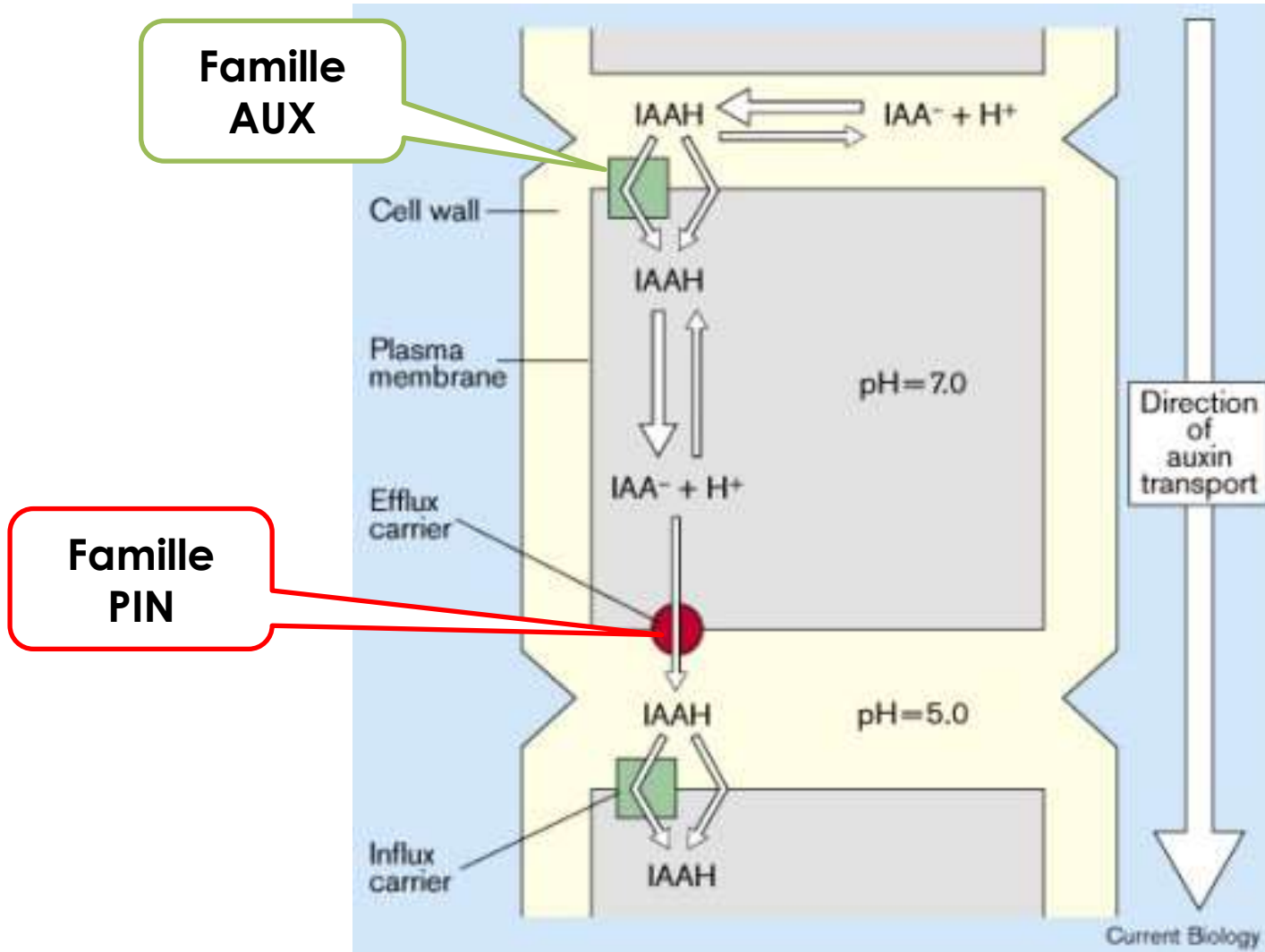
- Phytohormone jouant un rôle important au cours du développement:
- Elongation cellulaire
 - Réponses de tropisme (Phototropisme)
 - Dominance apicale
 - Etc...

TP

Exemple du transport polarisé de l'auxine (AIA)

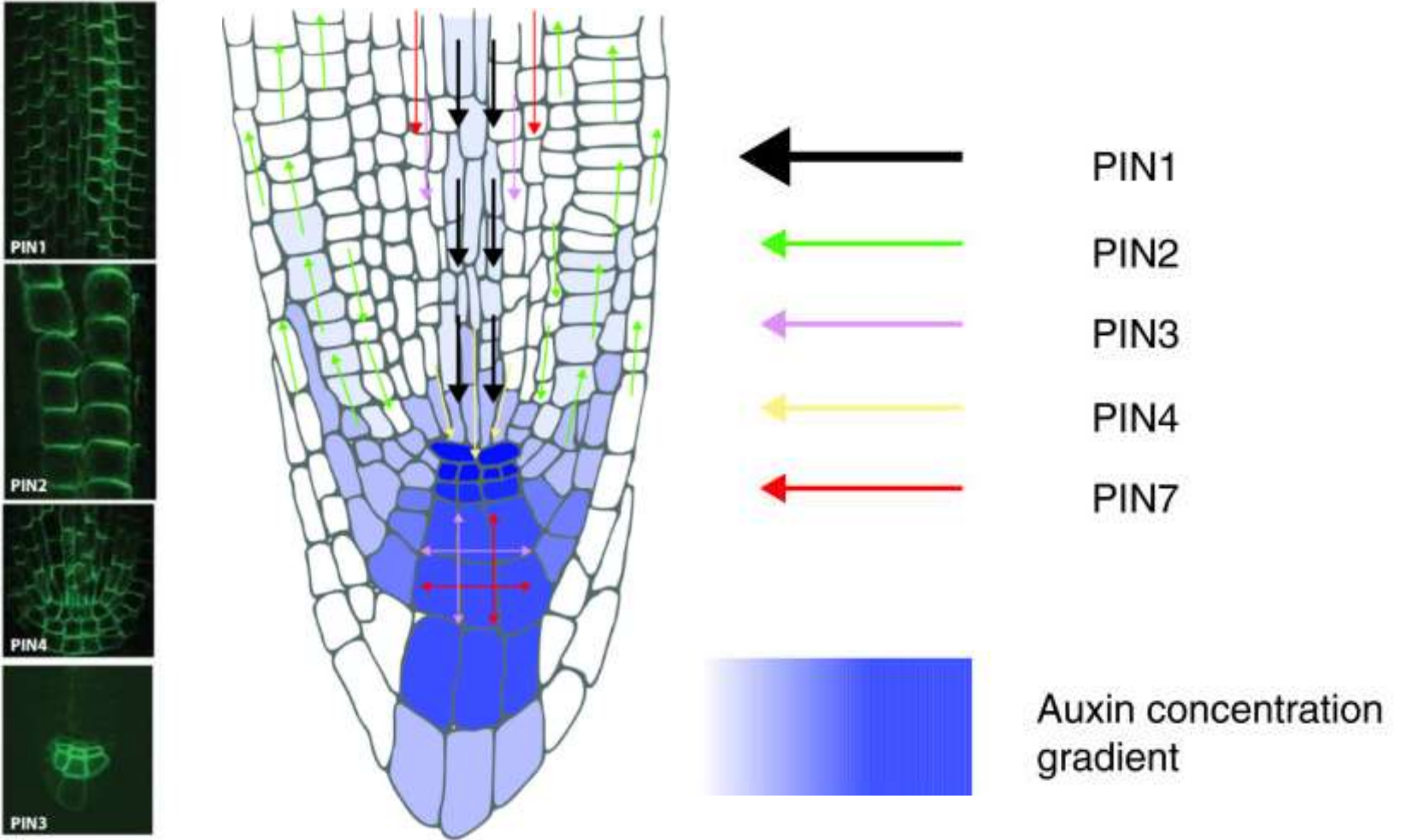


Exemple du transport polarisé de l'auxine



Une large famille de transporteur PIN oriente les flux d'auxine

Exemple: Développement racinaire



Křeček, P., et al.. (2009) The PIN-FORMED (PIN) protein family of auxin transporters. *Genome Biology* 10: [249](#).

Particularités du développement des plantes

→ **Organismes fixés adaptés** à leur environnement :

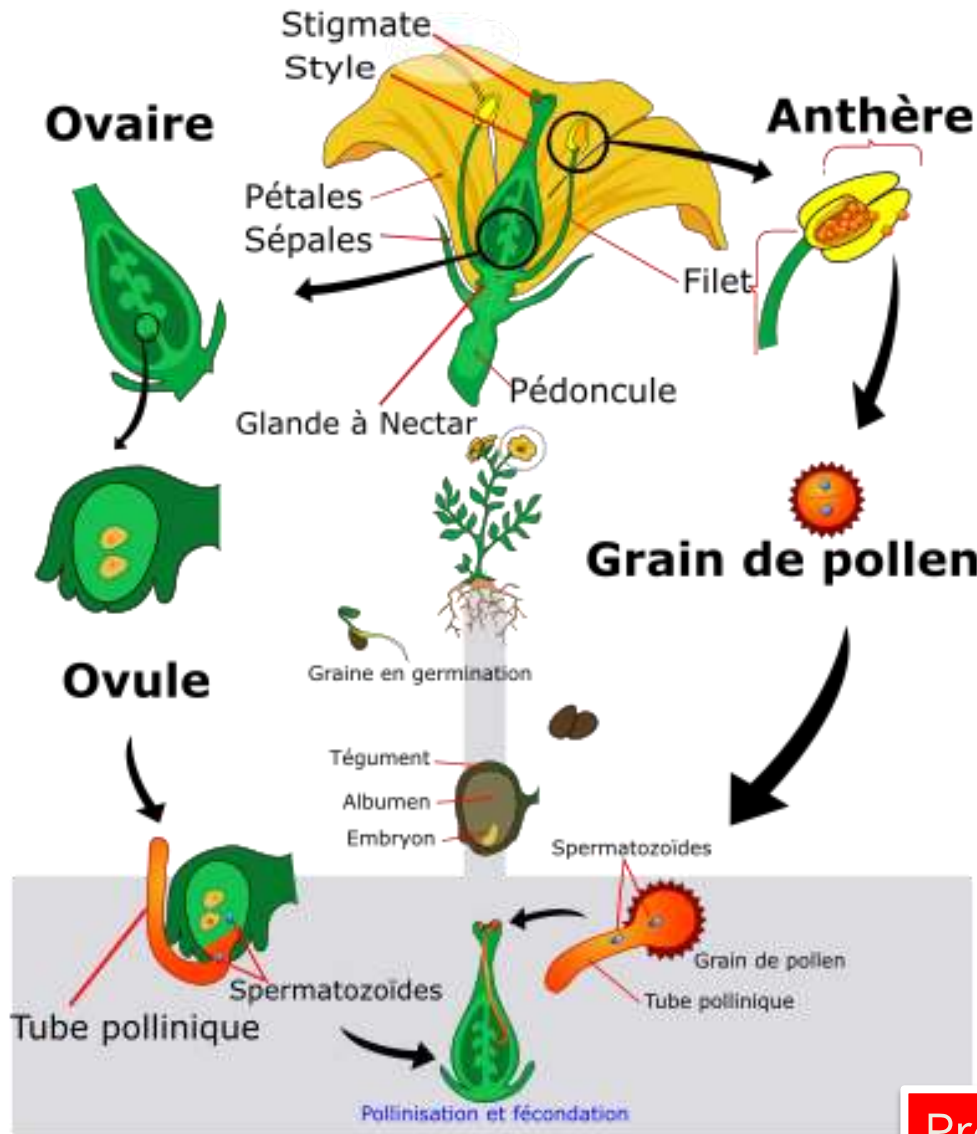
→ Autotrophie

→ Développement post-embryonnaire continu

→ **Matrice extracellulaire: Paroi et Plasmodesmes**

→ Pas de migration cellulaire

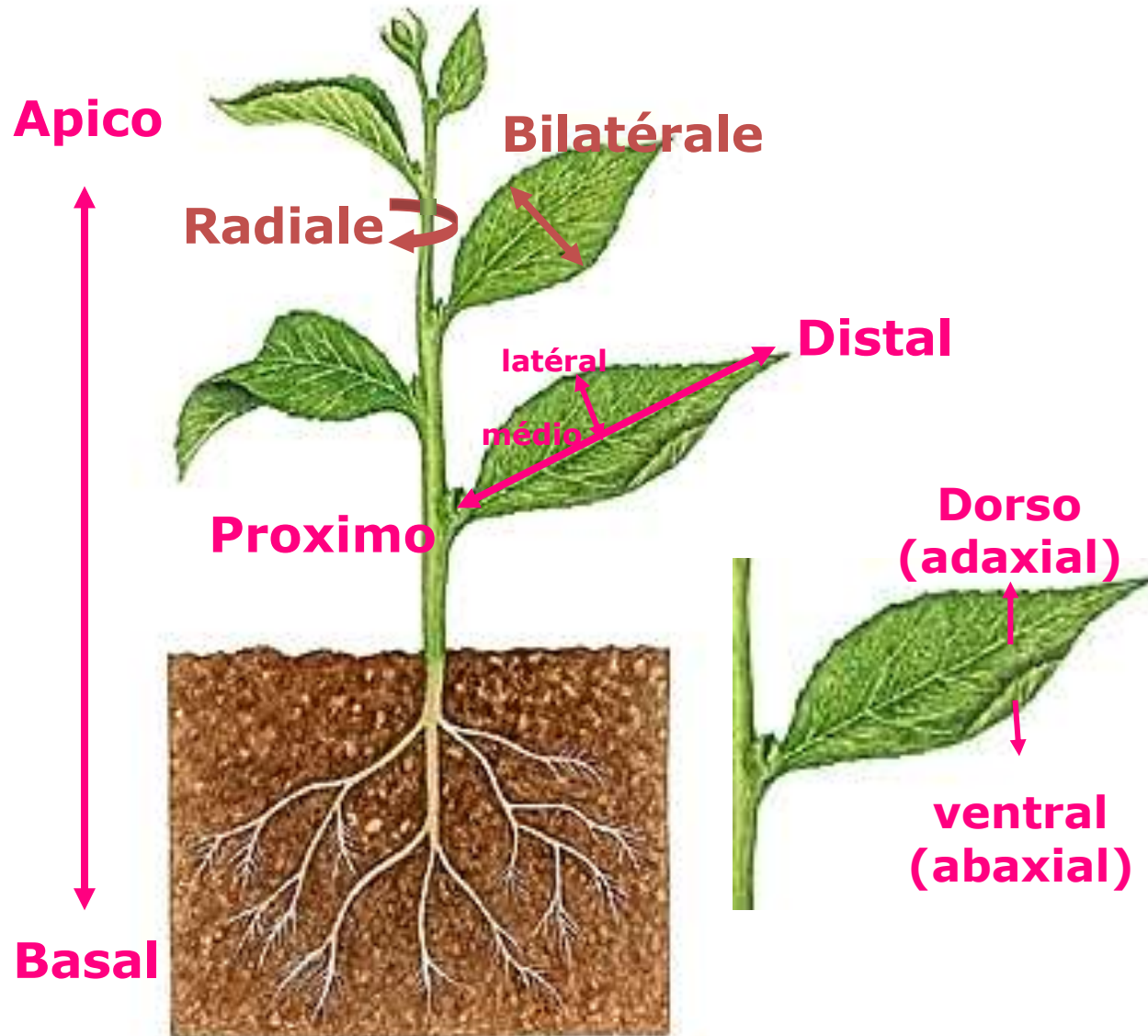
→ Conséquences sur la différenciation cellulaire



Cycle de vie d'une angiosperme

Pre-réquis

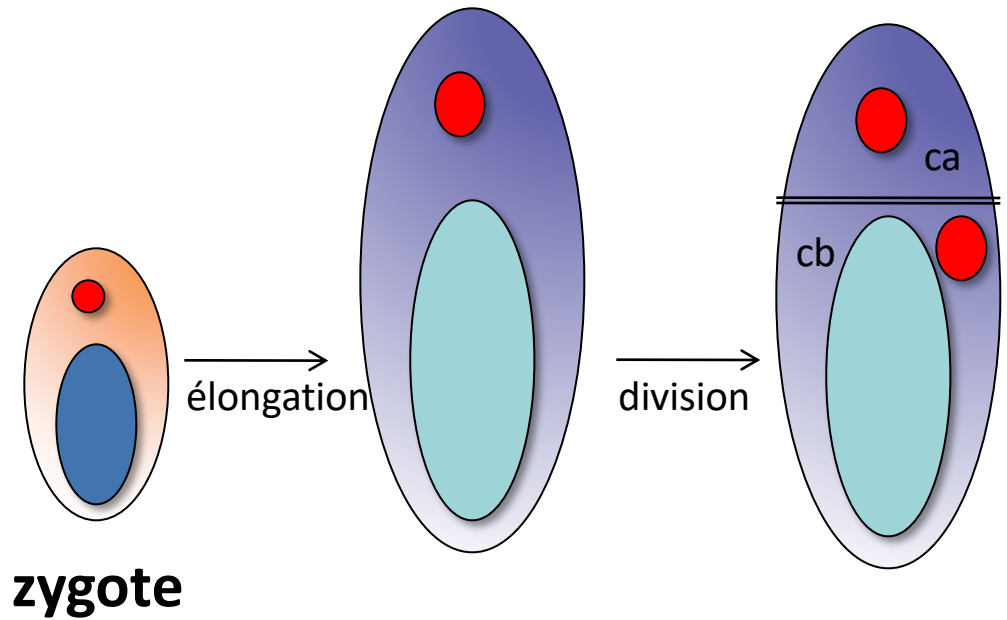
① Mise en place des axes de polarités



Polarisation du zygote

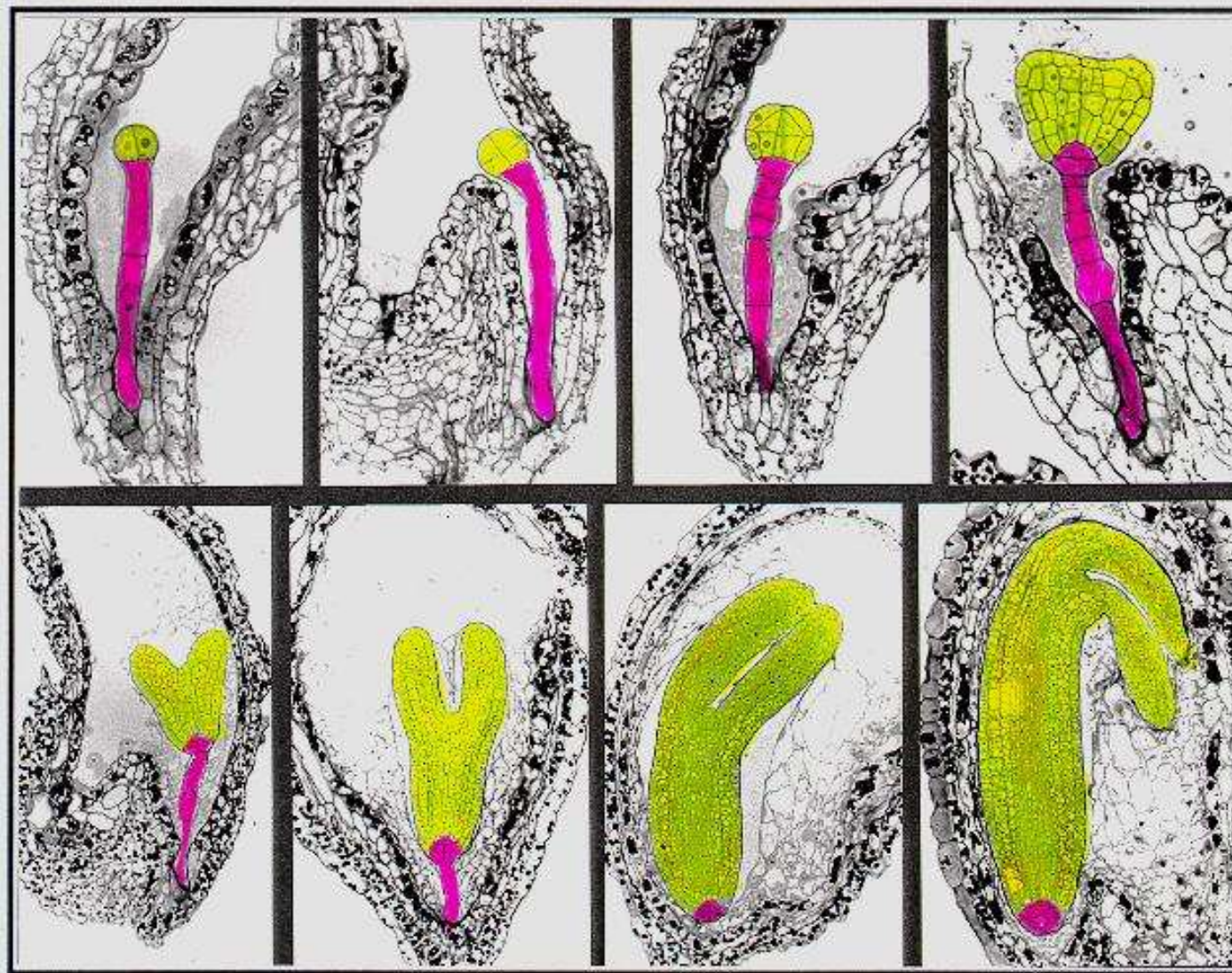


Zygote
Arabidopsis thaliana



1ère division asymétrique

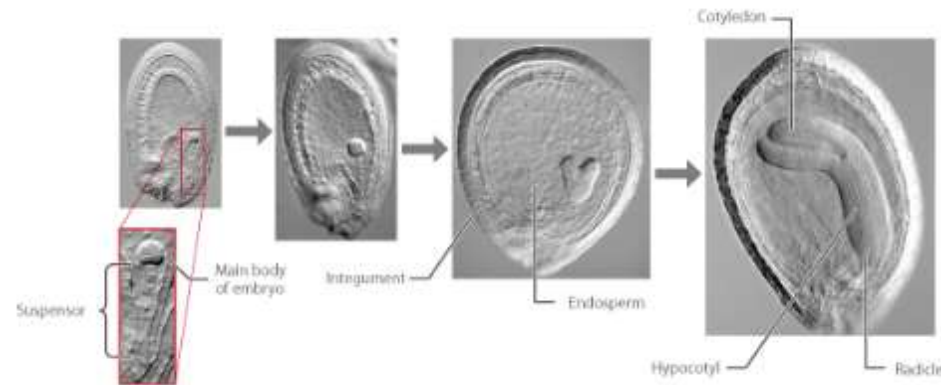
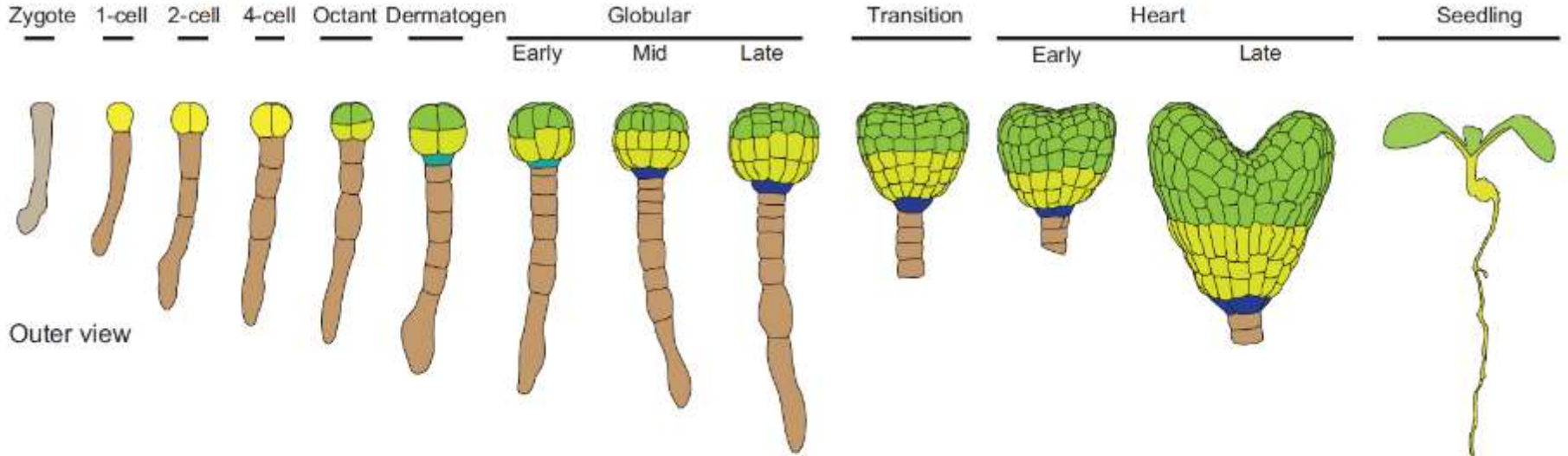
Polarisation cellulaire au cours de l'embryogenèse



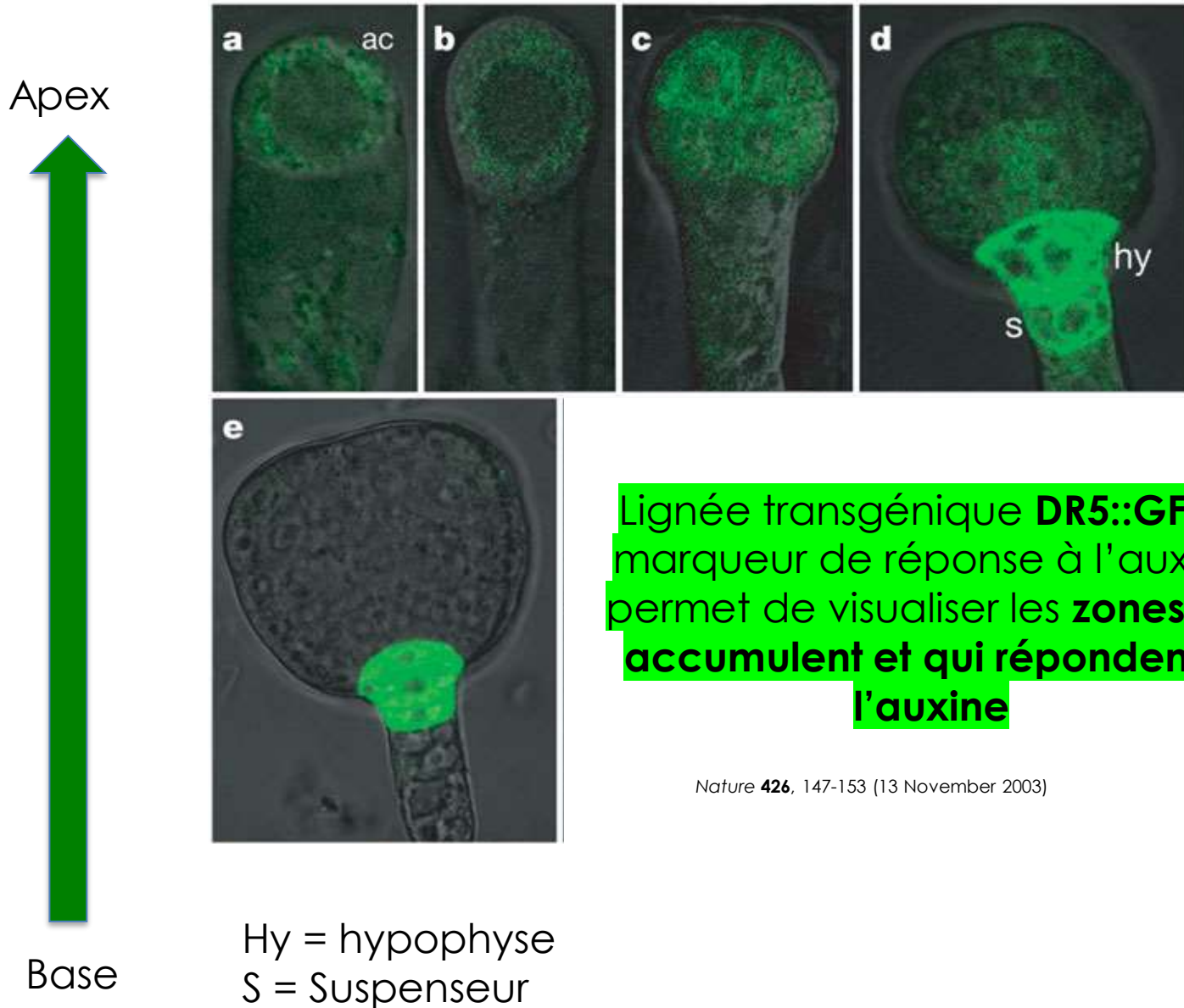
Cellule apicale
= Embryon
(- l'hypophyse)

Cellule basale
= Suspenseur
+ hypophyse

Les étapes de l'embryogenèse



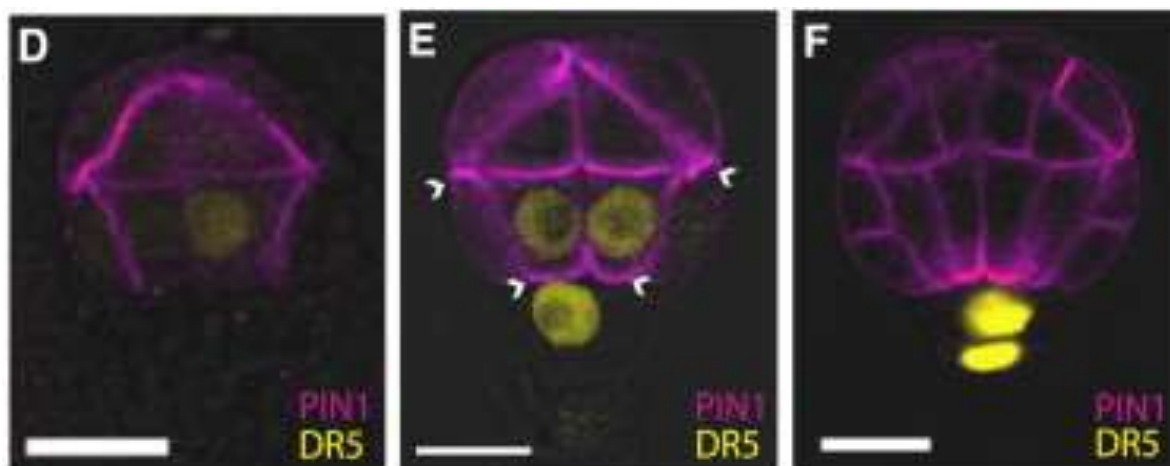
La mise en place de l'axe apical-basal est due à la formation d'un gradient d'auxine



Lignée transgénique **DR5::GFP** =
marqueur de réponse à l'auxine
permet de visualiser les **zones qui
accumulent et qui répondent à
l'auxine**

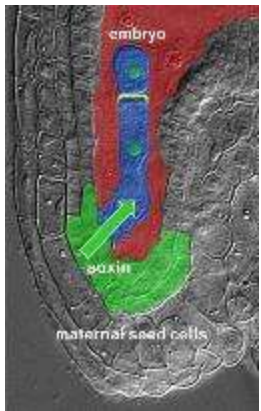
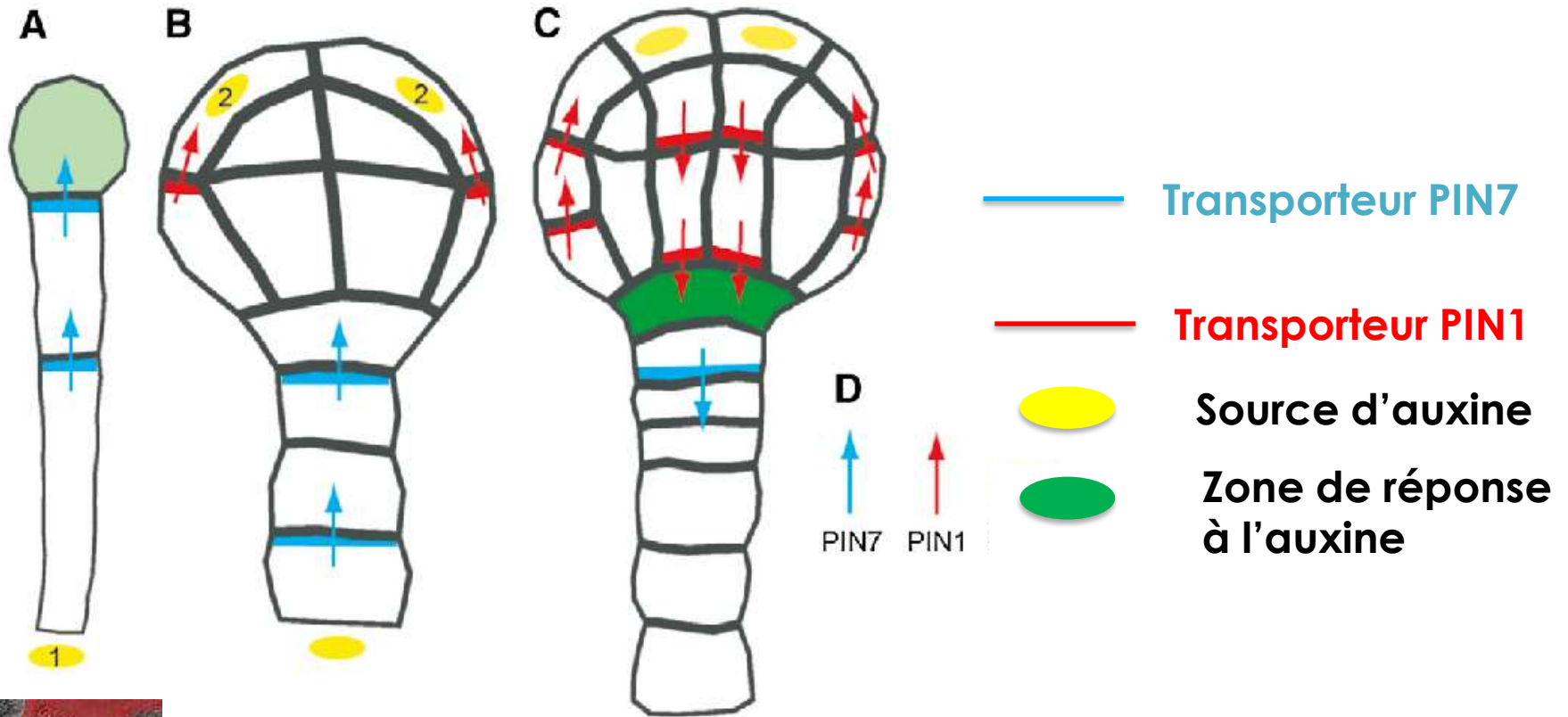
Nature **426**, 147-153 (13 November 2003)

Les transporteurs d'efflux PIN s'orientent différemment au cours de l'embryogenèse

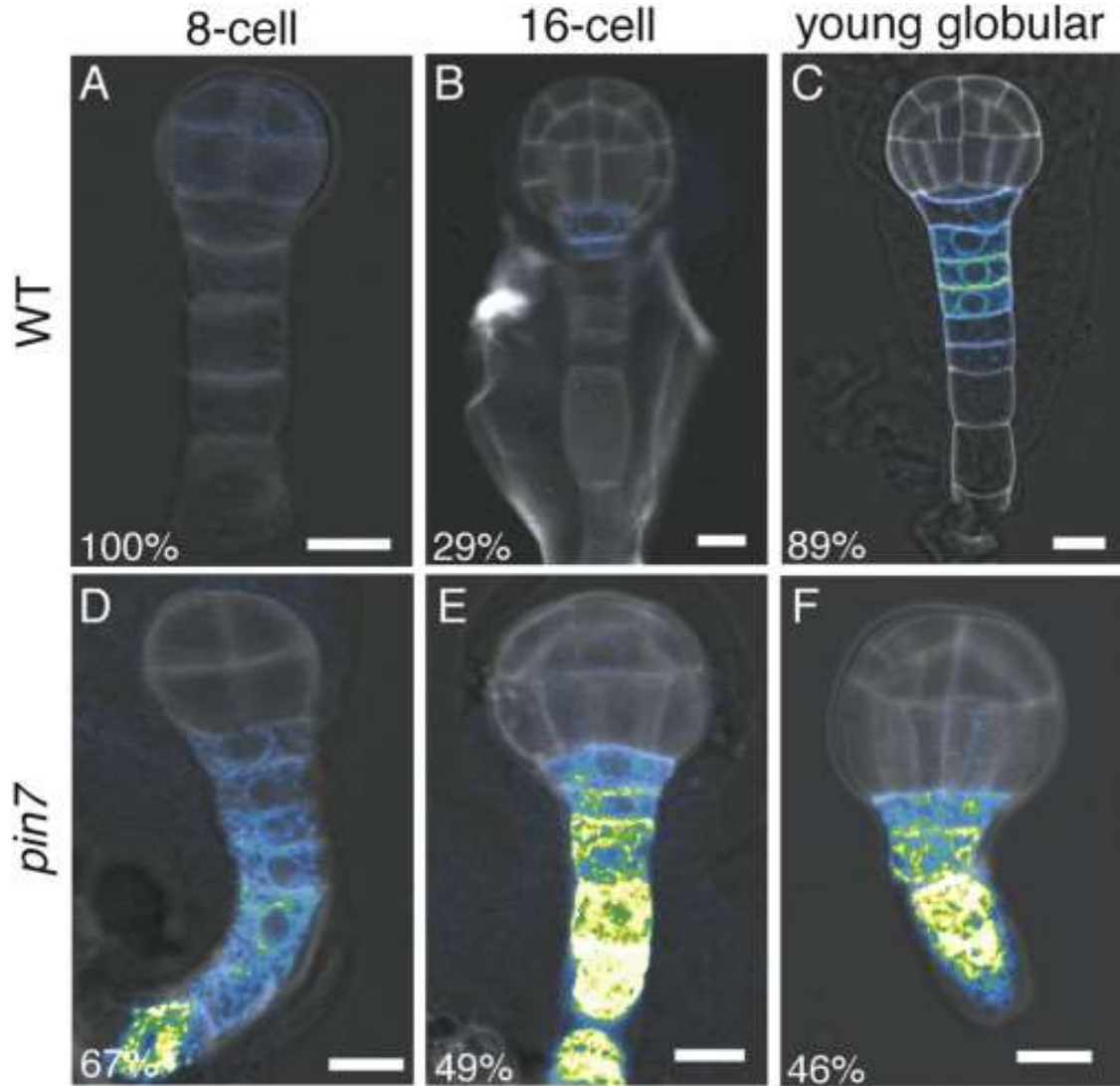


PIN1 = Transporteur d'efflux de l'auxine
DR5 = marqueur d'accumulation
d'auxine

Formation d'un gradient d'auxine au cours de la polarisation apico-basale



PIN7 est indispensable pour la mise en place d'un gradient d'auxine et une embryogenèse correcte



Auxin-response:blue-yellow intensity gradient

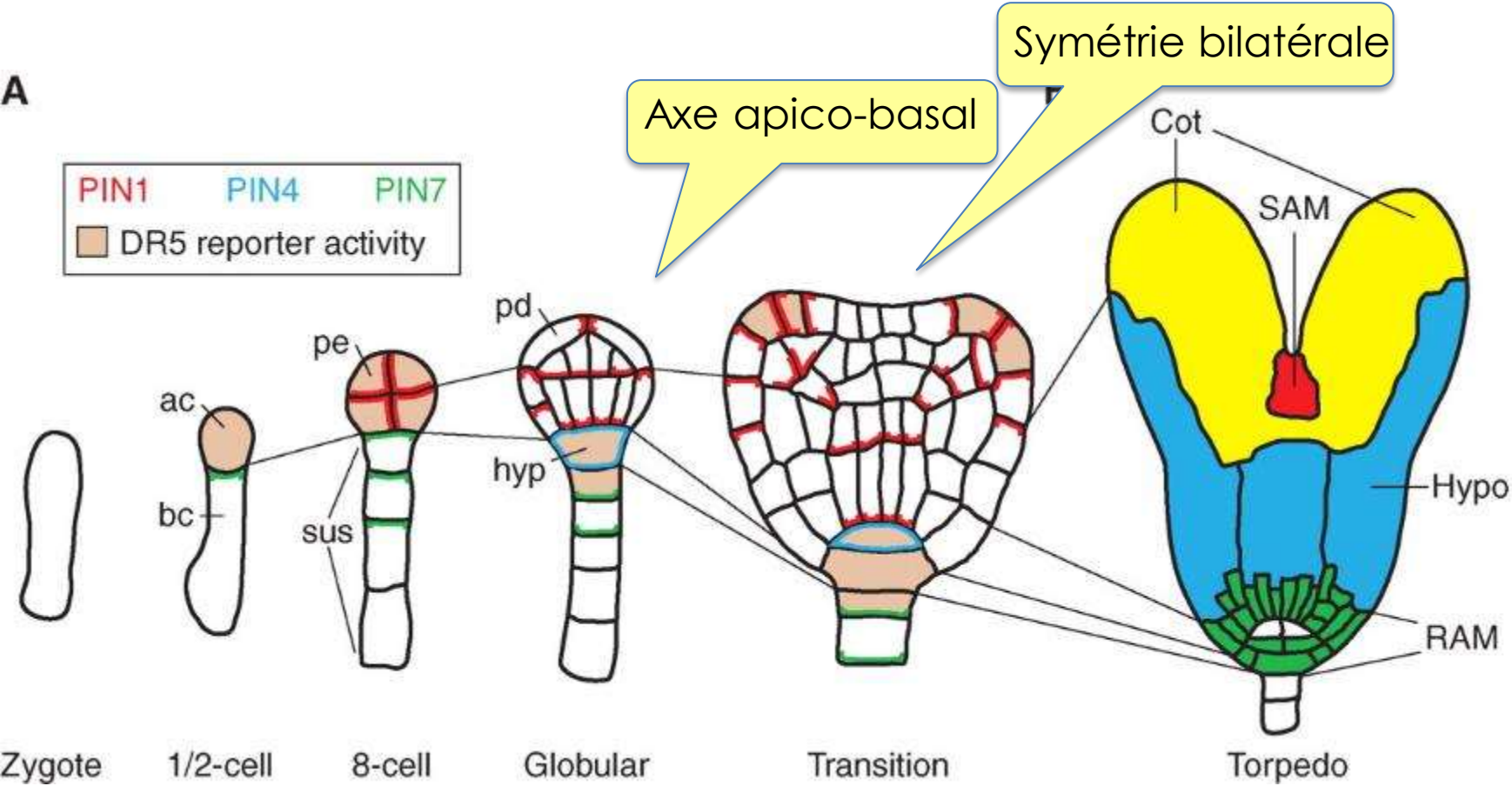
Plante sauvage (Wild-type)



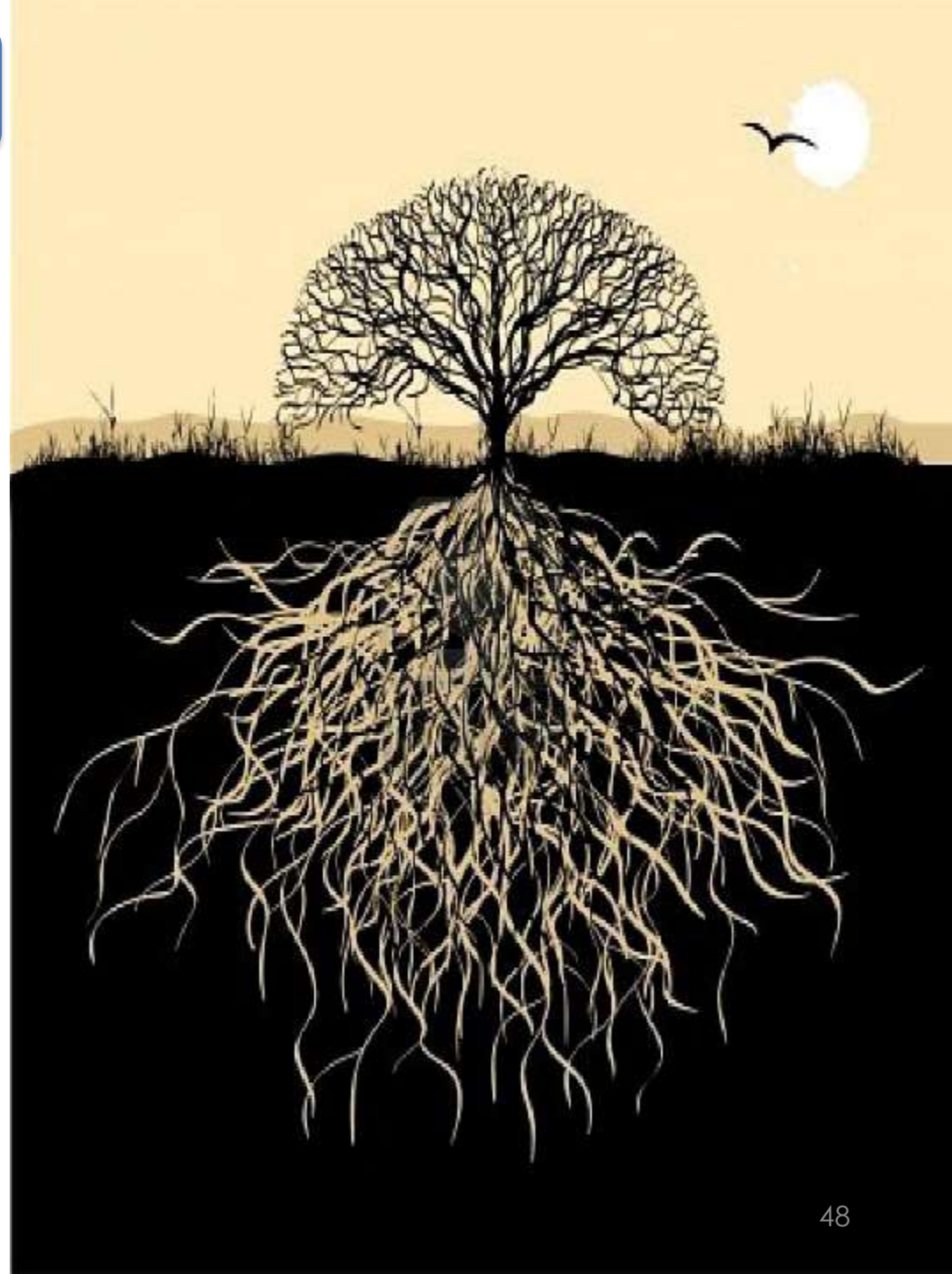
Mutant déficient en PIN7



CCL : l'auxine un facteur majeur de l'embryogenèse

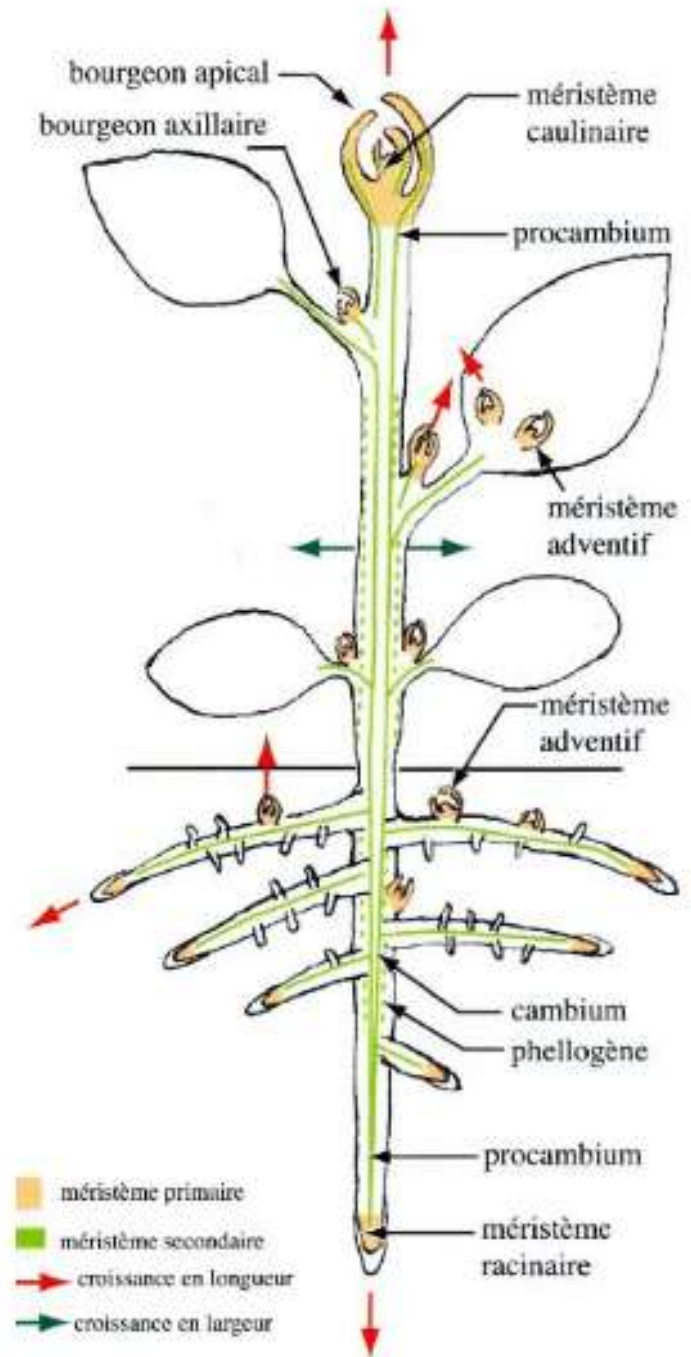
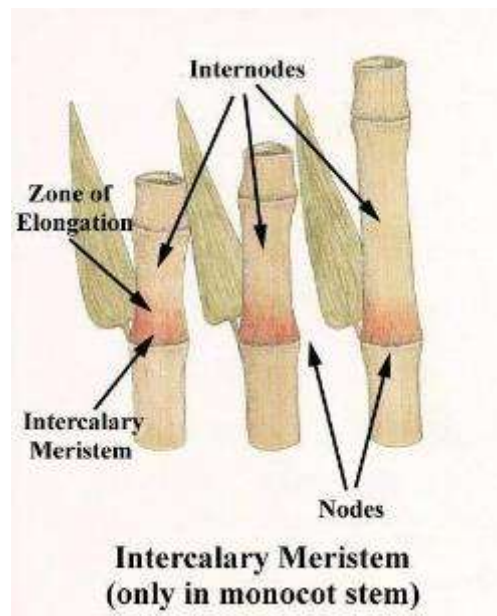


② Croissance racinaire



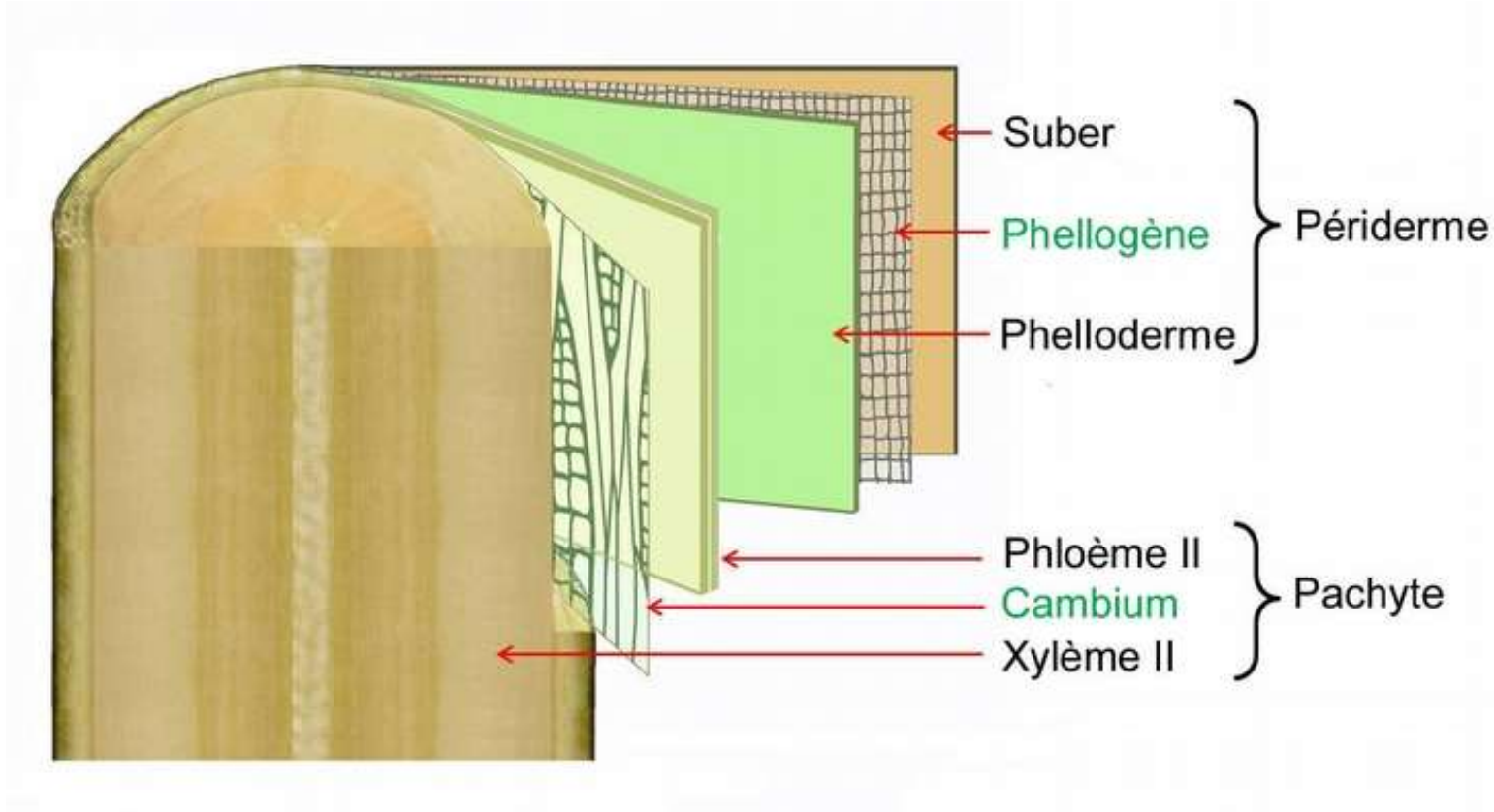
Méristèmes Primaires à l'origine des tissus primaires chez toutes les plantes

- Méristèmes **apicaux** caulinaires et racinaires (Apex)
- Méristèmes **axillaires** (à la base des feuilles)
- Méristèmes **adventifs** (sur un organes)
- Méristèmes **intercalaires**



Méristèmes secondaires = Croissance secondaire en largeur chez les plantes ligneuses

→ Zones de cellules indifférenciées en division d'origine **post-embryonnaire**

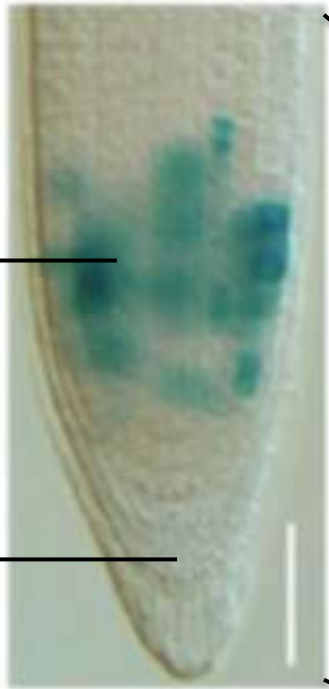


- **Phellogène → écorce**
- **Cambium → bois**

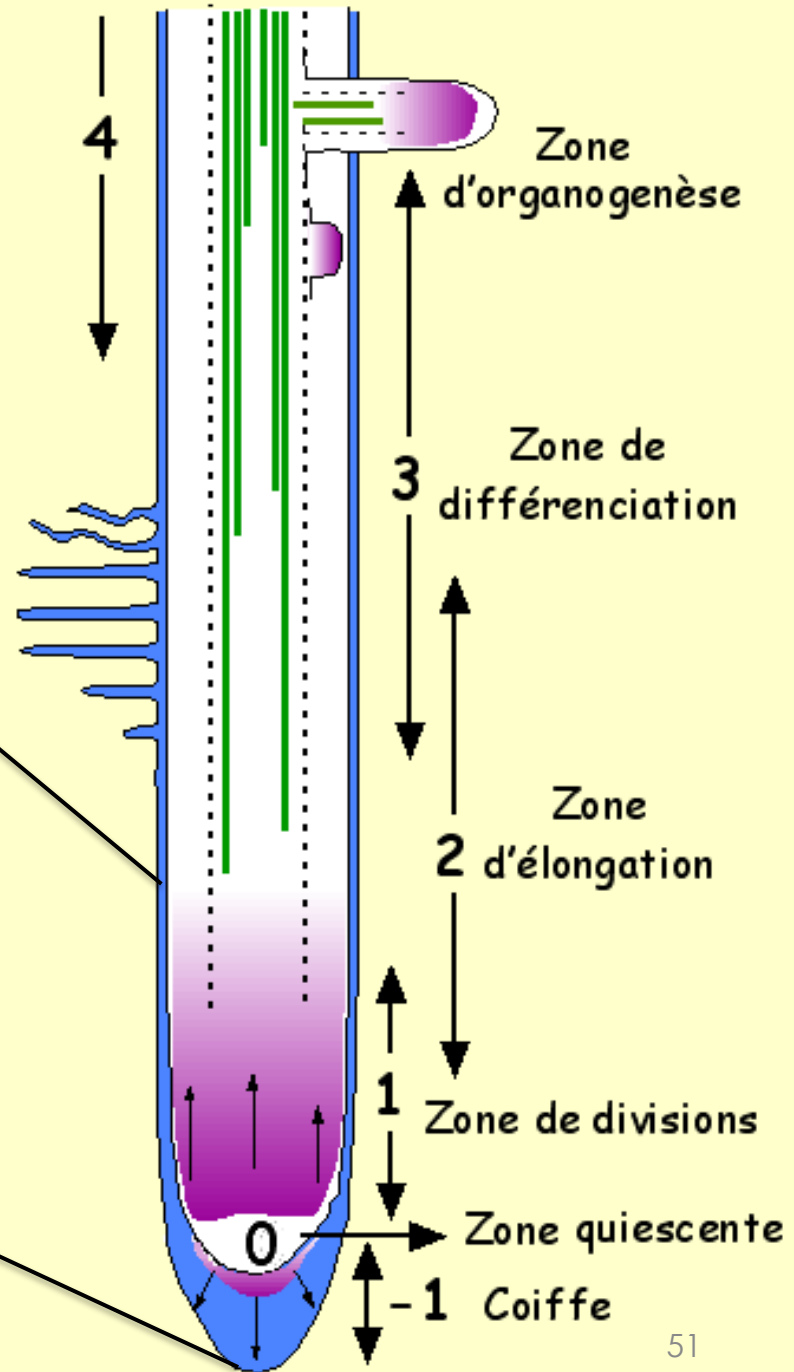
Méristème Apical Racinaire (MAR)

MAR

Coiffe



Marquage pointe racinaire de la Cycline B1 marquant uniquement les cellules en mitose

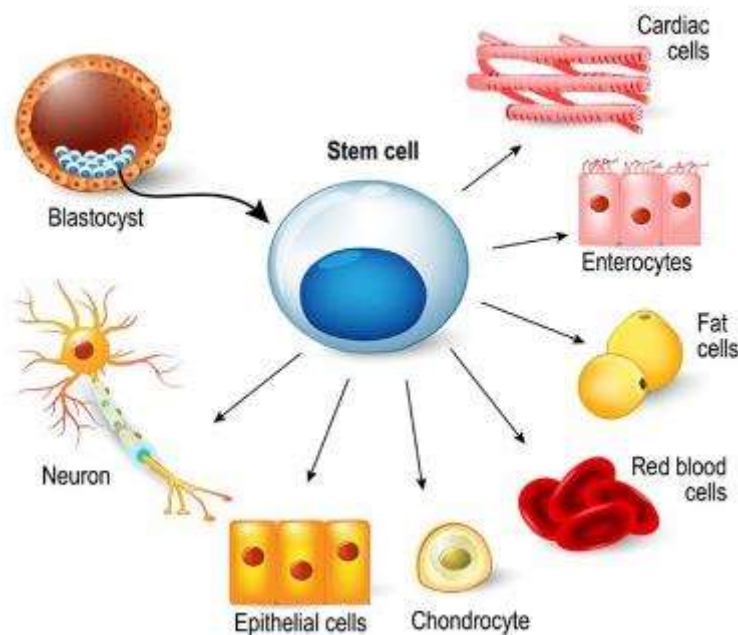


Les méristèmes constituent une niche de cellules souches :

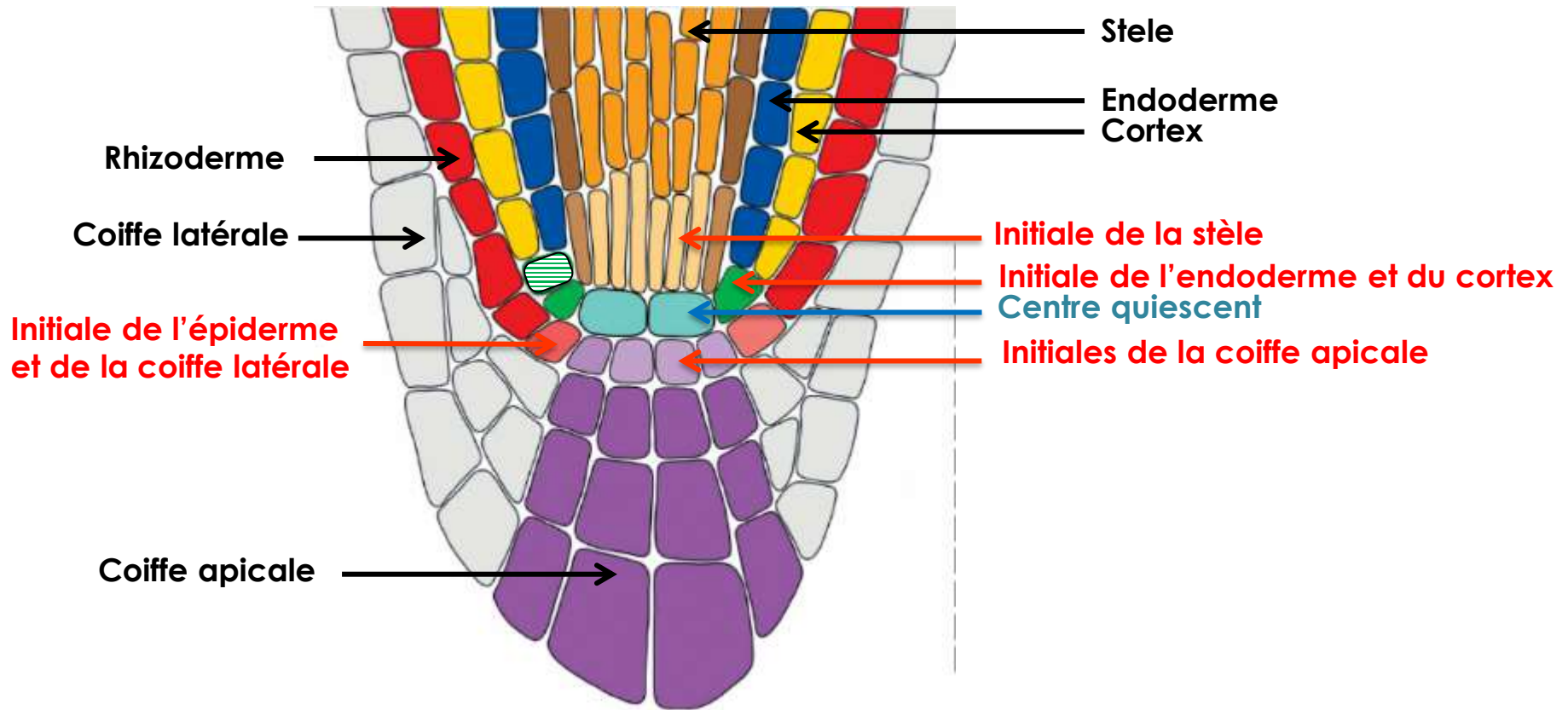
→ Micro-environnement qui permet la production de cellules filles et le renouvellement des cellules souches (Ohlstein et al. 2004).

Cellule souche :

→ Cellule **indifférenciée** se caractérisant par la capacité à **engendrer des cellules spécialisées par différenciation cellulaire** et une **capacité à se maintenir par prolifération** (auto-renouvellement)



Niche de Cellules Souches Racinaires



2-1 Mise en place des niches de cellules souches au cours de l'embryogenèse

La niche est mise en place au cours de l'embryogenèse à partir du stade globulaire précoce

→ Recherche de **facteur nécessaire** pour spécifier l'identité cellules souches racinaires

→ Recherche d'un **Mutant de perte de fonction**



Mutant *plethora* (*plt*) d'*Arabidopsis* incapable de mettre en place un système racinaire

WT plant

plt mutant

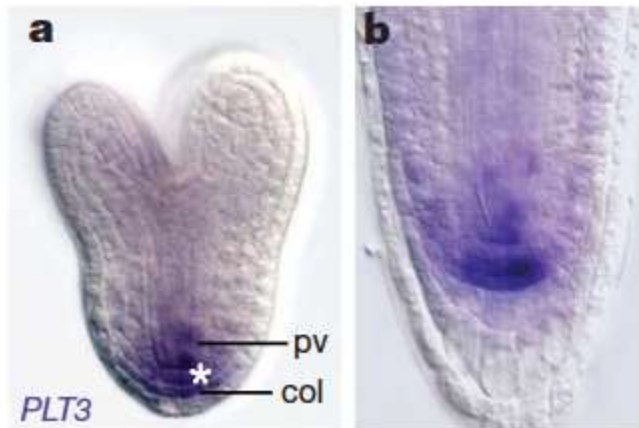


Expression ectopique de *PLT* dans le MAC

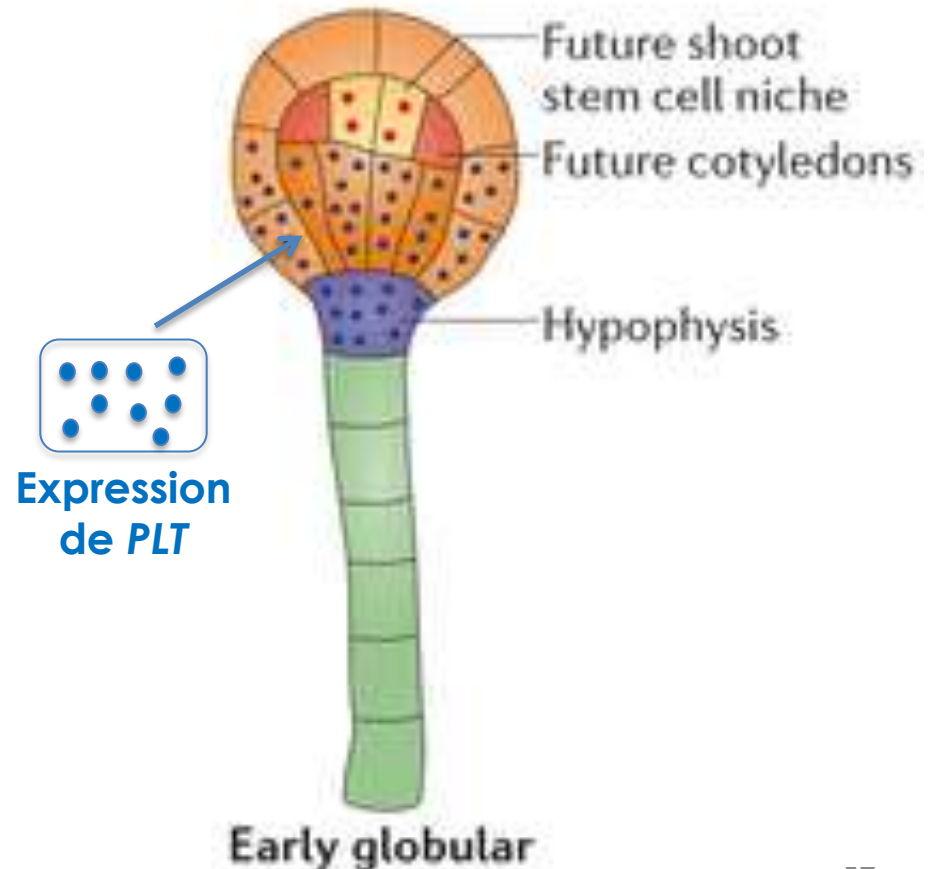
PLT est **nécessaire** et **suffisant** pour définir
l'identité MAR

2-1 Mise en place des niches de cellules souches au cours de l'embryogenèse

PLETHORA (PLT) = facteur d'identité des cellules souches racinaires

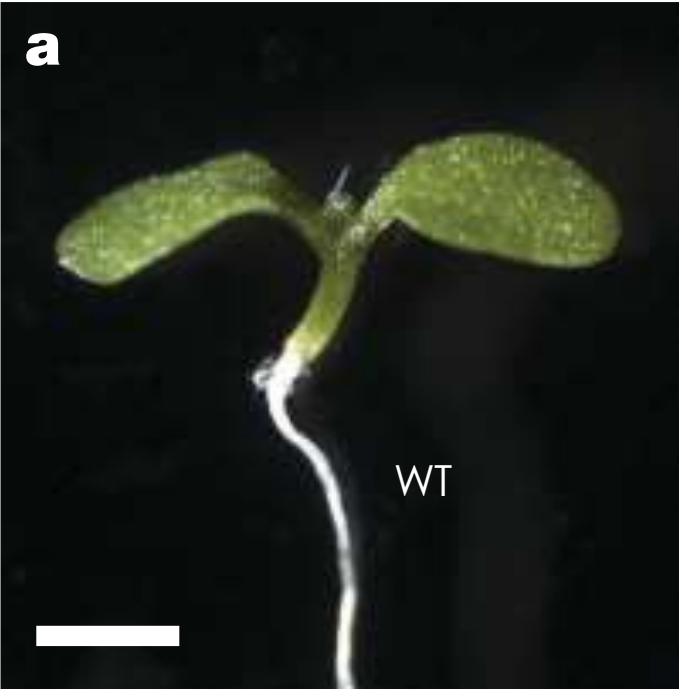


Hybridation *in situ* révélant le domaine d'expression de PLT dans l'embryon et la racine



Identification du mutant *topless (tpl)*

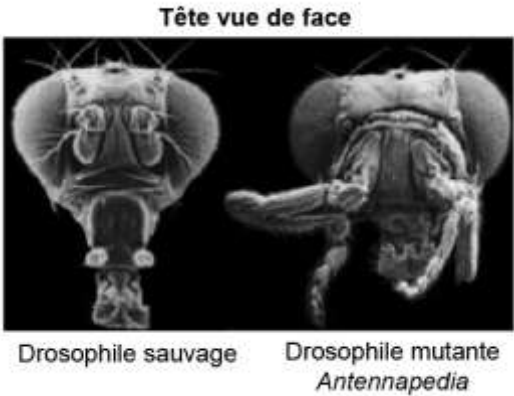
Le mutant *tpl* est un **mutant homéotique** avec un changement d'identité des organes (domaine caulinaire se transforme en domaine racinaire)



Type sauvage



tpl

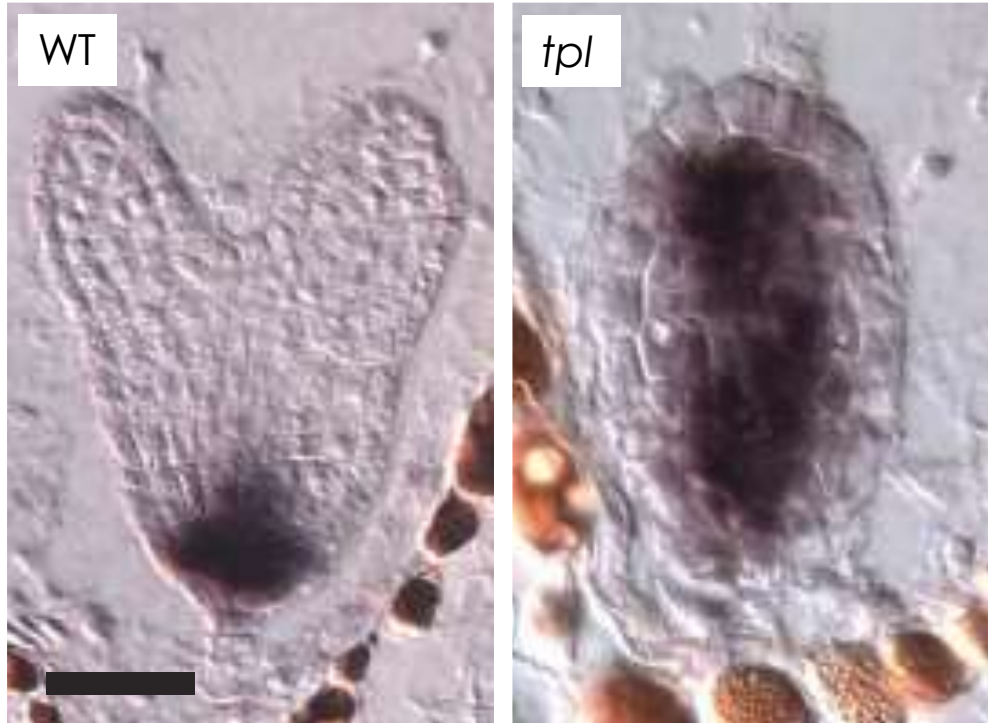


Drosophile sauvage

Drosophile mutante
Antennapedia

Fonction de TPL?

TPL réprime l'expression de *PLT* dans la partie apicale



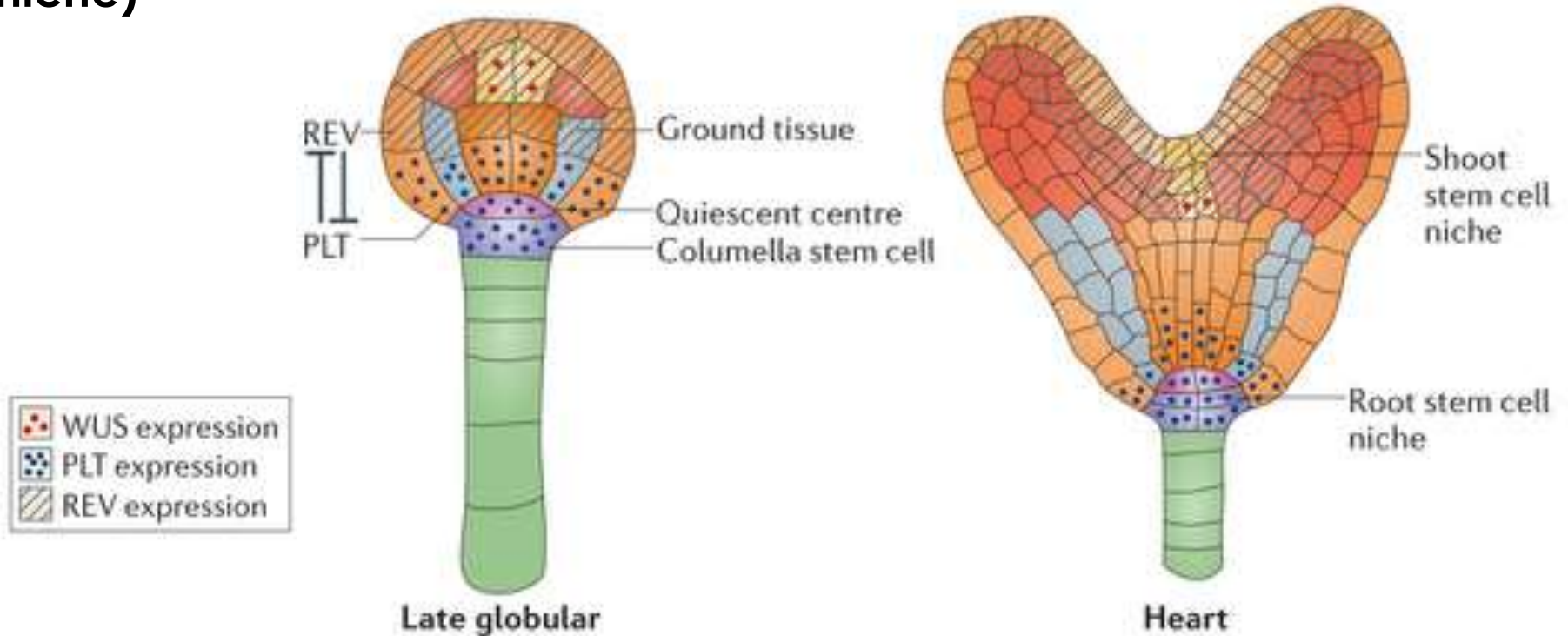
Expression de *PLT* chez le WT et mutant *topless (tpl)*
visualisée par hybridation *in situ*



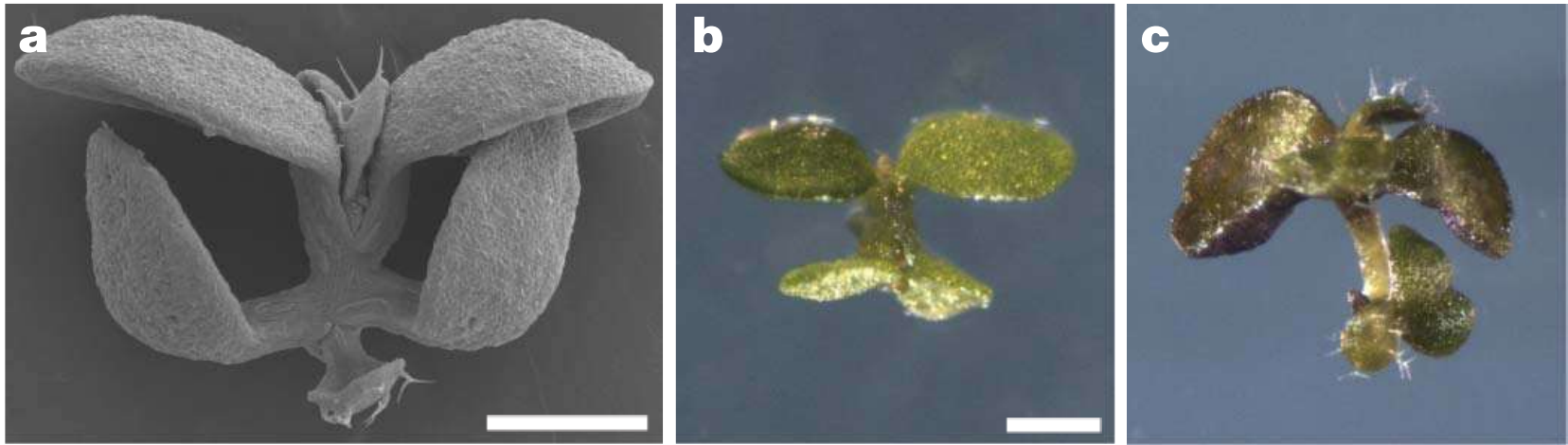
Action mutuellement antagoniste de **PLETHORA (PLT)/REVOLUTA (REV)**

PLT → Identité niche de cellules souches racinaires

REV → Identité niche de cellules souches caulinaires (shoot stem cell niche)



Comment démontrer que REV est suffisant?



Expérience d'expression ectopique de *REV* dans le MAR

Smith et al. Nature 2010

Le facteur REV est suffisant pour spécifier l'identité MAC

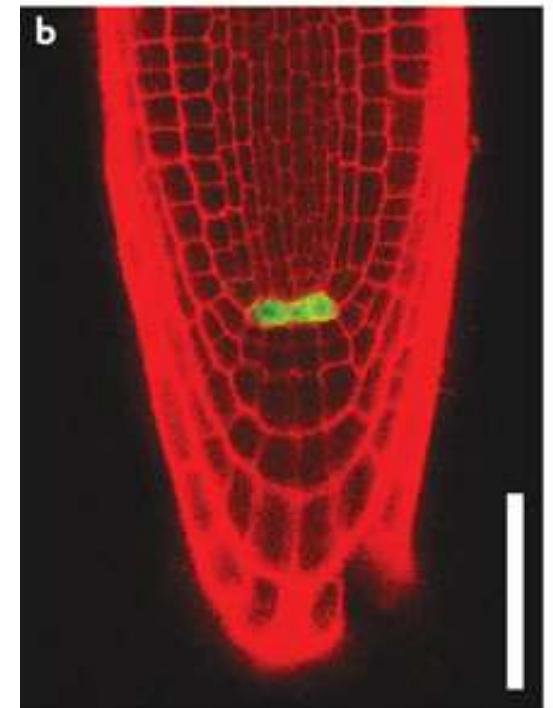
2-2 Le Centre Quiescent (CQ)

- Taille variable (4 cellules chez Arabidopsis ; 1000 chez le Maïs)
- Vitesse de division très lente (ex: 3 jours chez *A. thaliana*)

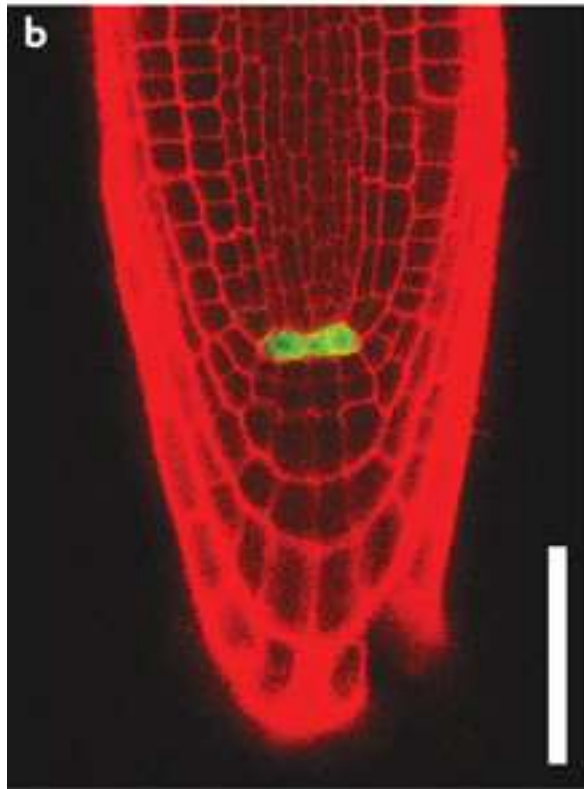
→ **Etat Quiescent** qui jouerait une rôle dans la long vit  des plantes

« *The low proliferation rate of QC cells might represent a mechanism to maintain an error-free genome because every round of replication harbors the possibility of replication errors, which in turn could alter the genomic integrity of the stem cells* »

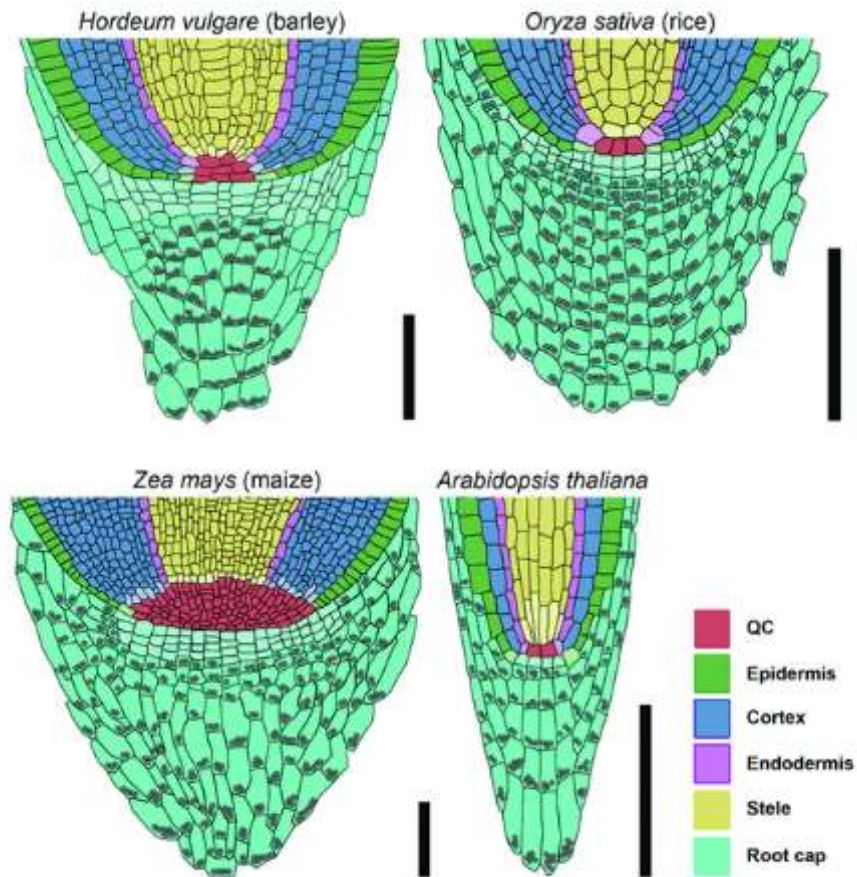
Heyman et al. Trends in Cell Biology, 2014



Le CQ est correspond à la zone d'expression du facteur de transcription *WOX5* (*WUSCHEL-RELATED HOMEODOMAIN 5*)



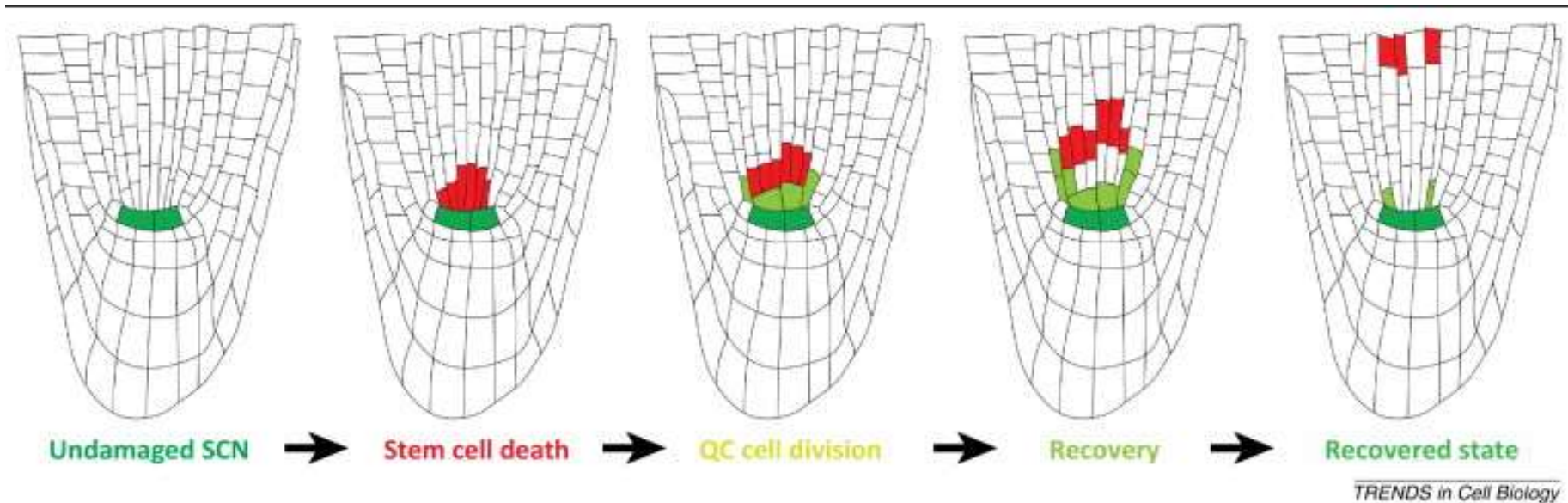
WOX5::GFP racine *A. thaliana*



Fonctions du Centre Quiescent (CQ)

→ Contrôle **le maintien et la taille de la niche de cellules souches**

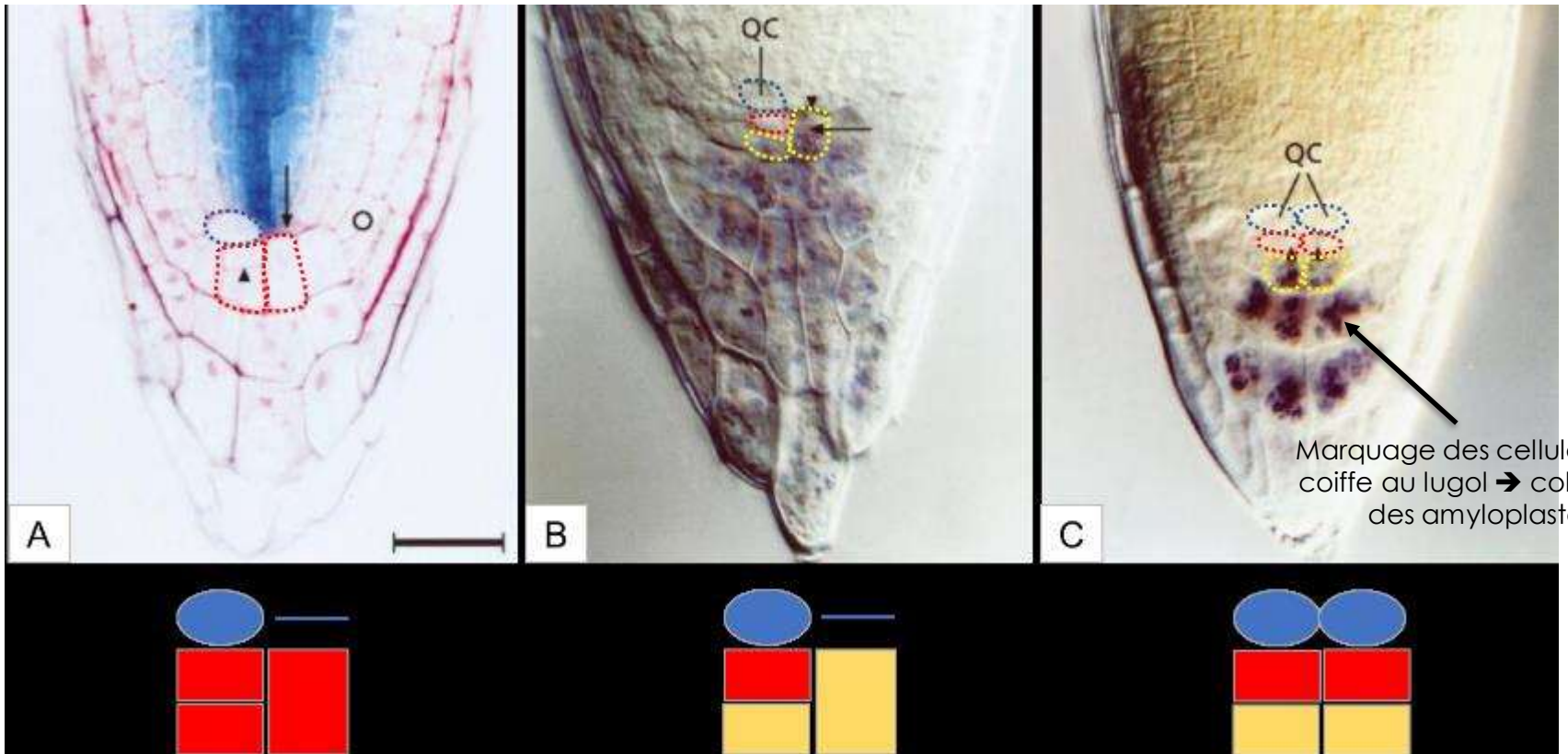
Si les cellules souches sont endommagées, les cellules du CQ entrent en division et produisent de nouvelles initiales





Expérience d'ablation cellulaire

Ablation d'une des 2 cellules du centre quiescent

Témoin



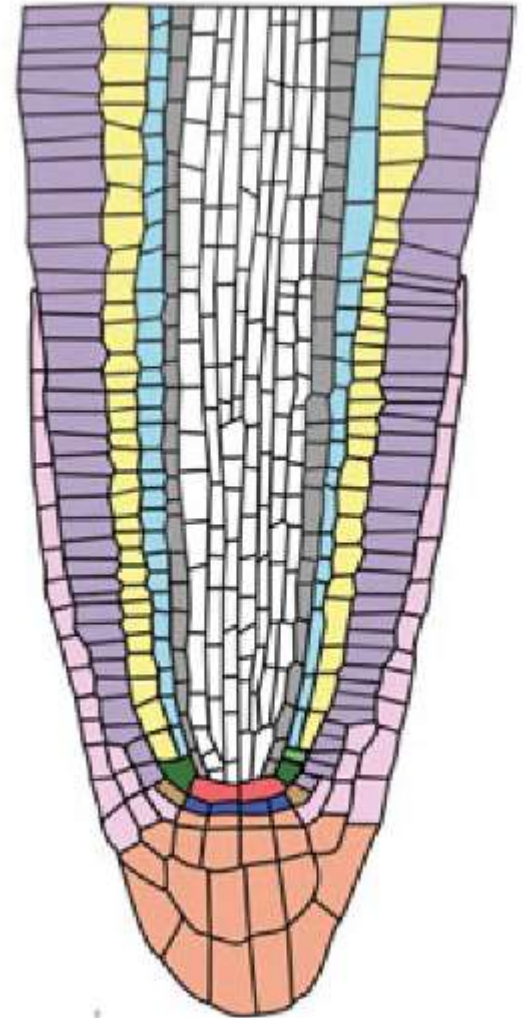
 Cellule du centre quiescent

 Cellule initiale de la coiffe

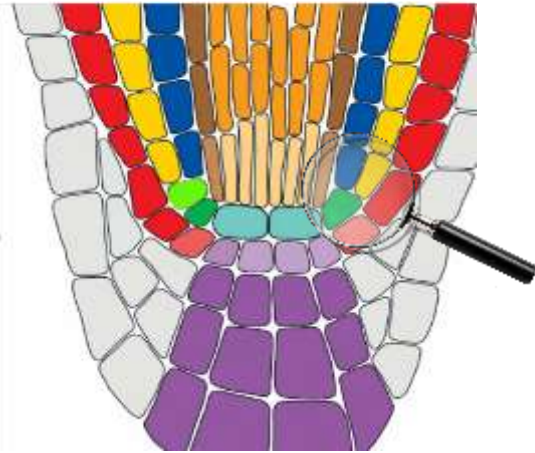
 Cellule différenciée de la coiffe

2-3 Développement racinaire post-embryonnaire:

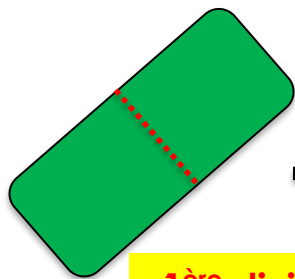
- Equilibre entre maintien du MAR et la construction des tissus racinaires
- Le MAR est uniquement **histogène** (ne produit que les tissus de la racine sur lequel il se trouve)



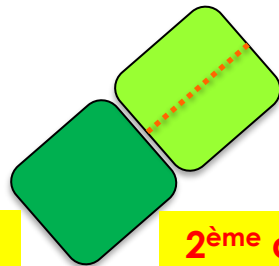
Différenciation de l'endoderme et du cortex



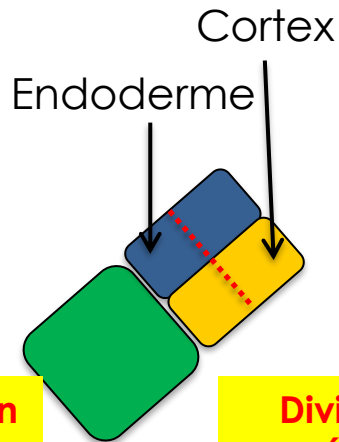
Cellule initiale du cortex/endoderme



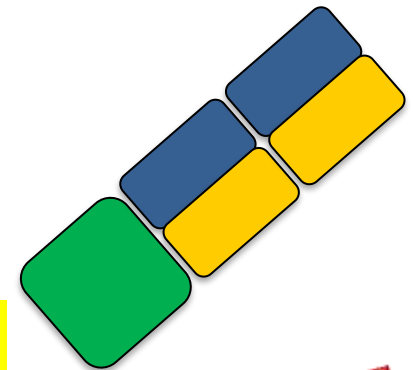
1^{ère} division
asymétrique
anticline



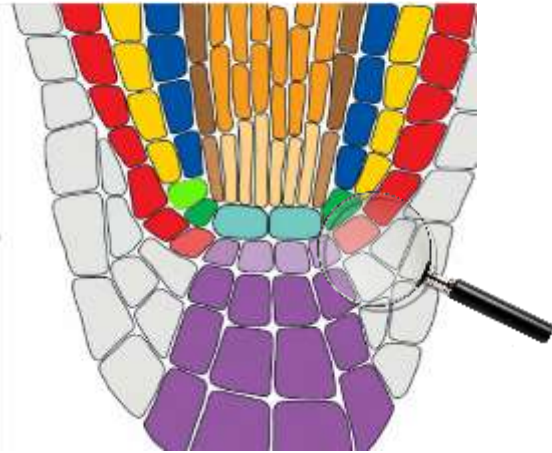
2^{ème} division
asymétrique
péricline



Divisions
symétriques
anticline



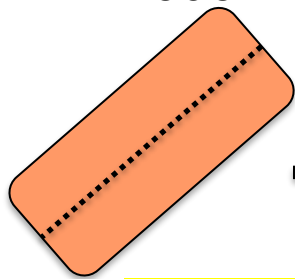
Différenciation de la coiffe latérale et du rhizoderme



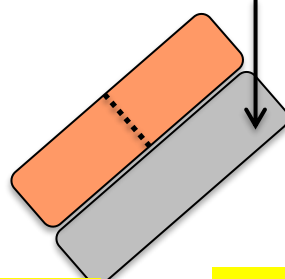
Cellule initiale de la
coiffe latérale du
rhizoderme

Cellule de la coiffe
latérale

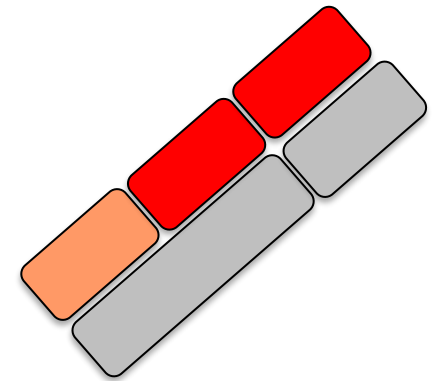
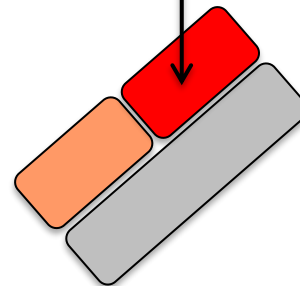
Cellule du
rhizoderme



**1^{ère} division
asymétrique
péricline**

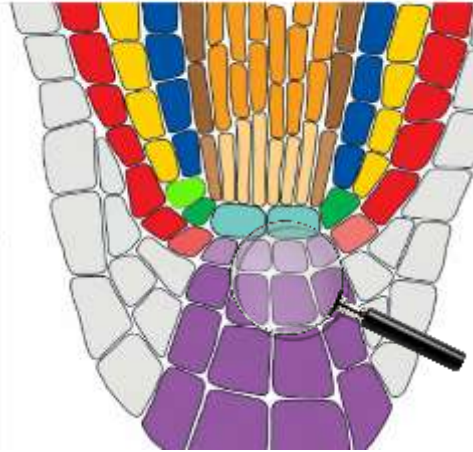


**2^{ème} division
asymétrique
anticline**

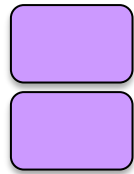
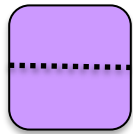


**Divisions
symétriques
anticline**

■ Différenciation de la coiffe apicale (columelle)



Cellule initiale de la
coiffe apicale



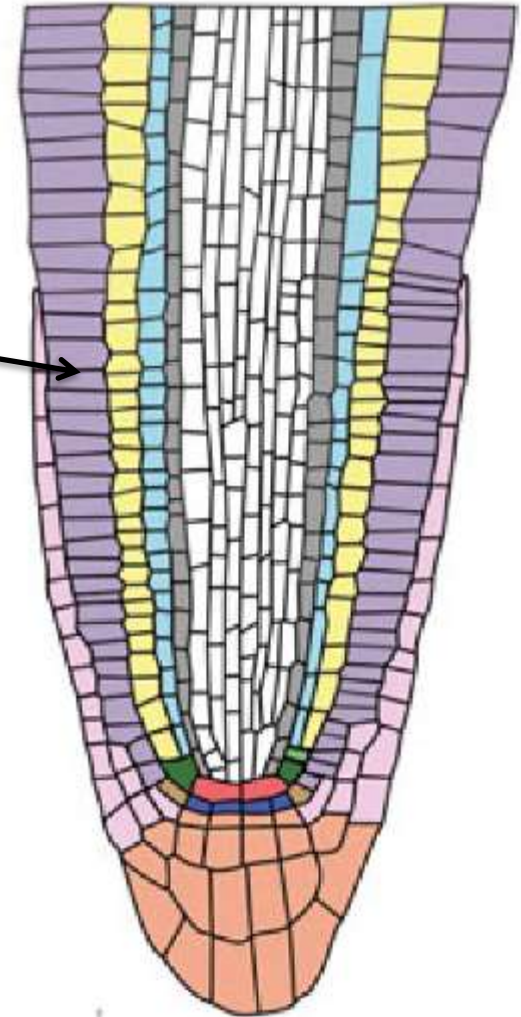
**1^{ère} division
symétrique
anticline**

**Différenciation
par effet de
position**

Cellule de la coiffe
apicale

En dehors de la niche de cellules souches,
la majorité des divisions sont symétriques

= Divisions **Prolifératives** qui ne permettent
pas de créer de nouveaux tissus ou organes



(Nomenclature génétique)

Types	Conventions	Exemples
Phénotype mutant	Minuscule italique entier	<i>superman</i>
Allèle muté	Minuscule italique en 3 lettres	<i>sup</i>
Nom du locus	Majuscule italique	<i>SUP</i>
Protéine cod�e par le gène	Majuscule droite	SUP

- **Famille multig nrique:** *SUP1, SUP2, SUP3*, etc....
- **Série allélique:** *sup1-1, sup1-2, sup1-3, sup2, sup3-1, sup3-2*, etc...
- **Double mutant:** *sup1 sup2*