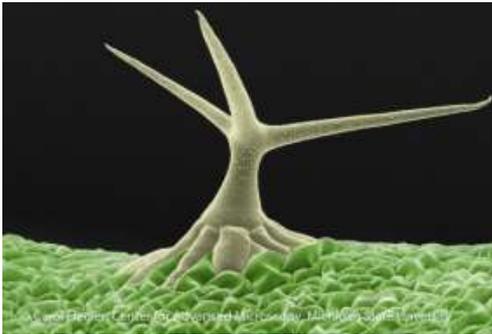


Licence 3 Biologie Santé – 2024/2025  
UE de Développement

# Biologie du Développement des Plantes



Marianne Delarue  
[marianne.delarue@universite-paris-saclay.fr](mailto: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

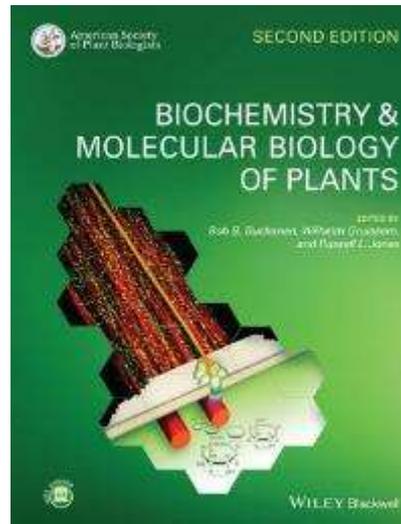
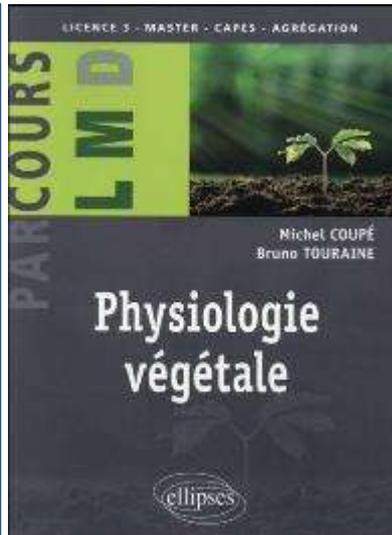
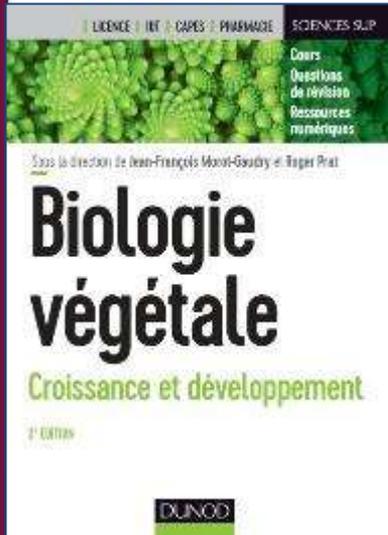
## **Thème II: Signalisation et Morphogenèse : La photomorphogenèse**

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



## FORMATION PAR LA RECHERCHE

### ➔ Ecole Universitaire de Recherche « Saclay Plant Sciences »



LabEx Sciences des Plantes de Saclay

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

### ➔ Master 1 International « Plant & Microbial molecular Biology »



International Master 1 "Microbial and Plant Systems Biology" (MPSB)

<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

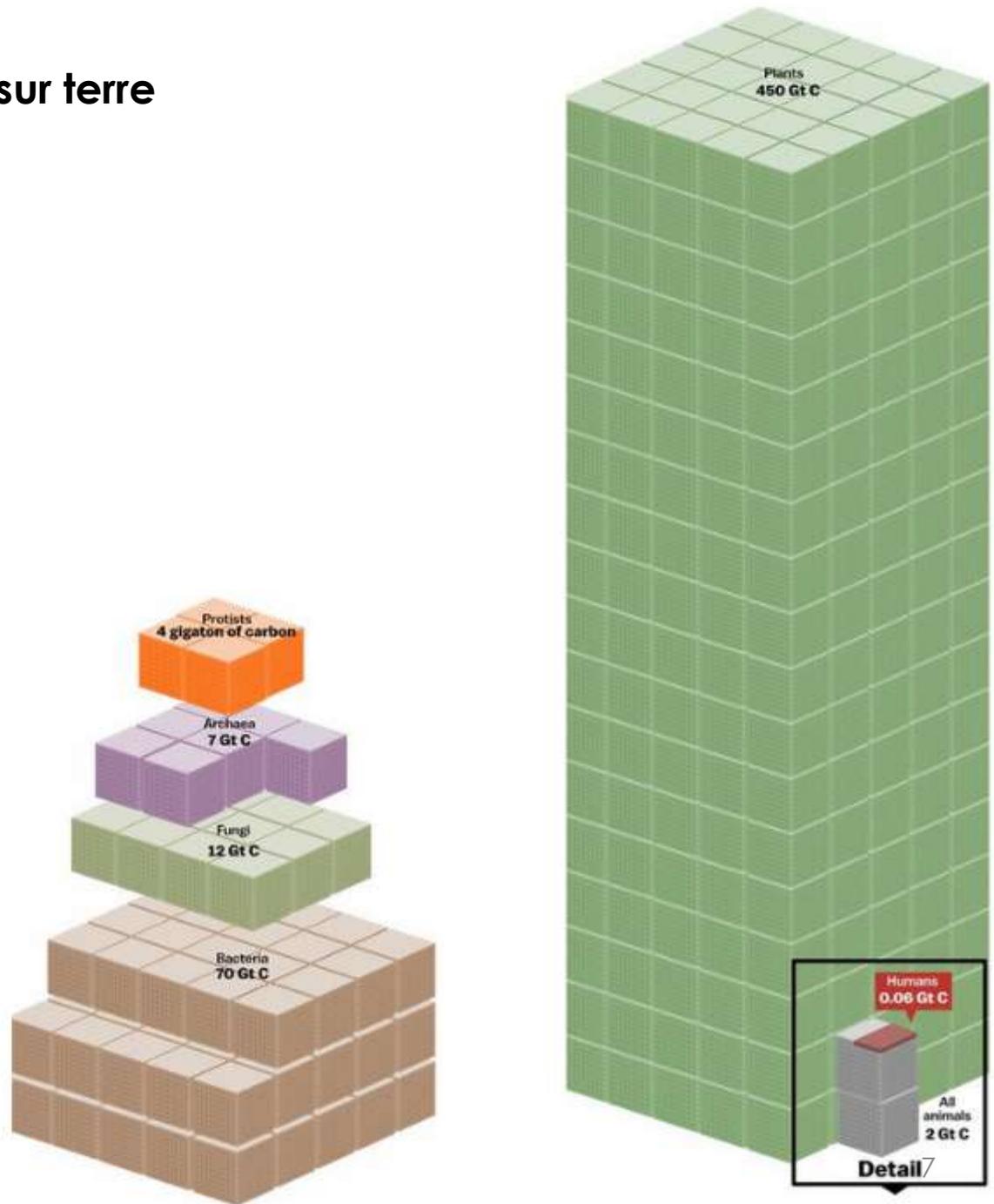
# Introduction

- ① Pourquoi étudier le développement des plantes?

*Sequoiadendron giganteum*  
Hauteur 75m  
Diamètre 8m  
Age 3200 ans



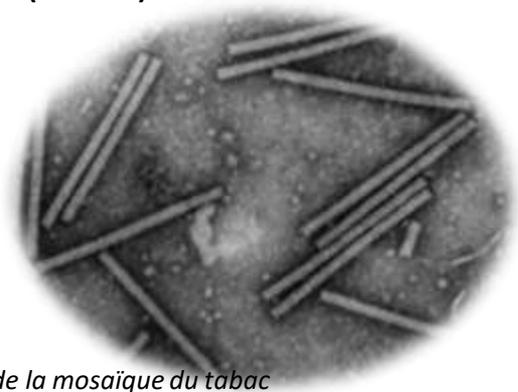
# Distribution de la Biomasse sur terre (en Gt de Carbone)



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)



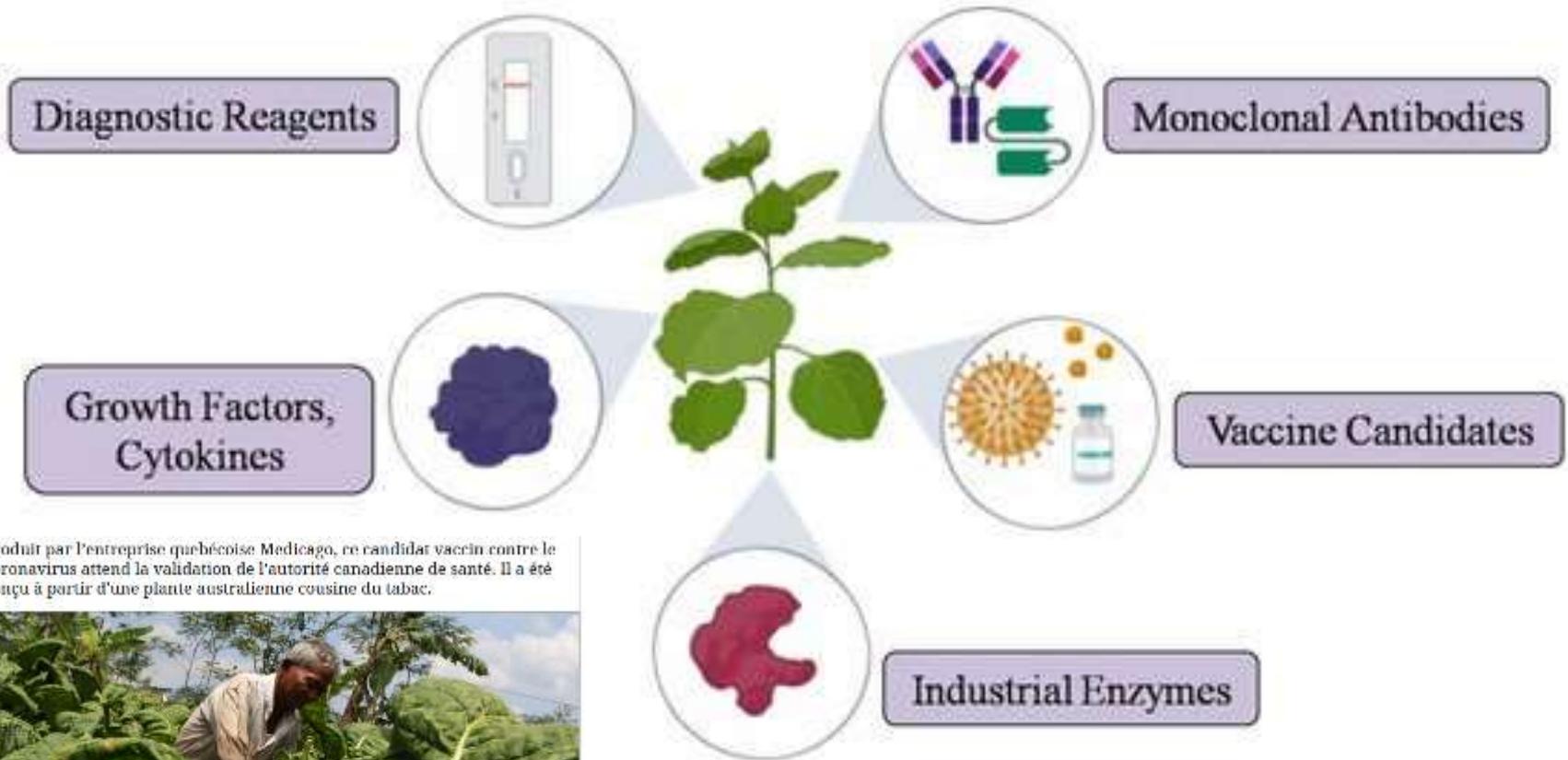
ARN interférence 2004

Transposons chez le Maïs  
(Prix Nobel 1984)



B. Mc Clintock

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

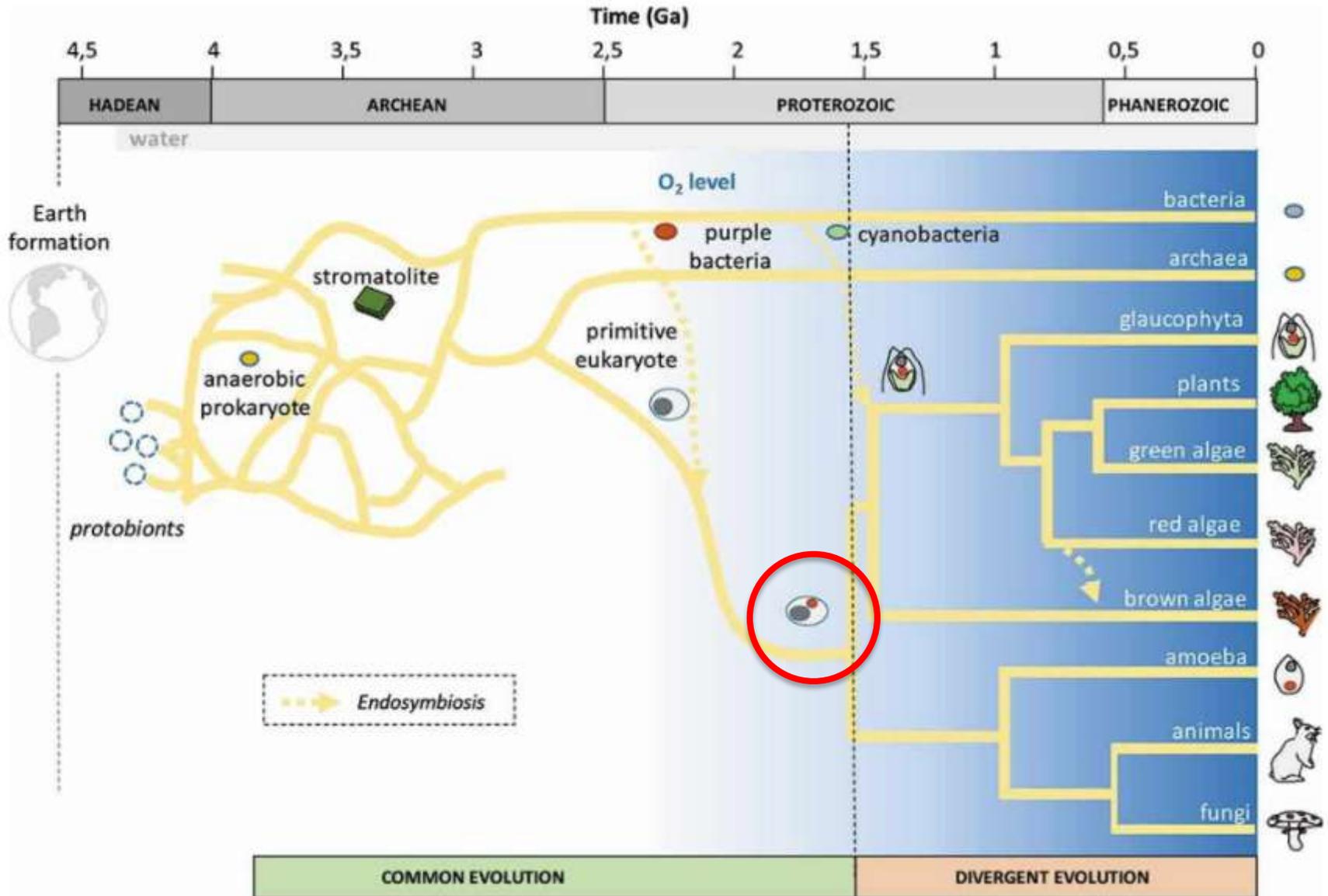


Produit par l'entreprise québécoise Medicago, ce candidat vaccin contre le coronavirus attend la validation de l'autorité canadienne de santé. Il a été conçu à partir d'une plante australienne cousine du tabac.



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



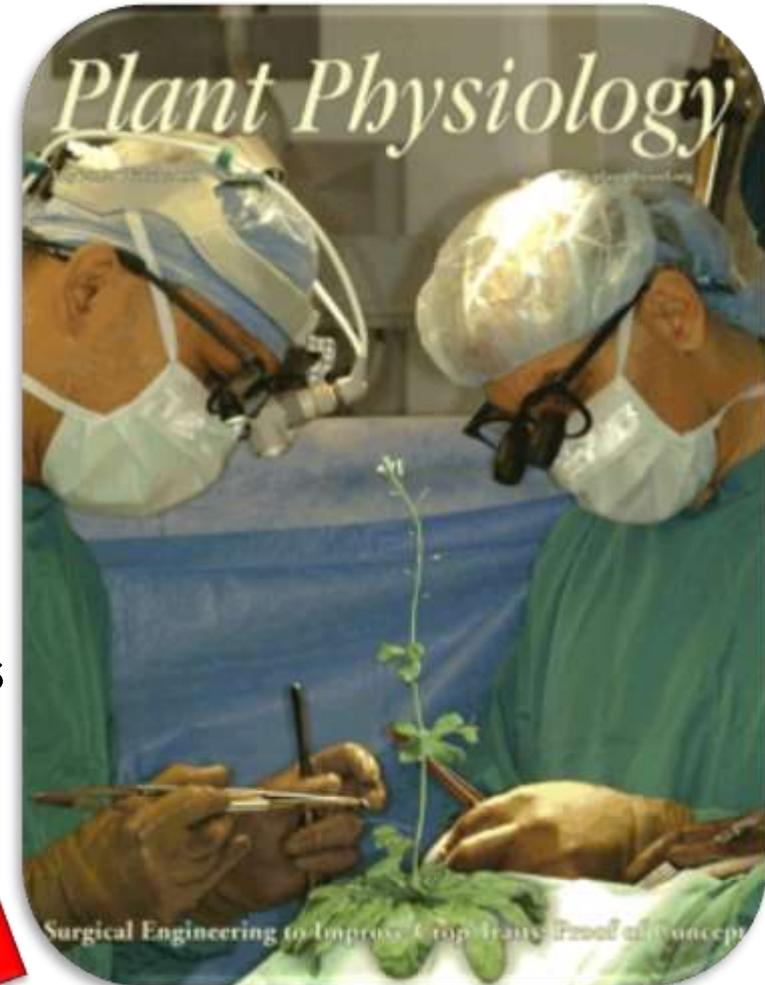
# Des questions et des outils communs

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

TD1

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

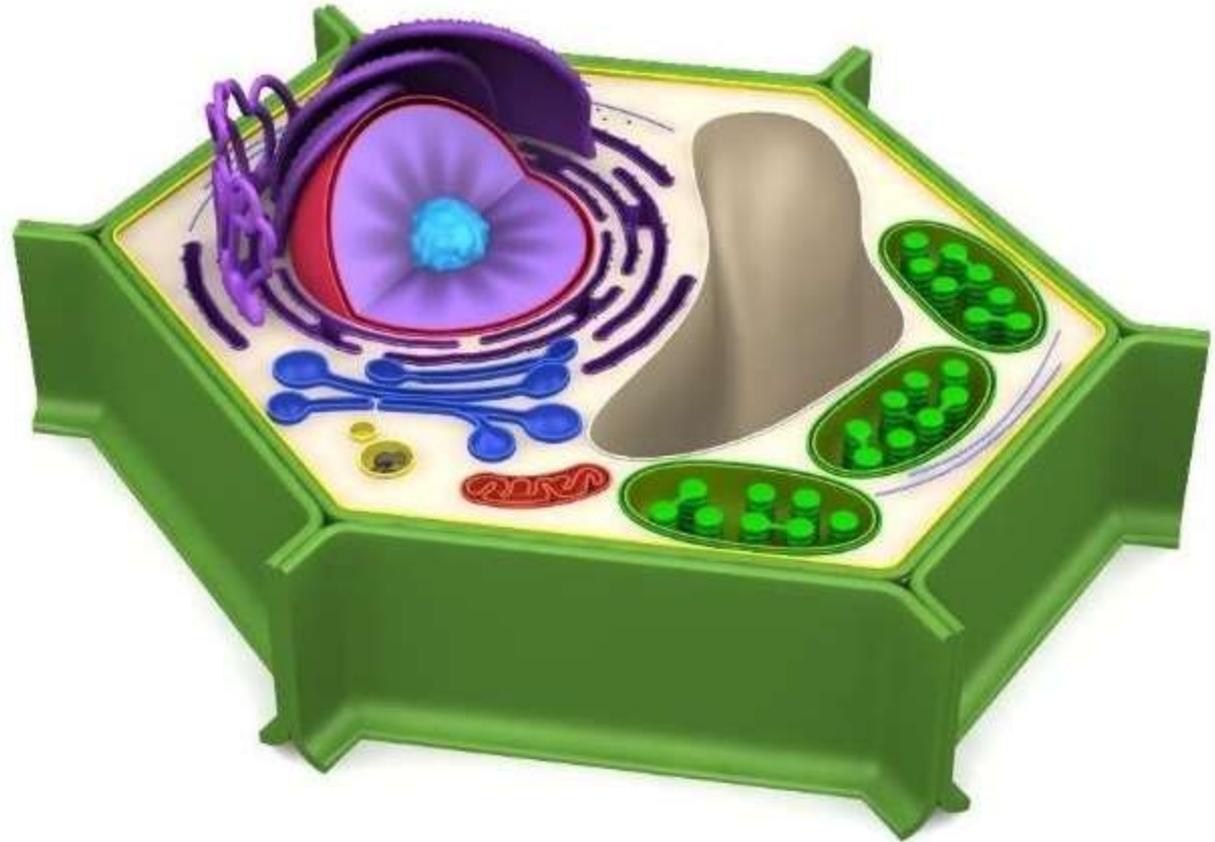
Pre-réquis



*Arabidopsis thaliana*

# Introduction

## ② Particularités du règne végétal



# Introduction

## ② Particularités du règne végétal

→ Organismes fixés adaptés à leur environnement :

→ Autotrophie

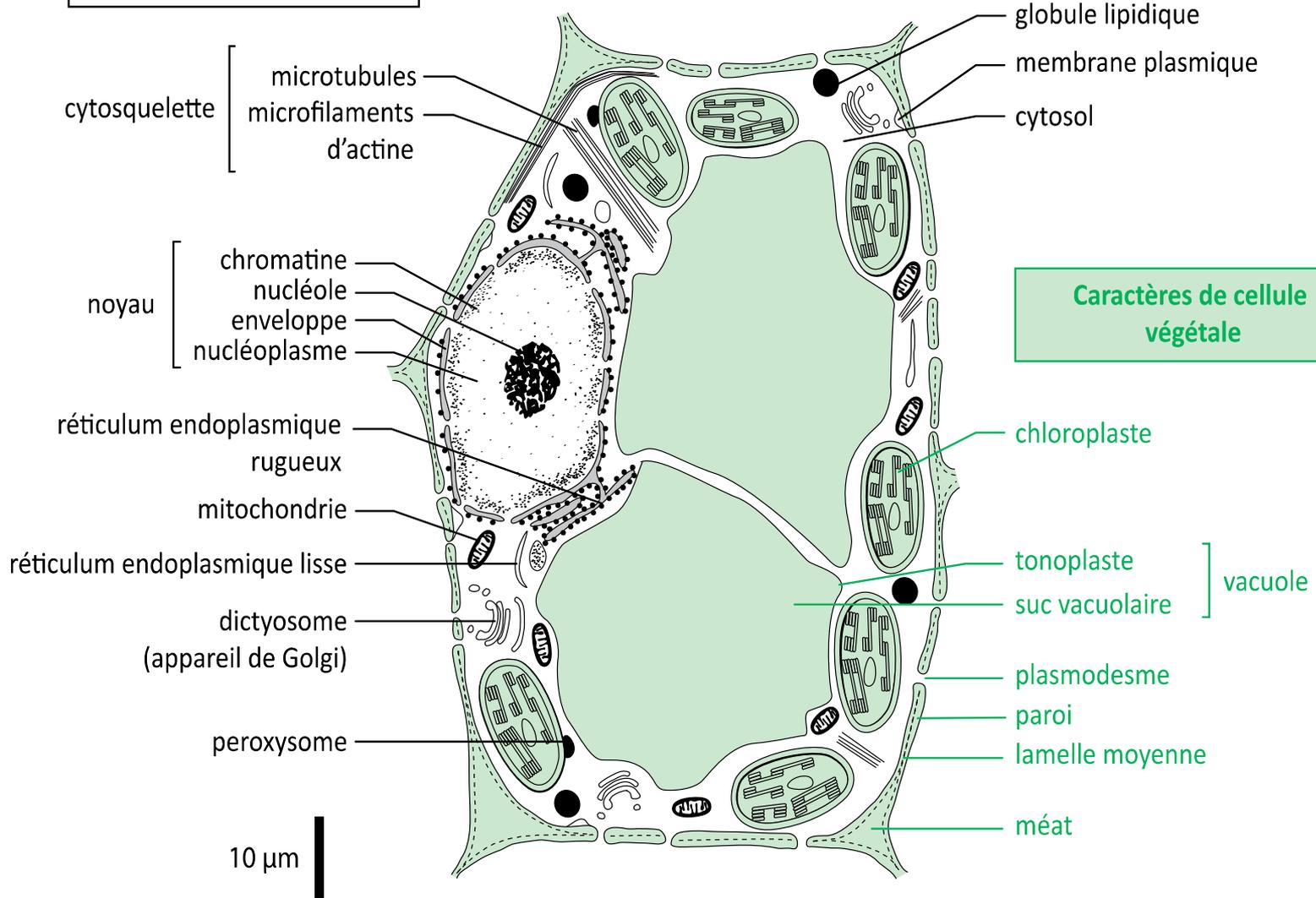
→ Développement **post-embryonnaire** continu



*[Pinus longaeva](#)*

> 5000 ans

Caractères de cellule  
eucaryote



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

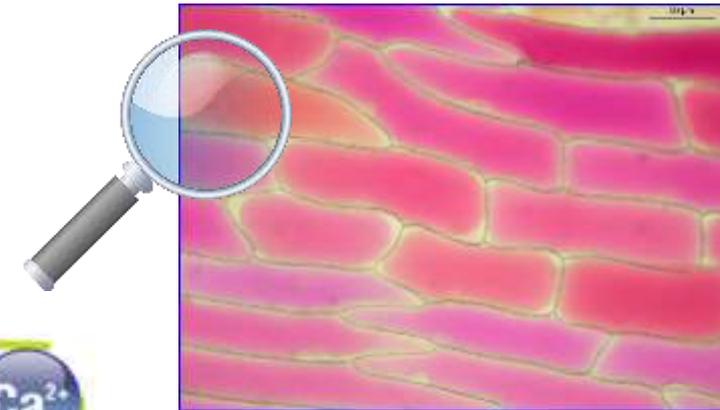
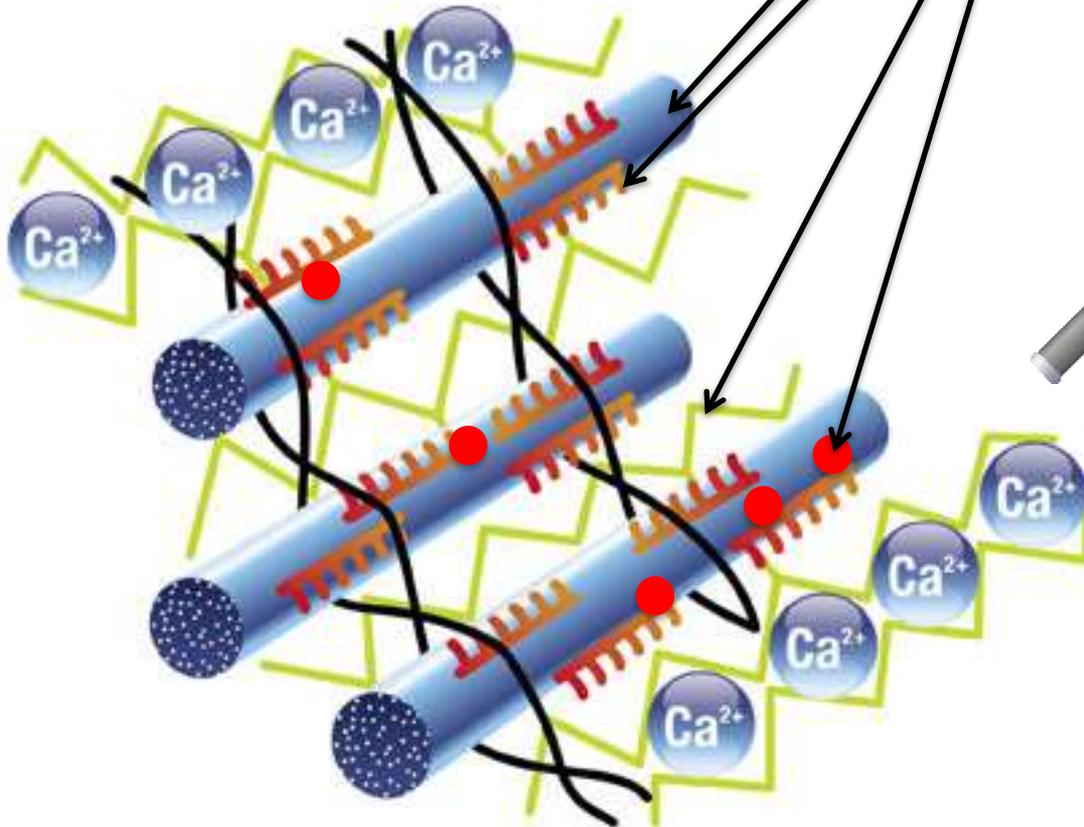
## Importance de la paroi des cellules végétales

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)

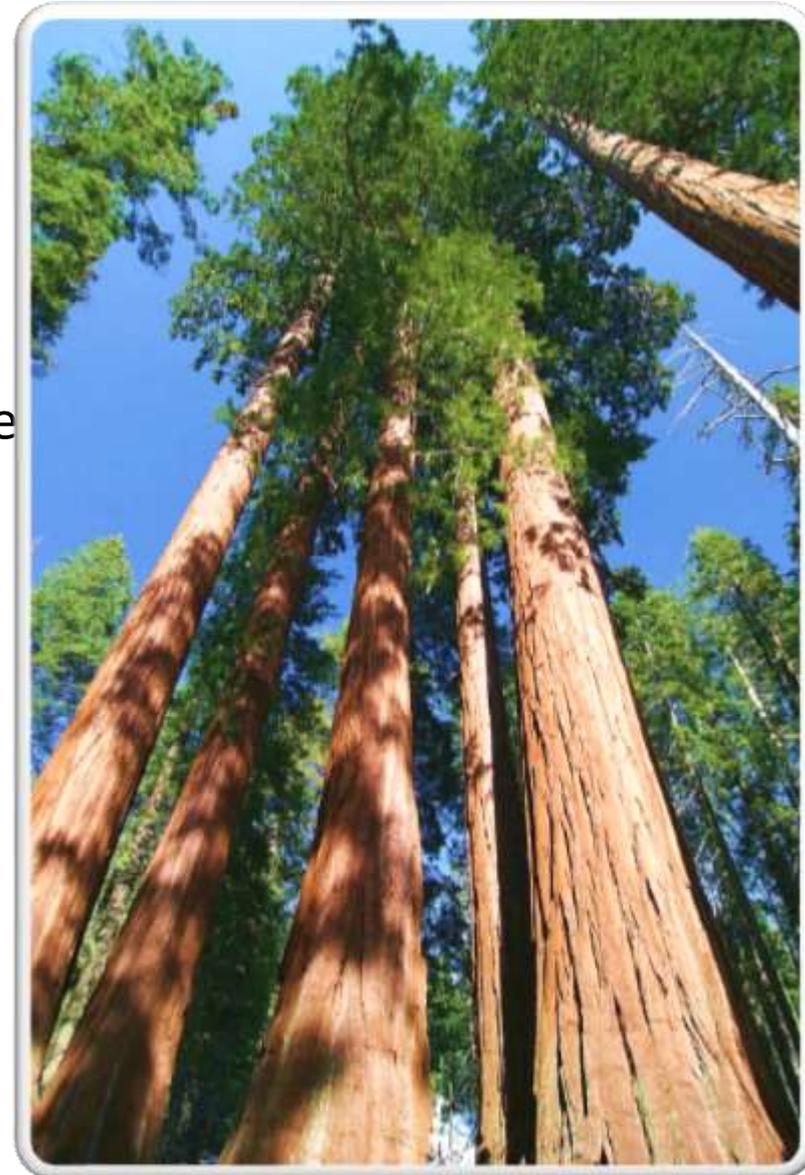


Cellules d'épiderme oignon rouge

## 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:

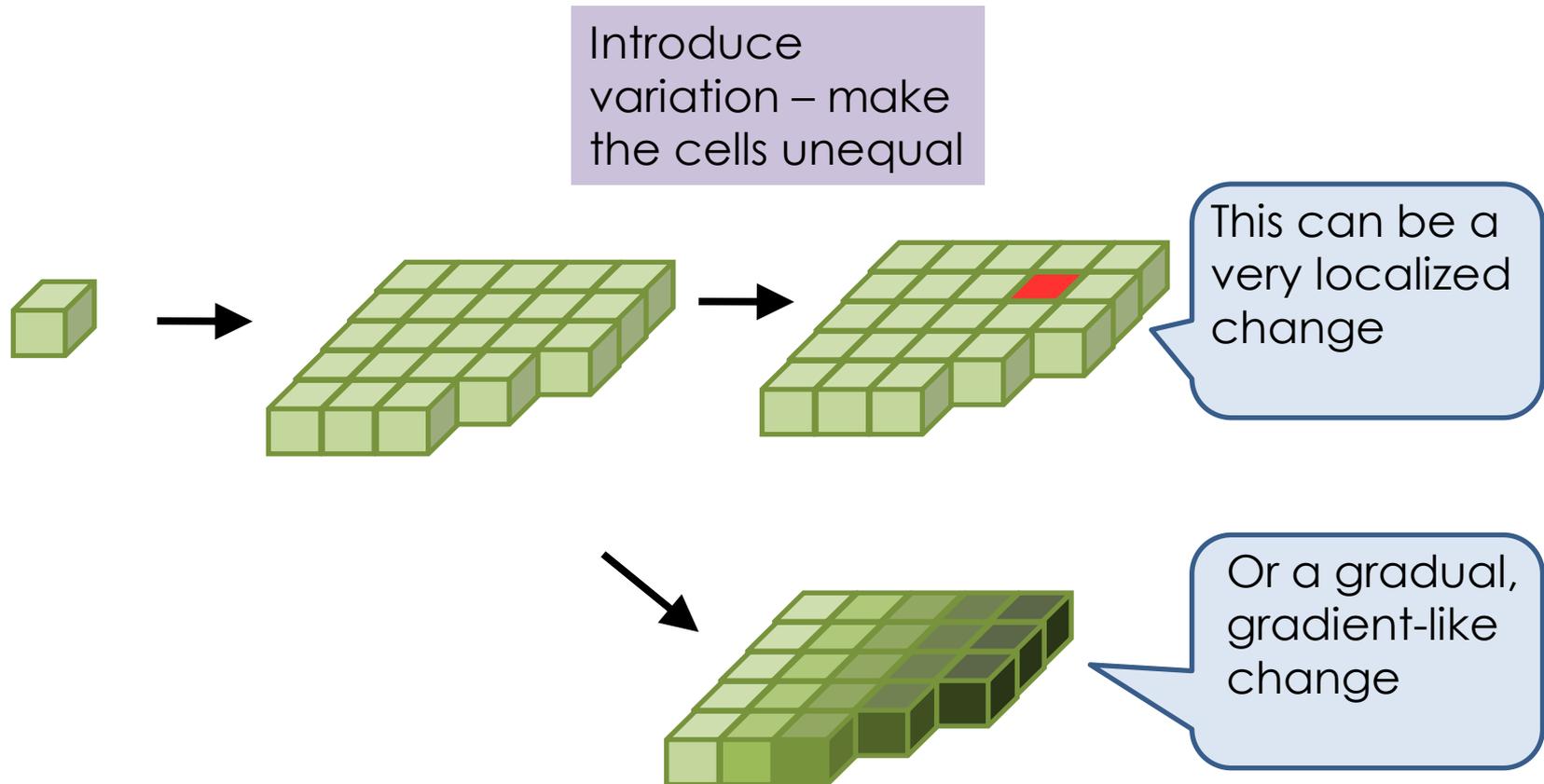
50% de la Biomasse terrestre; 1<sup>ère</sup> source de Carbone renouvelable

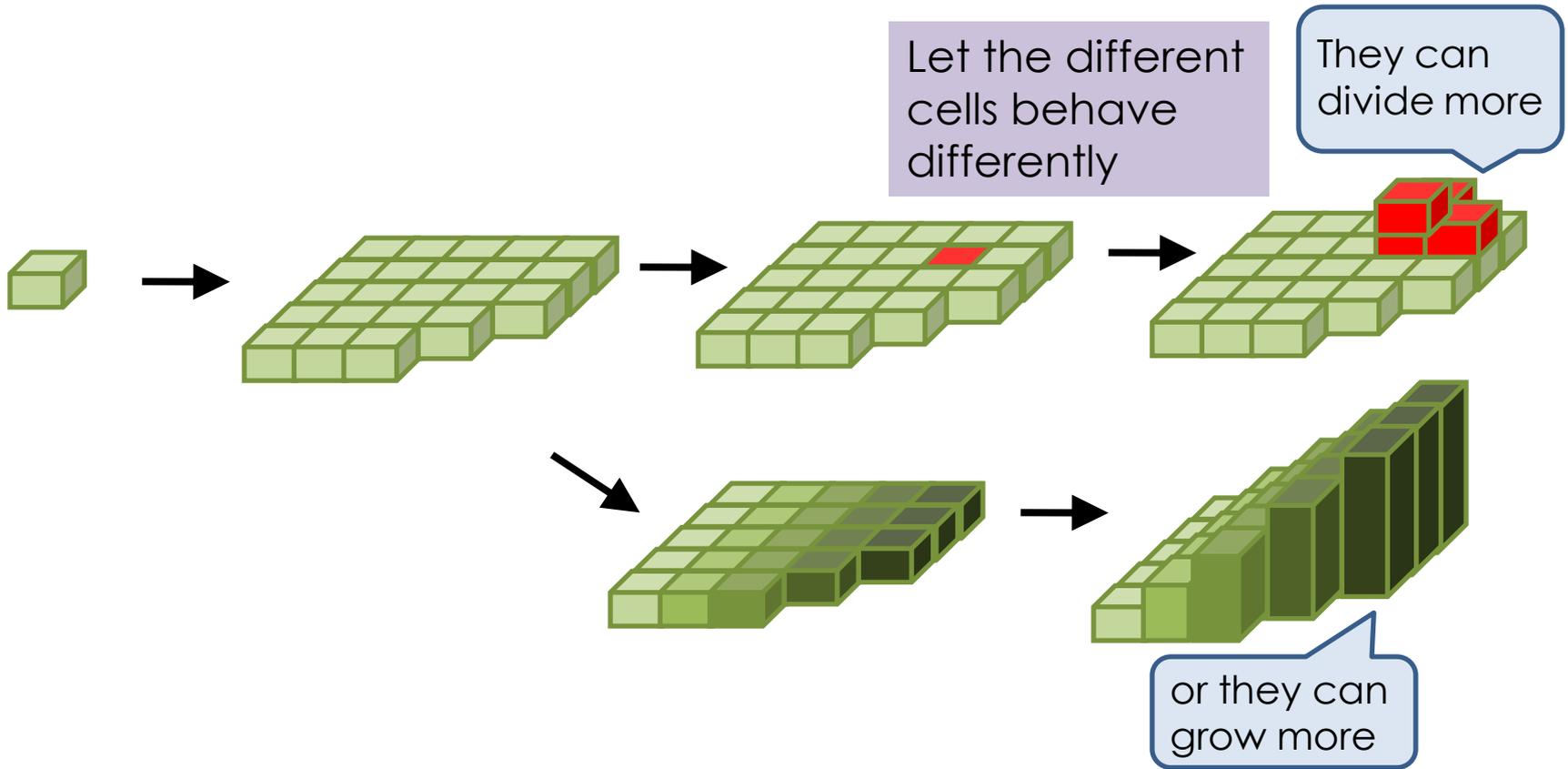


# Introduction

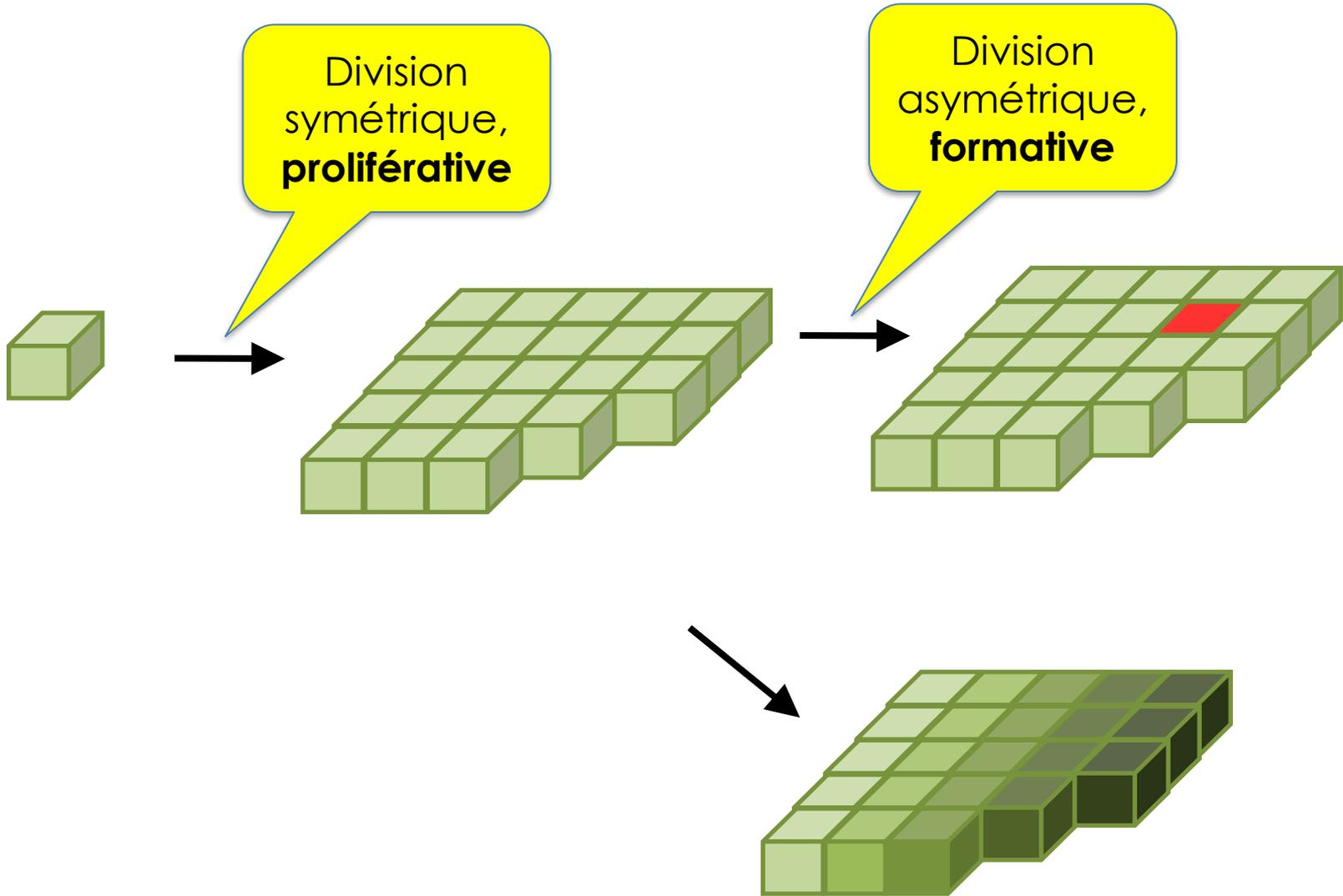
## ③ Différenciation et divisions asymétriques

Comment construire un organisme ?



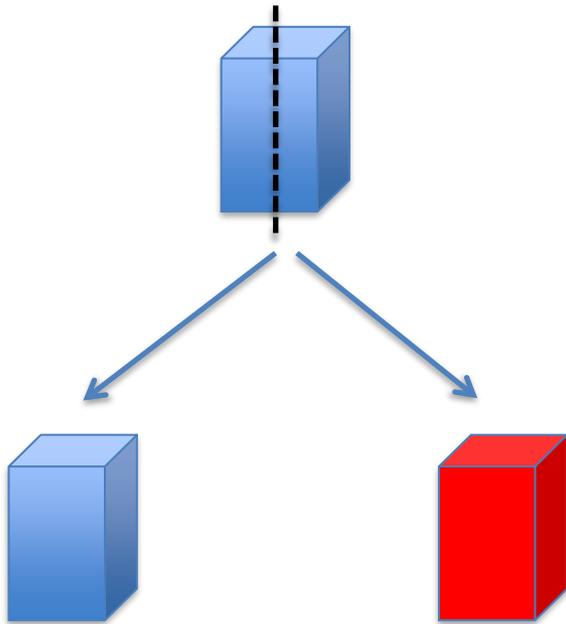


# Deux types de divisions cellulaires

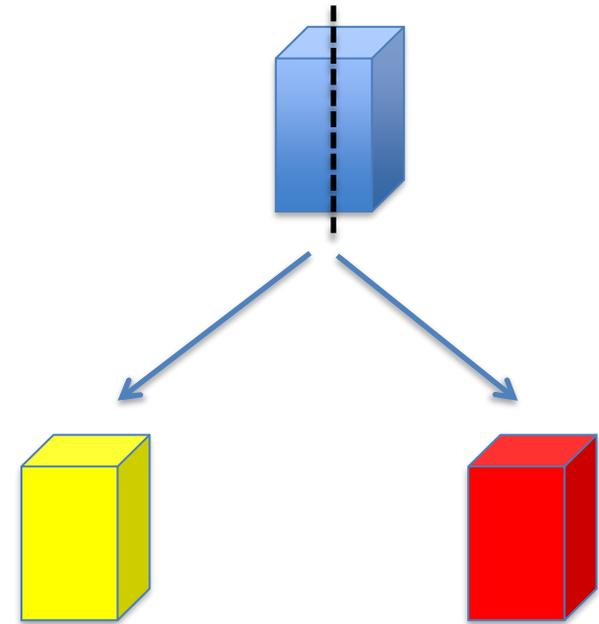


# Divisions asymétriques

2 cas:



Exemple: Divisions des  
cellules souches  
méristématiques

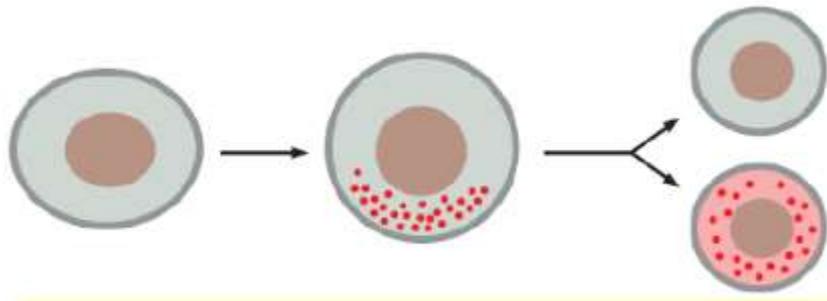


Exemple: 1<sup>ère</sup>  
division du zygote

# Mécanismes moléculaires et cellulaires de la rupture de symétrie

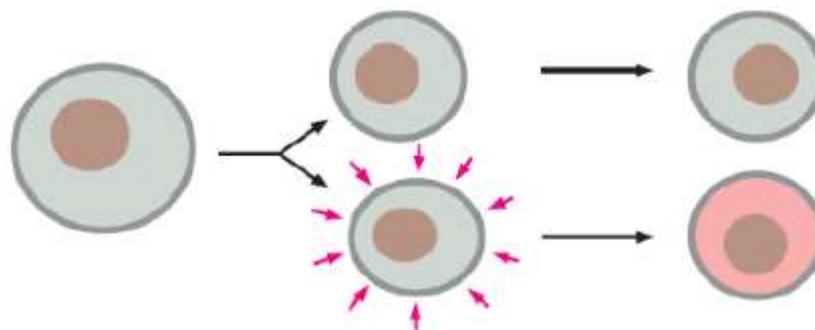
## → Lignage cellulaire

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

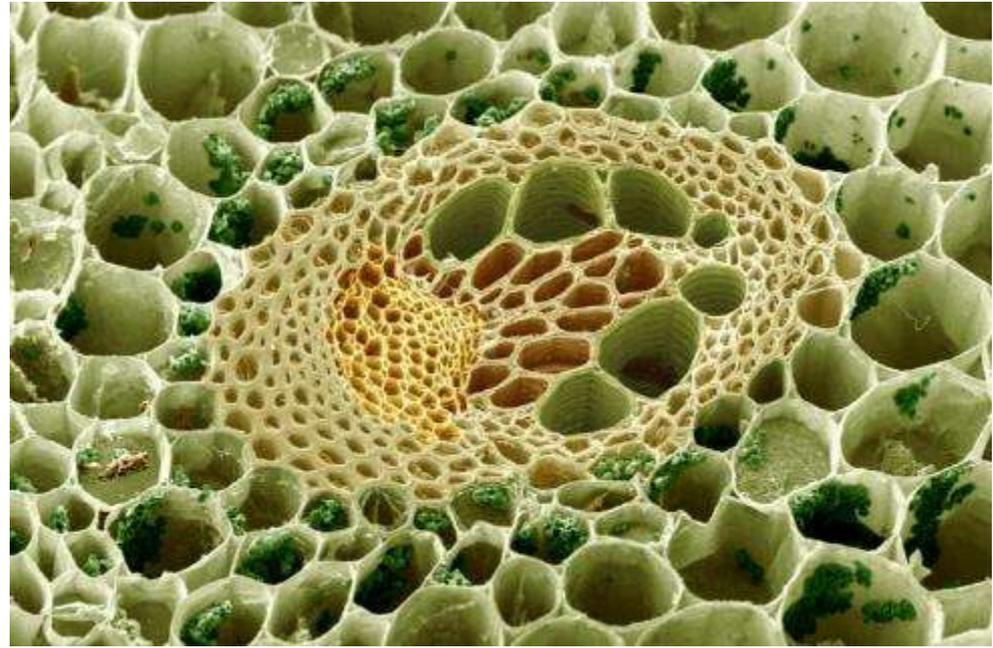


## → Effet de position

- 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!**

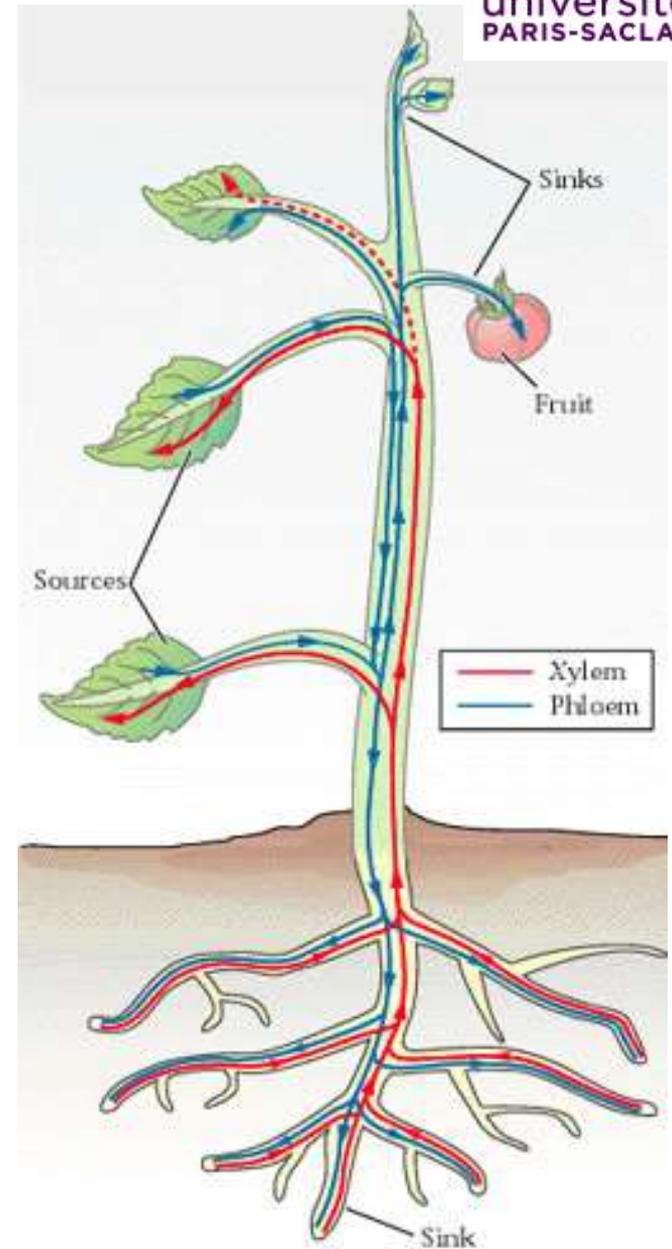


*Tissu vasculaire (Power and Syred/Science Photo Library/Getty Images )*

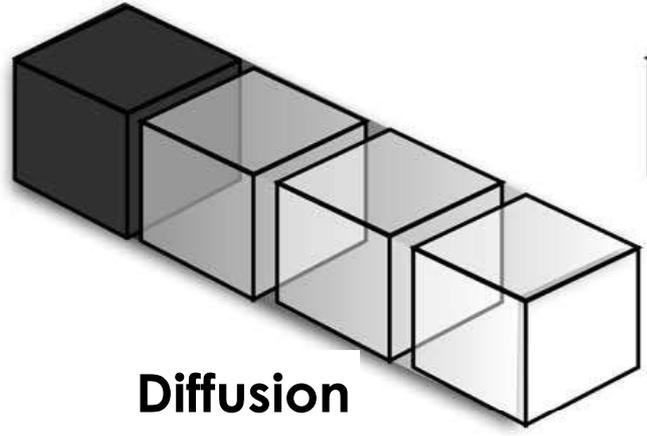
La construction en 3D d'un organe est donc établie par le contrôle très précis de **l'orientation des mitoses** et **les effets de position** qui gouvernent **l'identité des cellules filles**

# Introduction

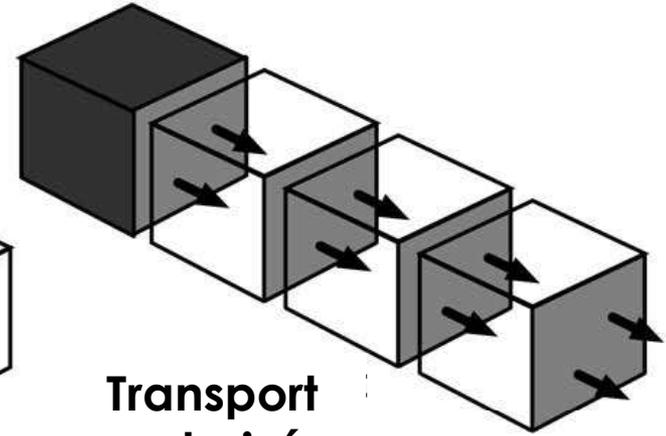
## ④ Les voies de communications



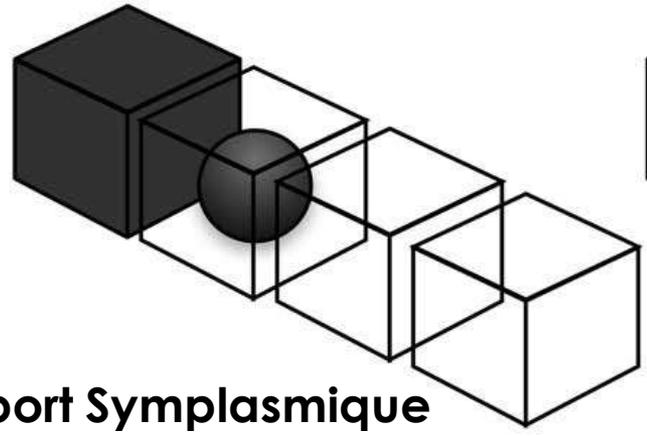
# 4 modalités de communication des signaux au niveau cellulaire



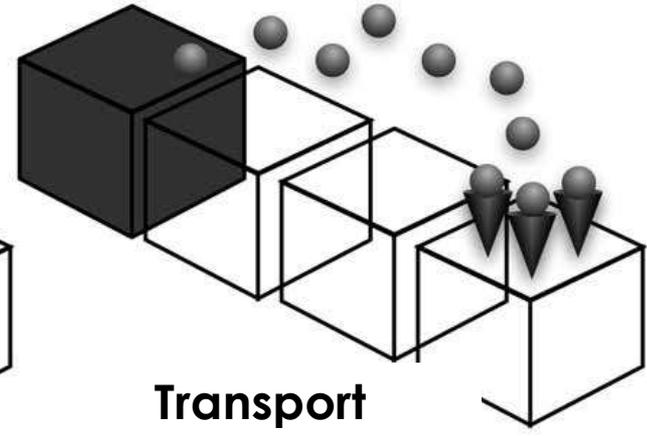
**Diffusion**



**Transport polarisé**



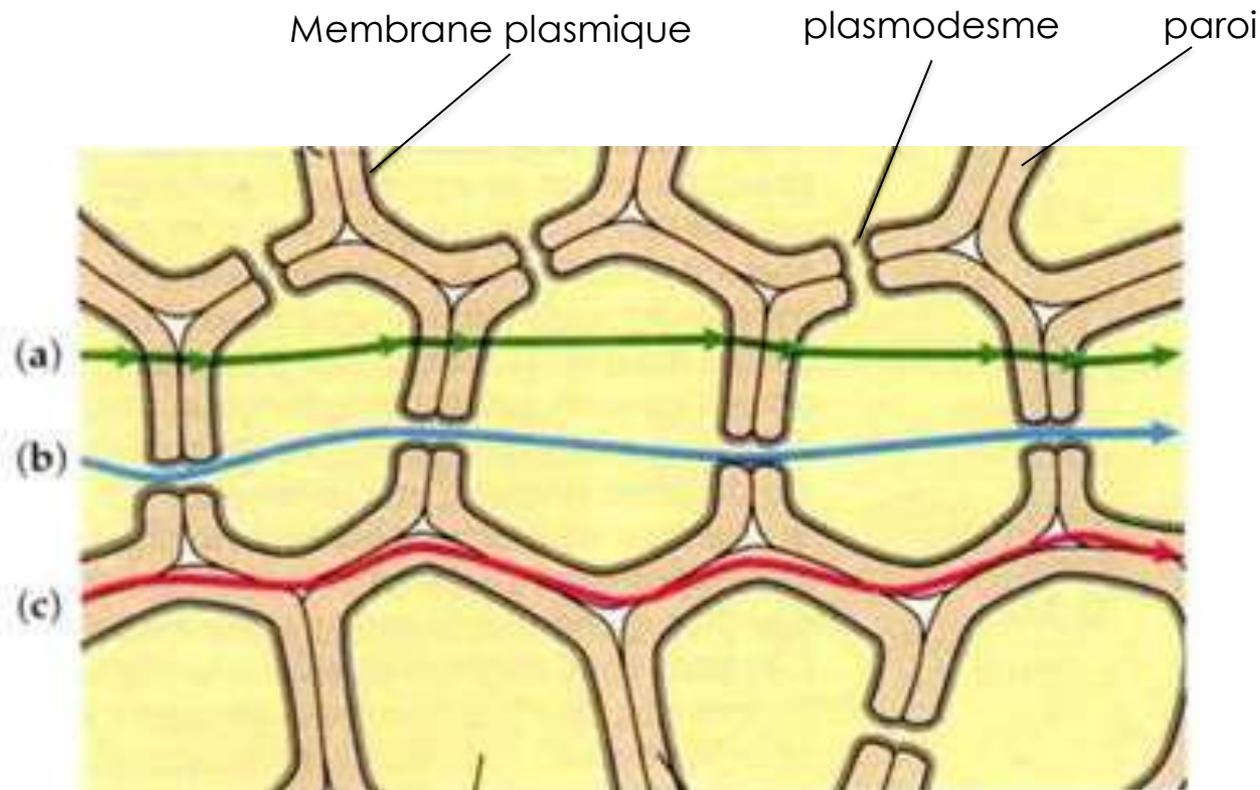
**Transport Symplasmique**



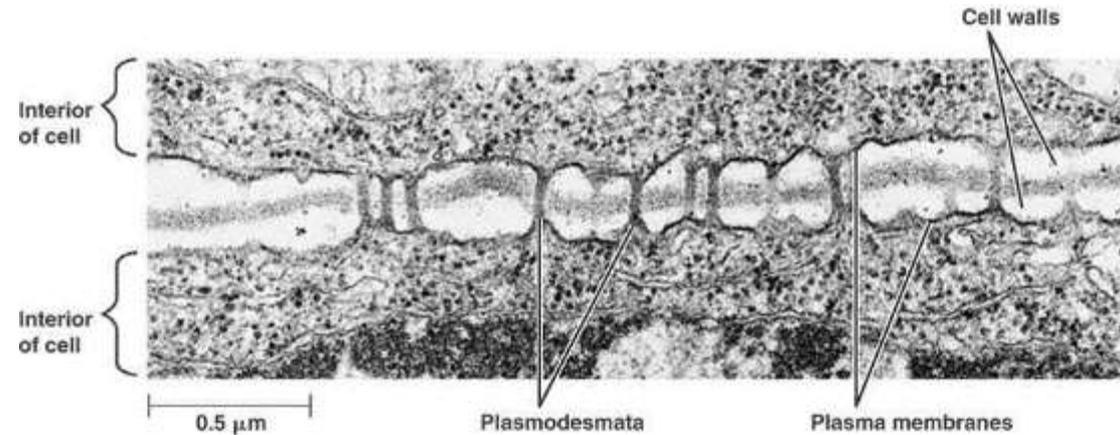
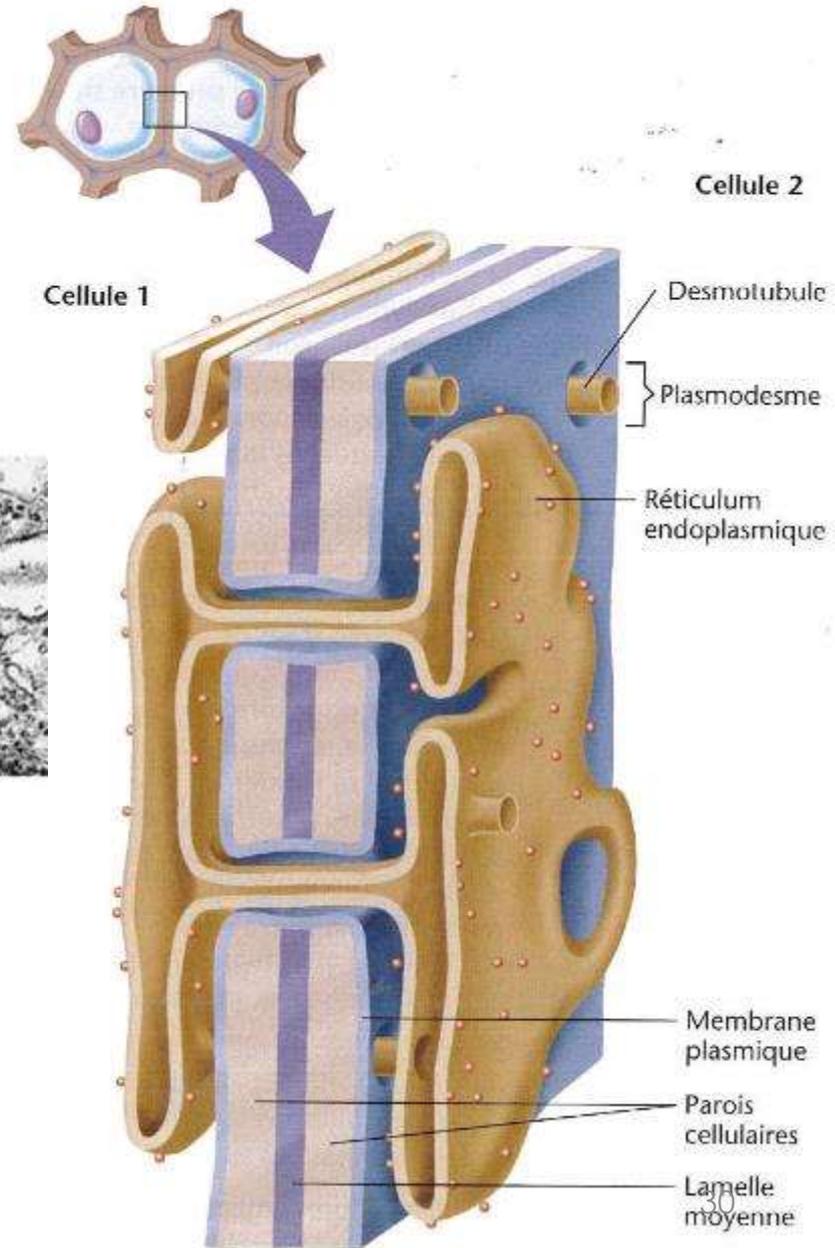
**Transport Apoplasmique**

## Différentes voies de communication cellules à cellules:

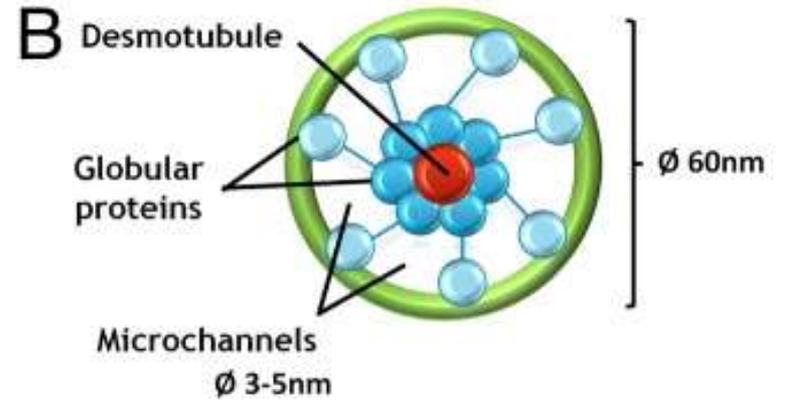
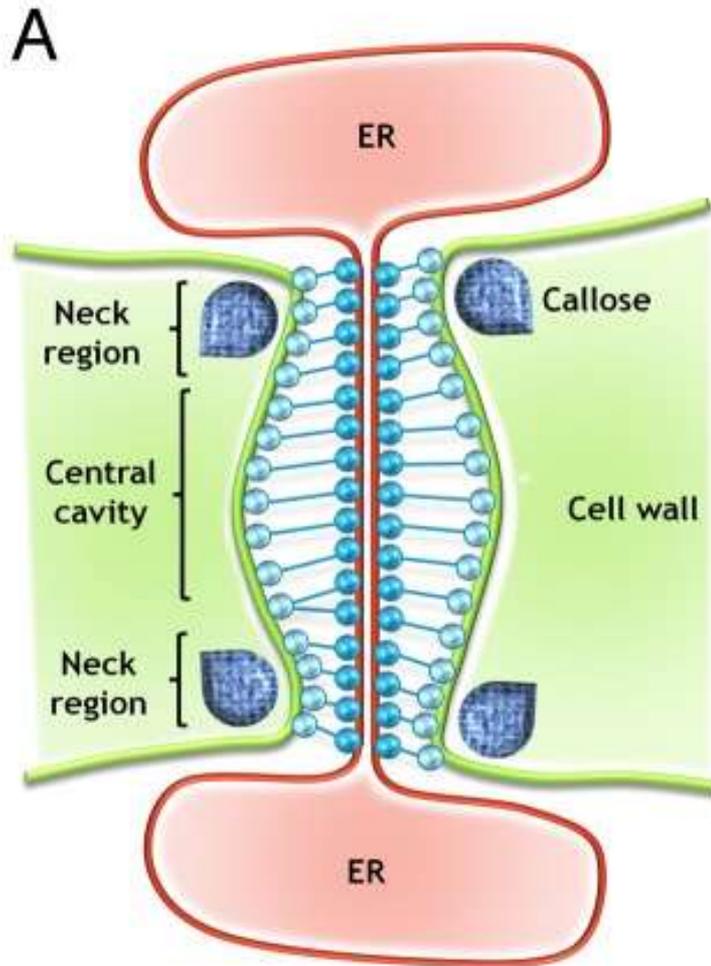
- **(a) Voie transcellulaire:** diffusion à travers les MP
- **(b) Voie Symplasmique:** à travers les plasmodesmes
- **(c) Voie Apoplasmique:** entre les cellules, au niveau des parois



# Les plasmodesmes: des canaux cytoplasmiques



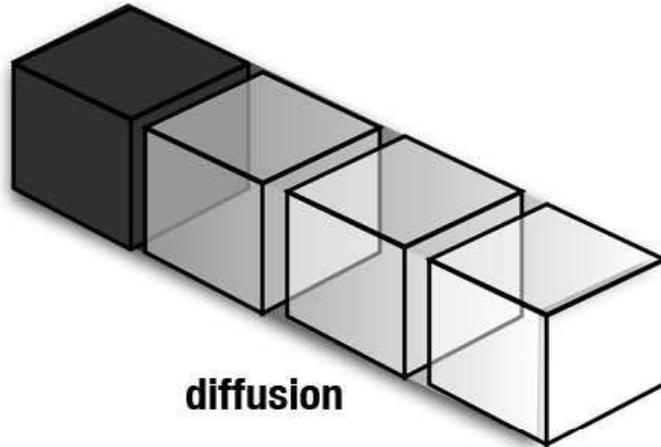
## Un canal actif et sélectif



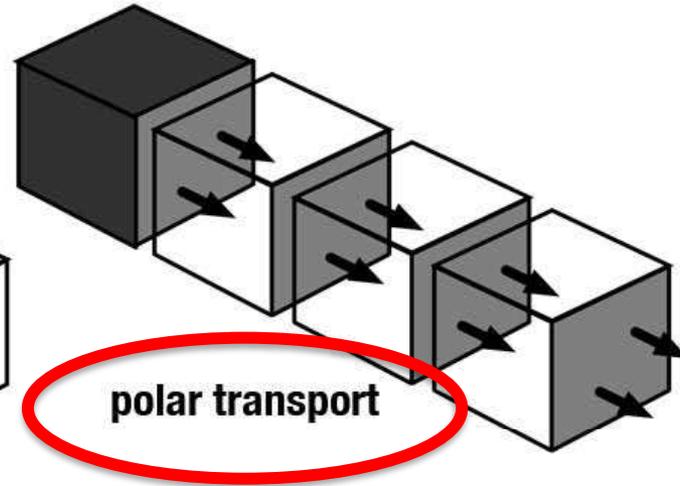
### Transit de molécules variées:

- 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)**

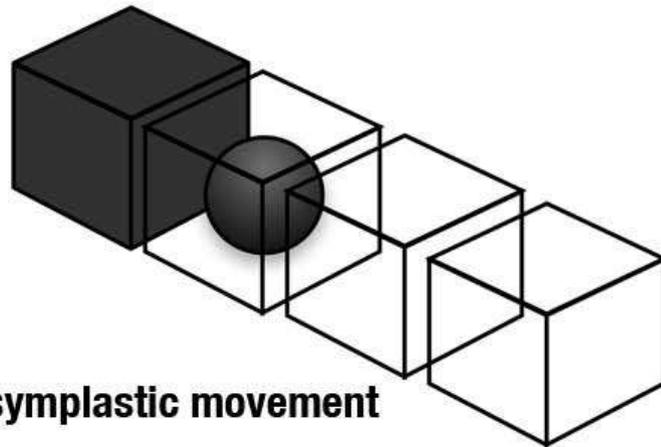
# Autres modalités de transport



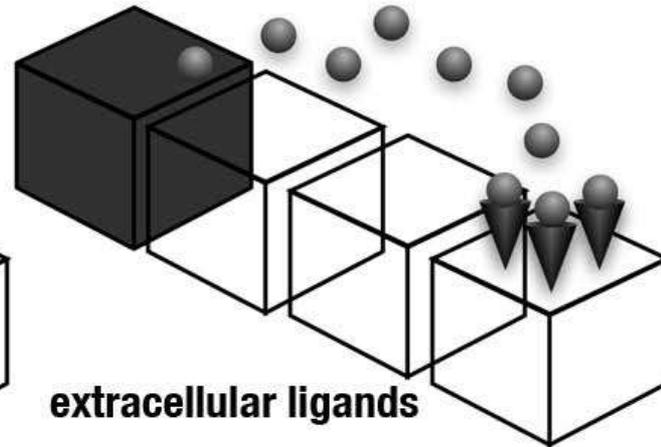
diffusion



polar transport



symplastic movement



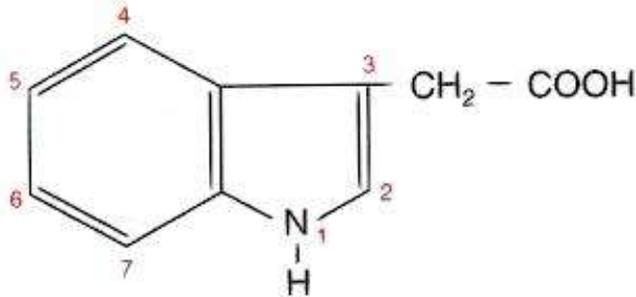
extracellular ligands

# Exemple du transport polarisé de l'auxine

## L'auxine:

Acide Indole 3 Acétique (AIA)

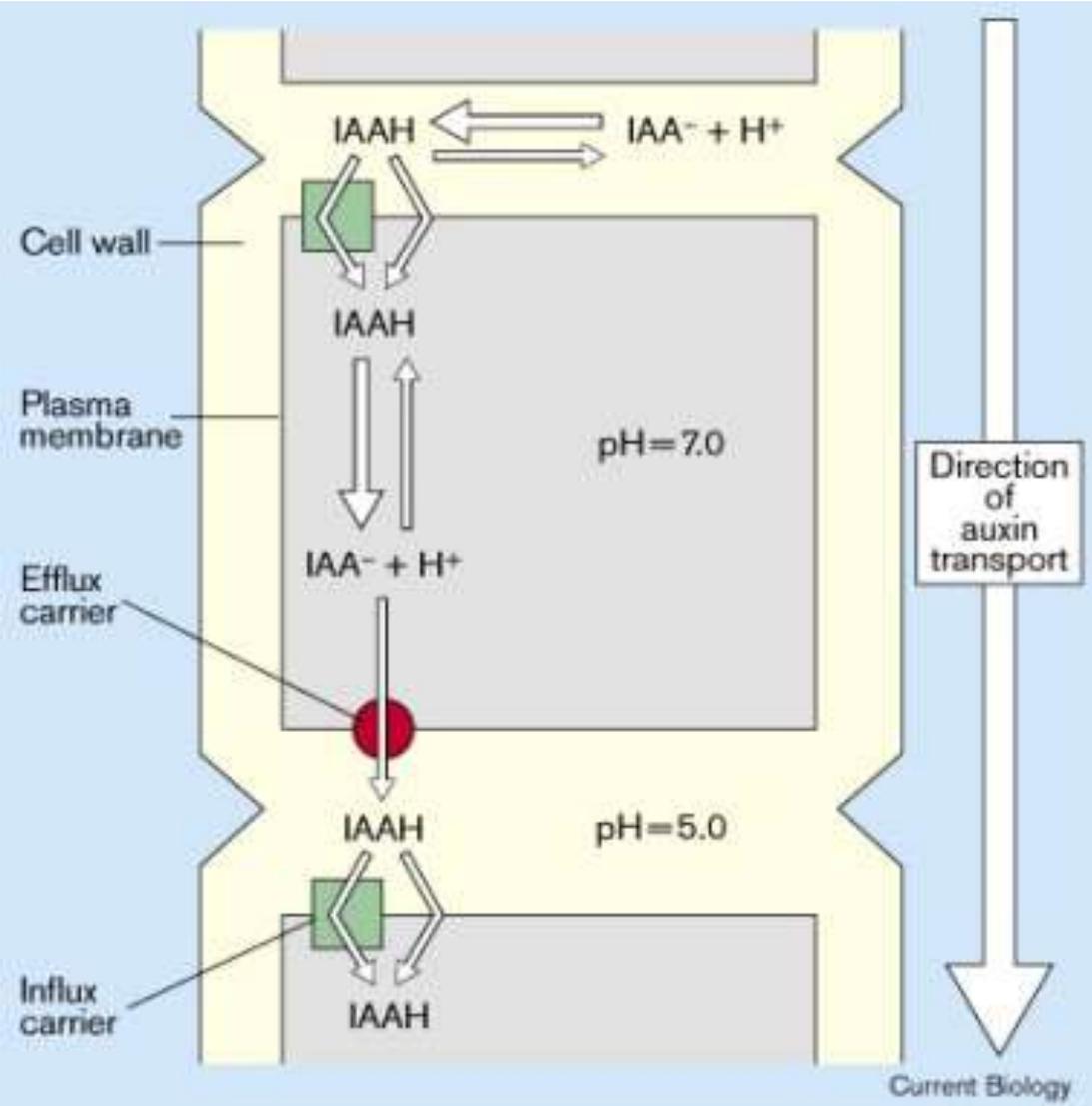
Pre-réquis



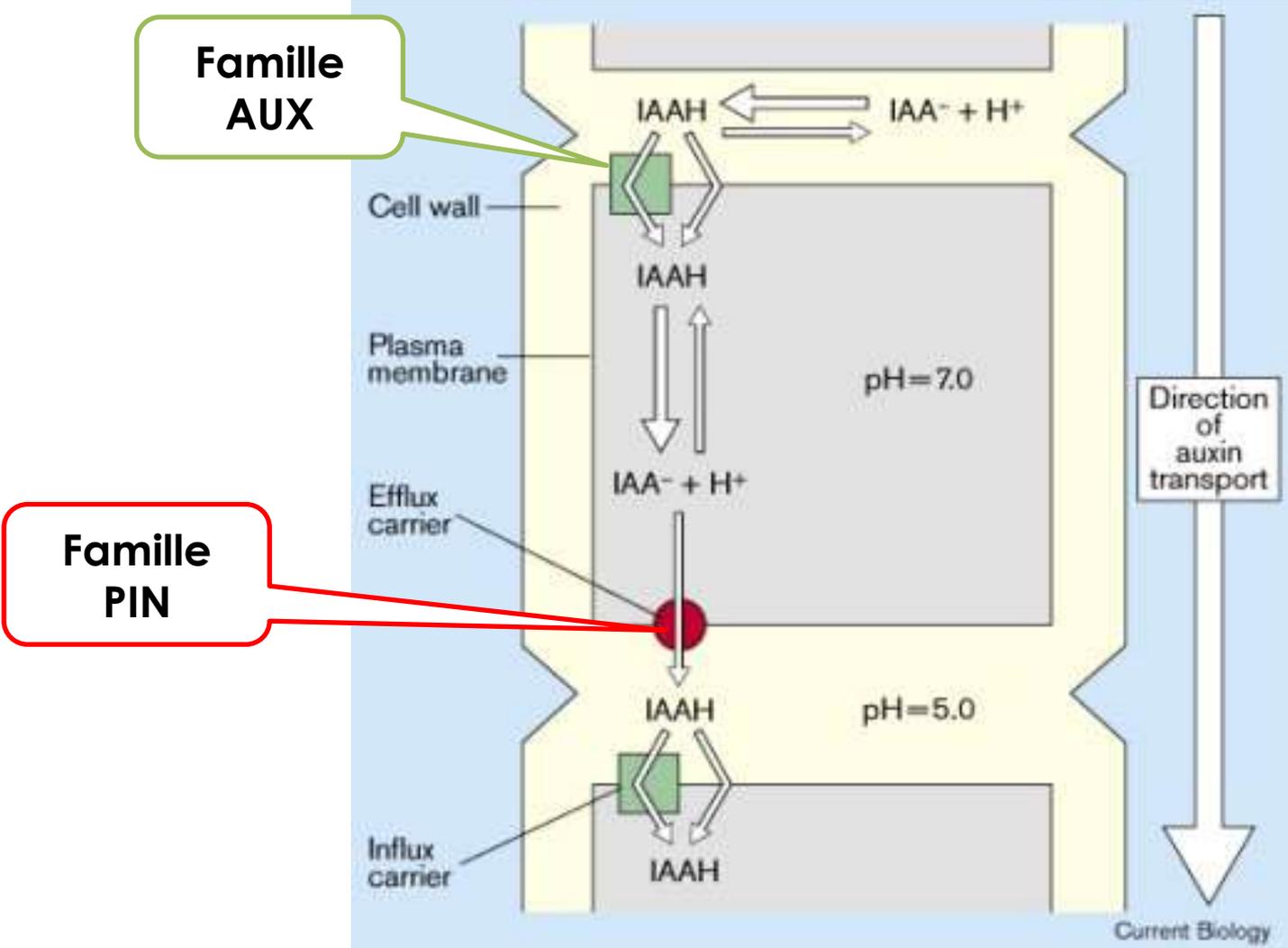
- Phytohormone jouant un rôle important au cours du développement:
- Elongation cellulaire
  - Réponses de tropisme (Phototropisme)
  - Dominance apicale
  - Etc...

TP

# Exemple du transport polarisé de l'auxine (AIA)

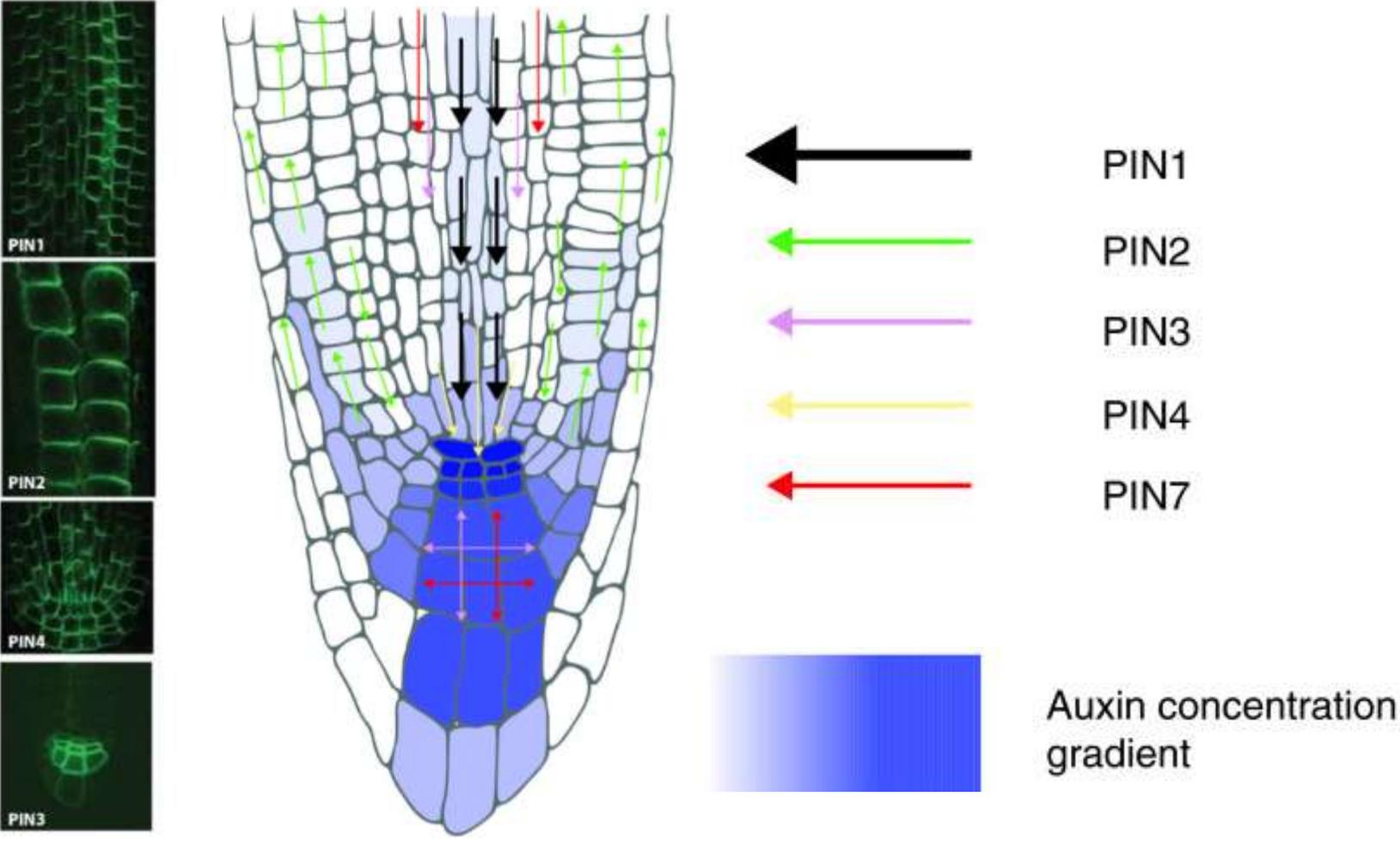


# Exemple du transport polarisé de l'auxine



# 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

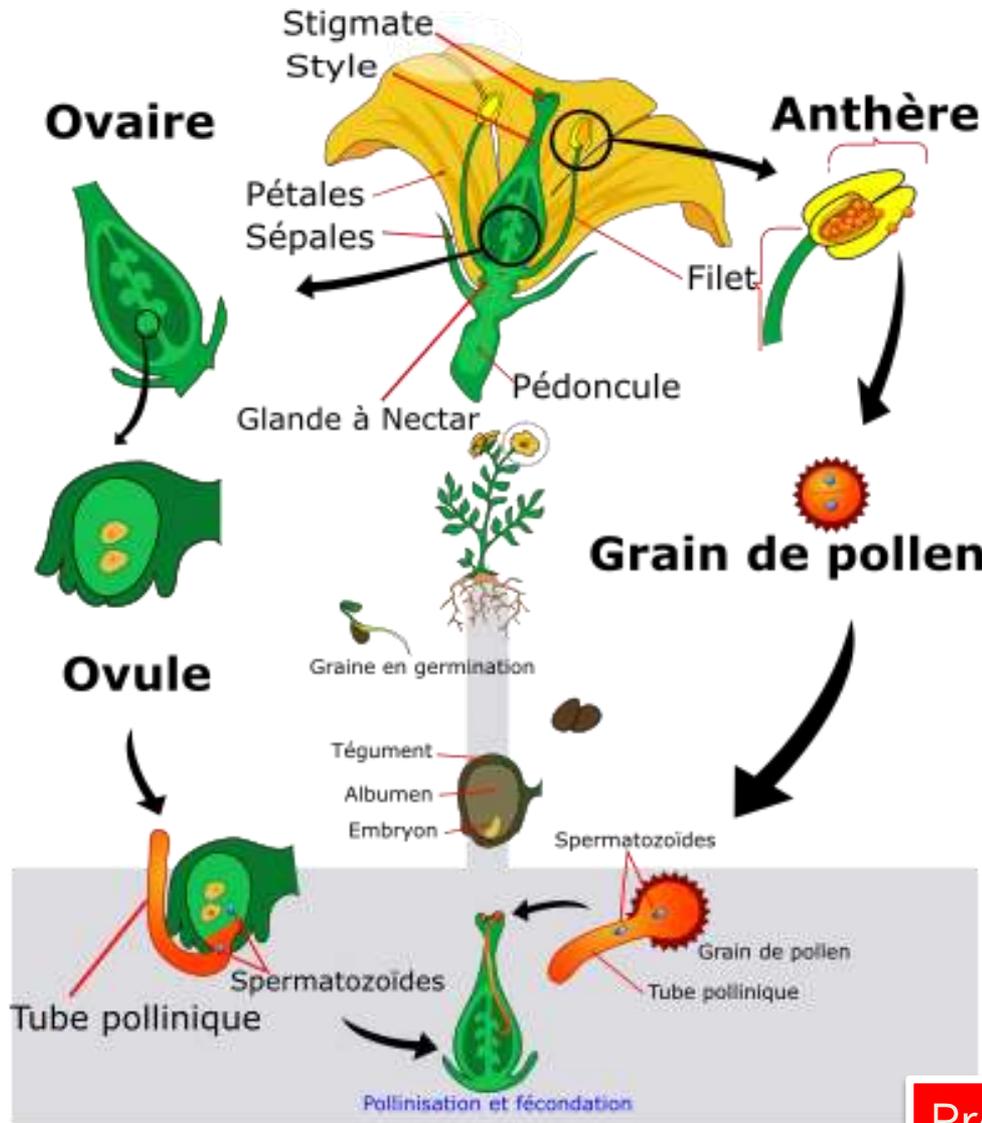
→ Développement post-embryonnaire continu

→ **Matrice extracellulaire: Paroi et Plasmodesmes**

→ Pas de migration cellulaire

→ Conséquences sur la différenciation cellulaire

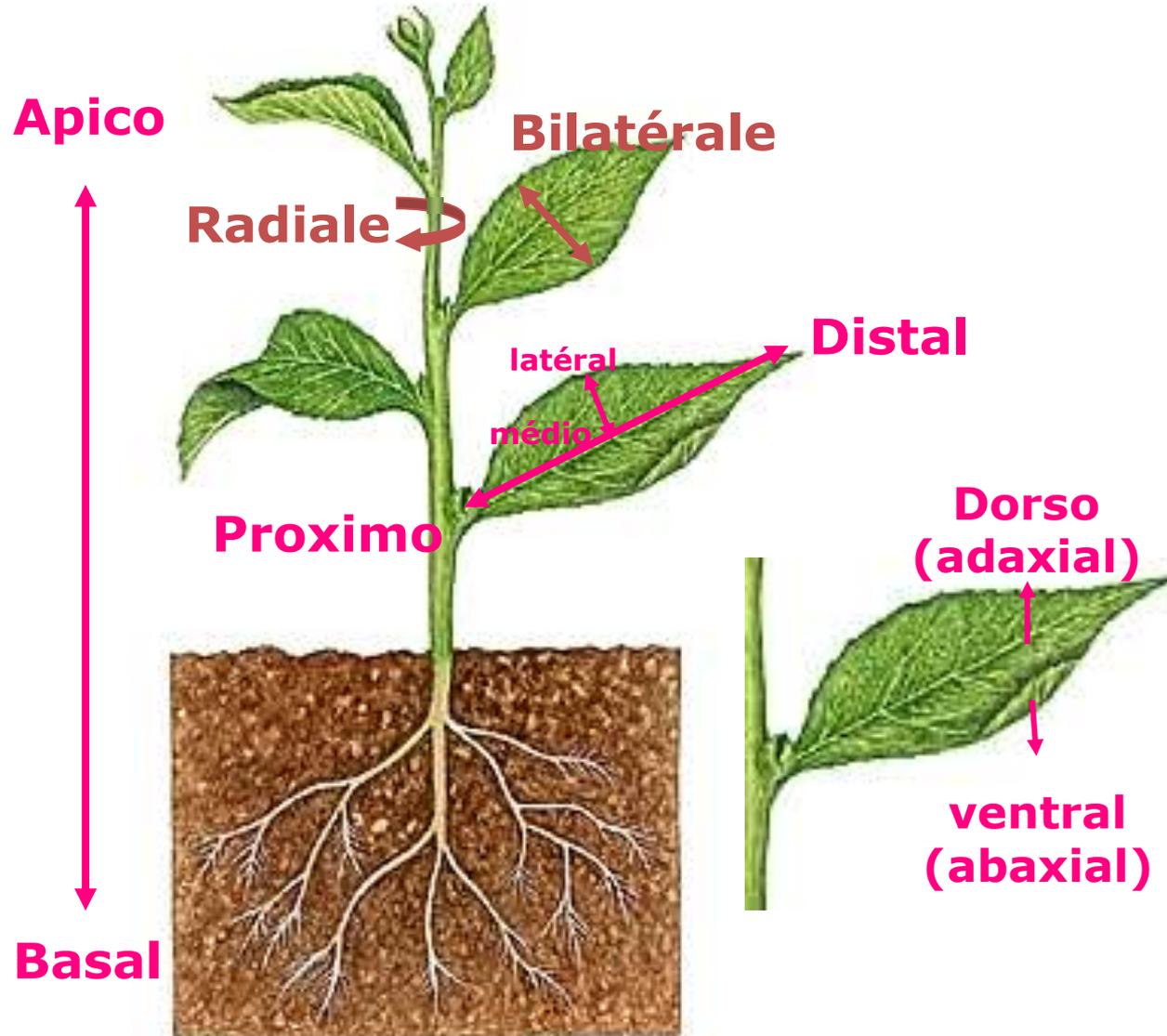
# Thème I : Programmes de Développement



Cycle de vie d'une angiosperme

Pre-réquis

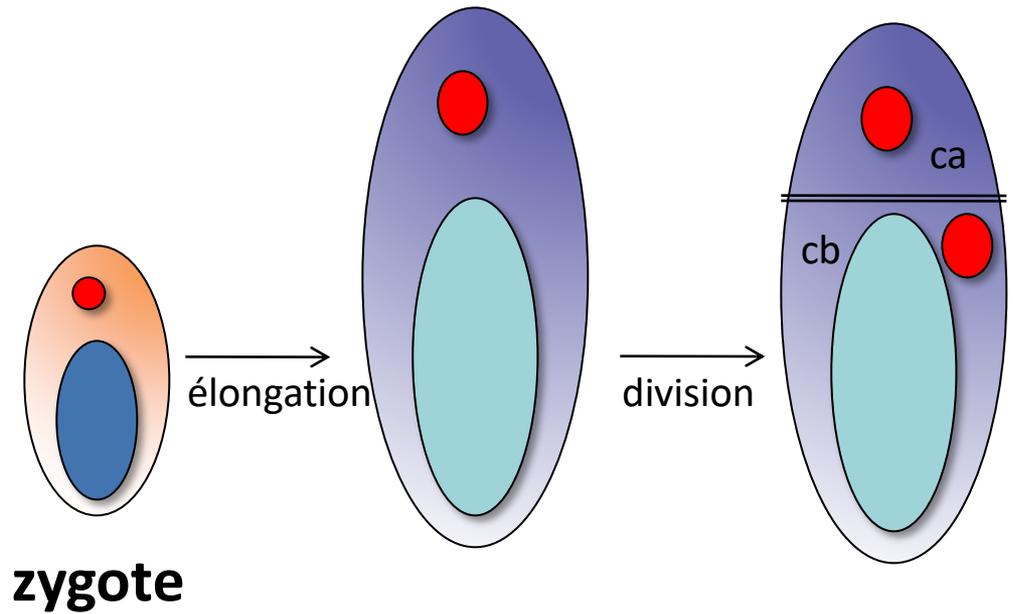
# ① Mise en place des axes de polarités



## Polarisation du zygote

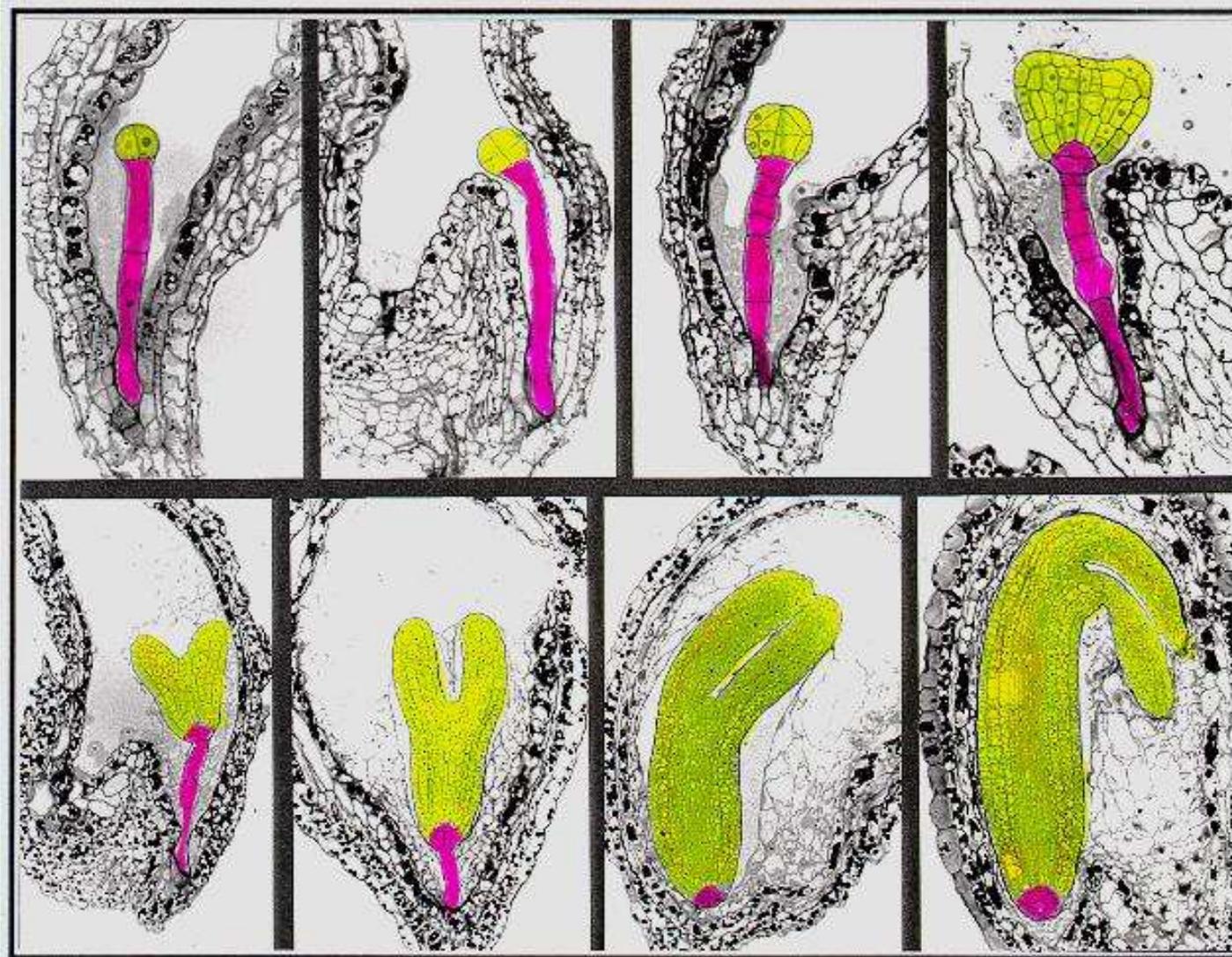


Zygote  
*Arabidopsis thaliana*



1ère division asymétrique

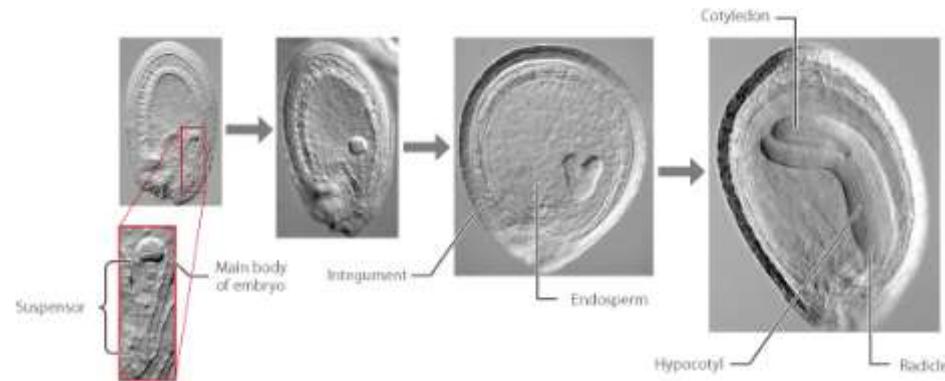
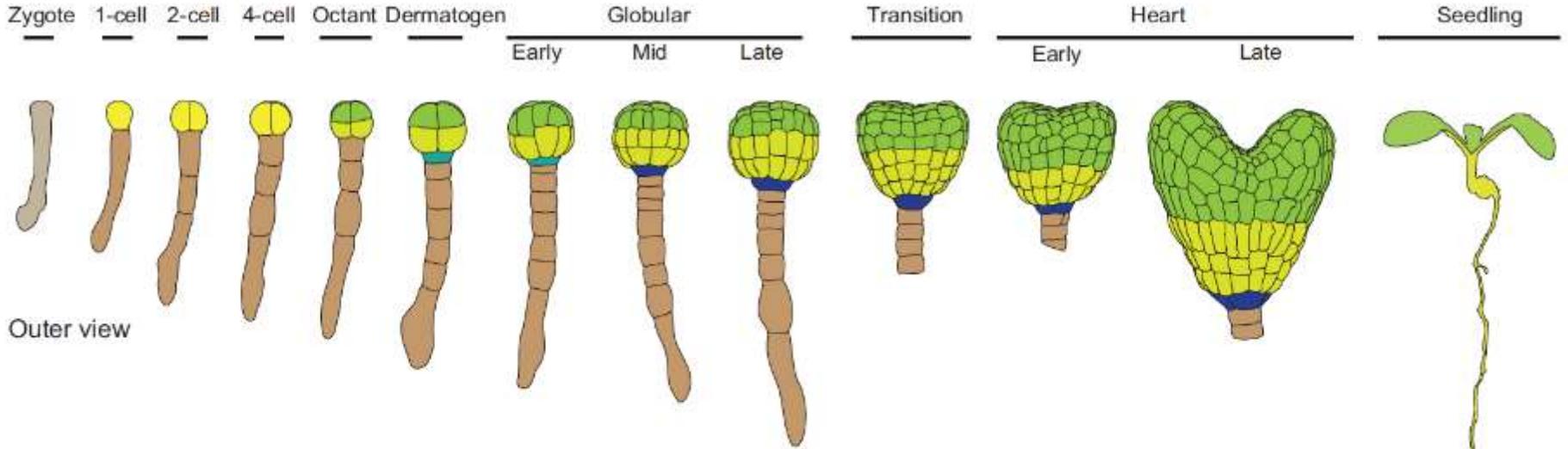
## Polarisation cellulaire au cours de l'embryogenèse



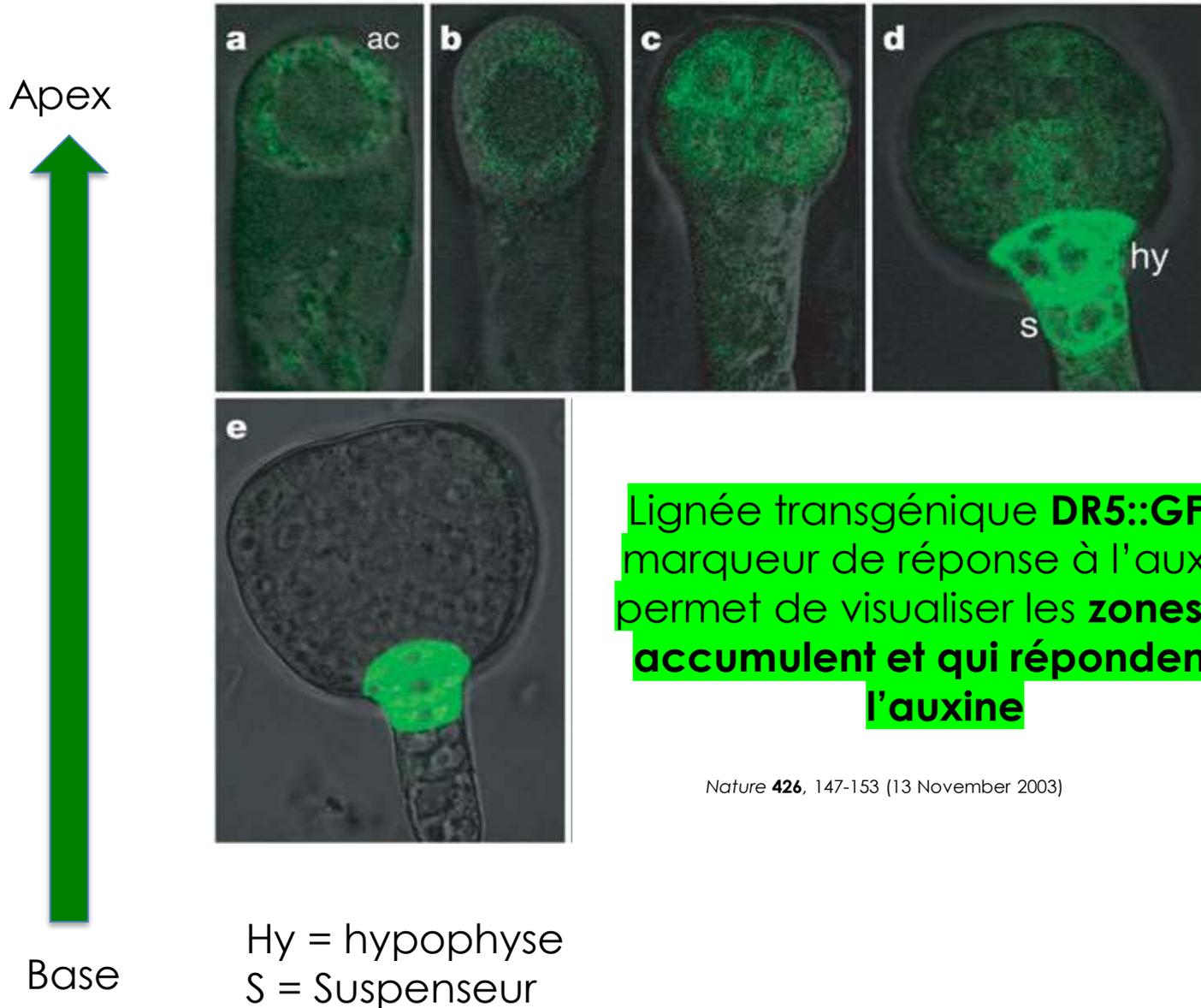
Cellule apicale  
= Embryon  
(- l'hypophyse)

Cellule basale  
= Suspenseur  
+ hypophyse

# Les étapes de l'embryogenèse



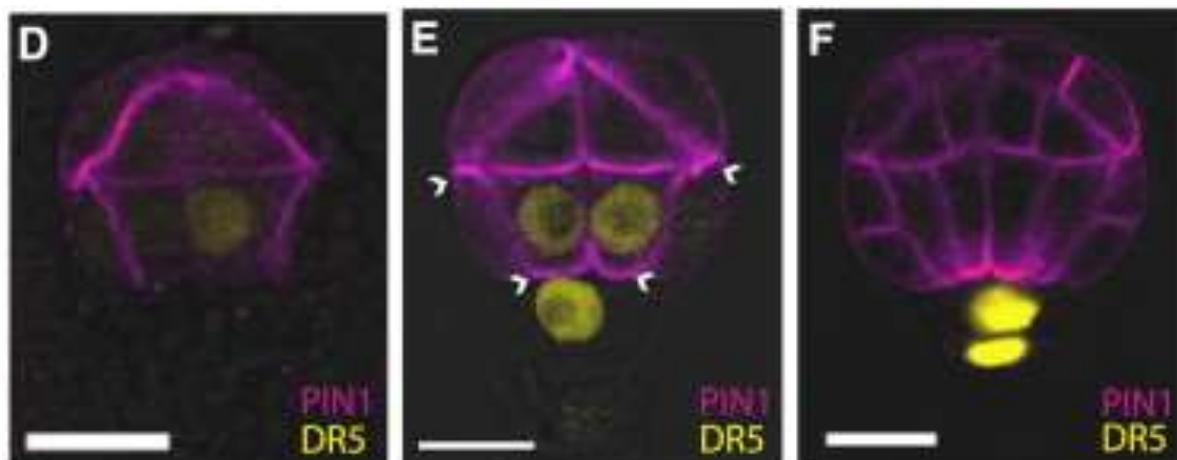
La mise en place de l'axe apical-basal est due à la formation d'un gradient d'auxine



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

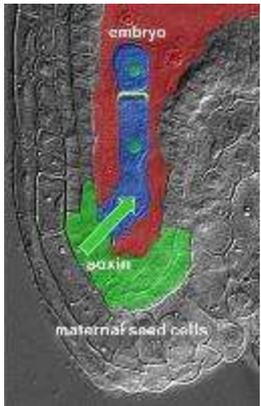
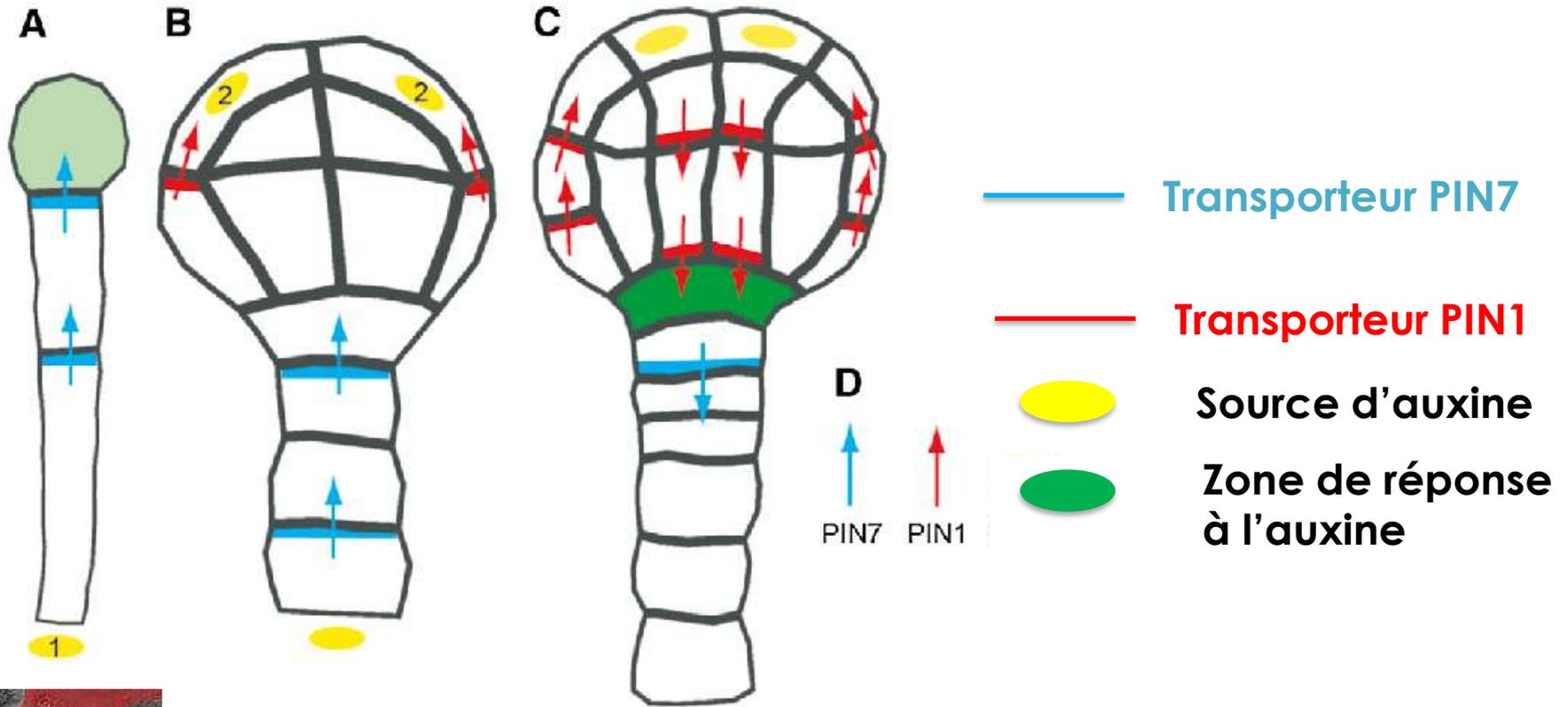
*Nature* **426**, 147-153 (13 November 2003)

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

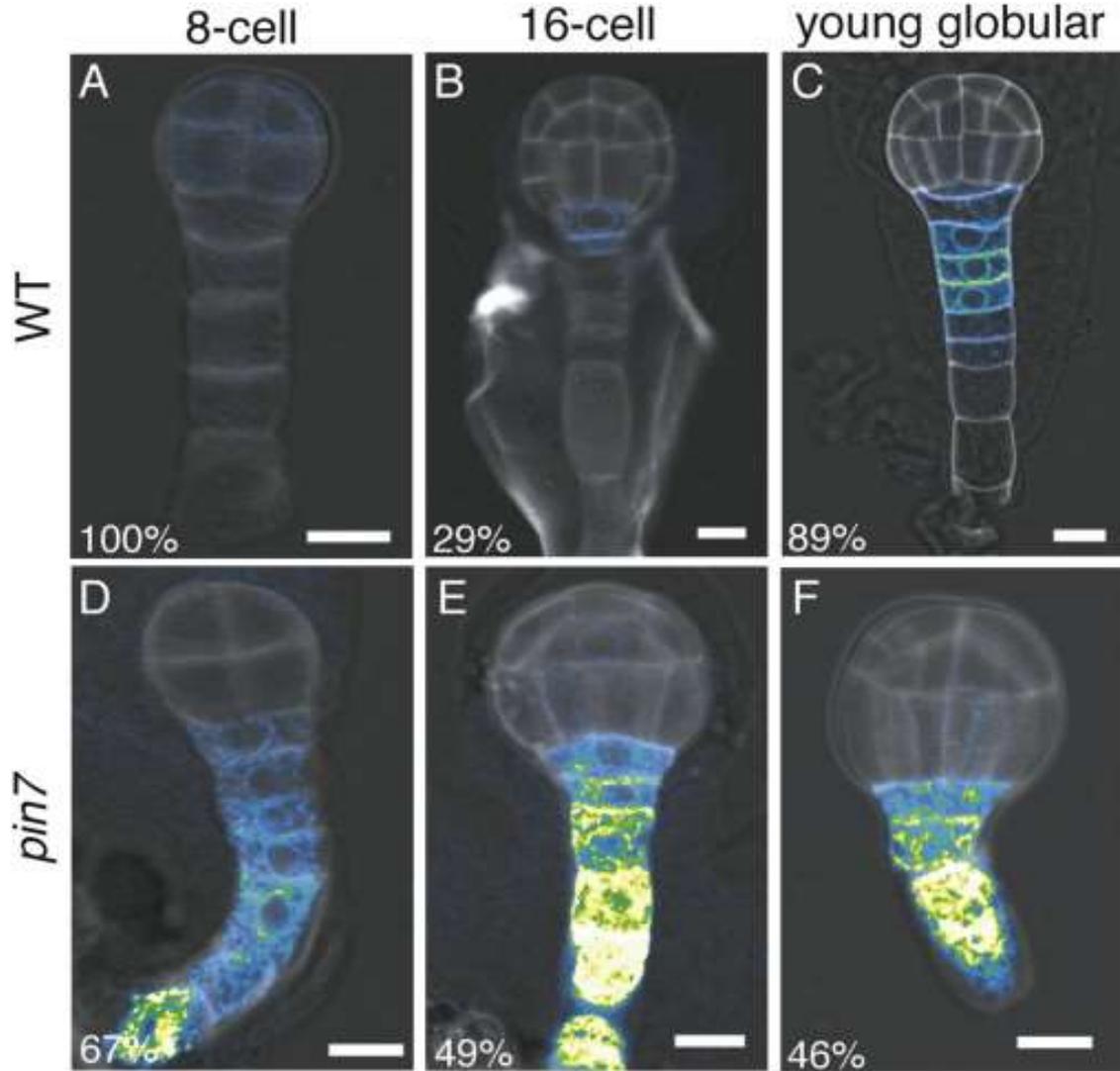


PIN1 = Transporteur d'efflux de l'auxine  
DR5 = marqueur d'accumulation  
d'auxine

# 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**

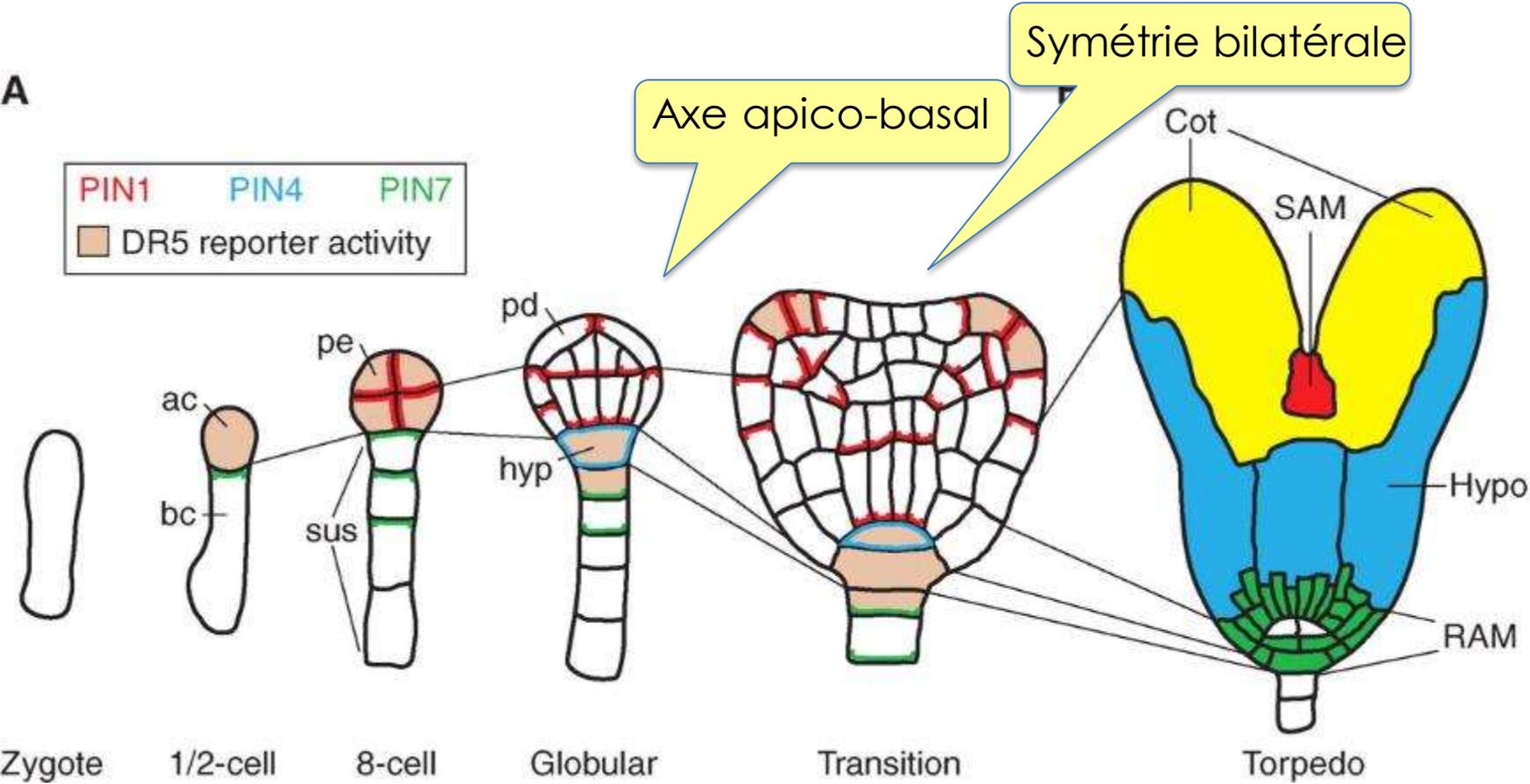
Plante sauvage (Wild-type)



Mutant déficient en PIN7



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

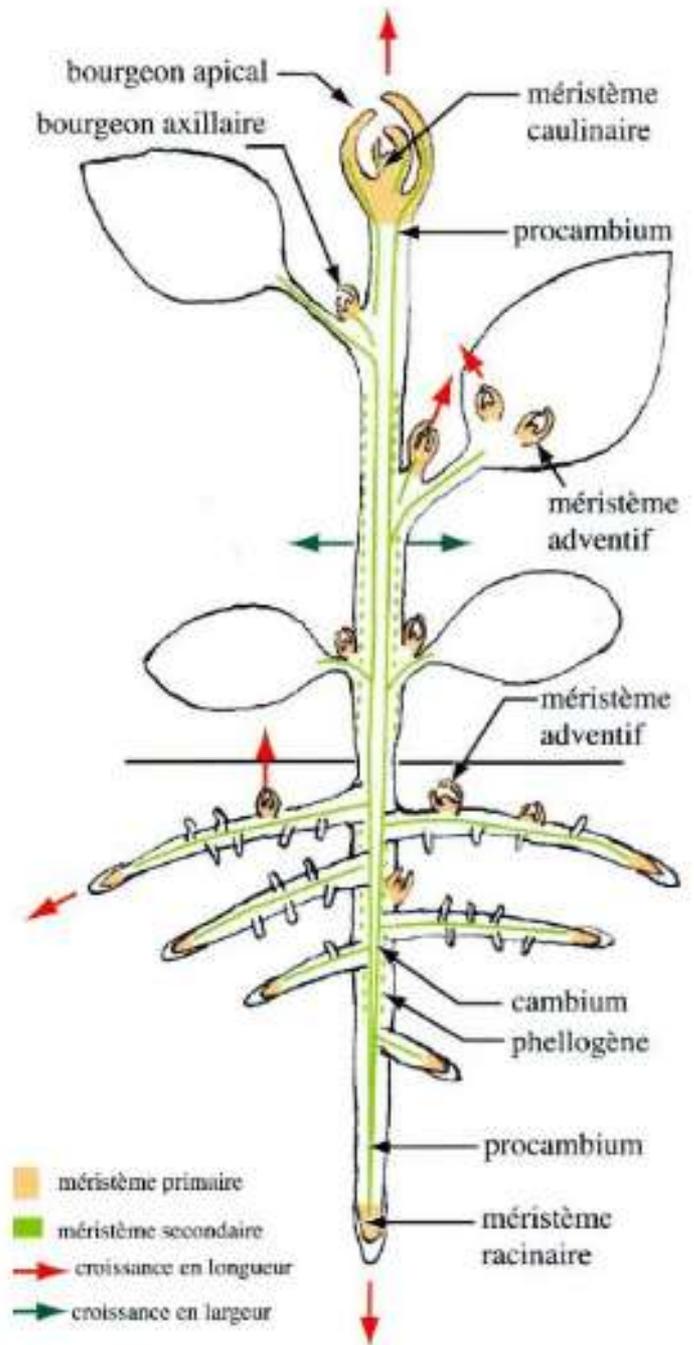
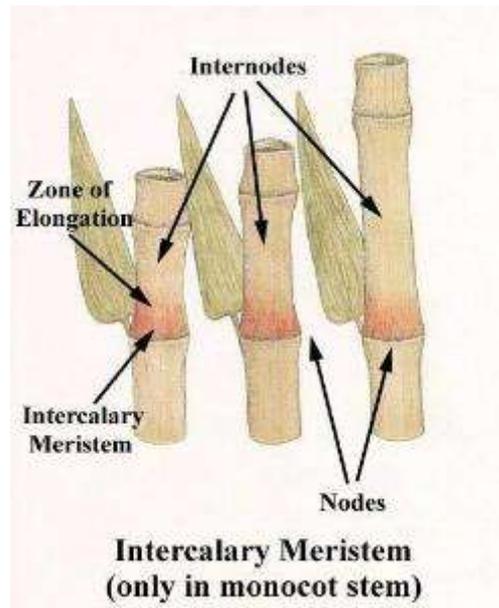


## ② Croissance racinaire



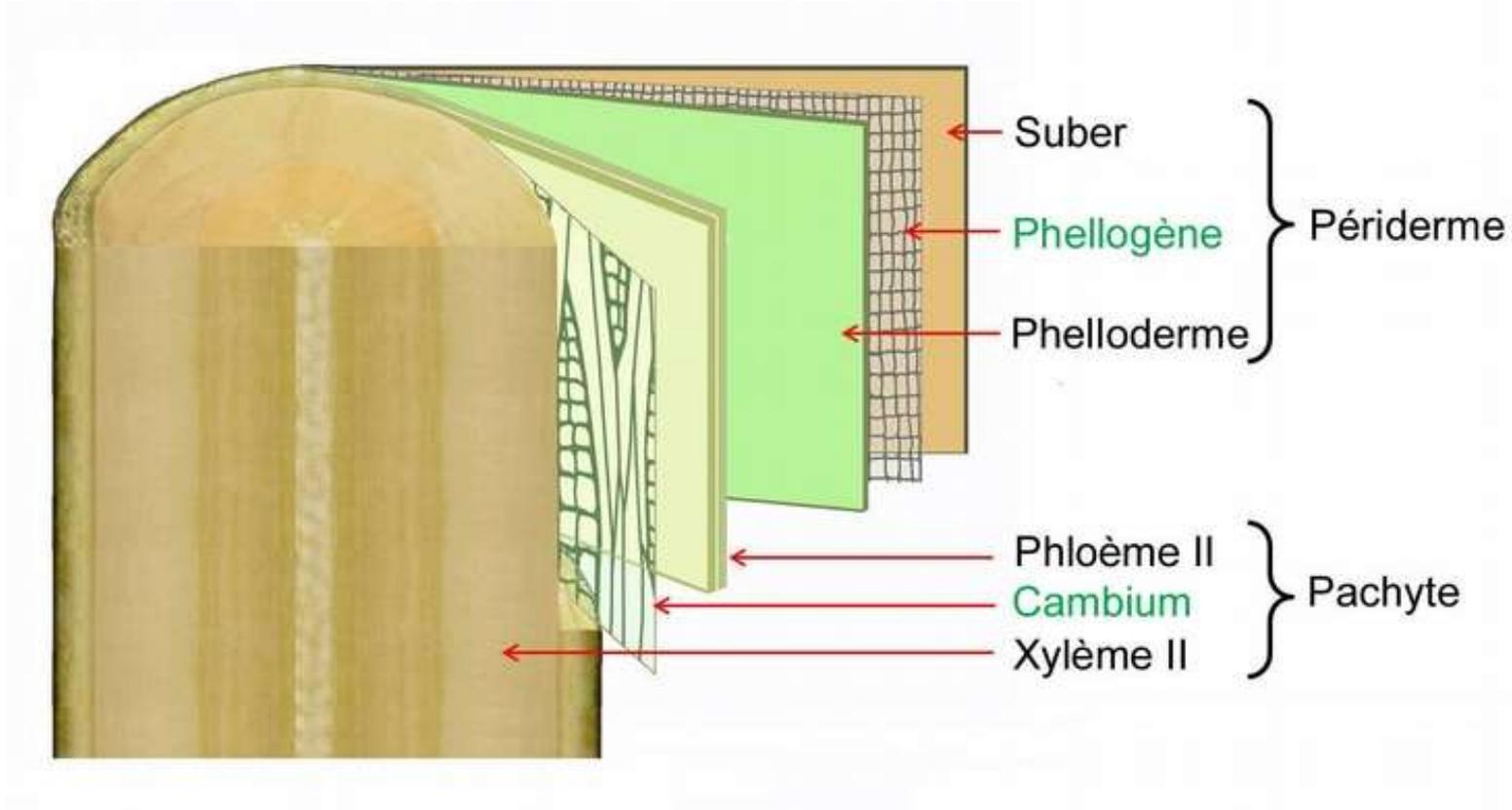
# Méristèmes Primaires à l'origine des tissus primaires chez toutes les plantes

- 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**

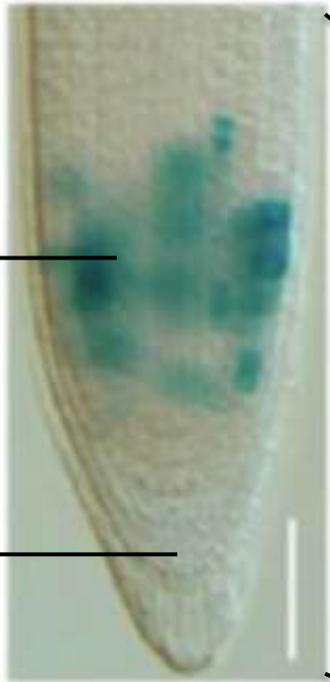


- **Phellogène → écorce**
- **Cambium → bois**

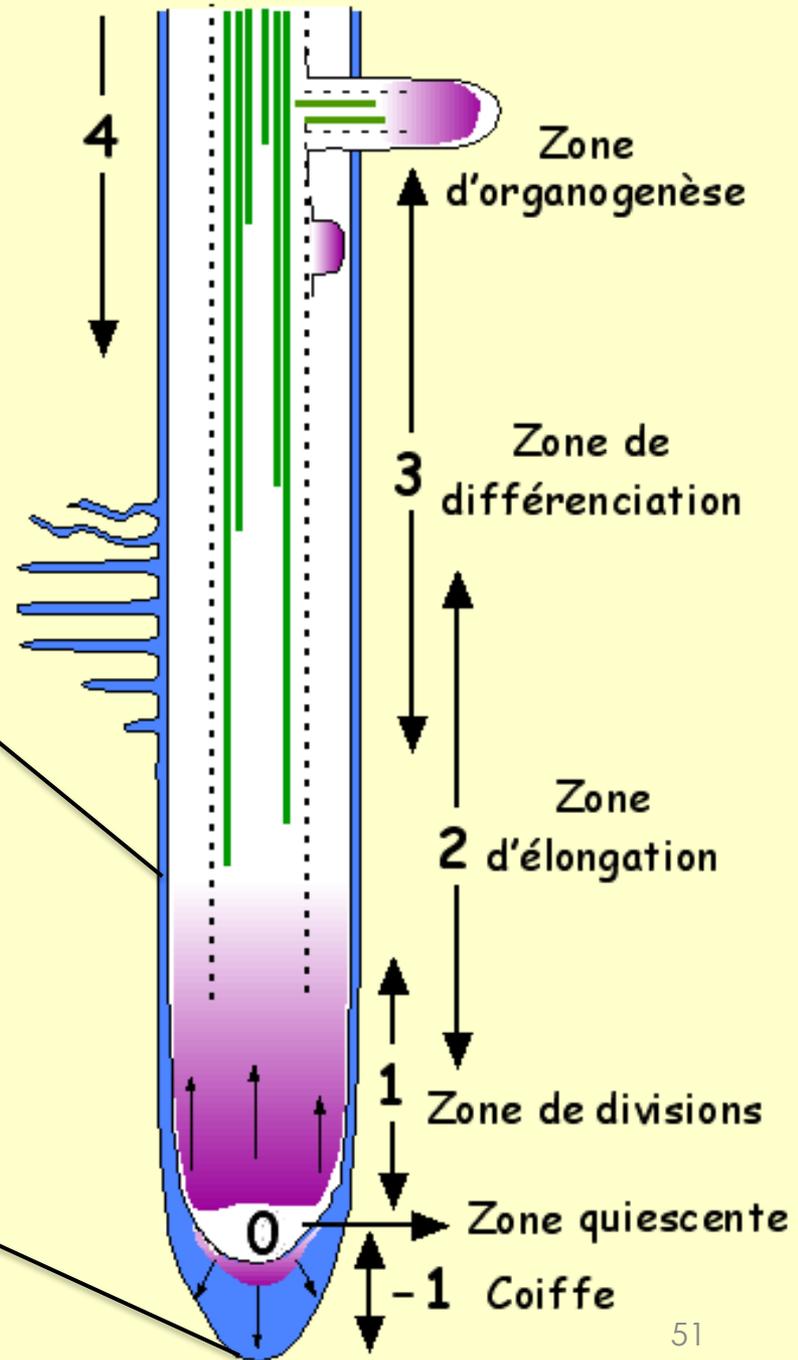
# Méristème Apical Racinaire (MAR)

MAR

Coiffe



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

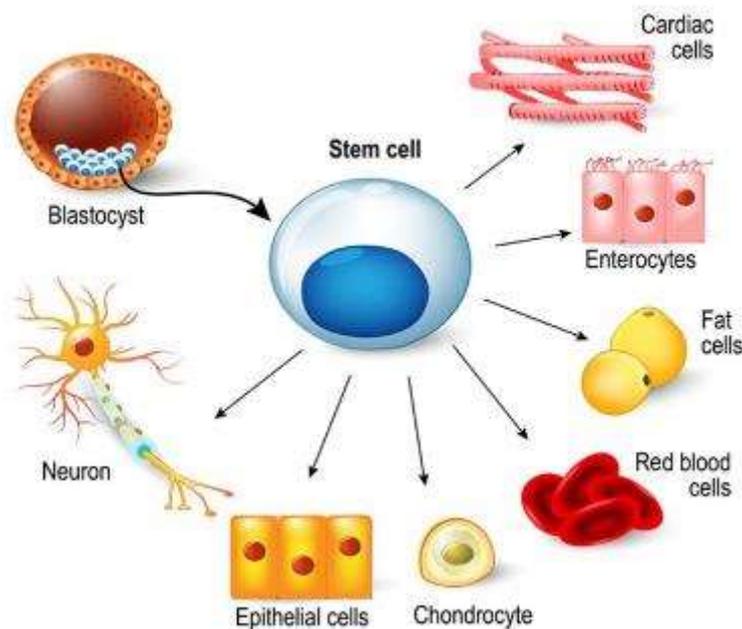


## Les méristèmes constituent une niche de cellules souches :

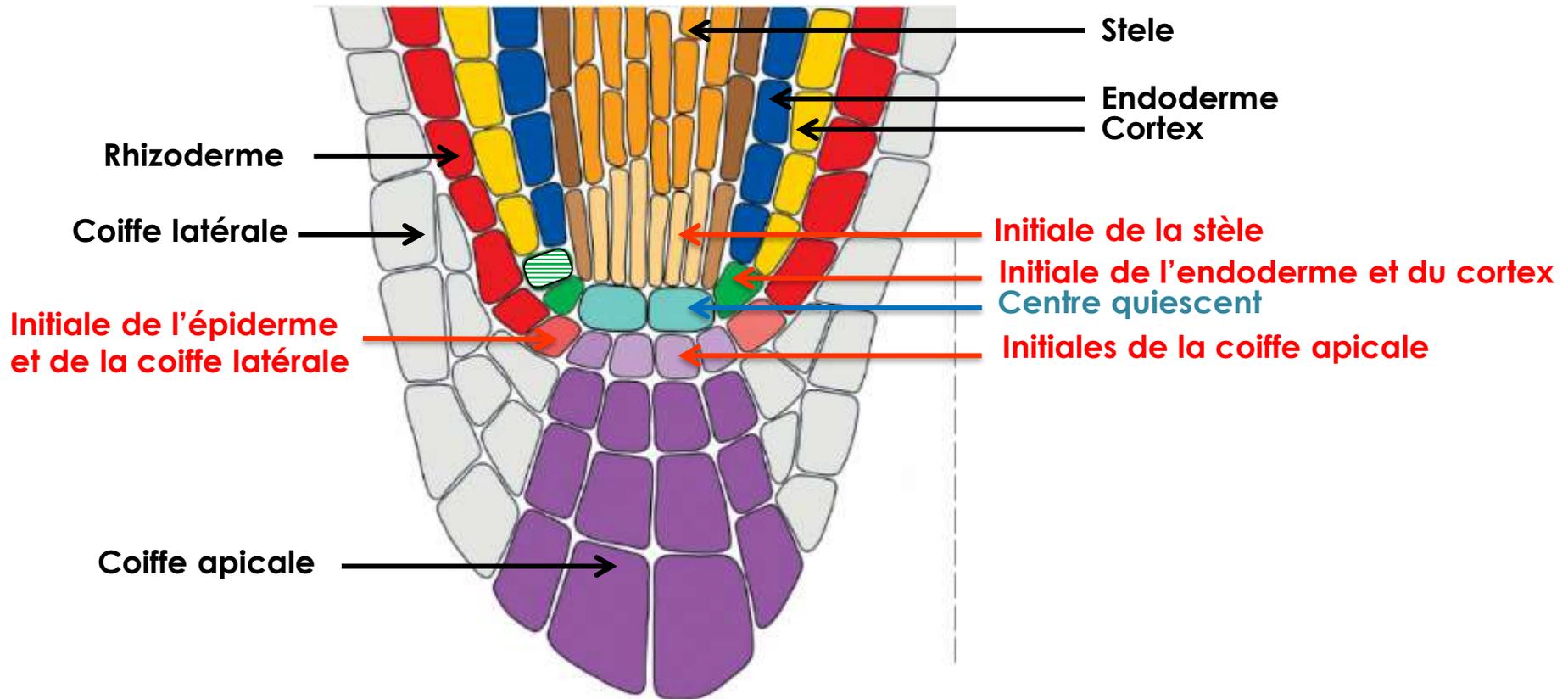
→ Micro-environnement qui permet la production de cellules filles et le renouvellement des cellules souches (Ohlstein et al. 2004).

## 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

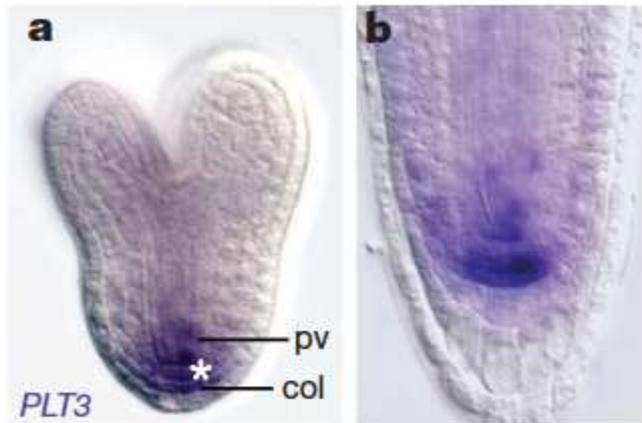


Expression ectopique de *PLT* dans le MAC

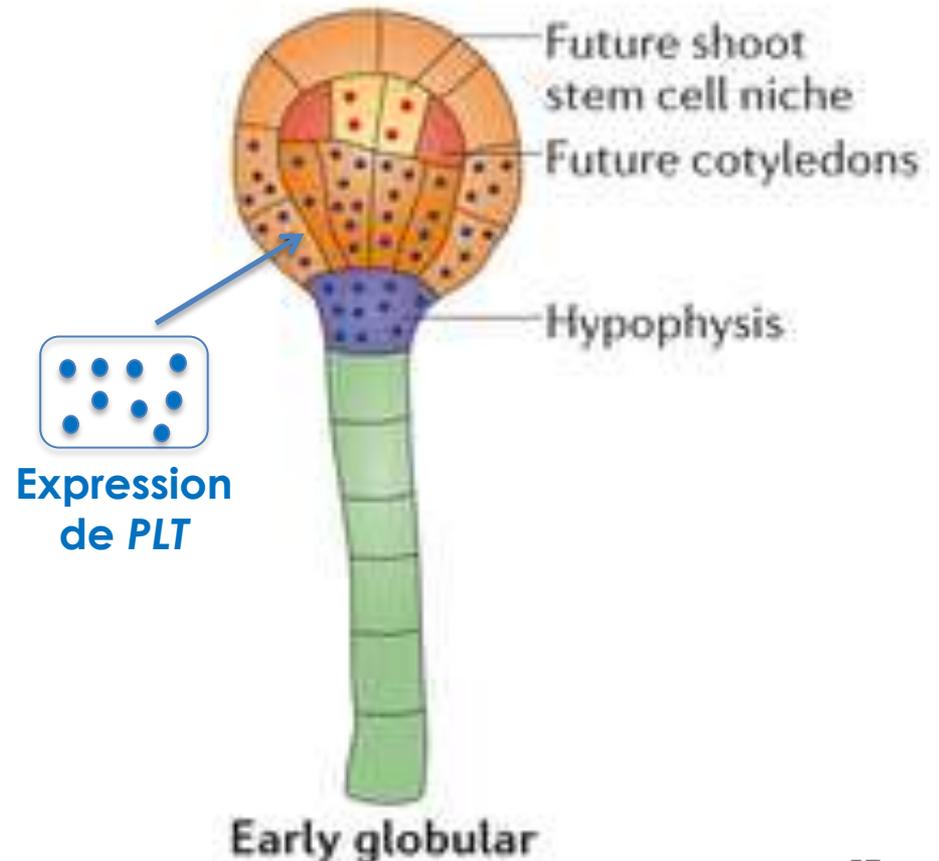
PLT est **nécessaire** et **suffisant** pour définir  
l'identité MAR

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

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

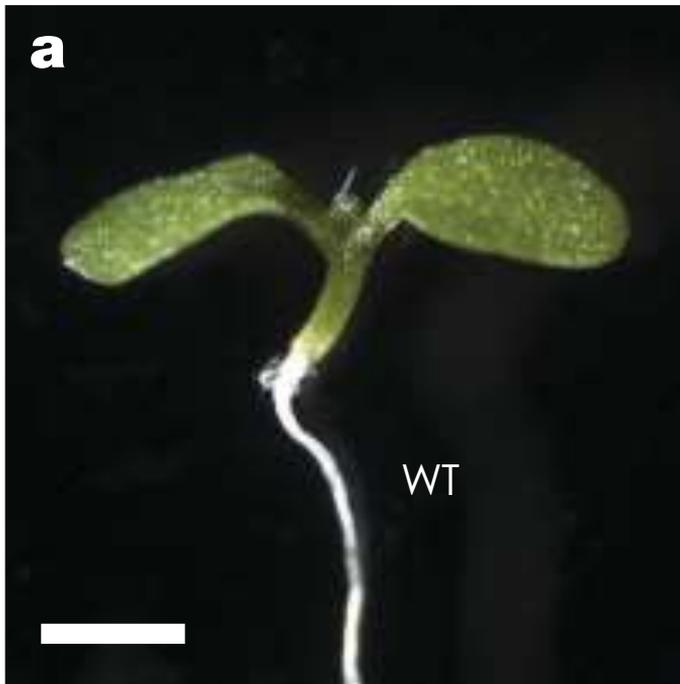


Hybridation *in situ* révélant le domaine d'expression de PLT dans l'embryon et la racine

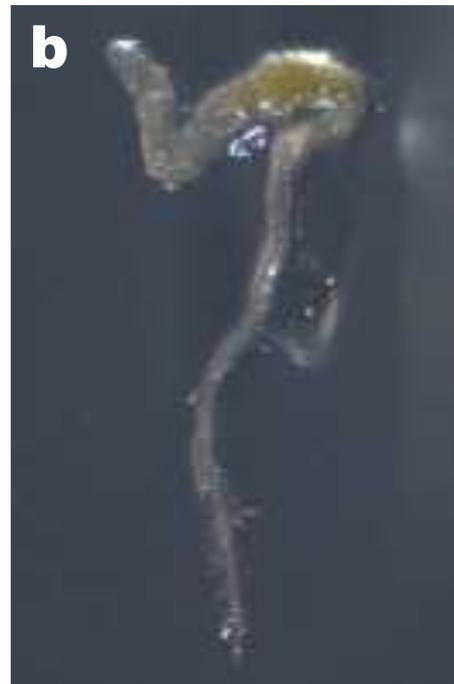


# Identification du mutant *topless* (*tpl*)

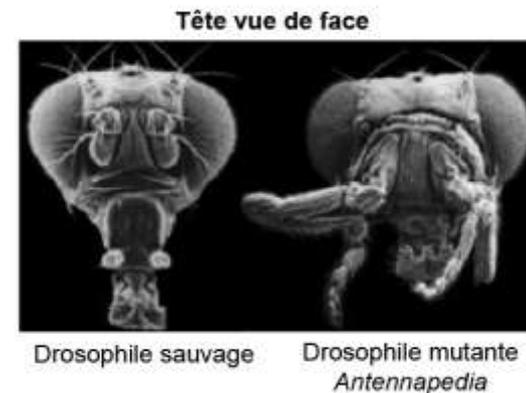
Le mutant *tpl* est un **mutant homéotique** avec un changement d'identité des organes (domaine caulinaire se transforme en domaine racinaire)



Type sauvage

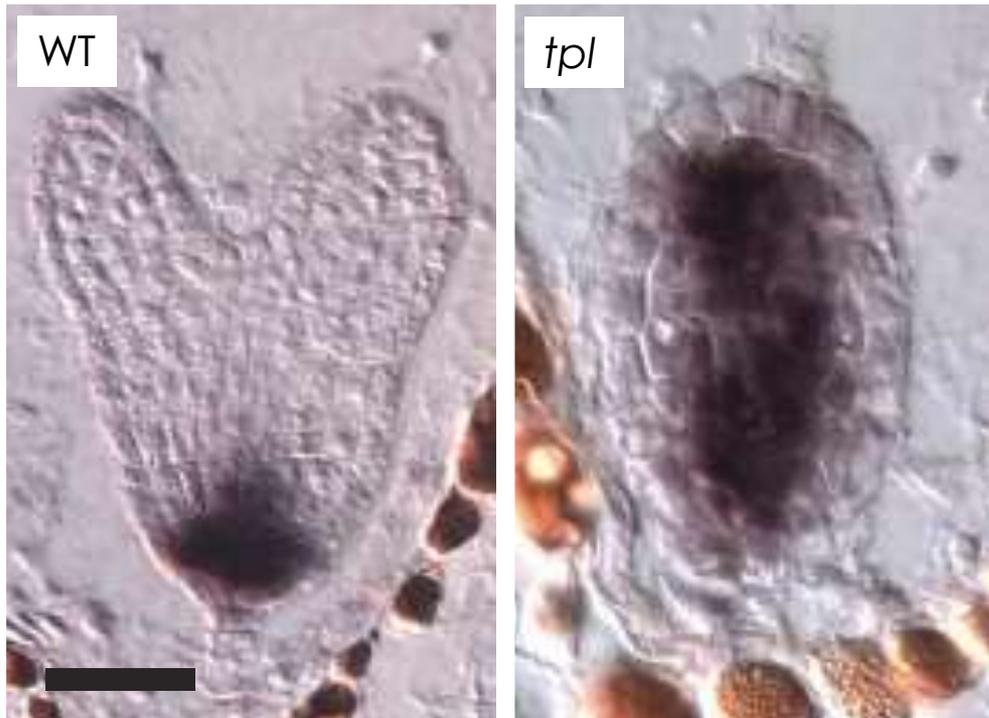


*tpl*



**Fonction de TPL?**

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



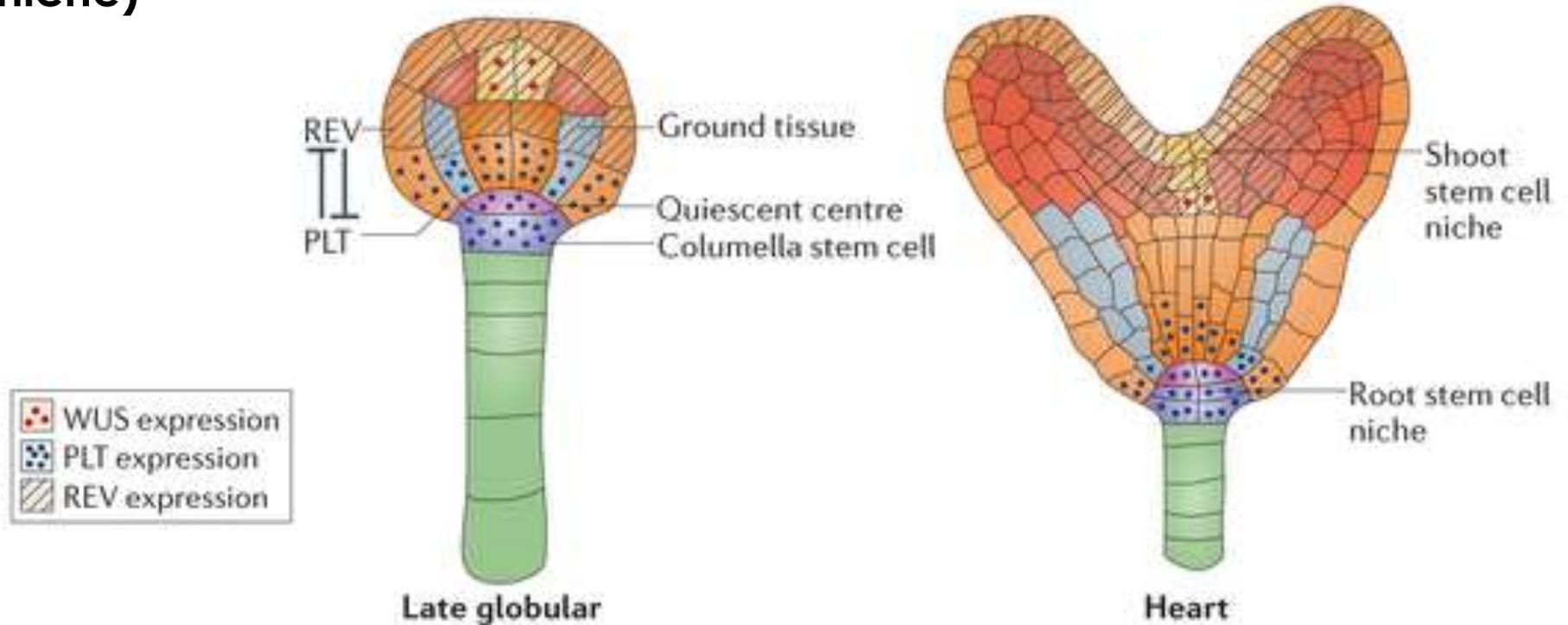
Expression de *PLT* chez le WT et mutant *topless (tpl)*  
visualisée par hybridation *in situ*



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

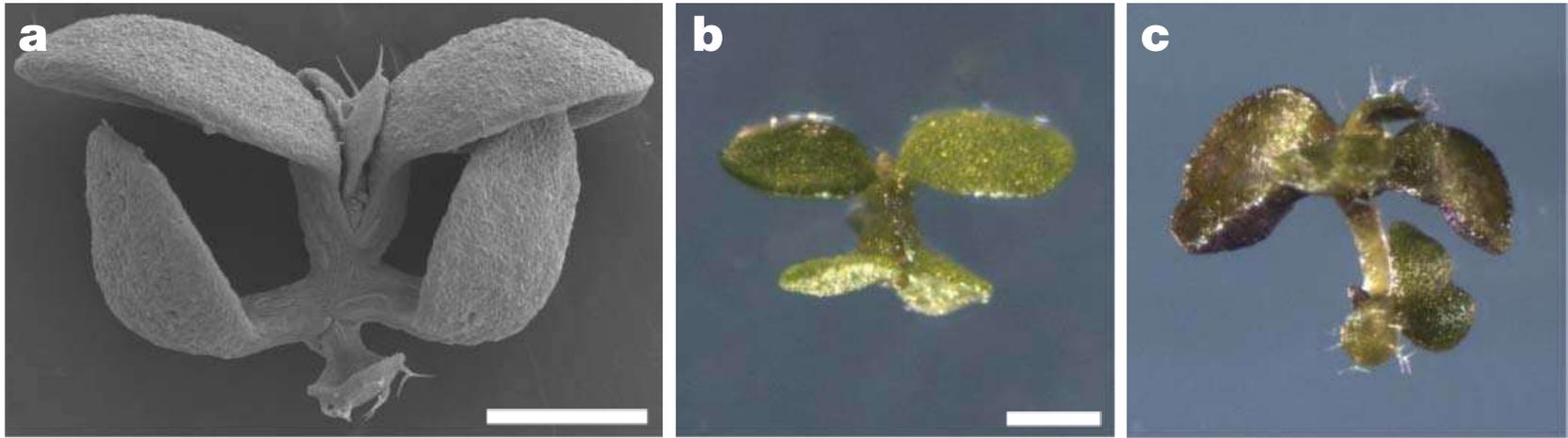
PLT → Identité niche de cellules souches racinaires

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



Nature Reviews | Molecular Cell Biology

**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**

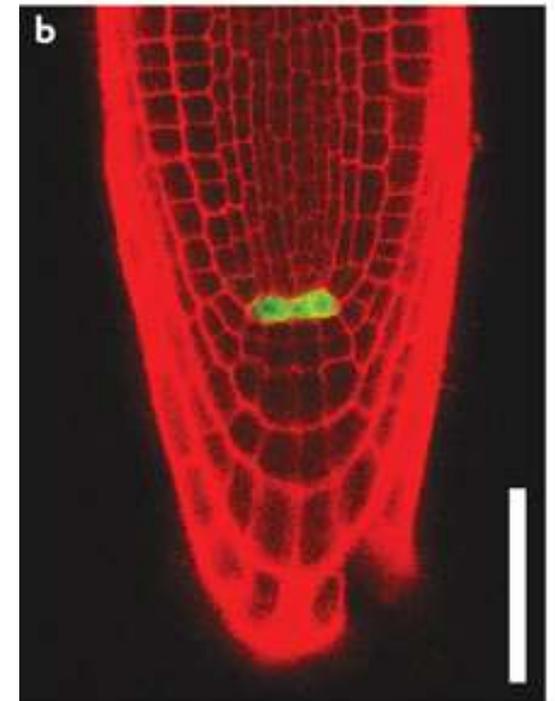
## 2-2 Le Centre Quiescent (CQ)

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

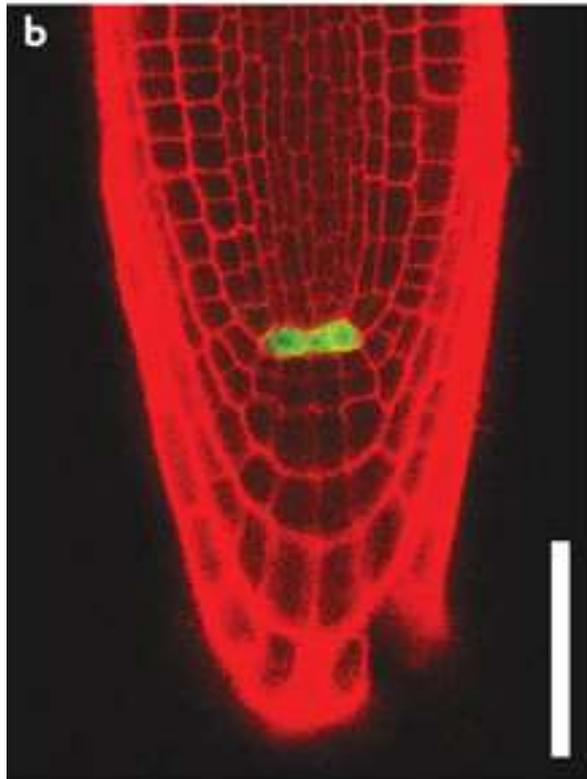
→ **Etat Quiescent** qui jouerait une rôle dans la long vit  des plantes

« *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* »

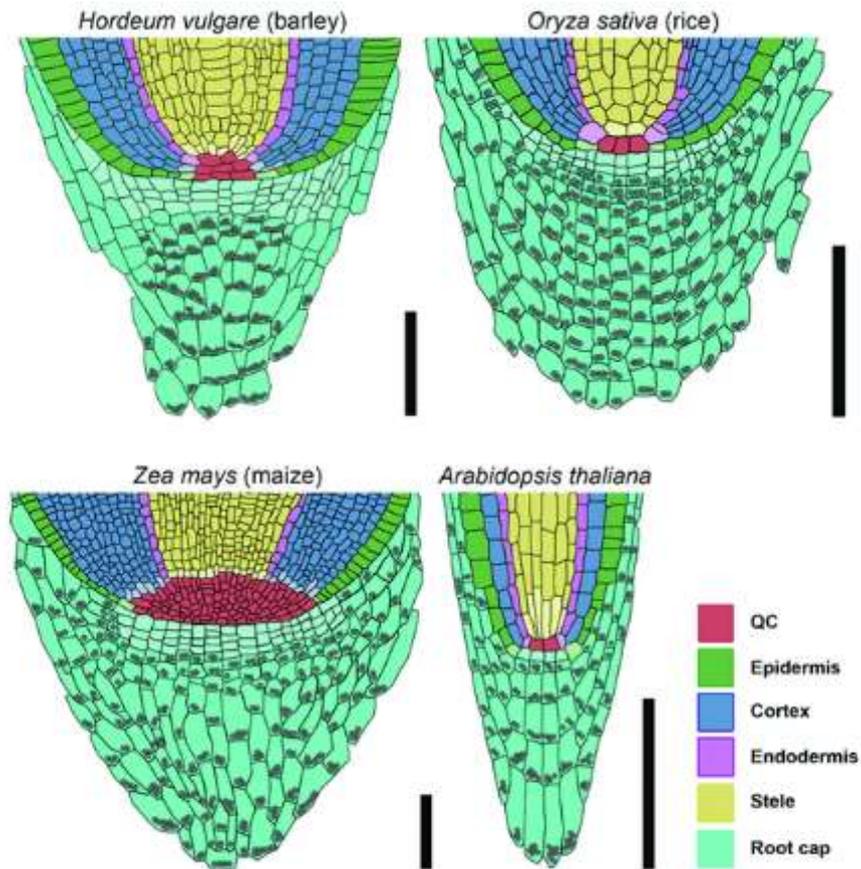
*Heyman et al. Trends in Cell Biology, 2014*



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



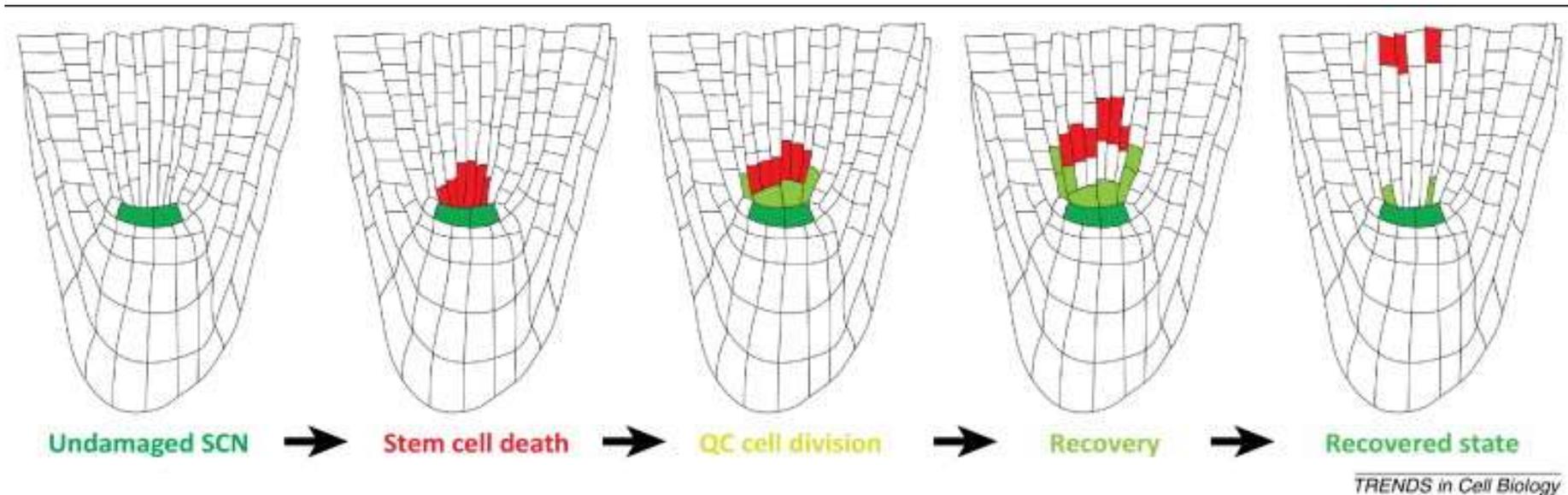
*WOX5::GFP* racine *A. thaliana*



## Fonctions du Centre Quiescent (CQ)

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

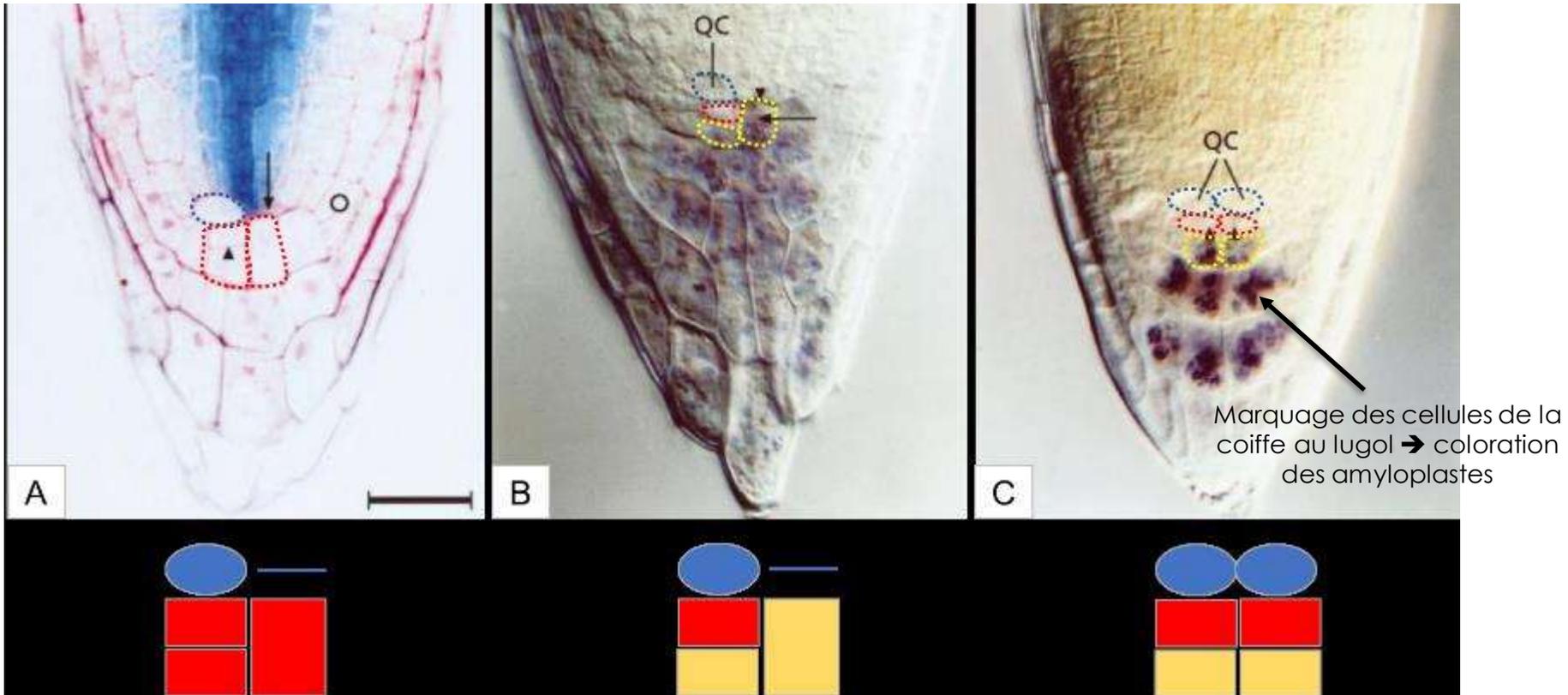
Si les cellules souches sont endommagées, les cellules du CQ entrent en division et produisent de nouvelles initiales



# Expérience d'ablation cellulaire

**Ablation d'une des 2 cellules du centre quiescent**

**Témoin**

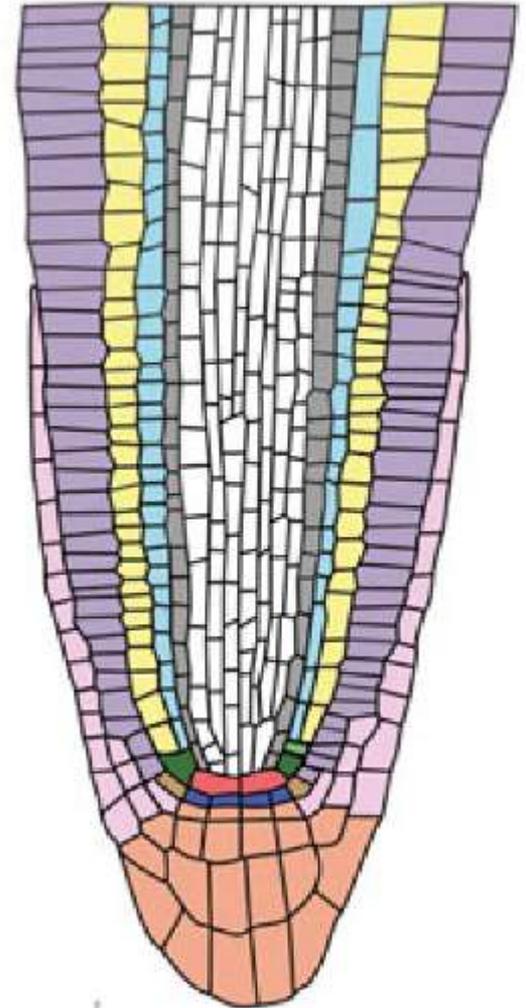


 Cellule du centre quiescent  
 Cellule initiale de la coiffe

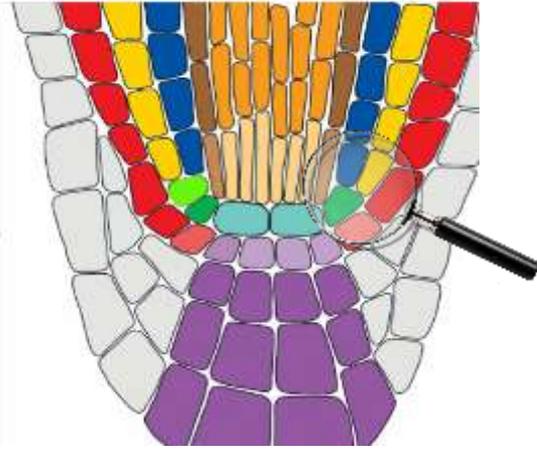
 Cellule différenciée de la coiffe

## 2-3 Développement racinaire post-embryonnaire:

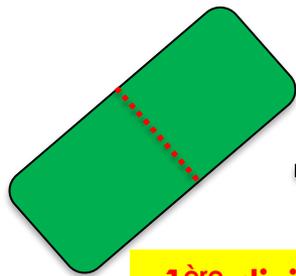
- Equilibre entre maintien du MAR et la construction des tissus racinaires
- Le MAR est uniquement **histogène** (ne produit que les tissus de la racine sur lequel il se trouve)



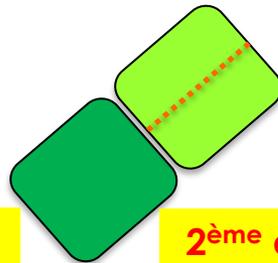
# Différenciation de l'endoderme et du cortex



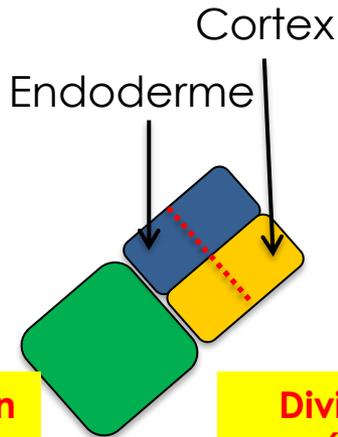
Cellule initiale du cortex/endoderme



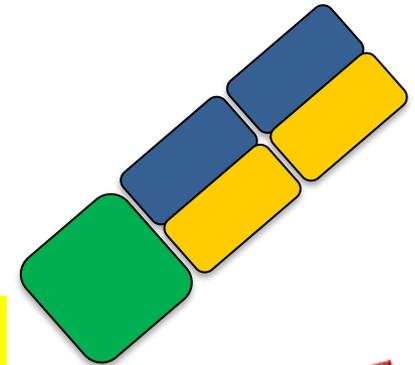
1<sup>ère</sup> division  
asymétrique  
anticline



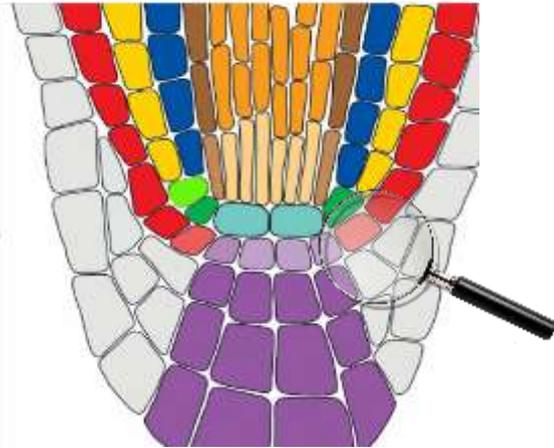
2<sup>ème</sup> division  
asymétrique  
péricline



Divisions  
symétriques  
anticline



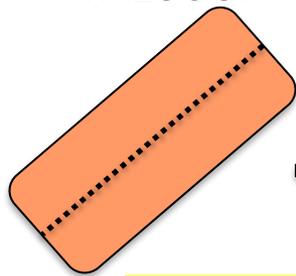
## Différenciation de la coiffe latérale et du rhizoderme



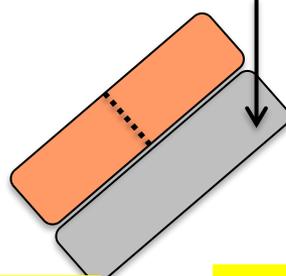
Cellule initiale de la  
coiffe latérale du  
rhizoderme

Cellule de la coiffe  
latérale

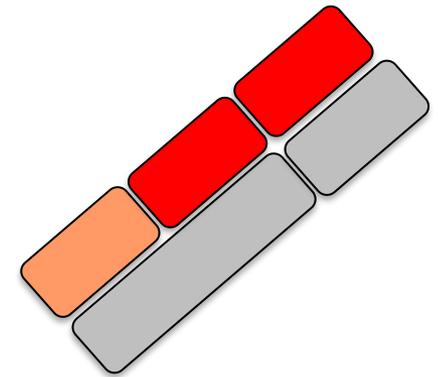
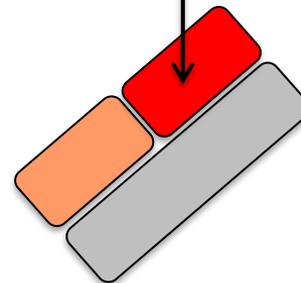
Cellule du  
rhizoderme



**1<sup>ère</sup> division  
asymétrique  
péricline**

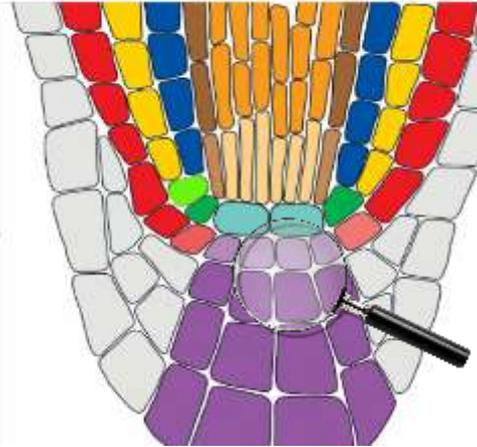


**2<sup>ème</sup> division  
asymétrique  
anticline**

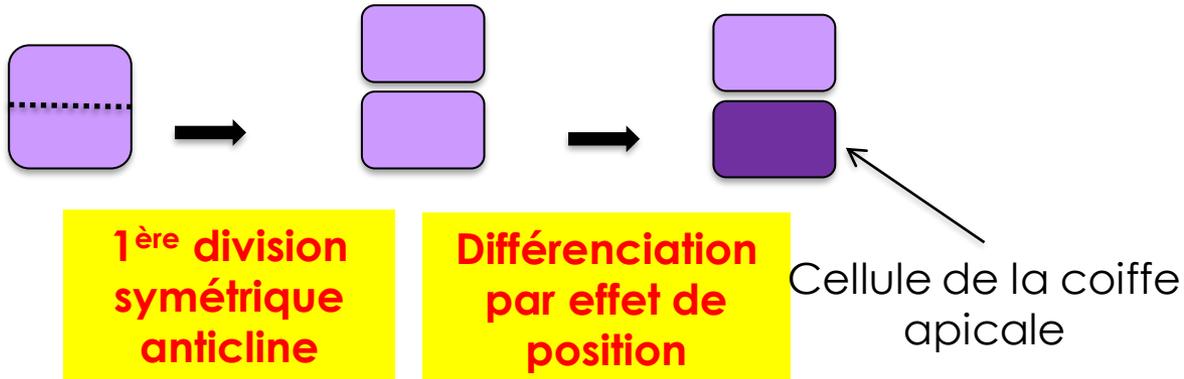


**Divisions  
symétriques  
anticline**

## ■ Différenciation de la coiffe apicale (columelle)

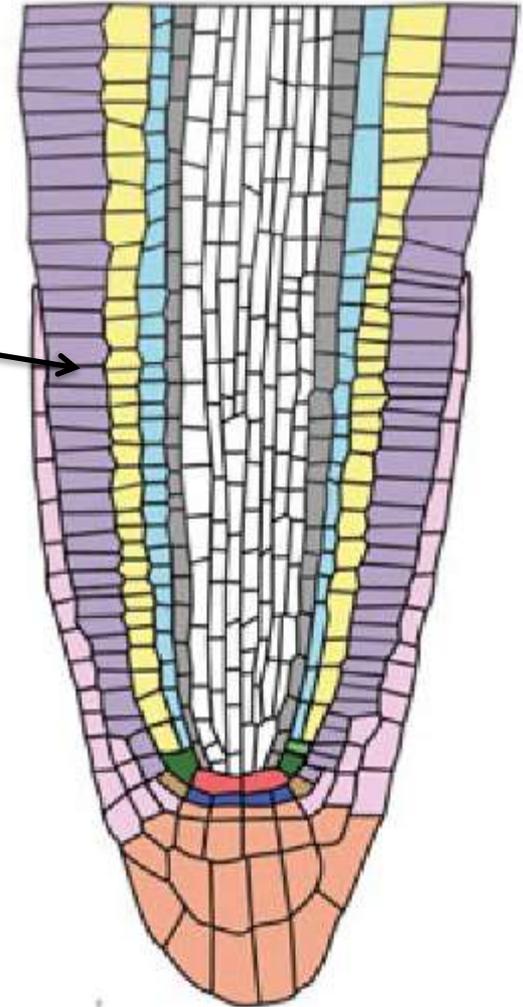


Cellule initiale de la  
coiffe apicale



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*