



# ONTOGENESE DES PLANTES SUPERIEURES

- **Ouvrages :**
  - Plant physiology. Taiz, Zeiger. 5th edition. Sinauer
  - Physiologie végétale II. Croissance et Développement. P. Mazliak. Hermann ed. (edition 1998)
  - Physiologie végétale. 2. Développement. R. Heller, R. Esnault, C. Lance. Dunod. 6ème édition 2000

Avril, 2020

# ONTOGENESE

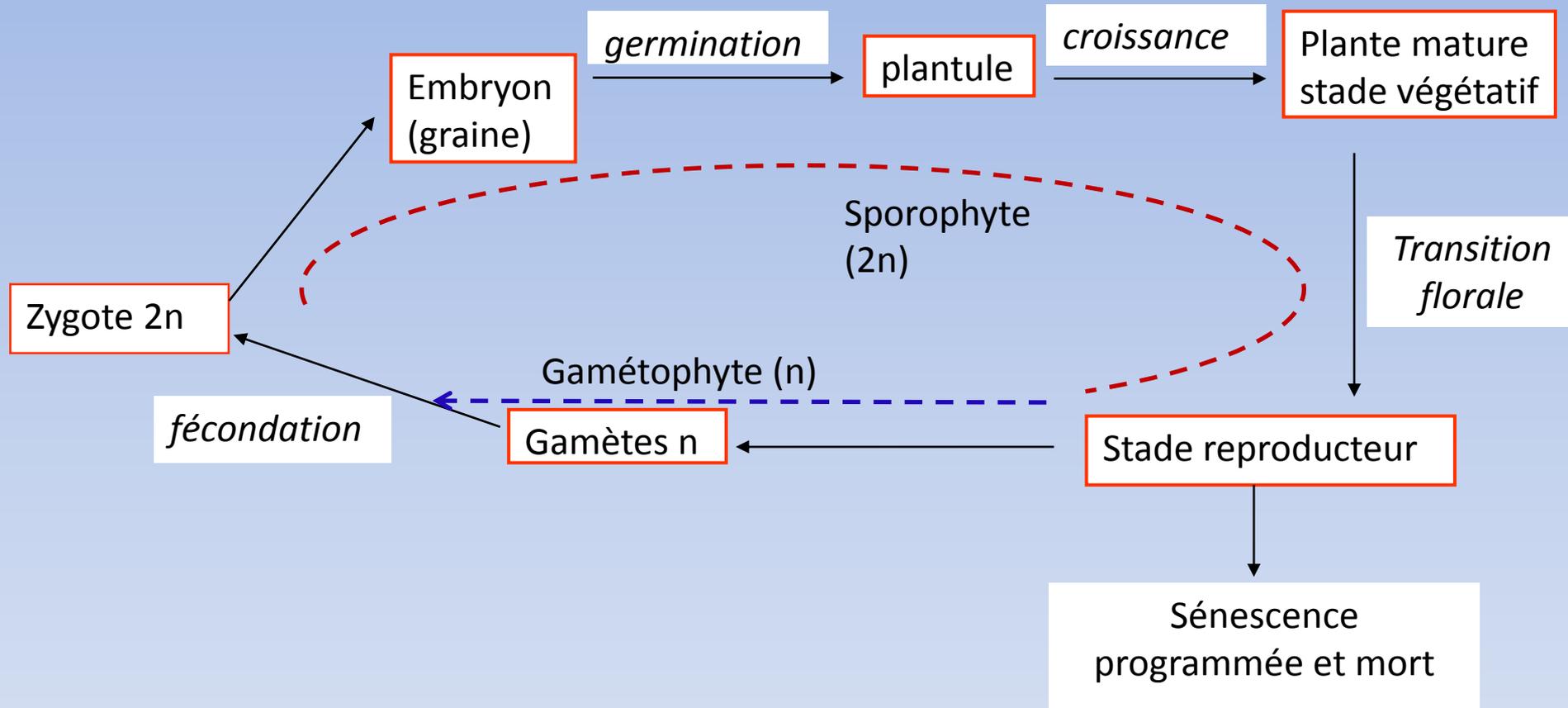
Mot composé de *onto-* (« être ») et *genèse*.

L'ontogenèse est donc la genèse d'un être vivant

L'**ontogenèse** ou le **développement** est l'ensemble de processus allant de la (**fécondation**) jusqu'à la formation d'un individu adulte et elle peut inclure aussi le vieillissement (*senescence*).  
Autrement dit, c'est l'étude phénomènes situés dans le cycle de vie d'un être vivant.

Les processus de développement d'un individu Angiosperme sont illustrés dans le schéma suivant:

# Le cycle de développement d'un individu (Angiosperme):



Le cycle de vie d'une Angiosperme est caractérisé par la dominance du sporophyte (2n) alors que les gamétophytes (n), mâle (contenu du grain de pollen) et femelle (sac embryonnaire), sont devenus microscopiques.

Chez les Angiospermes, l'ontogenèse ou le développement comprend 2 étapes principales: le développement embryonnaire (embryogenèse) et le développement post-embryonnaire

Le développement embryonnaire (embryogenèse) est l'une des évènements de la formation de la graine

La graine est un organe de dissémination qui provient d'un ovule fécondé. Toute graine comporte des téguments qui jouent en général un rôle protecteur, elle contient nécessairement un embryon et des réserves.

**D'où provient-t-elle ?**

**Pollinisation et fécondation**

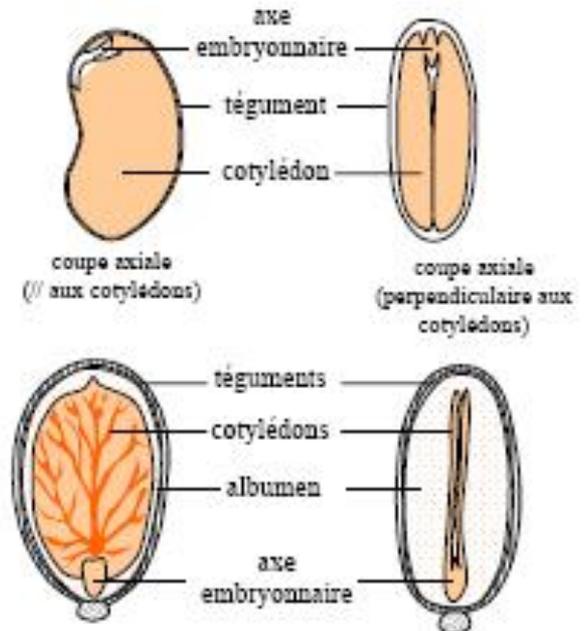
### Graines de Dicotylédones



**Le Haricot**



**Le Ricin**

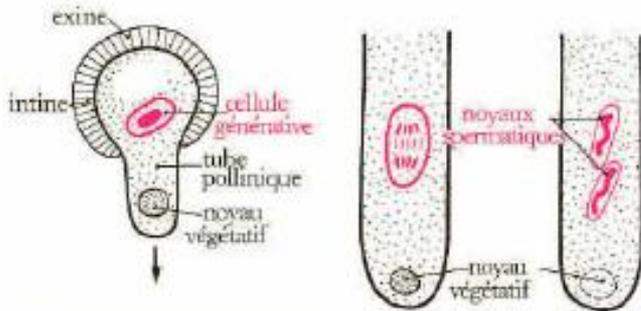


## Pollinisation :

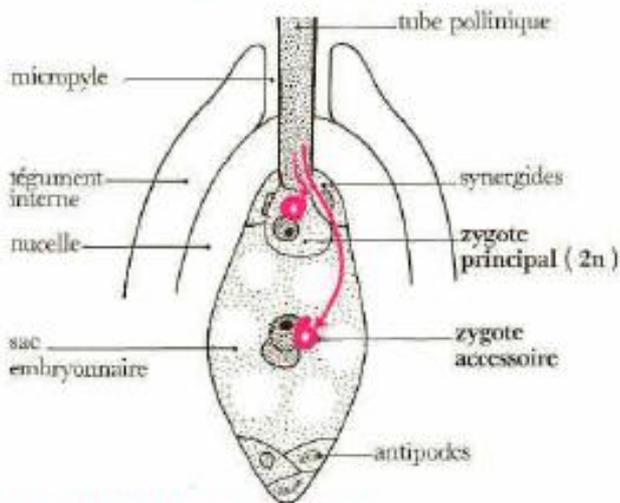
**La pollinisation:** transport des grains de pollen des étamines sur le stigmate par les insectes, par le vent,...

Autopollinisation : pollen de la même fleur ("hermaphrodisme")

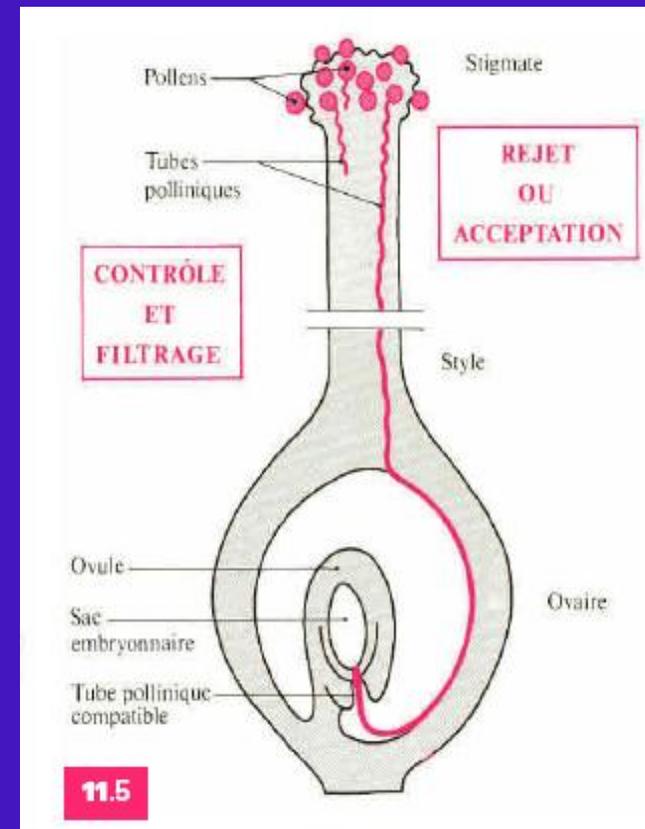
Pollinisation croisée : pollen d'une autre fleur



Sortie et allongement du tube pollinique



Double fécondation des Angiospermes



11.5

## Fécondation

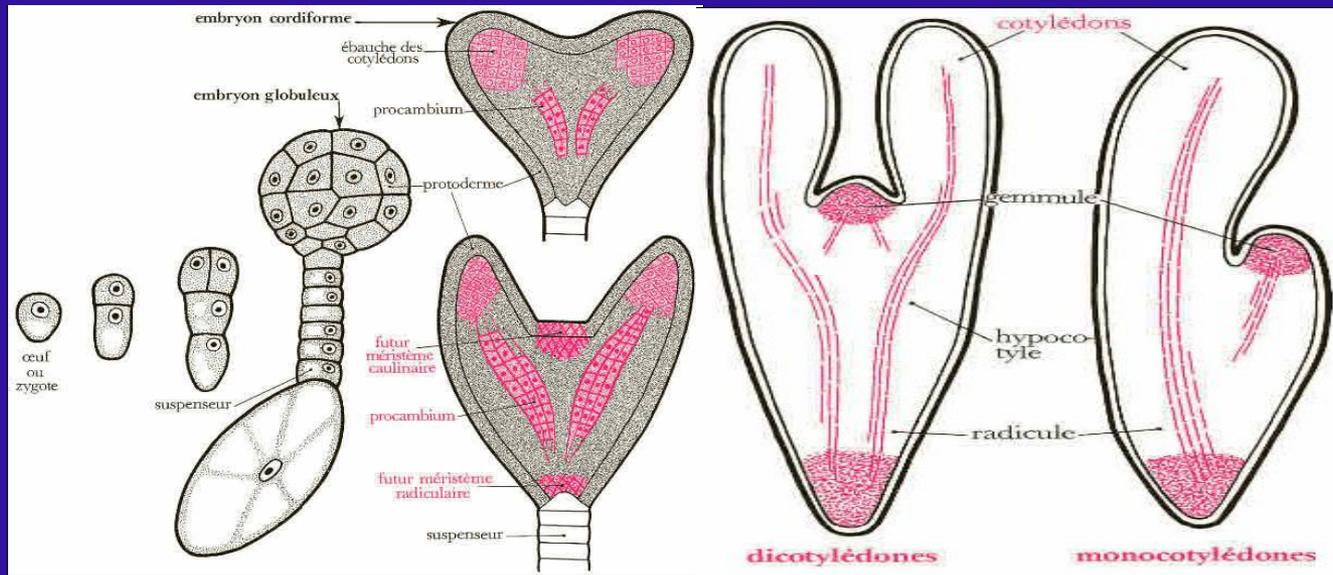
**La fécondation:** Chez les Angiospermes, elle est *double*: un des noyaux s'unit à l'oosphère et donne un **zygote principal** diploïde ; l'autre formera avec les 2 noyaux polaires, un **zygote accessoire**, en général triploïde.

Après cette double fécondation, le pistil reprend sa croissance et évolue en **fruit** tandis que l'ovule se transforme en **graine**.

## Devenir des deux zygotes:

Le zygote principal → subit une suite de segmentations (embryogenèse = formation de l'embryon).

Le zygote accessoire → donne une masse de cellules inorganisées, à rôle nourricier, albumen, qui entre en compétition avec l'embryon



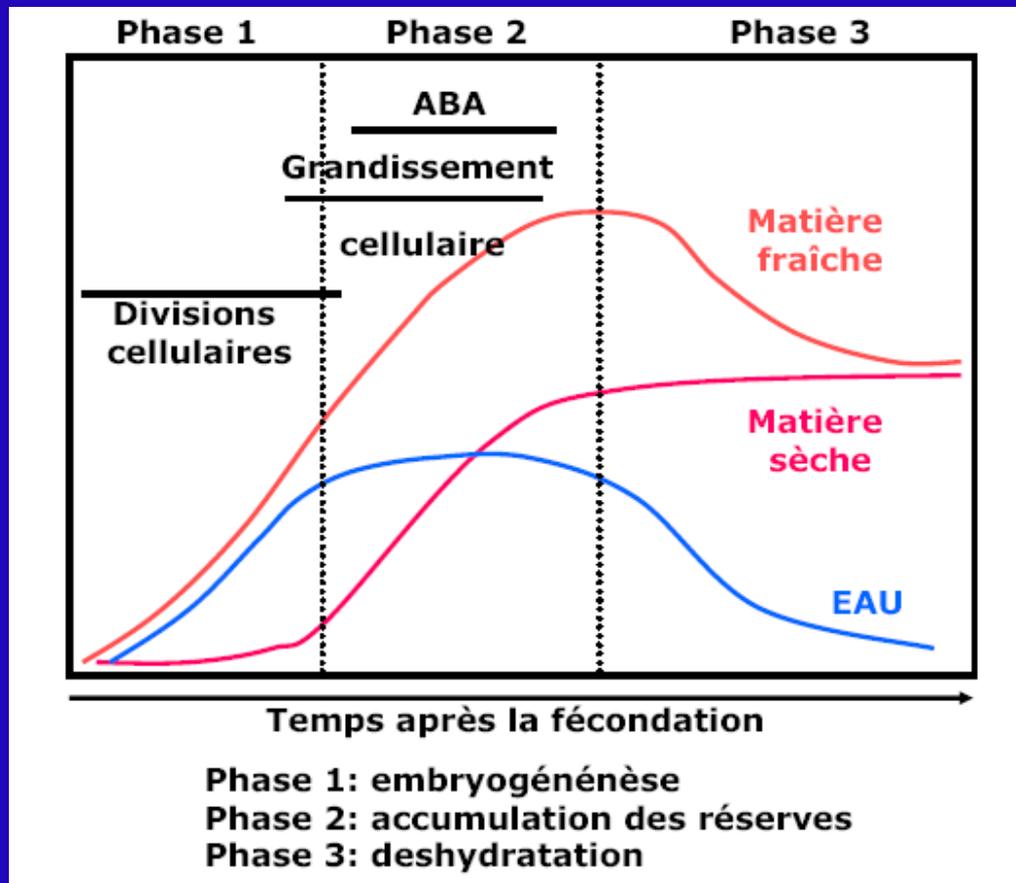
On distingue 3 types de graines:

- 1) *Graines à albumen, albuminées (Céréales)*
- 2) *Graines à cotylédon, exalbuminées (Légumineuses).*
- 3) *Graines à périsperme, le nucelle persiste (cafier).*

## Formation de la graine :

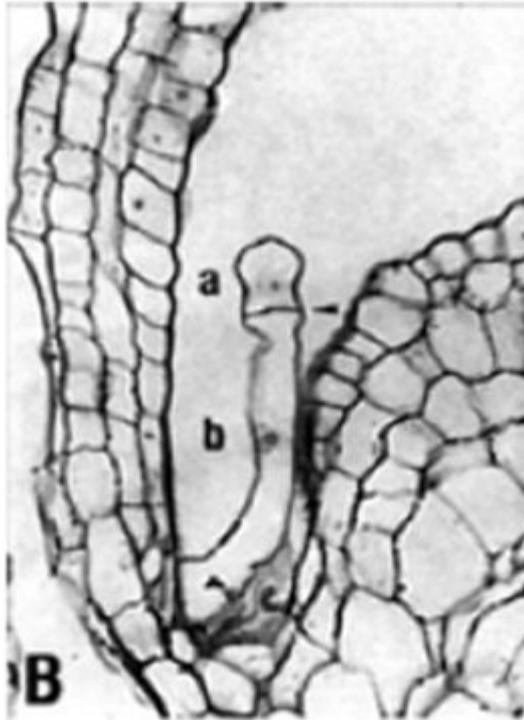
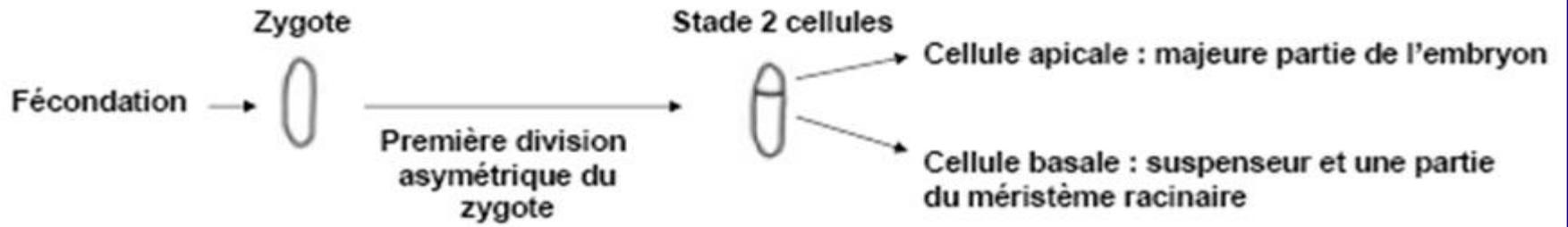
La formation des graines comporte 3 phases :

- 1) La formation de l'embryon (embryogenèse).
- 2) L'accumulation de réserves dans des tissus spécialisés (la maturation des graines) correspond à la fin de la différenciation de l'embryon et surtout à la phase d'accumulation des réserves.
- 3) Déshydratation

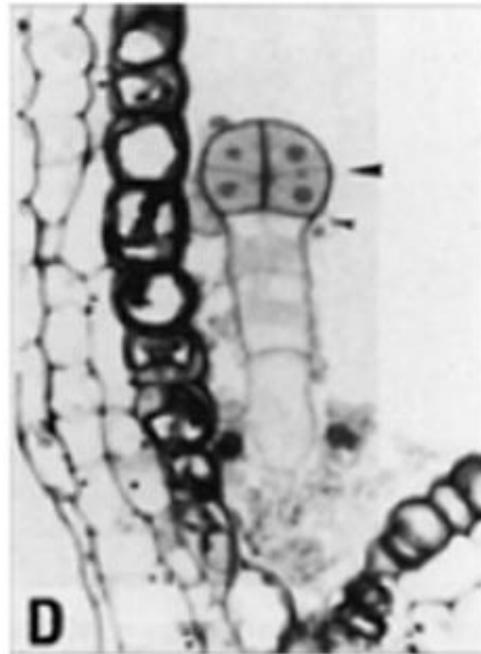
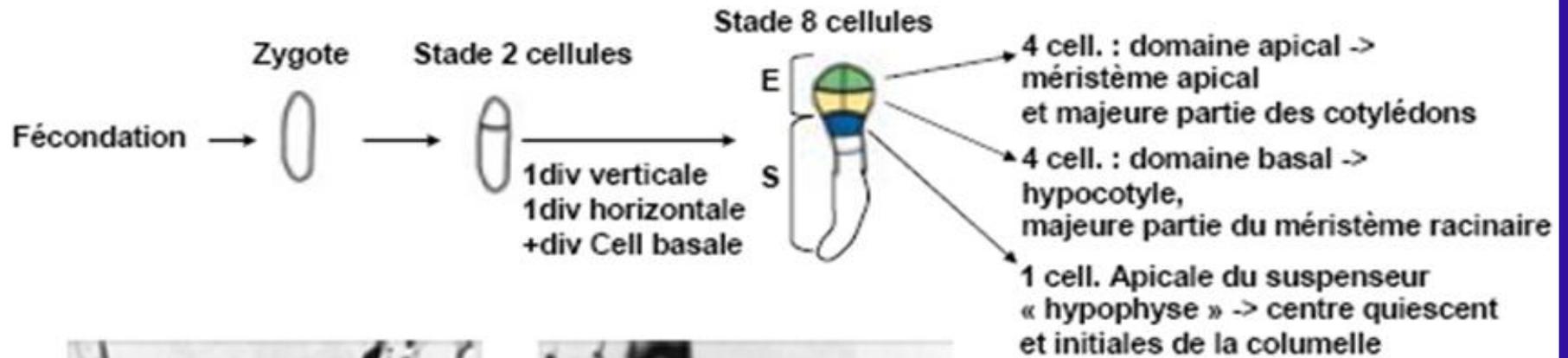


# 1. Embryogenèse :

Les étapes les plus importantes de l'embryogenèse chez *Arabidopsis* et de nombreux autres Angiospermes sont les suivantes:

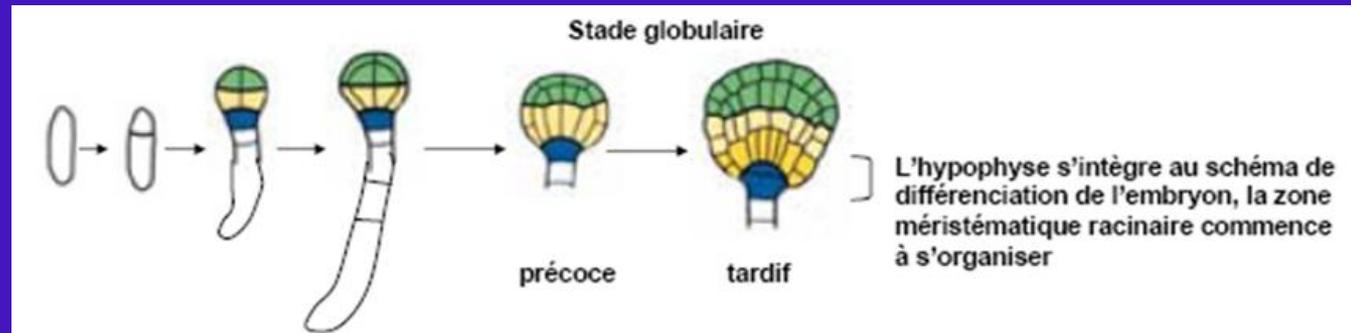
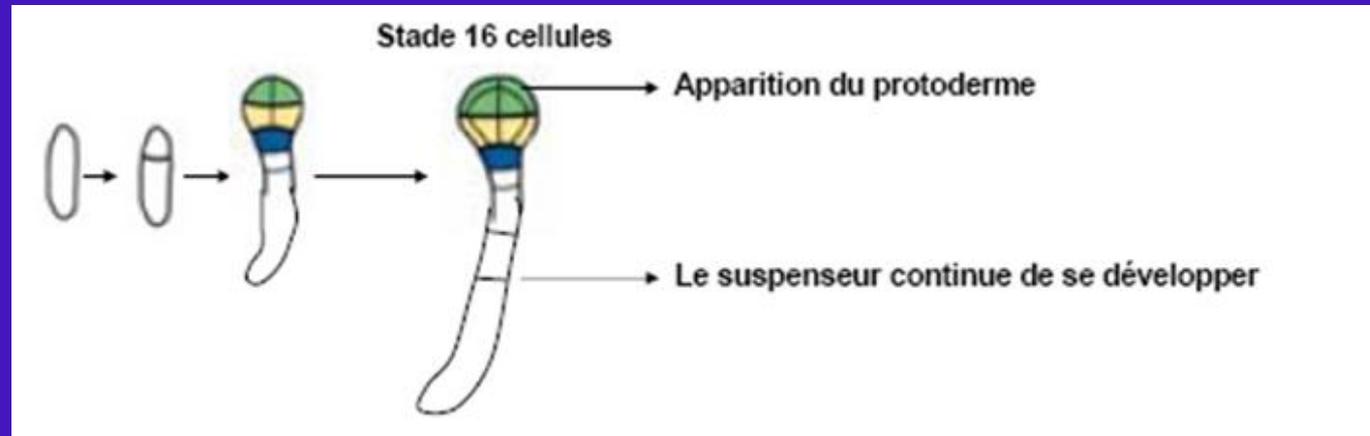


# 1. Embryogenèse :



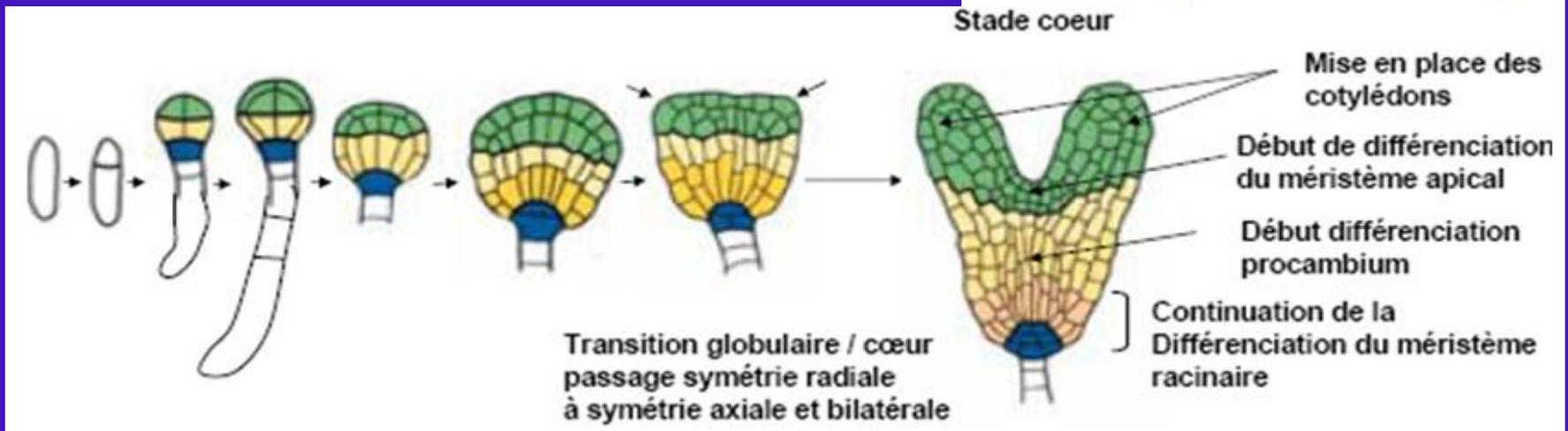
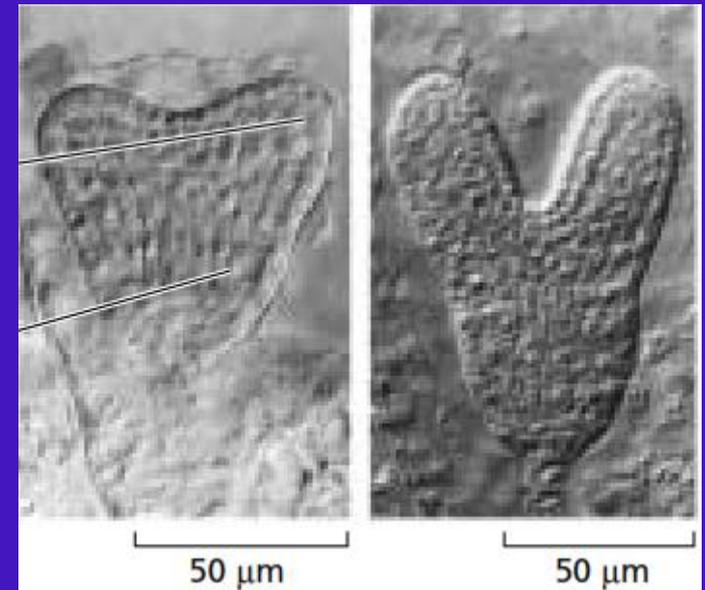
# 1. Embryogenèse :

**Stade globulaire:** Après la première division du zygote, la cellule apicale subit une série de divisions hautement ordonnées, générant un embryon globulaire à huit cellules (octant) 30 heures après la fécondation. Des divisions cellulaires précises supplémentaires augmentent le nombre de cellules dans la sphère.



## 1. Embryogenèse :

**Stade cœur:** Cette étape se forme par des divisions cellulaires rapides dans deux régions de chaque côté du futur apex caulinaire. Ces deux régions produisent des excroissances qui donneront plus tard naissance aux cotylédons et donneront à l'embryon une symétrie bilatérale.



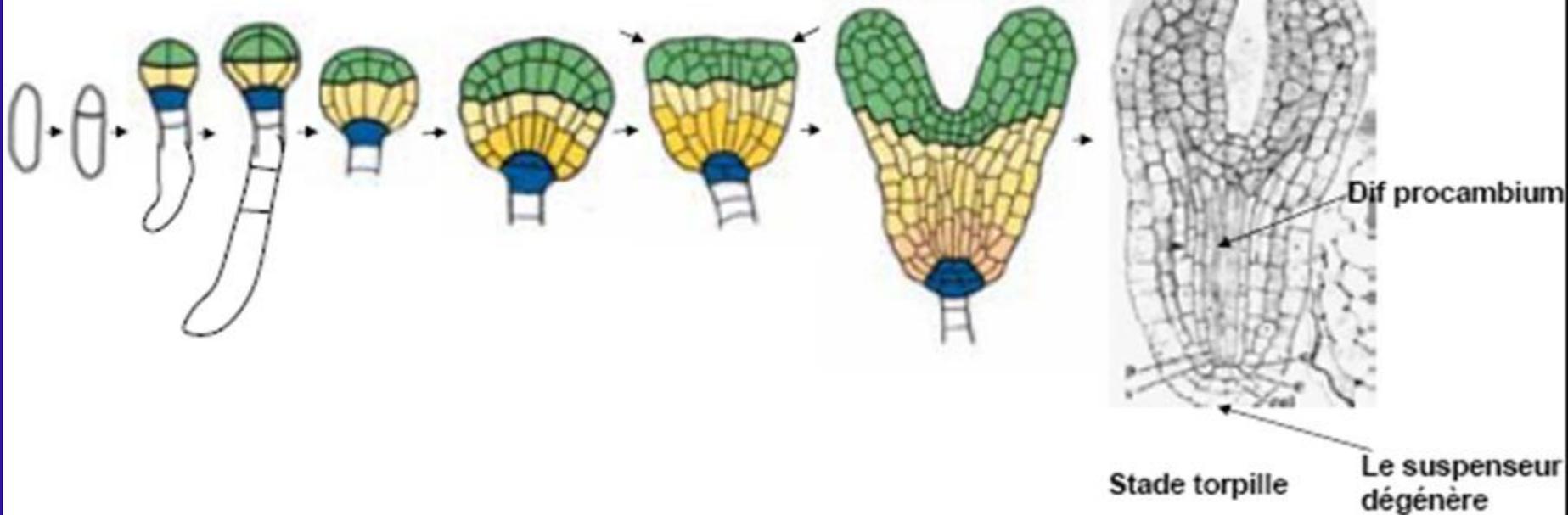
## 1. Embryogenèse :

### Stade torpille:

Cette étape résulte de l'élongation cellulaire à travers l'axe de l'embryon et du développement ultérieur des cotylédons.



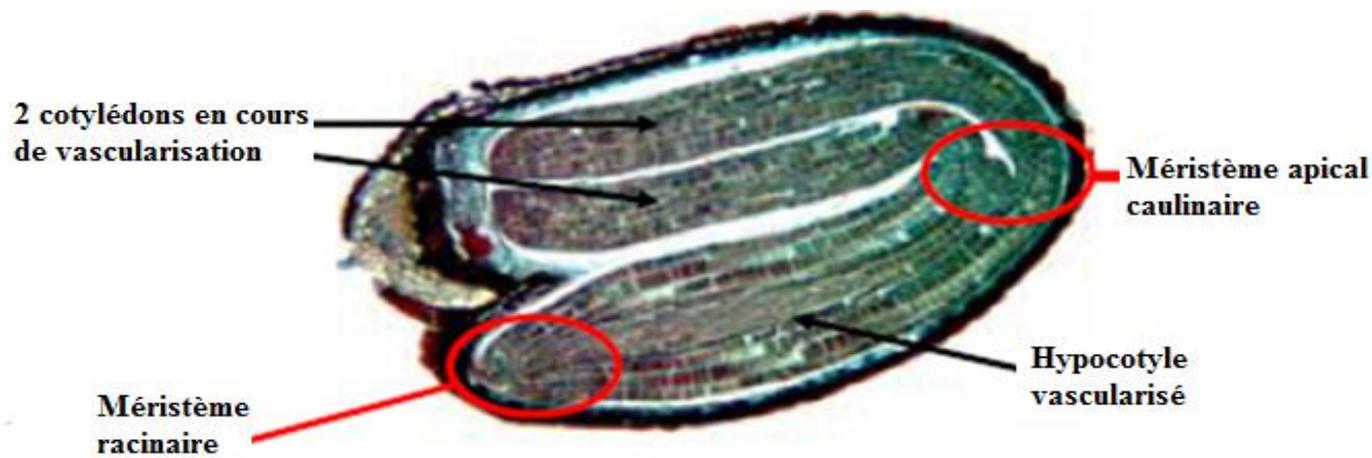
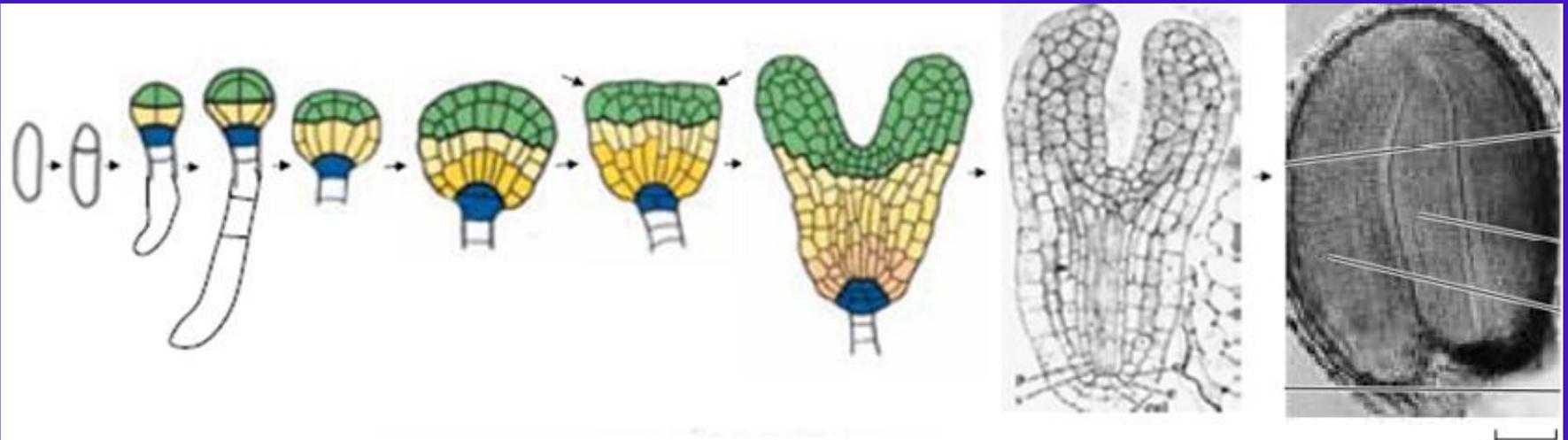
50  $\mu$ m



# 1. Embryogenèse :

## Stade cotylédonaire (maturation):

Vers la fin de l'embryogenèse, l'embryon et la graine entrent en dormance par la perte de l'eau et en devenant métaboliquement quiescents.



Stade cotylédonaire



Fin de l'embryogenèse

## 2. Accumulation et stockage des réserves :

Les réserves sont stockées sous forme de polysaccharides (amidon), de lipides (triacylglycérol) ou de protéines. La maturation des graines s'accompagne d'une augmentation de la masse de matière fraîche et de la respiration. L'augmentation de matière sèche est plus progressive et la graine commence à se déshydrater. Les chloroplastes riches en chlorophylle sont formés de façon transitoire dans l'embryon. Ils accumulent de l'amidon, se transforment en amyloplastés et dégénèrent lors de la dessiccation de la graine. Des réserves lipidiques et protéiques s'accumulent dès le début de la formation de la graine. Une faible quantité de sucre solubles est aussi accumulée.

La phase de maturation se termine à la fin de la dessiccation de la graine.

### a) Nature des réserves :

- **Glucides** : graines amyloacées, par ex. blé, maïs...accumulent de l'amidon (amyloplastés) ou des hémicellulose (parois)
- **Lipides** : graines oléagineuses, par ex. arachide, colza, ricin... accumulent des triglycérides (oléosomes)
- **Protéines** : graines protéagineuses, par ex. haricot, lupin... (grains d'aleurone ou vacuoles de stockage)

## b) Synthèse des réserves

### • Les protéines de réserve :

albumines, globulines, prolamines et glutéines → corps protéique ou grains d'aleurone (vacuoles de réserves bordées par une membrane).

### • Les lipides de réserve : triglycérides

acides gras (plastides puis RE) et glycérol (cytosol)

oléosomes, associé à des oléosines

### • Les glucides de réserve : l'amidon et les hémicelluloses

à partir de saccharose importé

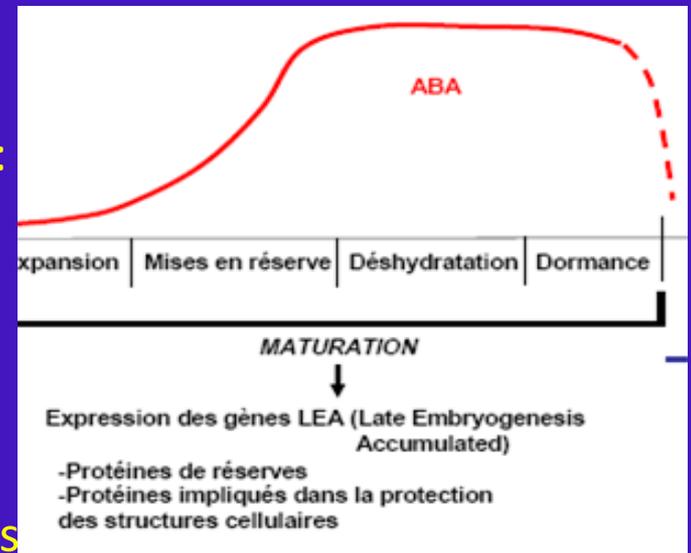
amidon (amyloplast) et hémicelluloses (parois)

## c) Contrôle hormonal de la maturation de la graine :

### Contrôle hormonal de la maturation de la graine par l'acide abscisique ABA

La teneur en ABA de l'embryon augmente fortement pendant la première moitié du développement embryonnaire (vers 15 jours) et chute ensuite, l'ABA :

- Stimule la croissance des jeunes embryons
- Stimule l'accumulation de réserves
- Augmente la tolérance à la dessiccation par :
  - L'induction de la synthèse de protéines LEA (*late embryogenesis abundant*).
  - L'accumulation de saccharose et d'oligosaccharides



- L'ABA inhibe aussi la germination précoce (cas des mutants vivipares = La perte de fonction de l'ABA empêche l'entrée en dormance et induit des germinations précoces)



Mutants vivipares de maïs germent sur le pied mère

### 3. Déshydratation ou postmaturation :

- Diminution de la teneur en eau jusque 10-15% (**résistance à la dégradation microbienne**)
- Réorganisations membranaires
- Diminution du métabolisme



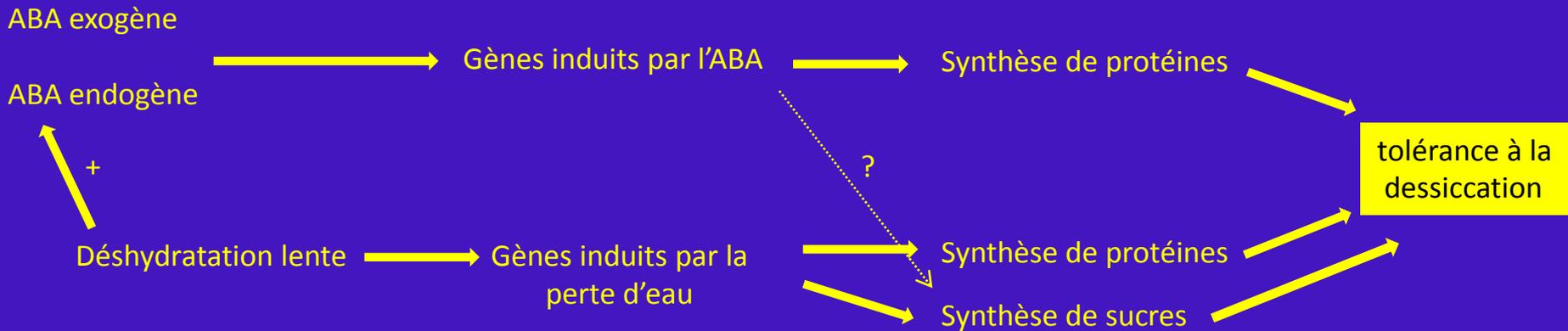
ce qui entraîne leur entrée en **(vie latente)**

## Acquisition de la tolérance à la dessiccation:

L'acquisition de la tolérance à la dessiccation est associée à la synthèse de protéines spécifiques (LEA) et à l'accumulation de saccharose et d'oligosaccharides (raffinose, stachyose, verbascose), lesquels jouent un rôle capital dans la protection des structures cellulaires lors de la déshydratation.

- Les sucres stabilisent les membranes.
- Les protéines LEA interviennent en protégeant les membranes cellulaires.

## Mécanismes possibles de l'acquisition de la tolérance à la dessiccation:



## **Dormance et quiescence :**

Graine dormante = inapte à reprendre la vie active (toutes activités sont suspendues, pas de division, d'expansion ou de différenciation) même si les conditions de l'environnement sont favorables.

Lorsque les conditions externes sont défavorables, les graines sont incapables de germer, et on dit qu'elles sont quiescentes,

Donc, contrairement aux graines dormantes, les graines quiescentes sont potentiellement capables de germer si les conditions de l'environnement sont favorables.

On distingue 2 catégories de dormance:



### **1- Dormance tégumentaire**

La semence intacte est incapable de germer à cause des enveloppes séminales qui s'oppose à la germination de l'embryon = inhibition tégumentaires.

On distingue plusieurs types d'inhibition tégumentaires :

Les téguments assurent normalement la protection des graines mais dans de nombreux cas ils peuvent empêcher la germination en jouant un rôle de :

Barrière physique = résistance mécanique, imperméabilité à l'eau, imperméabilité à l'O<sub>2</sub>.

Barrière chimique = piégeage de l'oxygène par des composés phénoliques, présence d'inhibiteurs de germination dans les téguments

## 2- Dormance embryonnaire :

L'embryon lui-même est incapable de germer, même débarrassé des diverses structures qui les entourent.

L'embryon peut être dormant au moment de la récolte de la semence on parle alors de dormance primaire.

Dans d'autres cas l'embryon des semences fraîchement récoltées est parfaitement capable de germer mais il perd cette aptitude sous l'influence de différents facteurs externes ( $T^{\circ}$ , privation d' $O_2$ ), on parle de dormance secondaire.

### • Levées de dormances

En général des facteurs environnementaux particuliers lèvent la dormance des graines.

- Le facteur le plus efficace est une période de froid de quelques jours à plusieurs semaines à des températures inférieures à  $5^{\circ}C$ .
- Pour beaucoup de plantes, la lumière peut aussi lever la dormance des graines.
- Pour faire germer une graine, on peut remplacer l'induction lumineuse par l'application d'acide gibbérellique. De même, des mutants qui ne synthétisent pas de gibbérelline produisent des graines incapables de sortir de leur dormance, ce qui n'est pas le cas des plants sauvages correspondants. On peut provoquer la germination de ces graines en les traitant par du GA3, ce qui confirme que les gibbérellines sont impliquées dans le contrôle de la dormance. Dans la plupart des cas, c'est en fait le rapport des concentrations en acide abscissique et en gibbérellines qui contrôle la dormance et la germination des graines.

Au plan expérimental, différents traitements peuvent lever la dormance :

- Traitement par le froid = Stratification : le traitement généralement utilisé, consiste à placer les graines dans du sable en couches superposées à basses températures. Dans les conditions naturelles c'est le froid de l'hiver qui réalise la levée de dormance
- Traitement par la lumière : avec le froid, la lumière est le facteur de l'environnement actif, avec une portée cependant moins importante que le froid.

### Levée de dormance par la lumière

Les semences sont classées en 3 catégories :

- 1- Semences à photosensibilité positive (70% ).
- 2- Semences à photosensibilité négative (25% ).
- 3- Semences non photosensibles (5% ).

### Mécanisme d'action de la lumière:

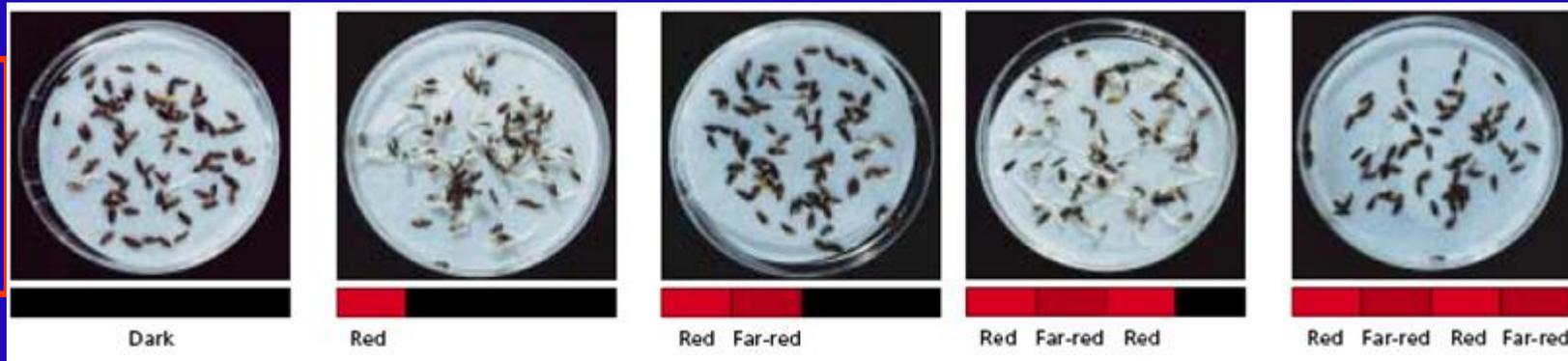
Les radiations rouges ont un rôle dans la germination des semences à phot +ive.

Les radiations rouges clair sont stimulatrices

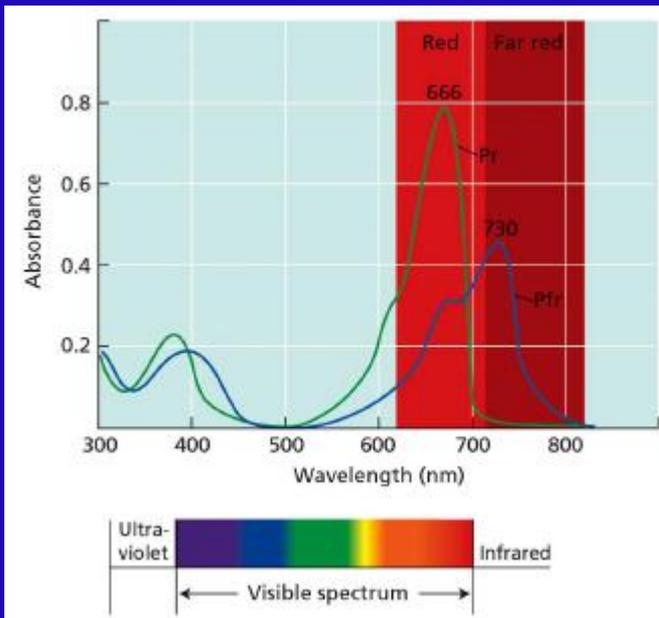
Les radiations rouges sombres sont inhibitrices

Les radiations RC et RS sont mutuellement antagonistes c.à.d Le RS annule l'effet du RC

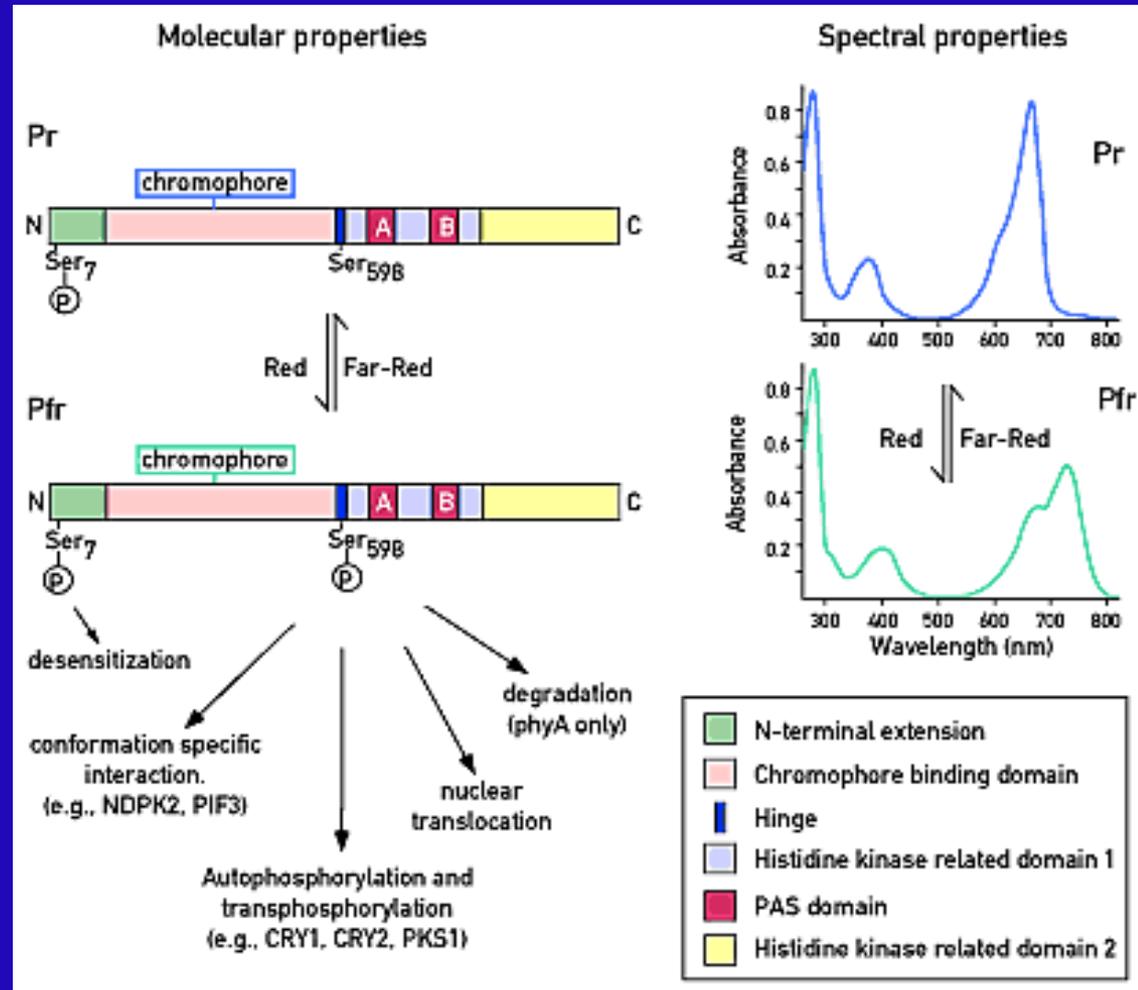
L'effet de la lumière sur la germination de graines de la Laitue



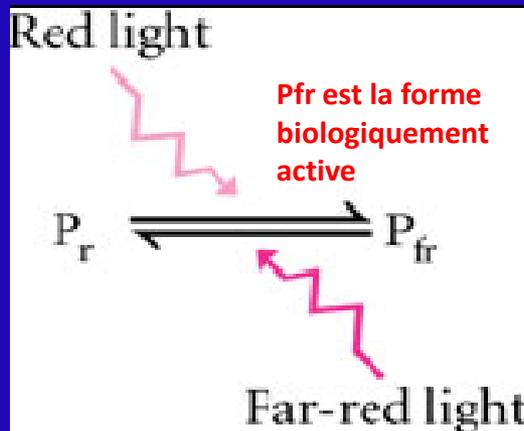
La lumière agit grâce à 1 pigment appelé phytochrome, qui existe sous 2 formes  $P_r$  et  $P_{fr}$ .  $P_r$  absorbe les radiations rouges claires et  $P_{fr}$  absorbe les radiations rouges sombres.



Spectres d'action



Les 2 formes sont photoconvertibles:



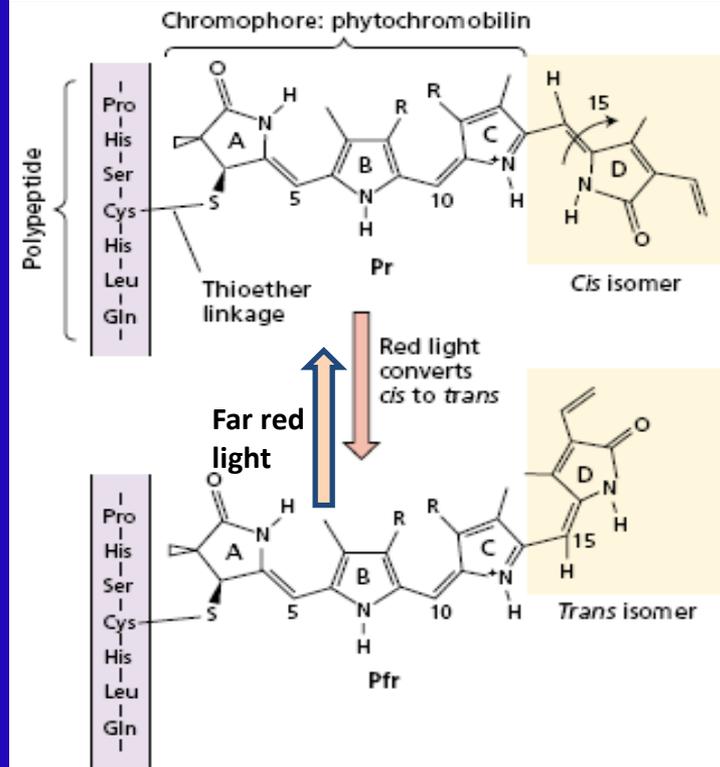
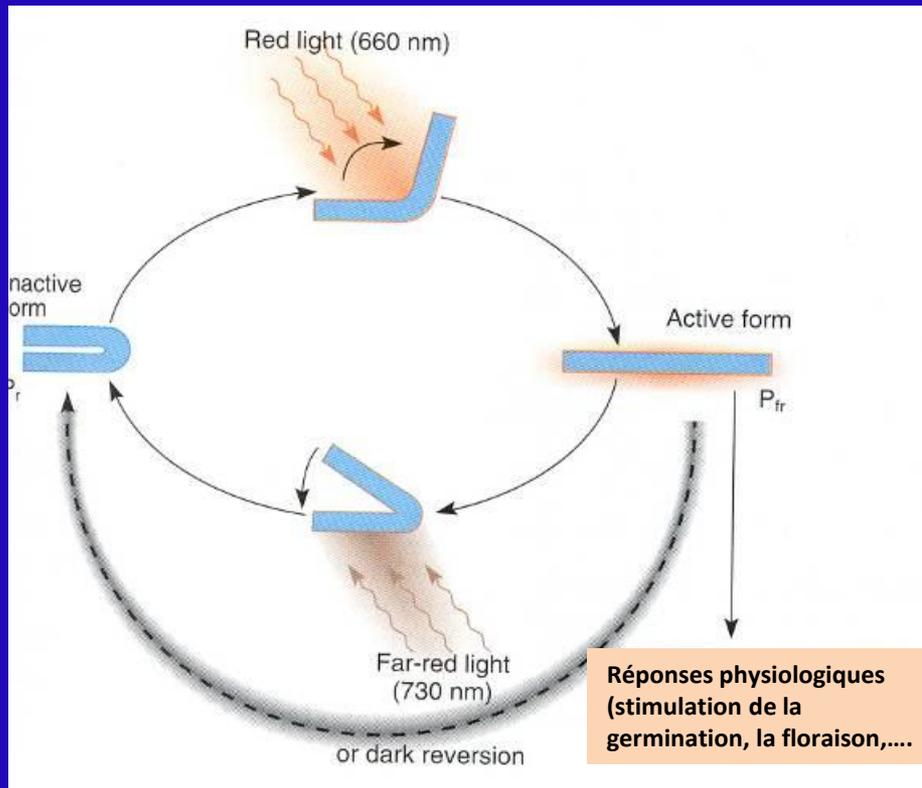
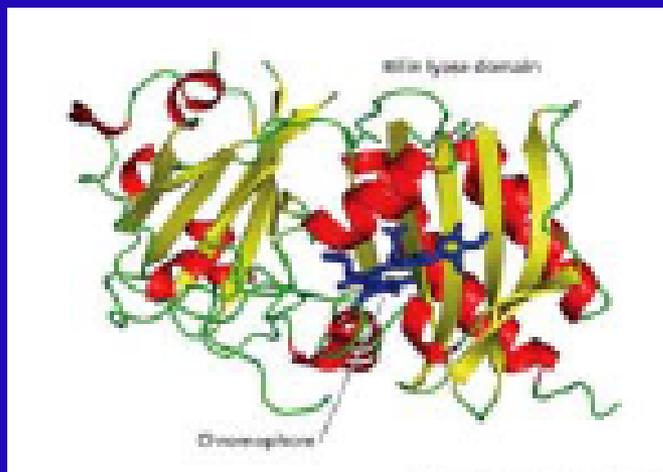


FIGURE 17.4 Structure of the Pr and Pfr forms of the chromophore (phytochromobilin) and the peptide region bound to the chromophore through a thioether linkage. The chromophore undergoes a *cis-trans* isomerization at carbon 15 in response to red and far-red light. (After Andel et al. 1997.)



## LE DEVELOPPEMENT VEGETATIF:

Le développement (en physiologie végétale) étudie toutes les modifications **qualitatives** et **quantitatives** chez une plante (de la fécondation à la mort).

- Les modifications quantitatives représente **la croissance** (les modifications irréversibles se produisant au cours du temps). On a, par exemple, l'augmentation de taille, de volume, de masse.
- Les modifications qualitatives se traduisent par l'acquisition de nouvelles propriétés **morphologiques** et **fonctionnelles** dont l'ensemble constitue **la différenciation**.

Développement = croissance + différenciation

Chez les végétaux supérieurs, Le développement implique 3 processus dans l'ordre de leur mise en œuvre :

provient au niveau cellulaire à la fois

- Une prolifération cellulaire augmentation du nombre de cellules (croissance par mérése de meristein : partager).
- Une augmentation des dimensions des cellules préexistantes (croissance par auxèse de anxein : croître).
- Une différenciation des cellules qui prennent des caractères morphologiques et physiologiques particuliers, différents suivant les tissus.

Chez les végétaux, la mérése et l'auxèse sont le + souvent séparées dans le temps et dans l'espace et comme la différenciation ne s'opère qu'au 2<sup>ème</sup> stade, les méristèmes subsistent pdt toute la vie du végétal, **les plantes ont une embryogénie indéfinie → différence fondamentale avec les animaux**

## **Mérèse, auxèse et différenciation :**

**La mérèse** consiste en divisions cellulaires, ou mitoses, qui s'opèrent ds des régions localisées, les méristèmes, sauf ds la feuille où elles se répartissent sur toute la surface du limbe → organe à embryogénie définie (croissance limitée ds le temps).

**L'auxèse** est :

- Parfois isodiamétrique (parenchyme de la feuille ou des organes de réserve).
- + généralement longitudinale (élongation) ou radiale (croissance en épaisseur).

**La différenciation** porte surtout sur:

- Structure de la paroi (dépôts de cellulose, de lignine, de subérine, etc.,.....)
- Le pouvoir de synthèse (tissus assimilateurs, sécréteurs, de réserve)
- Acquisition de potentialités physiologiques nouvelles (virage floral)

## **Le cycle cellulaire :**

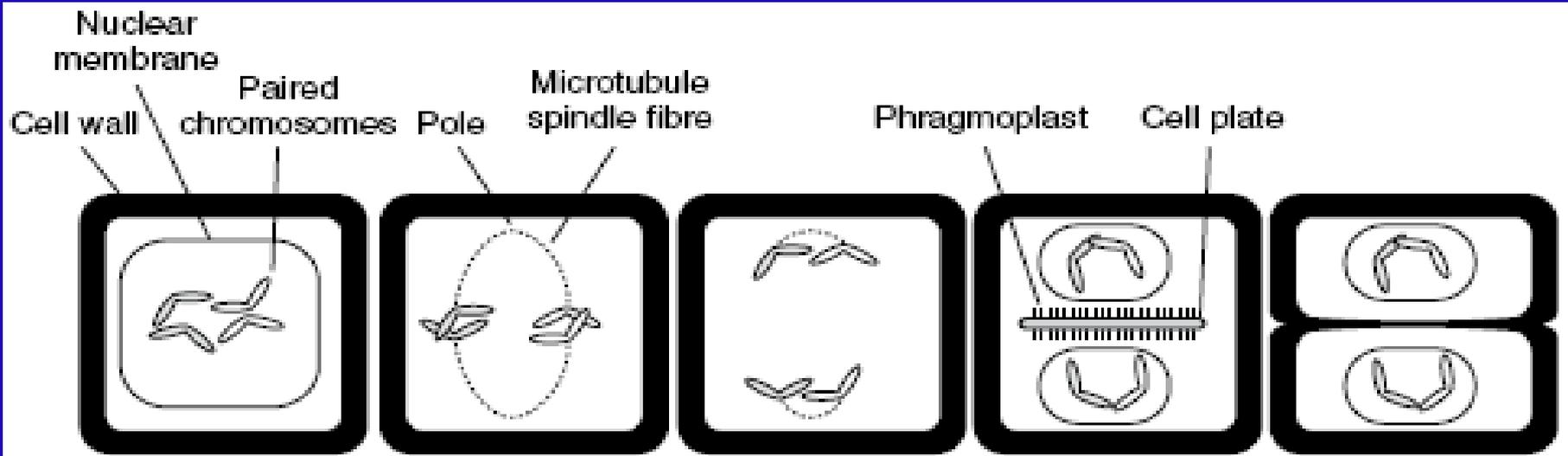
Il comporte 2 étapes de durée très inégales, l'interphase et la mitose.

La mitose se déroule en 4 étapes : la prophase, la métaphase, l'anaphase et la télophase

L'interphase est-elle-même divisée en plusieurs phases:

- G1 (présynthèse)
- S (synthèse) réplique d'ADN, grandissement cellulaire, grandissement et division des organites, synthèse d'autres composants cellulaires (les cellules différenciées sont bloquées en cette phase = pas de division)
- G2 (postsynthèse)

La durée des phases S, G2 et M sont relativement constantes, mais pour G1 est très longue et peut durer indéfiniment. La majorité des cellules différenciées sont bloquées en G1. le cycle cellulaire peut être bloqué aussi en G2 (cellules du péricycle).



Prophase

Metaphase

Anaphase

Telophase

Cytokinesis

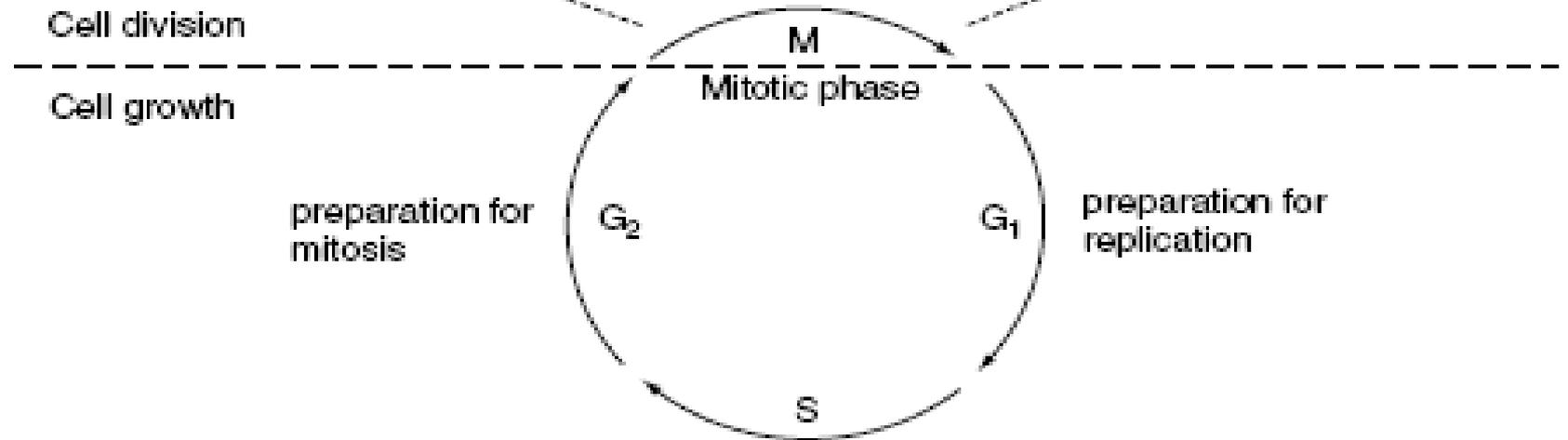
Cell division

Cell growth

preparation for mitosis

preparation for replication

Chromosome replication

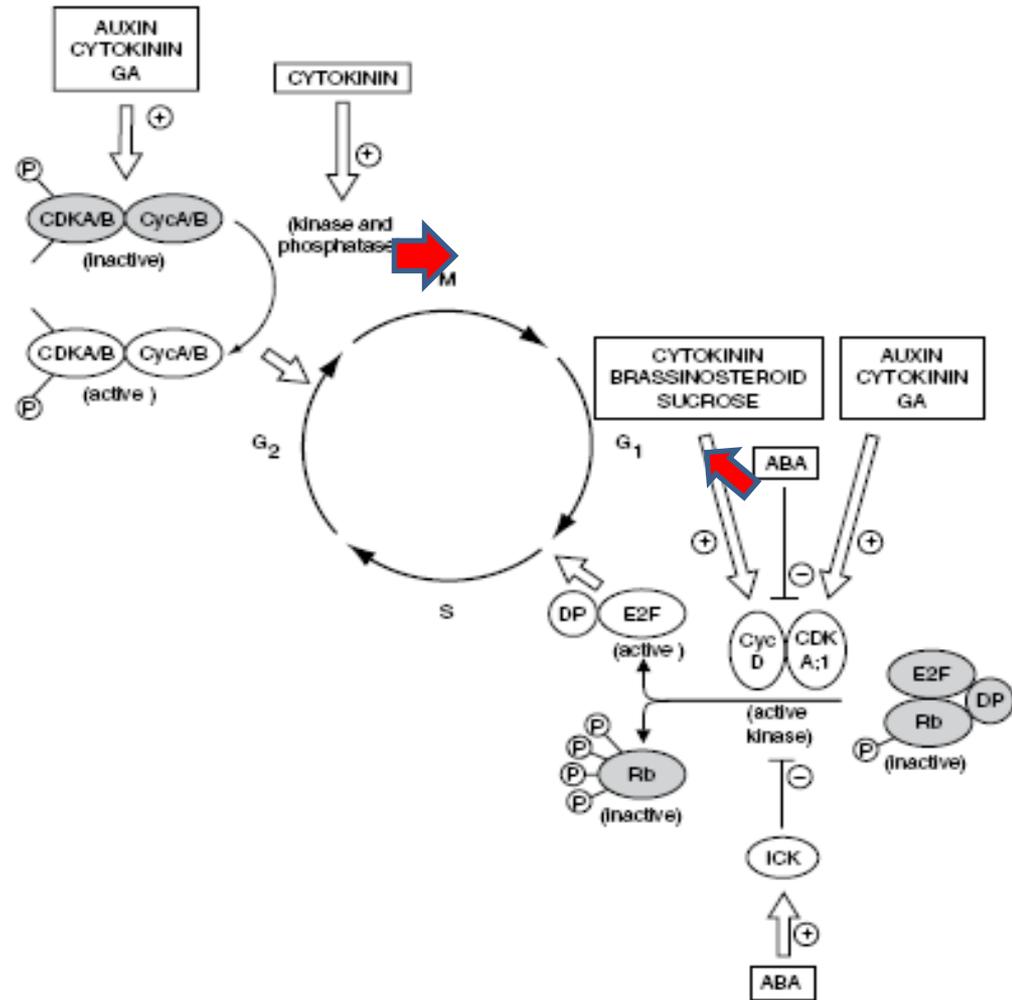


## Régulation du cycle cellulaire:

La progression du cycle cellulaire est contrôlée par une série de protéines interactives, appelées cyclins (Cycs) et cyclin-dépendent kinases (CDKs), dont leurs activités sont souvent contrôlées par phosphorylation et déphosphorylation.

2 points clés de contrôle ont été identifiés chez les végétaux: Le 1<sup>er</sup> lors de la transition G<sub>1</sub> - S et le 2<sup>ème</sup> contrôle lors de la transition G<sub>2</sub> - M.

**Fig. 8.4** The regulation of the plant cell cycle. There are two checkpoints in the plant cell cycle at the G<sub>1</sub>/S and G<sub>2</sub>/M transitions. The transition from G<sub>1</sub> to S requires the protein E2F to be in the free, active state – if bound to Rb (retinoblastoma protein) it is inactive. Binding of E2F to Rb is controlled by the phosphorylation status of Rb which, in turn, is controlled by the activity of kinases and phosphatases. In the presence of auxin, cytokinin, gibberellic acid, brassinosteroids and sucrose, a kinase activity is stimulated. This hyperphosphorylates Rb and causes it to dissociate from E2F. The kinase can be inhibited by ABA. Transition from G<sub>2</sub> to M is also governed by the phosphorylation status of specific amino acids in proteins forming a regulatory complex which, in turn, is regulated by cytokinin. Modified from Stals & Inzé (2001) and Rossi & Varotto (2002).



## Le développement végétatif de l'appareil aérien:

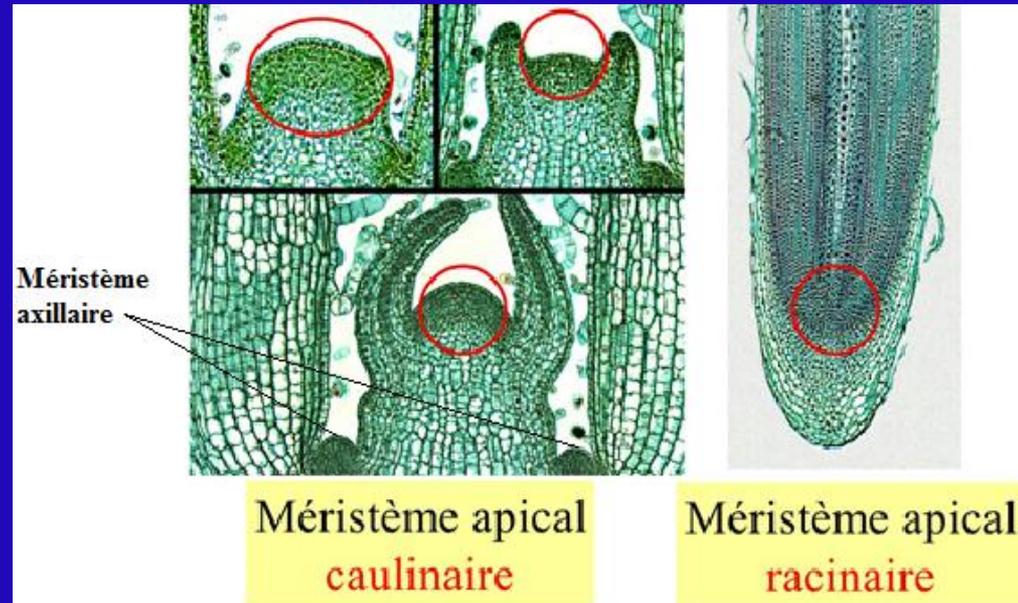
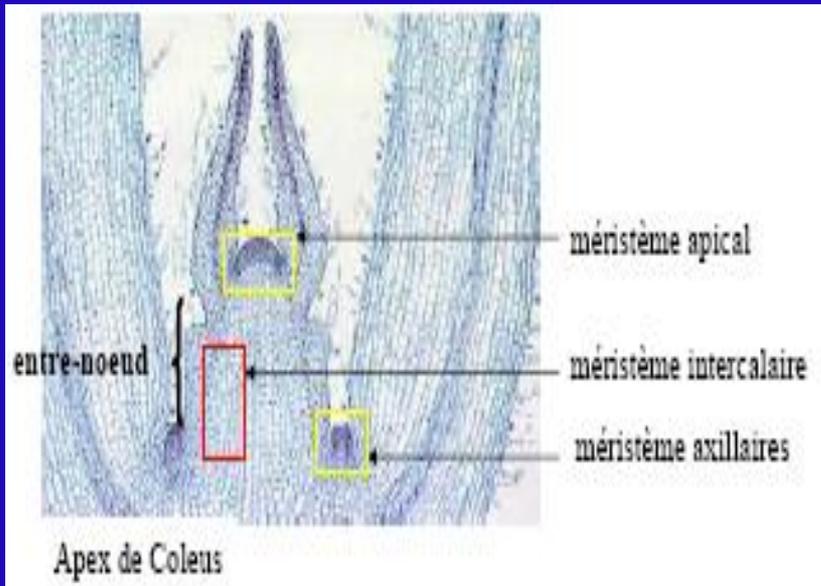
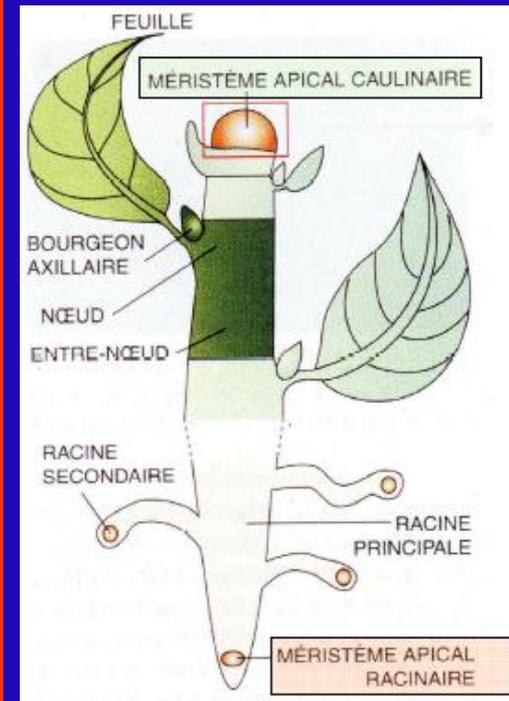
### Méristèmes et production d'organes aériens:

Chez les végétaux, Le développement dépend de petits massifs de cellules indifférenciées qui conservent une capacité à se diviser, les méristèmes et qui sont responsables de la formation des cellules à l'origine de l'édification de la plante adulte.

Pendant l'embryogénèse, 2 types de méristème primaire sont formés:

- Le méristème apical caulinaire qui produit des tiges, des feuilles, contrôle la disposition spatiale des feuilles et des bourgeons sur la tige (phyllotaxie).
- Le méristème apical racinaire qui produit le système racinaire.

Durant le développement post-embryonnaire, la plupart des végétaux développent une variété de méristème secondaire (méristèmes axillaires, méristèmes adventifs, méristèmes latéraux, méristèmes intercalaires, méristèmes floraux,.....)



**Les méristèmes axillaires** sont issus du méristème caulinaire et sont situés à l'aisselle des feuilles. Ils sont souvent au repos (dominance apicale) et constituent pour la plante une réserve de méristèmes en cas de blessure, décapitation, du méristème apical.

**Les méristèmes adventifs** correspondent à des néoformations résultant d'une phase de dédifférenciation puis de redifférenciation de tissu déjà différenciés (limbe foliaire). Ils peuvent se mettre en place spontanément sur certains tissus de plantes intactes mais sont plus fréquents en réponse à des blessures ou lors de la culture in vitro de végétaux où ils représentent une voie de régénération de tissus déjà différenciés.

**Les méristèmes intercalaires** se trouvent à l'intérieur de l'organe, le plus souvent au niveau de la base. Les méristèmes intercalaires des feuilles et des tiges des graminées leurs permettent de poursuivre leurs croissance après gazonnage.

**Les méristèmes racinaires latéraux** ne sont pas issus du méristème apical racinaire mais d'une différenciation de tissus déjà en place.

**les méristèmes latéraux ou cambium** une deuxième catégorie de méristème à propriétés complètement différentes assure la croissance en épaisseur en particulier des espèces pérennes et des arbres. Ce sont des anneaux de quelques cellules d'épaisseur à l'intérieur des tiges et des troncs. Les cellules issues de ces méristèmes se différencient en phloème à l'extérieur et en xylème à l'intérieur de l'axe vertical.

Ces cambium comprennent deux types cellulaires :

1. longues cellules à l'origine des vaisseaux et des fibres du bois ce sont les initiales fusiformes
2. cellules de type isodiamétrique à l'origine des rayons ligneux (parenchyme ligneux du bois) : initiales radiales.

Les méristèmes apicaux caulinaires sont organogènes ils engendrent des tiges et des feuilles puis des fleurs lors de la transition méristème végétatif – méristème floral.

Les méristèmes latéraux sont seulement histogènes ils produisent de nouveaux tissus.

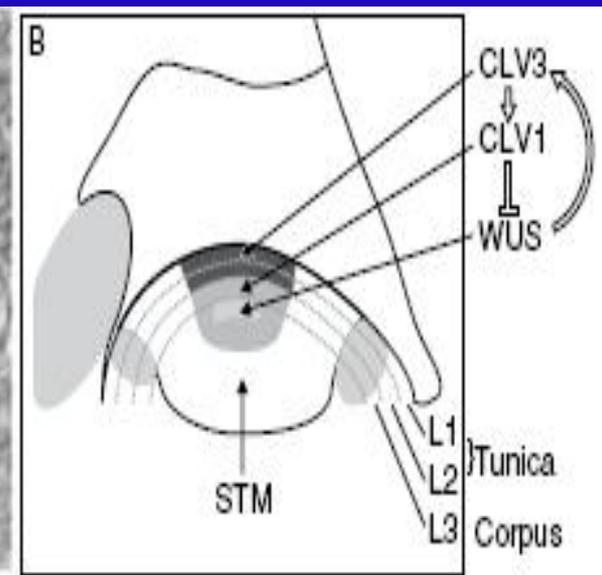
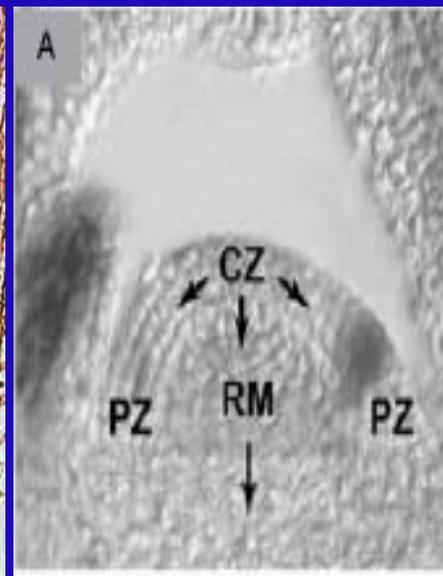
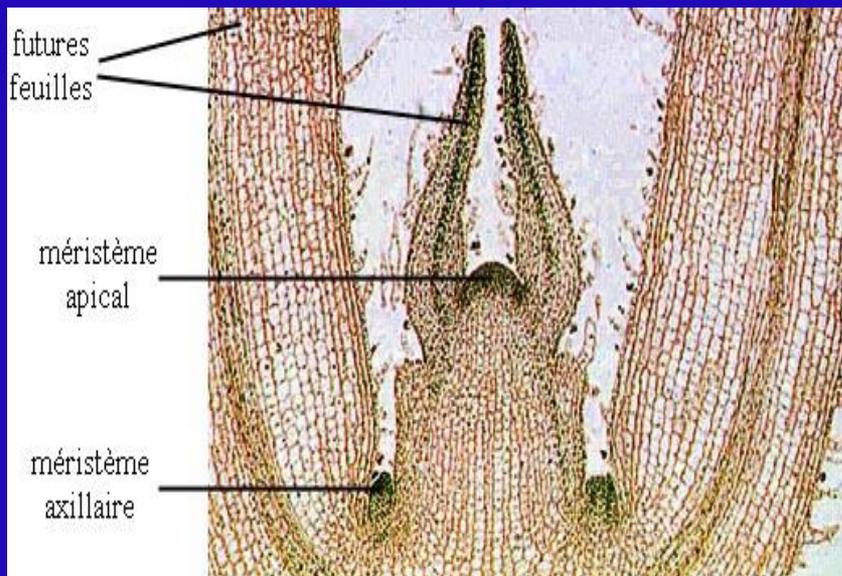
## Structure et fonctionnement du méristème apical caulinaire

### Structure:

Le méristème se situe à l'apex des tiges et comprend différents zones qui se distinguent selon la structure des cellules et surtout leur devenir. D'une manière générale, les cellules méristématiques sont de petites tailles, cubiques, avec un fort rapport nucléo-cytoplasmique et peu ou pas de vacuoles.

- Zone centrale : cellules relativement grandes, avec quelques vacuoles se divisant moins que les cellules de la zone périphérique, maintiennent une population de cellules indéterminées
- Zone périphérique : cellules plus petites se divisant rapidement et conduisant à la formation de primordia foliaires
- Zone support ou (rib. zone) à la base du méristème fournissent les tissus de la tige.

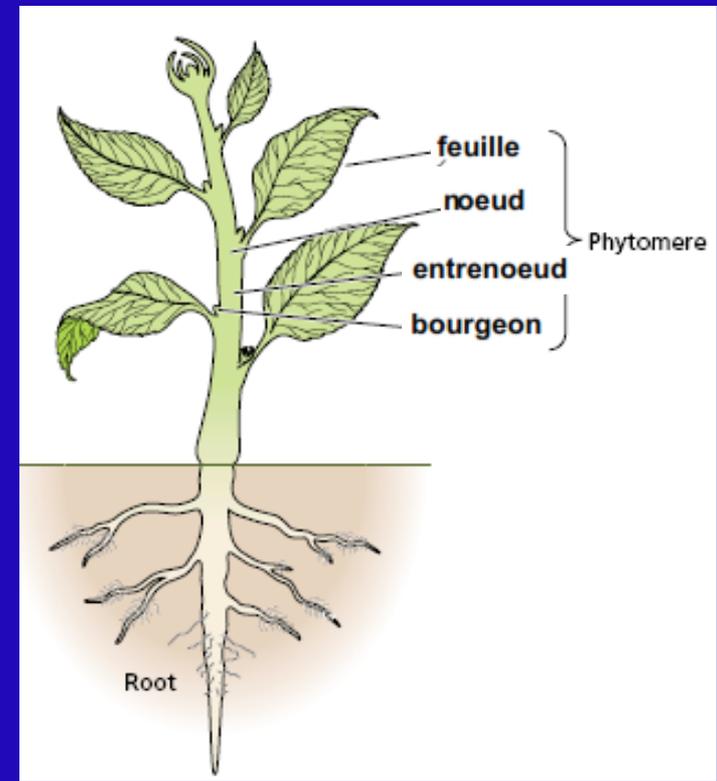
On distingue aussi des couches cellulaires au sein du méristème, 3 couches chez les dicotylédones (L1, L2 et L3) et 2 couches chez les monocotylédones (L1 et L2). les cellules des couches L1 et L2 (=tunica) se divisent de façon perpendiculaire à la surface (divisions anticlinales) de façon à accroître la surface du méristème. Par contre, les cellules de la couche L3 (corpus) se divisent d'une manière aléatoire



## Fonctionnement:

On distingue différents types de méristème caulinaire suivant leur origine, la nature des organes latéraux produits et s'ils ont une croissance définie (limite génétiquement programmée de leur croissance) ou indéfinie (pas de limite définie de leur croissance).

**Le méristème apical caulinaire** a une croissance indéfinie. Il produit des phytomères de manière continue si les conditions environnementales sont favorables et en absence de stimulus de floraison. Le **phytomère** est une unité de développement constituée d'un ou plusieurs feuilles, un nœud, l'entre nœud, et un ou plusieurs bourgeons axillaires.



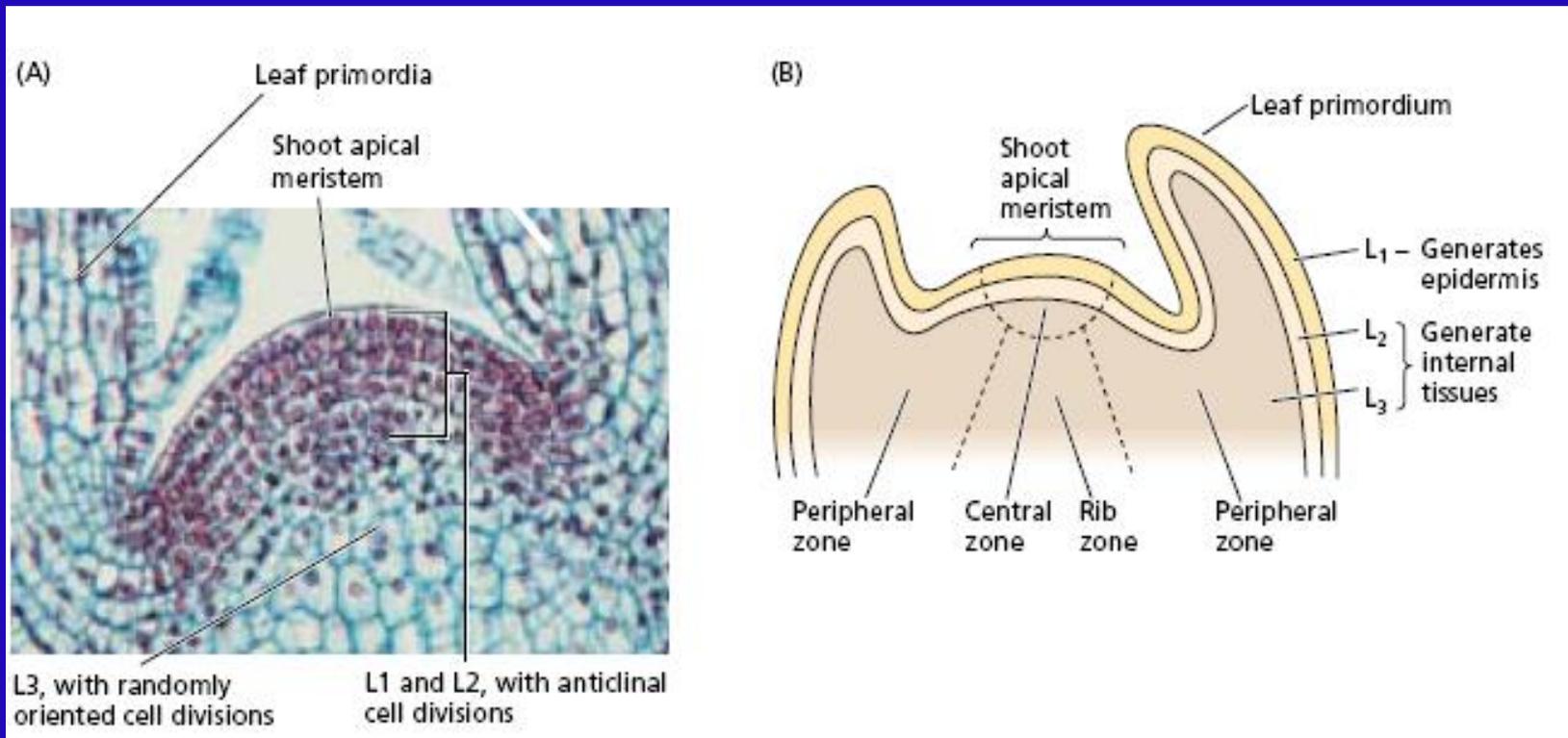
**Le bourgeon axillaire** est un méristème secondaire, qui à l'état végétatif, possède la même structure et le même potentiel de développement que le méristème apical.

Les méristèmes végétatifs peuvent être convertis en méristèmes floraux lors de la floraison.

**Les méristèmes floraux** diffèrent des méristèmes végétatifs par le fait qu'ils produisent des organes floraux au lieu des feuilles (sépales, pétales, étamines et carpelles) et ils ont une croissance définie (toutes activités méristématiques cessent après la production des derniers organes floraux).

En plusieurs cas, les méristèmes végétatifs ne sont pas directement convertis en méristèmes floraux, ils sont premièrement transformés en méristème d'inflorescence. **Le méristème d'inflorescence** différent de méristème floral par:

- Il produit les bractées et les méristèmes floraux au lieu des sépales, pétales, étamines, et des ovules.
- Le méristème d'inflorescence peut être défini ou indéfini suivant l'espèce.

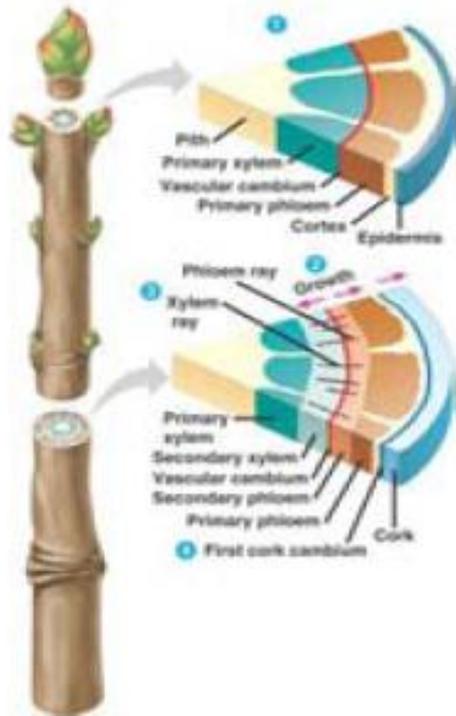


## La croissance primaire et secondaire des tiges:

Croissance primaire = croissance en longueur à partir du méristème du bourgeon terminal.

N.B. si un bourgeon latéral se développe, il devient le bourgeon terminal de la tige qu'il fabrique

Croissance secondaire = croissance en épaisseur de la tige (se fait surtout à partir d'un méristème cylindrique appelé cambium vasculaire)



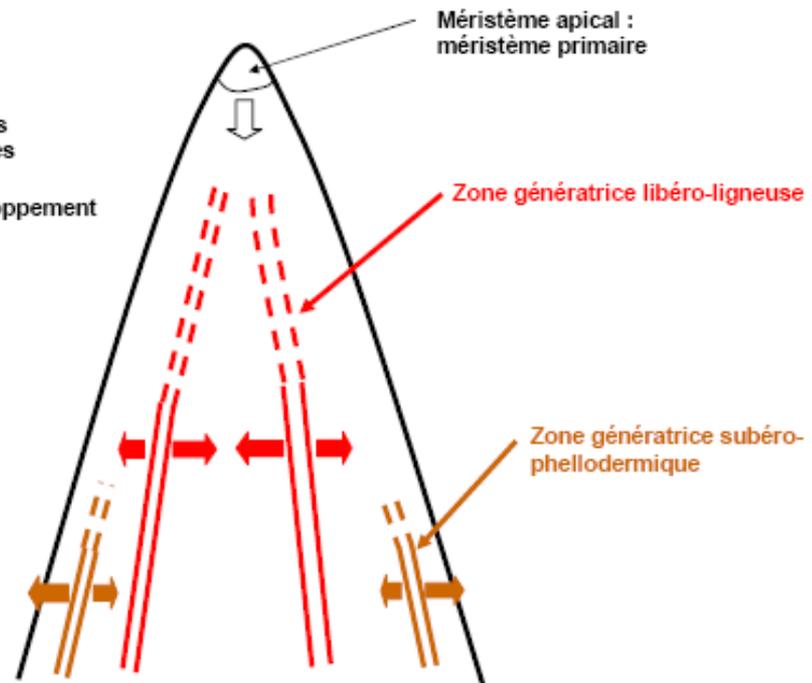
Croissance I<sup>ère</sup> et II<sup>ème</sup> dans un rameau de 2 ans

➔ Croissance en épaisseur : le cambium

*Développement végétatif aérien*

Les cambiums sont des méristèmes secondaires

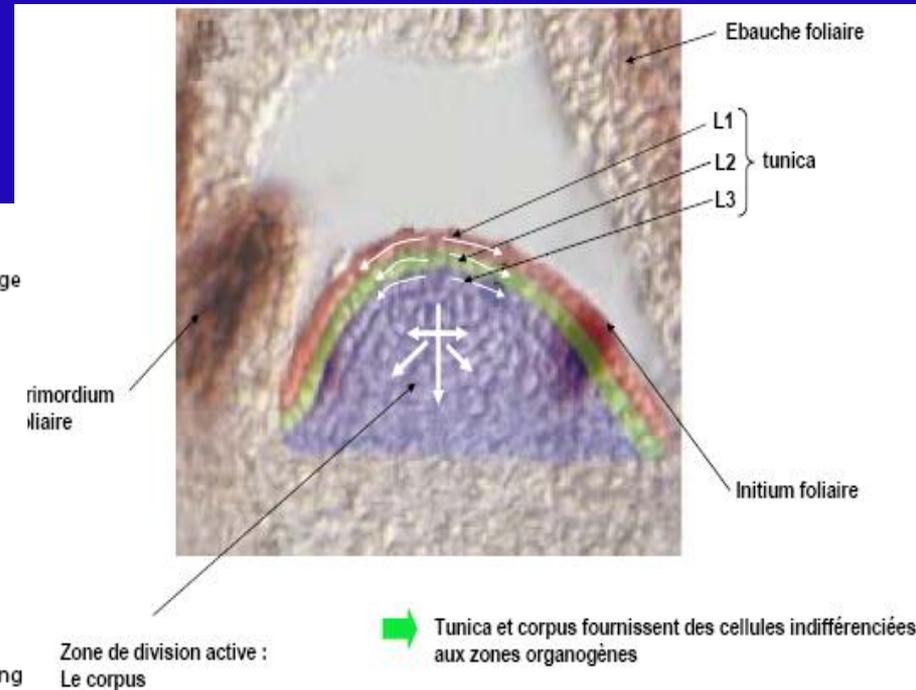
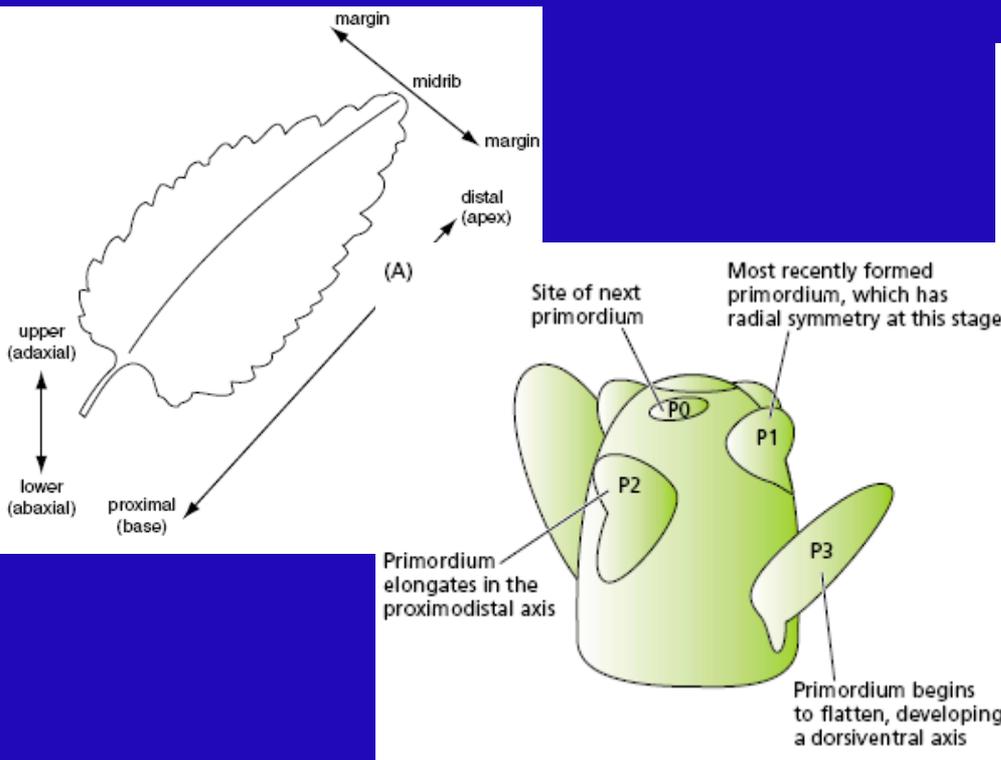
Ils permettent le développement en épaisseur des axes

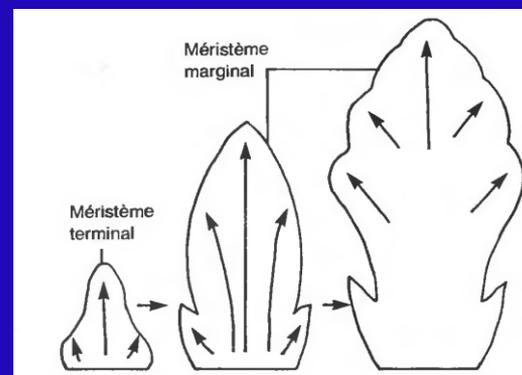
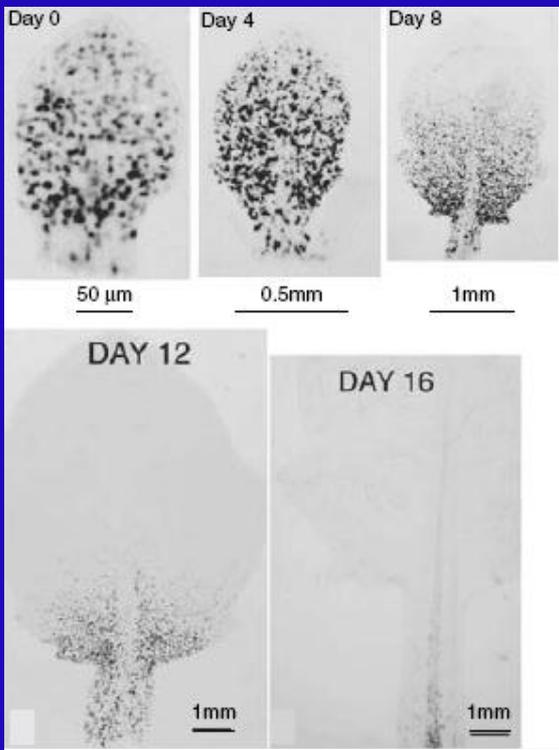


## Développement foliaire :

On distingue plusieurs étapes:

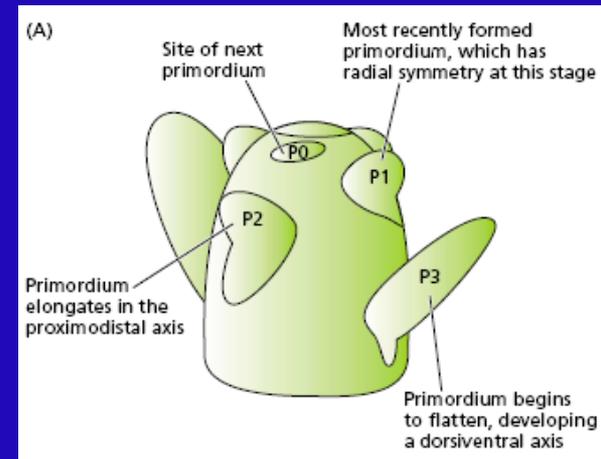
- 1 petit nombre de cellules des couches L1 et L2 se divisent rapidement par rapport aux cellules adjacentes pour produire les promordium foliaires qui vont croître en feuilles.
- Les différentes régions des promordium se différencient en différentes parties de la feuille suivant 3 axes: **dorsiventral** (abaxial–adaxial), **proximodistal** (apical–basal) et **lateral** (margin–midrib–margin). La face supérieure (adaxial) est spécialisée en absorption de la lumière; la face inférieure (abaxial) est spécialisée dans les échanges gazeux.
- La différenciation cellulaire : les cellules de L1 se différencient en tissus protecteurs (cellules épidermiques, trichomes et cellules de garde), les cellules de L2 se différencient en cellules photosynthétique du mésophylle et en éléments vasculaires, et les cellules de L3 se différencient en cellules de la gaine périvasculaire (bundle sheath cells)





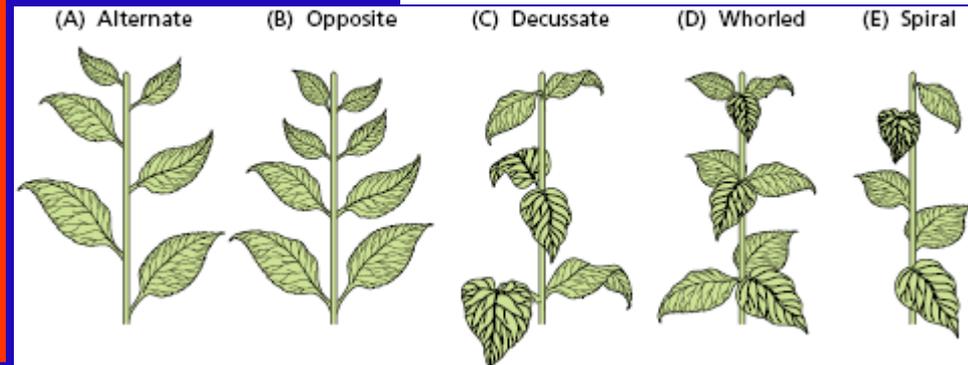
Stades successifs de la croissances des feuilles

Divisions cellulaires dans des feuilles d'Arabidopsis en développement, au fur et à mesure du développement de la feuille, la division se limite au niveau de la base de la feuille



Le temps et l'aspect de la répartition des promordiums foliaires sont génétiquement programmés et ils sont souvent caractéristiques des espèces.

Le nombre et la distribution des feuilles sur la tige s'appelle la phyllotaxie et on distingue plusieurs types de phyllotaxie (alternée, opposée, décussée, Verticillée, spiralée).



## Croissance et développement de l'appareil racinaire :

### La croissance en longueur des racines:

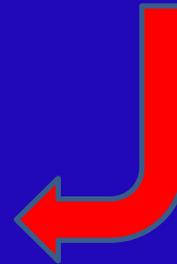
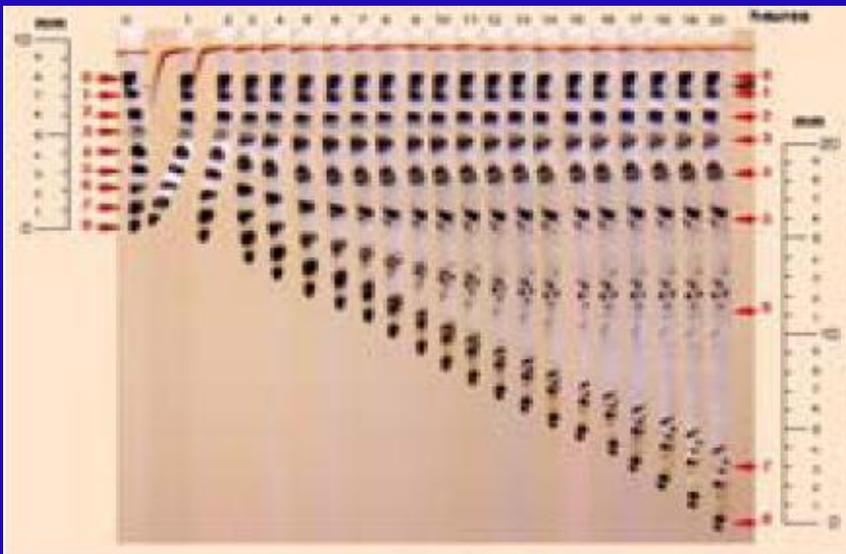
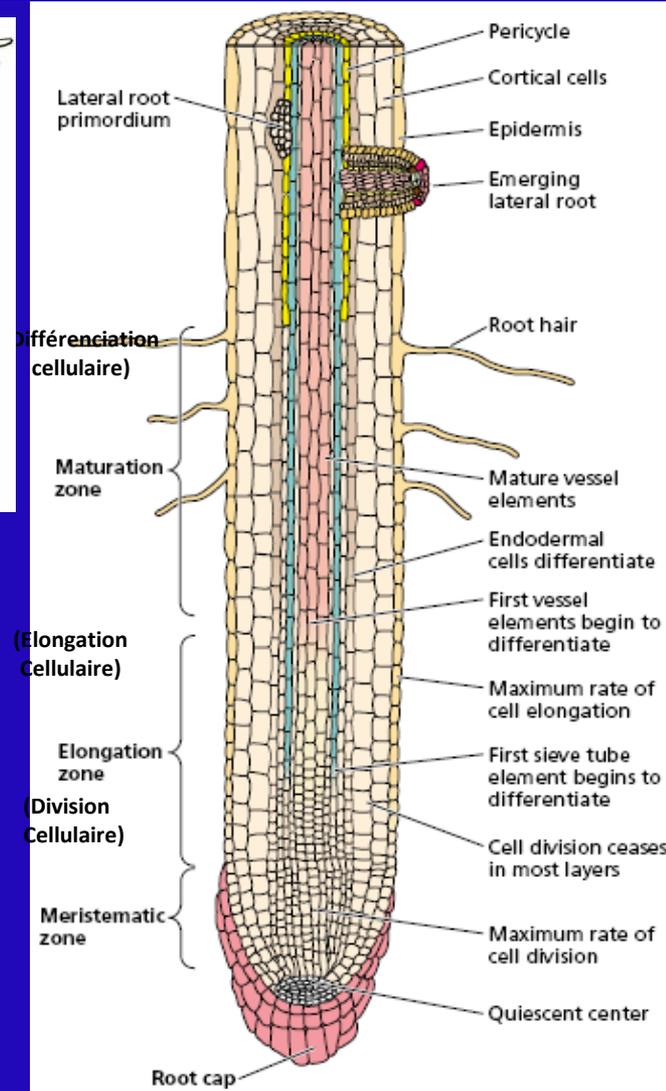
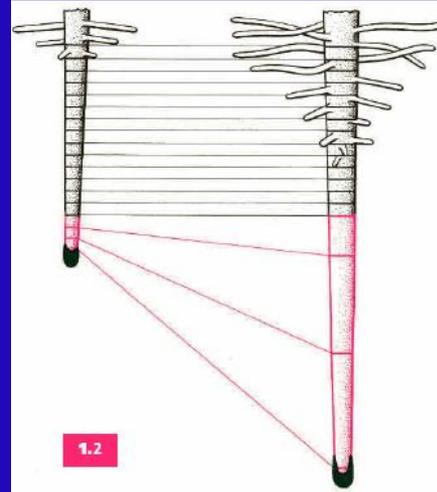
#### Structure d'une racine primaire:

On distingue 4 zones de développement au niveau de l'apex racinaire:

La coiffe, la zone méristématique, la zone d'élongation et la zone de maturation.

#### Expérience de Sachs:

Si on trace sur une racine en croissance des traits équidistants à l'encre de Chine, on remarque, après quelques heures, que seules les marques situées vers l'extrémité s'écartent les unes des autres : la croissance est donc **strictement subterminale** et c'est au **niveau de l'apex** qu'il faut rechercher les sites responsables de la rhizogenèse.



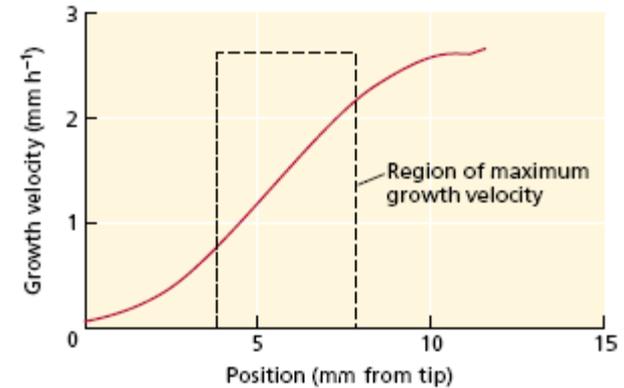
La plupart des divisions cellulaires dans l'apex de la racine sont anticlines (perpendiculaires à l'axe longitudinal → des divisions qui permettent l'augmentation de la longueur de la racine).

Il existe aussi quelques divisions périclines (parallèles à l'axe longitudinal → des divisions qui permettent d'augmenter le diamètre de la racine).

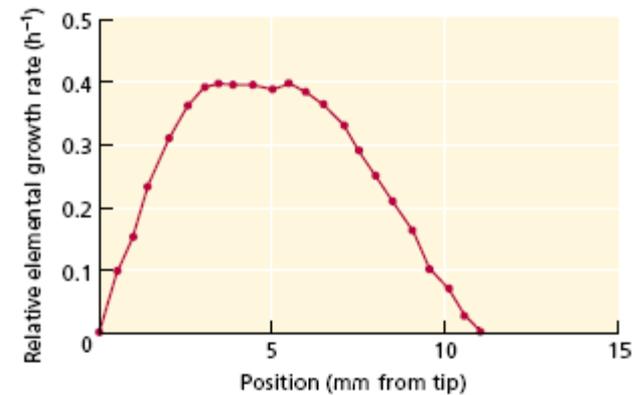
### L'auxine inhibe l'élongation des racines:

Le contrôle de l'élongation des racines par l'auxine est difficile à démontrer, peut être parce que l'auxine induit la production de l'éthylène qui est un inhibiteur de la croissance des racines. Cependant, même si la biosynthèse de l'éthylène est spécifiquement bloquée, les faibles concentrations d'auxine ( $10^{-10}$  to  $10^{-9}$  M) stimulent la croissance des racines intactes, alors que les fortes concentrations d'auxine ( $10^{-6}$  M) inhibe la croissance. Ainsi, les racines requièrent probablement une concentration minimale d'auxine pour croître, mais la croissance des racine est fortement inhibée par les concentrations d'auxine qui stimulent l'élongation des tiges et des coléoptiles.

(A) Growth velocity profile



(B) Relative elemental growth rate



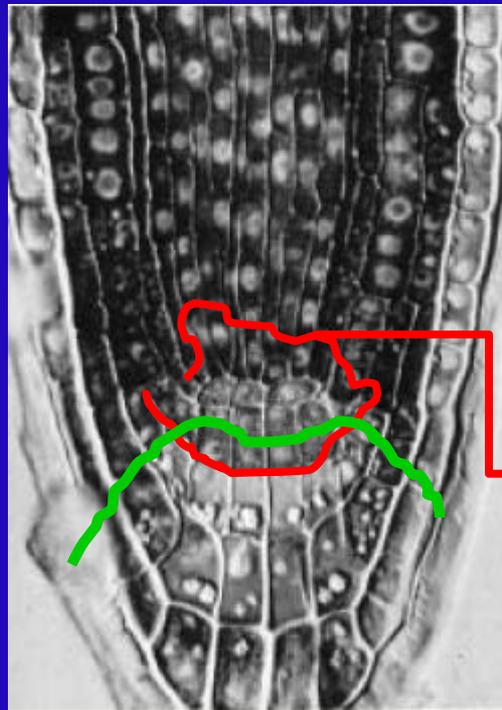
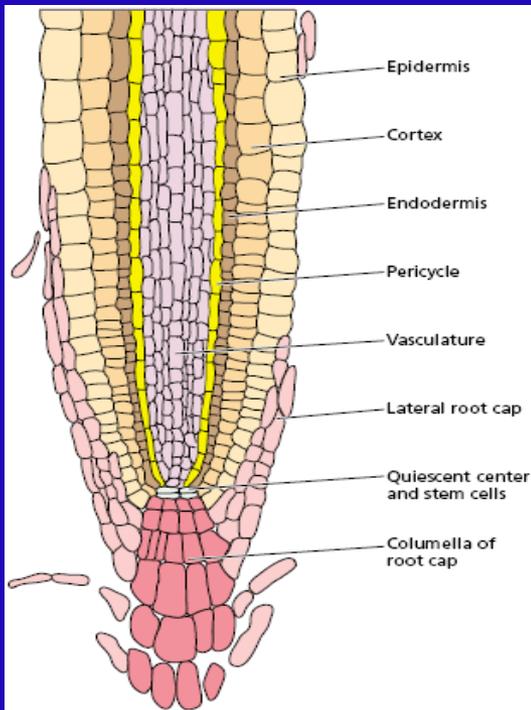
Cinétique de la croissance d'1 racine laire de maïs  
(A) vitesse de croissance le long de l'apex de la racine.

(B) Taux de croissance relative élémentaire le long de l'apex de la racine.

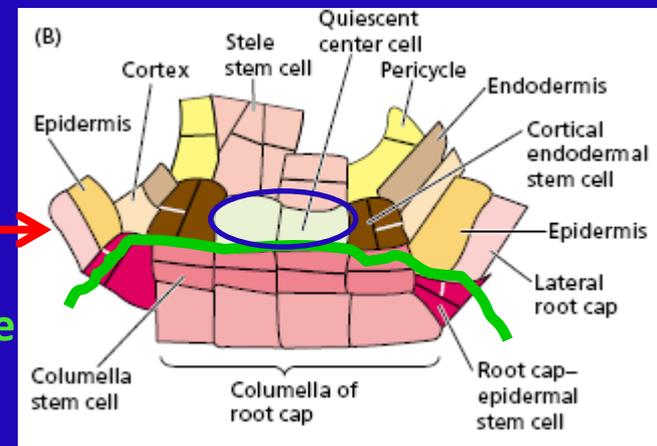
## Le méristème racinaire:

Le méristème apical racinaire d'Arabidopsis renferme les structures suivantes :

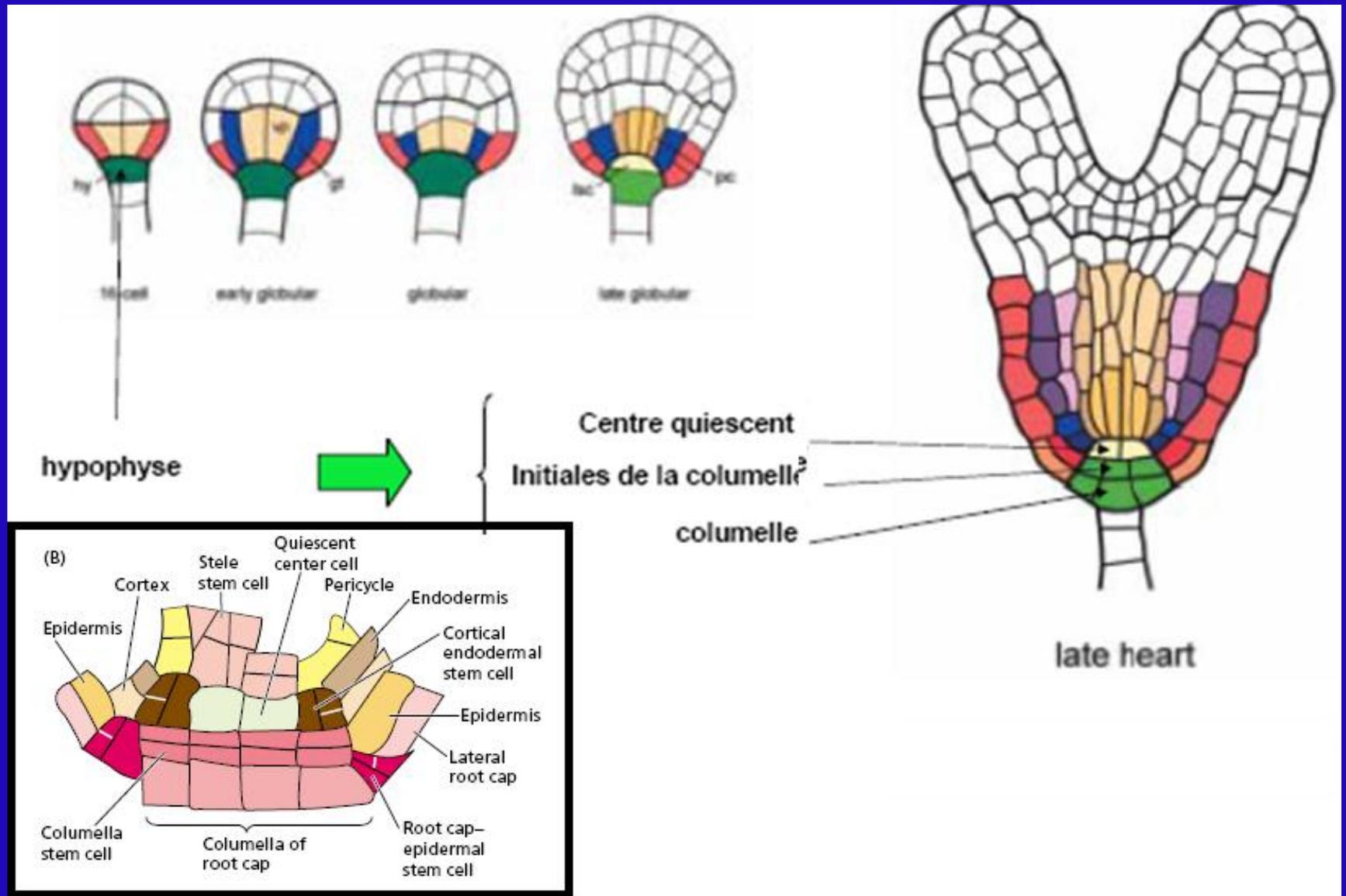
- **Le centre quiescent** composé de 4 cellules, ces cellules ne se divisent pas après l'embryogénèse.
- **Les cellules souches (initiales) cortico–endodermiques** : forment un anneau de cellules qui entourent le centre quiescent. Elles donnent les couches du cortex et de l'endoderme. Après une 1ère division anticline, les 2 cellules filles se divisent d'1 manière péricle pour donner le cortex et l'endoderme.
- **Les cellules souches (initiales) de la columelle**: Situées au dessus du centre quiescent , divisions anti et péricle pour donner une partie de la coiffe connue sous le nom columelle.
- **Les cellule souches (initiales) de l'épiderme de la coiffe**: forment 1 anneau qui entourent les cellules souches de la **columelle**. des divisions anticlines génèrent l'épiderme, les divisions pericle suivies de divisions anticlines produisent la coiffe latérale de la racine.
- **Les cellules souches (initiales) du stèle**: situées derrière le centre quiescent. Elles produisent le péricle et les tissus vasculaires.



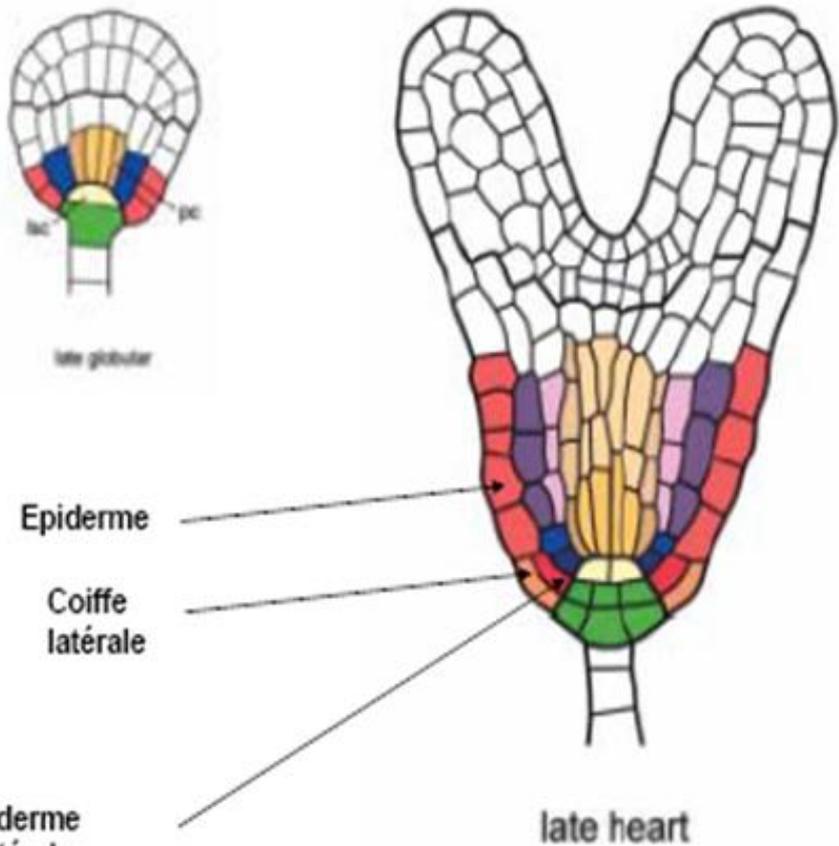
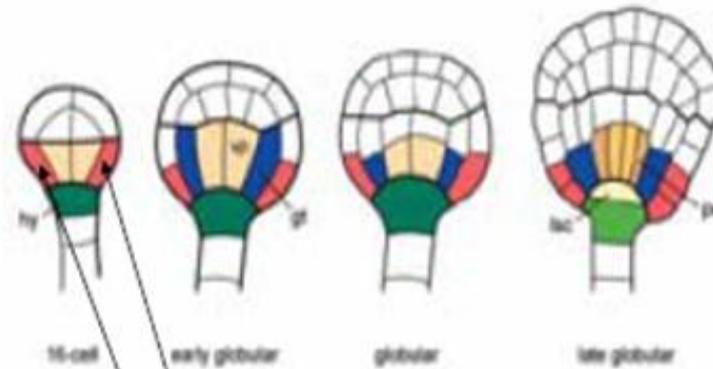
coiffe



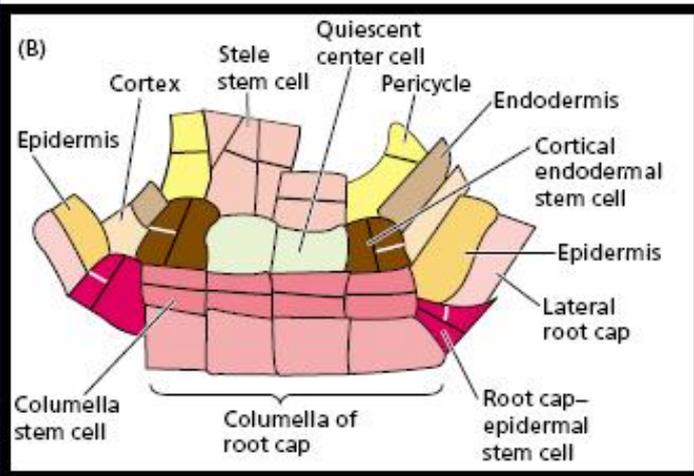
# Organisation du méristème racinaire:



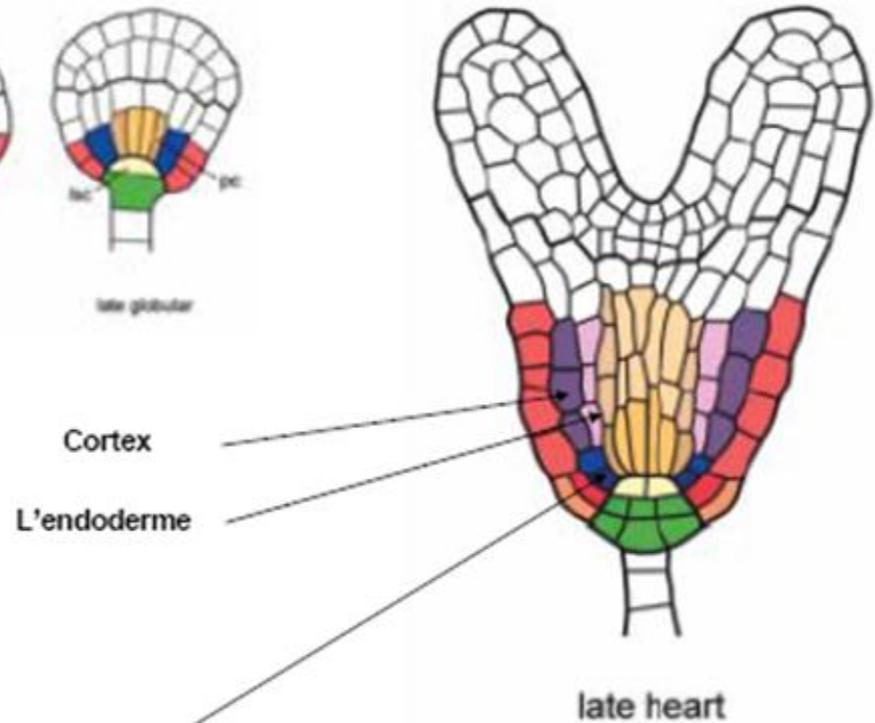
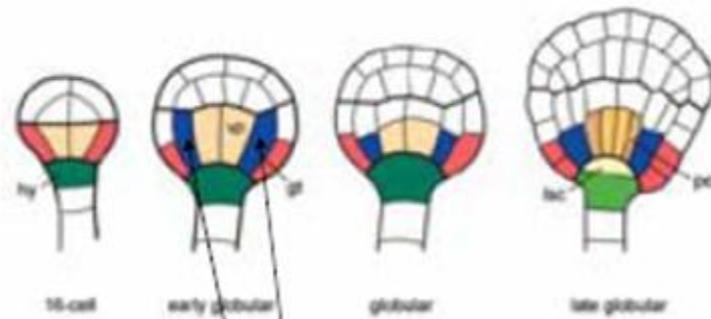
# Organisation du méristème racinaire:



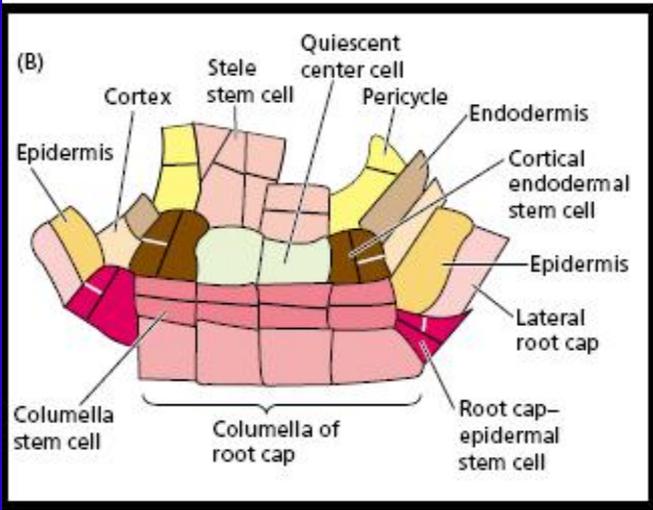
initiales de l'épiderme  
et de la coiffe latérale



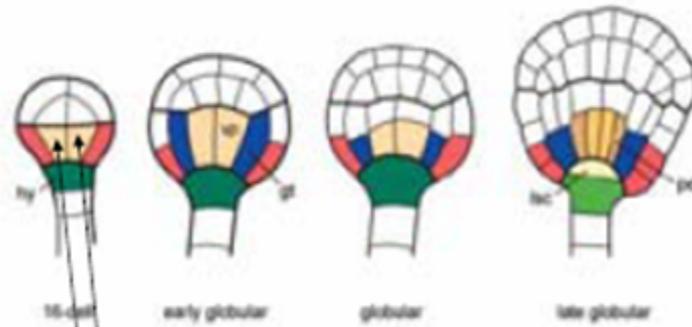
# Organisation du méristème racinaire:



initiales du cortex et de l'endoderme



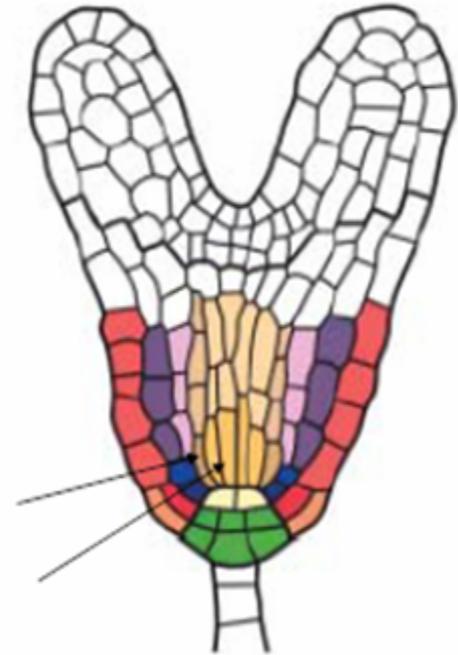
# Organisation du méristème racinaire:



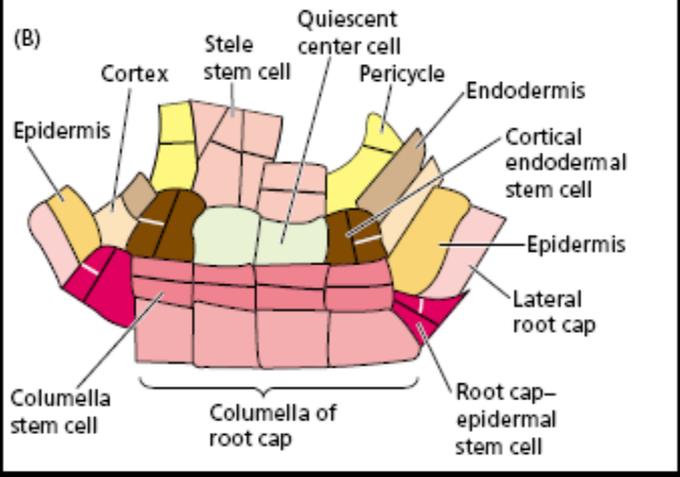
Primordium vasculaire



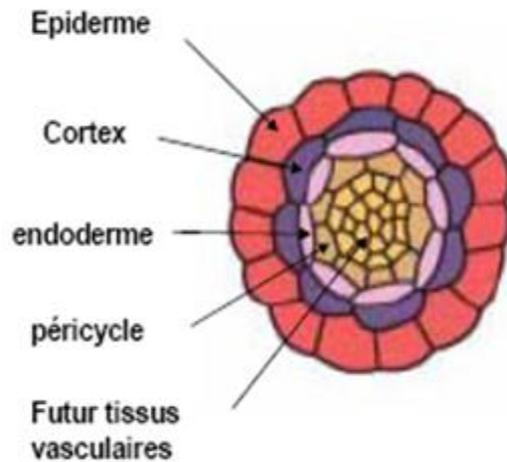
Initiale du péricycle  
Initiale des tissus vasculaires



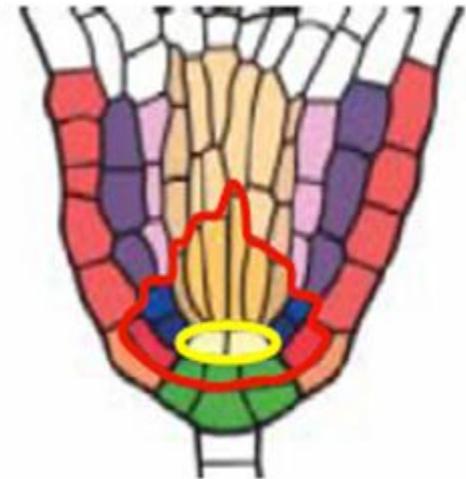
late heart



# Organisation du méristème racinaire:

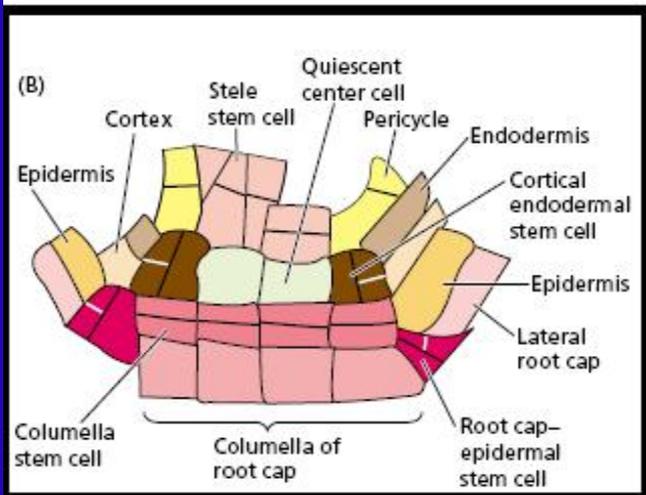


➡ Mise en place d'une différenciation radiale tissulaire



➡ Le centre quiescent joue un rôle de centre organisateur

➡ Il maintient les cellules qui l'entourent dans un état semi-indifférenciées : ce sont les initiales qui sont à l'origine des différents tissus racinaires



## Formation des racines latérales:

Les racines latérales se forment dans la région mature à partir du péricycle. Les divisions des cellules du péricycle donnent des méristèmes secondaires qui s'enfoncent à travers le cortex et l'épiderme pour donner naissance à un nouveau axe de croissance (racine). Le méristème secondaire se comporte comme le méristème primaire pour donner les différents types de cellules et de régions.

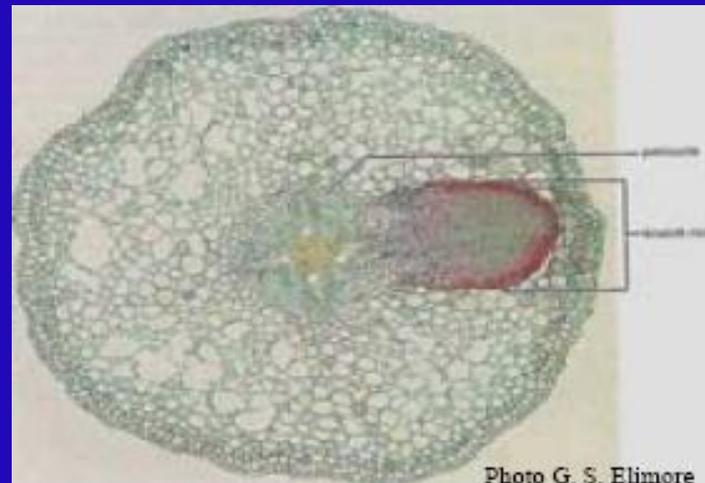
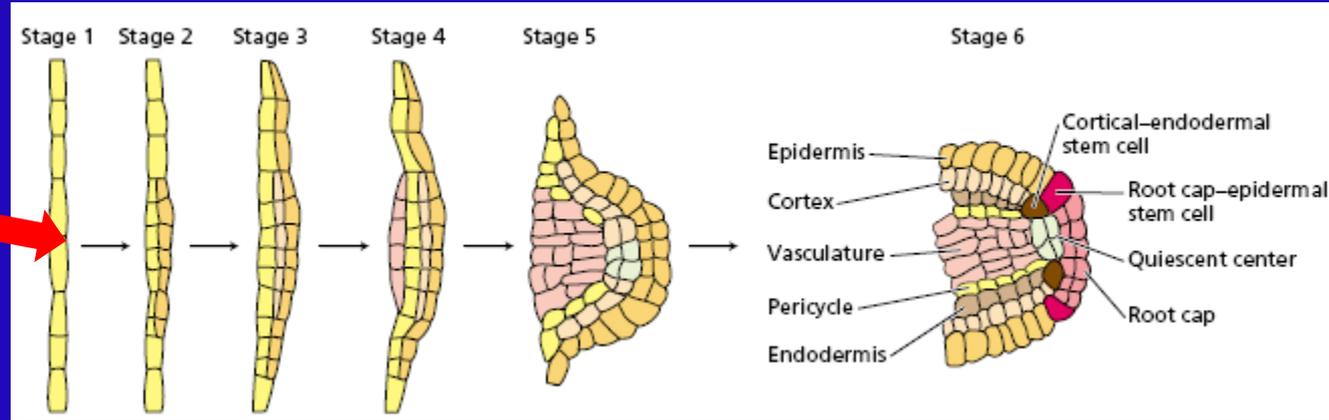
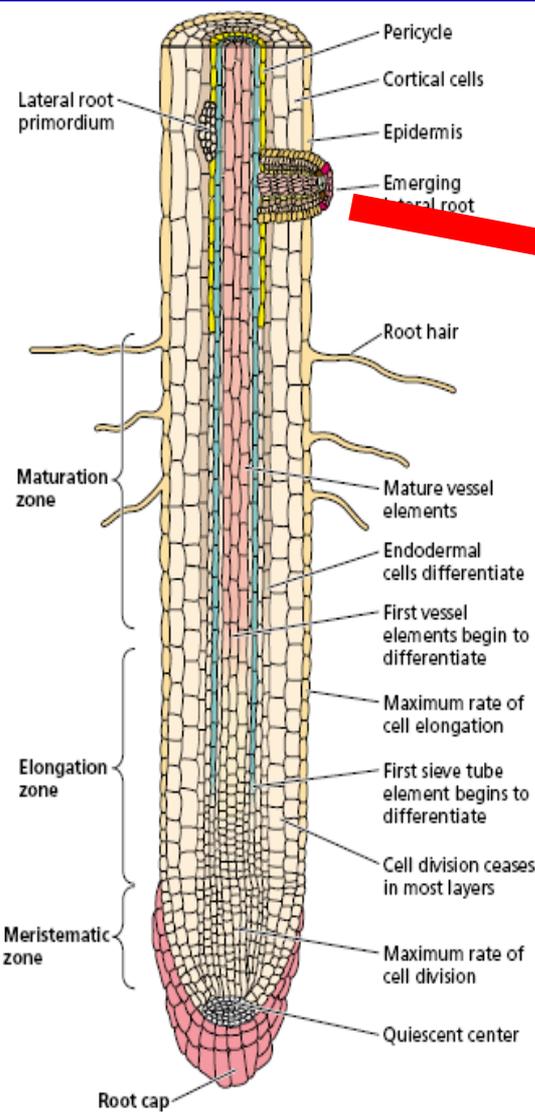


Photo G. S. Elimore