Document téléchargeable sur le site
https://www.svt-tanguy-jean.com/

Lycée Valentine LABBÉ
41 rue Paul DOUMER – BP 20226
59563 LA MADELEINE CEDEX
CLASSE PRÉPARATOIRE TB
(Technologie & Biologie)

ENSEIGNEMENT DE SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE (SVT)
°° SCIENCES DE LA VIE °°

Partie 3. Organisation fonctionnelle de la cellule eucaryote
>> Cours <<

Chapitre 18 : proposition de fiche à compléter

Le développement post-embryonnaire des Angiospermes

Objectifs : extraits du programme

Connaissances clefs à construire	Commentaires, capacités exigibles
3.4 Morphogenèse et plasticité phénotypique du développement des plantes Angiospermes	Ce paragraphe se fonde sur les études morphologique et anatomique des plantes angiospermes en travaux pratiques. Il s'agit d'exposer les mécanismes fondamentaux du développement : mérèse, auxèse et différenciation. L'objectif de ce paragraphe est de montrer que la morphogenèse chez les végétaux est liée à l'environnement et qu'elle est une réponse aux caractéristiques du milieu dans le cadre de la vie fixée. **Lien** : travaux pratiques [surtout TP 2.5. Morphologie, anatomie et histologie des Angiospermes]
3.4.1. Mécanismes fondamentaux du développement postembryonnaire des Angiospermes	
L'activité des méristèmes primaires au niveau des apex met en place la structure primaire de l'axe racine/tige feuillée. L'organogenèse et la croissance en longueur se déroulent tout au long de la vie de la plante.	- établir, à l'aide d'observations morphologiques, le développement itératif et indéfini de l'axe caulinaire ; - mettre en évidence l'existence de plusieurs processus cellulaires (mérèse, auxèse, différenciation) dans le développement des axes primaires d'une plante angiosperme ; - présenter l'organisation et le fonctionnement du méristème apical caulinaire en relation avec les organes et les tissus générés. - mettre en relation le maintien d'un réservoir de cellules au sein du méristème et le développement indéfini. **Limite** : Le contrôle génétique du méristème apical caulinaire n'est pas exigible.
L'activité des méristèmes secondaires met en place les tissus secondaires.	- montrer que le fonctionnement du cambium permet la production tridimensionnelle de tissus libéro-ligneux à l'origine de la croissance en épaisseur.
La mise en place de méristèmes latéraux permet l'extension des surfaces d'échanges de la plante avec son milieu.	- mettre en relation phyllotaxie et captation d'énergie lumineuse **Lien** : 2.4.1 [chapitre 11. Les Angiospermes, organismes autotrophes à vie fixée]
La phyllotaxie, le mode de croissance et de ramification sont des processus responsables du port du végétal.	- comparer le port d'un arbre et d'un buisson et caractériser les processus impliqués
L'auxèse ou grandissement cellulaire repose sur des modifications pariétales, des flux hydriques et une néosynthèse de composants matriciels. L'auxèse est sous le contrôle d'une phytohormone, l'auxine.	- établir, à l'aide de résultats expérimentaux, les principaux processus cellulaires de l'auxèse ; **Lien** : 1.2 [chapitre 2. Les membranes biologiques et leurs fonctions > partie « échanges membranaires »] - montrer les rôles à court et long terme de l'auxine dans les mécanismes d'auxèse. **Limites** : Les expériences historiques de découverte de l'auxine ne sont pas exigibles. Les modalités du transport de l'auxine ne sont pas traitées.
La différenciation cellulaire correspond à la spécialisation structurale et fonctionnelle des cellules.	- présenter les étapes et les mécanismes de la différenciation d'un vaisseau de xylème ; - montrer que les modifications de la paroi sont un élément majeur de la différenciation des cellules chez les angiospermes.
3.4.2. Influence des facteurs environnementaux sur le développement post-embryonnaire	
Les variations morphologiques, anatomiques et physiologiques des organes d'une même espèce sont sous la dépendance des conditions du milieu au cours de leur développement.	- montrer que le développement indéfini des végétaux permet une plasticité morpho-anatomique en relation avec l'environnement - distinguer, à partir de l'analyse d'exemples, accommodation, adaptation et convergence morphologique. - établir que la production des tissus conducteurs secondaires par le cambium est liée aux variations saisonnières. - montrer que les variations du milieu influencent la relation anatomie/physiologie au sein d'une feuille (exemples : feuille d'ombre et de lumière, index stomatique).
Le phototropisme est une croissance orientée liée à une auxèse différentielle. La lumière, facteur externe, induit une répartition différentielle de l'auxine.	- mettre en évidence, avec des données expérimentales, le rôle de l'auxine dans le phototropisme caulinaire et ses mécanismes ; - présenter un modèle d'interactions cellulaires et moléculaires expliquant la courbure phototropique.
Les modalités cellulaires et moléculaires du développement ainsi que l'influence des facteurs du milieu se retrouvent dans le développement de l'appareil racinaire.	**Limites** : Concernant l'appareil racinaire, aucune connaissance concernant son développement n'est exigible. Il s'agit d'être capable de transférer les raisonnements et les concepts développés pour la tige feuillée par l'analyse d'informations fournies.

Introduction

Développement = ontogenèse : *Au sens le plus large : peut inclure le **vieillissement** et la **sénescence**.*

NB **Morphogenèse** (terme proche) =

Chez les Angiospermes :

- Développement embryonnaire (DE) : *[→ chapitre 14]*
- Développement post-embryonnaire (DPE) : *[Germination → chapitre 14]*

Caractéristique : **développement indéfini** =

Trois processus cellulaires majeurs :

- Mérèse* :
- Auxèse* :
- Différenciation :

** Termes seulement utilisés en biologie végétale.*

Ce chapitre ne peut être compris sans le complément 4 (histologie végétale) et les TP de biologie végétale, notamment les TP 2.5). Il doit aussi être mis en lien avec tous les chapitres et TP des parties 2 et 3 traitant de physiologie végétale.

Comment s'effectue le développement post-embryonnaire des Angiospermes ? Comment l'environnement influence-t-il ce développement ?

Encadré A Le vocabulaire des cycles de développement (particulièrement ceux des végétaux)

- **Cycle de vie** = **cycle biotique** = **cycle biologique** = **cycle vital** = **cycle de reproduction** = **cycle de développement** =

- **Phase** :

- **Génération** :

Cas des Angiospermes :
- ***Génération diploïde*** =
- ***Génération haploïde*** =

- **Spore** :

- **Gamète** :

Figure a. Représentation générale d'un cycle vital digénétique (2 générations : gamétophyte + sporophyte) haplodiplophasique (phase haploïde en vert, phase diploïde en rouge).

Encadré B Cycle de développement des Angiospermes

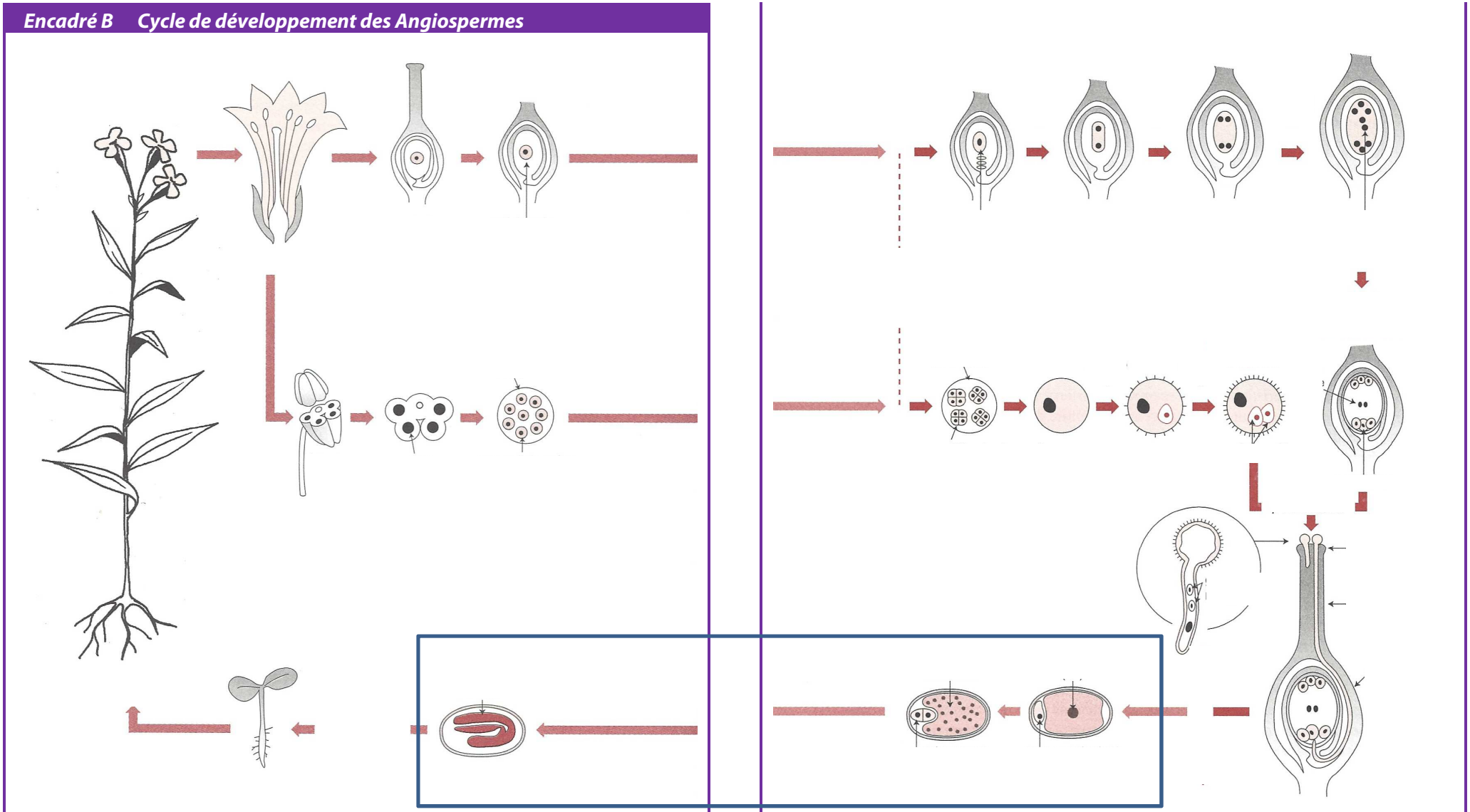


FIGURE b. <u>Une autre vision (1/2)</u>. D'après KLEIMAN (2001).

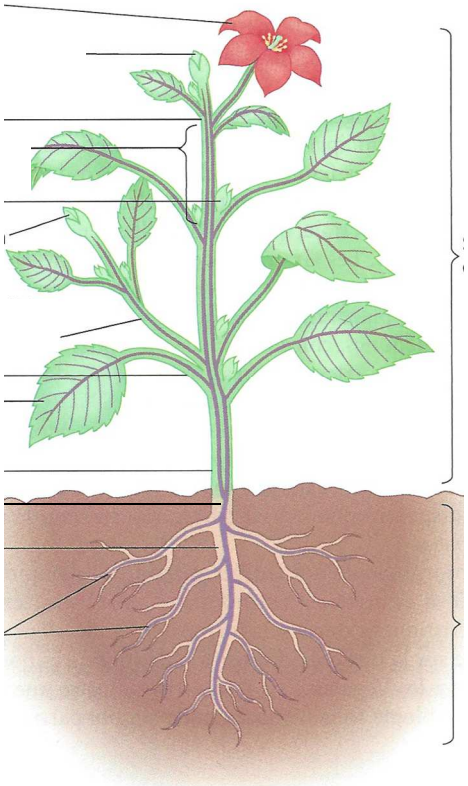
FIGURE b. <u>Une autre vision (2/2)</u>. D'après KLEIMAN (2001).

I. Le DPE des Angiospermes, un processus indéfini et zoné où interviennent des méristèmes

A. Nature et localisation des processus impliqués dans le DPE des axes primaires d'une Angiosperme

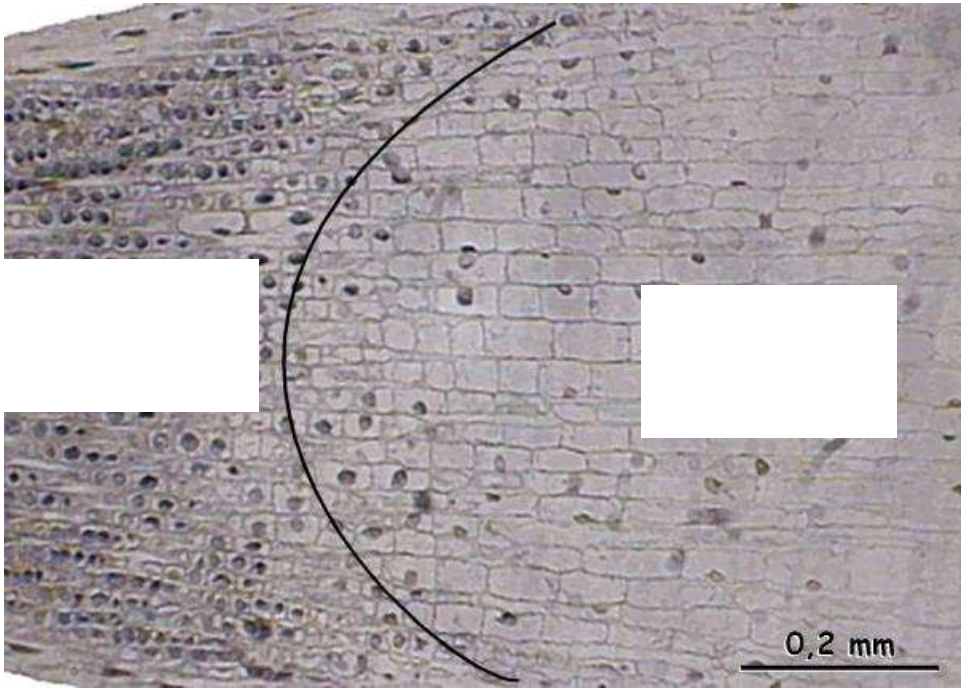
Capacités exigibles	✓ **Établir**, à l'aide d'observations morphologiques, le développement itératif et indéfini de l'axe caulinaire. ✓ **Mettre en évidence** l'existence de plusieurs processus cellulaires (mérèse, auxèse, différenciation) dans le développement des axes primaires d'une plante angiosperme.

1. Préalable : rappel de l'organisation générale d'une Angiosperme herbacée adulte

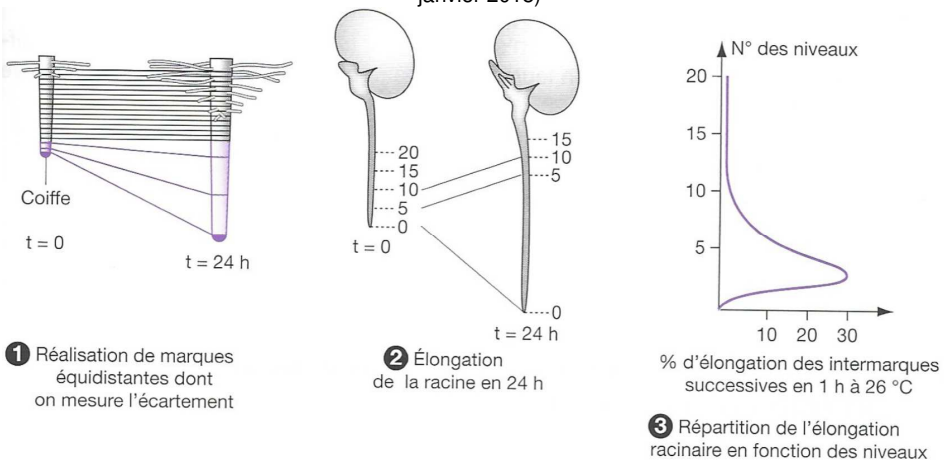


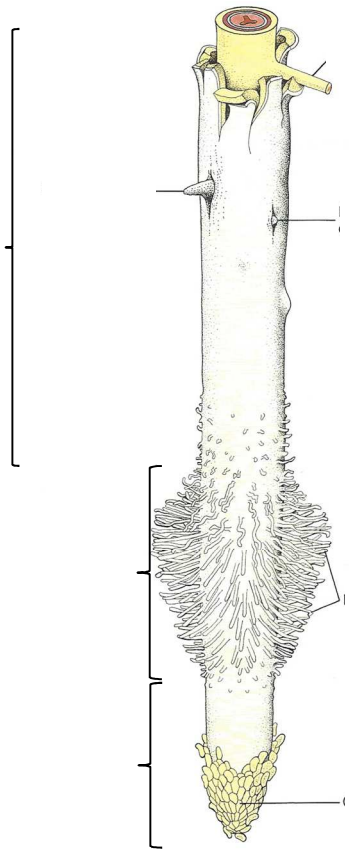
⮝ **FIGURE 1. Morphologie d'une Angiosperme (rappels).** D'après CAMPBELL & REECE (2007)
En violet : tissus conducteurs. On notera la transition dans leur organisation au niveau du **collet**.

2. Localisation et coopération des processus du DPE dans les racines primaires : organisation fonctionnelle de l'apex racinaire



⮝ **FIGURE 3. Mise en évidence de deux types structuraux de cellules dans l'apex d'une racine (CL) de Jacinthe.** http://espace-svt.ac-rennes.fr/applic/racine/l-racine/l-jac02c.htm (consultation janvier 2018)





Racine de dicotylée au sens strict Portion de racine de dicotylée montrant les relations spatiales entre la coiffe et la région pilifère et (en haut) les sites d'émergence des racines latérales, formées en profondeur, à l'intérieur de la racine principale. Les nouveaux poils absorbants apparaissent immédiatement à l'arrière de la zone d'élongation, à peu près au même rythme que disparaissent les poils âgés. La pointe de la racine est recouverte d'une gaine de mucigel qui la lubrifie au cours de son passage dans le sol.

FIGURE 5. <u>Pointe de racine d'Eudicotylédone</u>. D'après RAVEN *et al.* (2007b).
Complétez les légendes des accolades.

Encadré C Organisation d'un méristème apical racinaire (MAR)

Le méristème apical racinaire (MAR), méristème histogène qui assure la mise en place des tissus racinaires

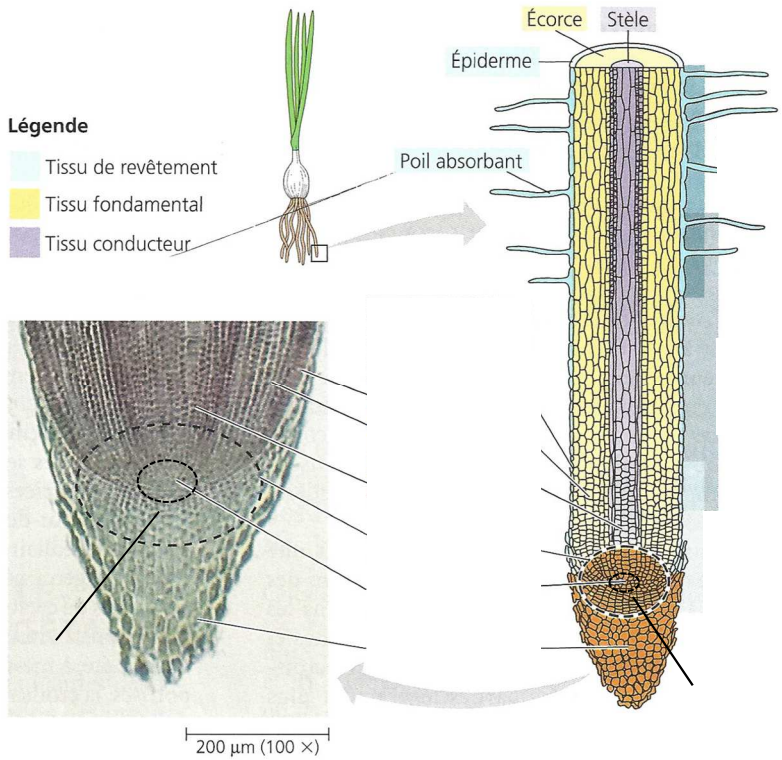


FIGURE a. <u>Organisation d'un apex racinaire</u>. D'après CAMPBELL & REECE (2004).

-
-
-
-
-

3. Localisation et coopération des processus du DPE dans les tiges primaires

a. Une mérèse localisée dans les bourgeons

Bourgeon :

[→ chapitre 14]

- **Bourgeon apical (= terminal)** (inclut le **méristème apical caulinaire MAC**)
- **Bourgeon latéral = secondaire = latéral =** axillaire [***associé à une feuille***] (inclut un **méristème latéral**, équivalent du MAC mais qui est inactif)

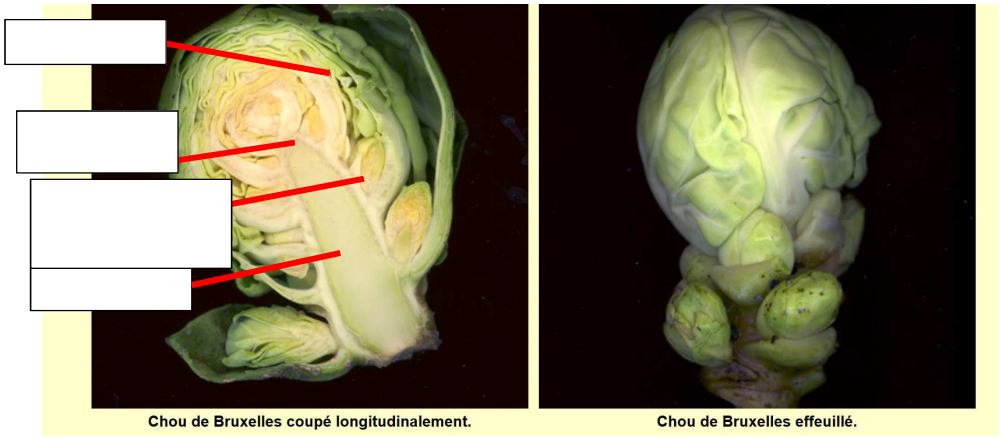


FIGURE 6. Organisation d'un Chou de Bruxelles, un bourgeon volumineux
http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Marche/chouBruxelles.htm (consultation novembre 2015)

FIGURE 7. Organisation générale d'un bourgeon typique. D'après SEGARRA *et al.* (2015).

Débourrement = ***« germination » (épanouissement) d'un bourgeon à la belle saison.***

Encadré D Les bourgeons ligneux, des bourgeons aptes à passer la mauvaise saison

Exemple du bourgeon de Marronnier

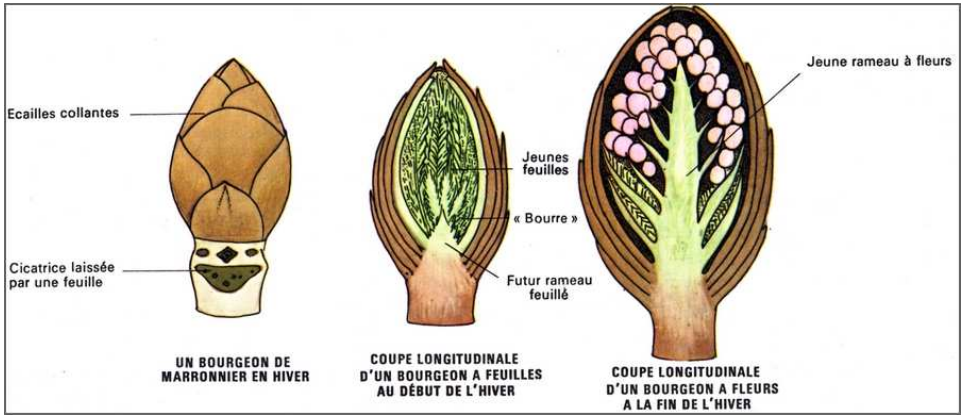


FIGURE a. Bourgeons de Marronnier *Aesculus hippocastanum* (Hippocastanaceae).
http://eric.bessoudcavillot.free.fr/6eme/TH2/6th2_chap1_cours.htm (nov. 2015)

FIGURE b. Bourgeon d'hiver de Marronnier coupé longitudinalement.
© Académie de Dijon

.

b. Une croissance itérative et modulaire par l'allongement des entre-nœuds (zones d'auxèse)

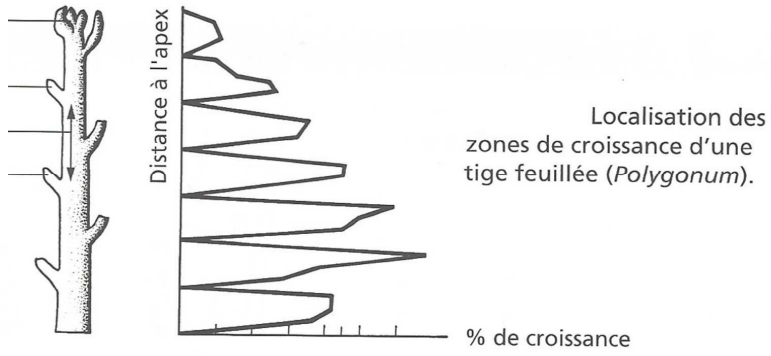
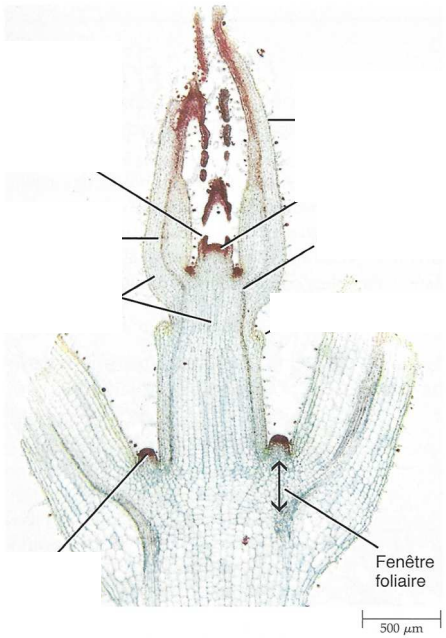


FIGURE 8. Estimation du pourcentage de la croissance dans une tige herbacée.
D'après PEYCRU *et al.* (2010a)



Pointe de la tige de Coleus blumei *Les feuilles de* Coleus*, plante commune d'appartement, sont opposées au niveau des nœuds. Chaque paire est perpendiculaire à la précédente (phyllotaxie décussée) ; les feuilles du nœud marqué dans la figure sont donc perpendiculaires au plan de la coupe.*

FIGURE 9. Méristème apical caulinaire (MAC) et apex de tige.
D'après RAVEN *et al.* (2007b)

c. Une différenciation tissulaire (histogenèse) mais aussi en organes (organogenèse) en aval des bourgeons

Le **fonctionnement du MAC** est explicité plus loin.

Histogène =

Organogène =

*NB Le **MAR**, par comparaison, est souvent considéré comme **seulement histogène** et non organogène (**pas de mise en place de « nouvel » organe**, seulement croissance d'un organe – la racine – déjà existant).*

Bilan (adapté du programme)	✓ L'activité des **méristèmes primaires** au niveau des **apex** met en place la **structure primaire** de **l'axe racine/tige feuillée**. ✓ L'**organogenèse** et la **croissance en longueur** se déroulent tout au long de la vie de la plante.

B. Les méristèmes primaires, des zones de mérèse assurant la croissance en longueur et le développement indéfini de la plante

Capacités exigibles	✓ **Mettre en relation** le maintien d'un réservoir de cellules au sein du méristème et le développement indéfini. ✓ **Présenter** l'organisation et le fonctionnement du méristème apical caulinaire en relation avec les organes et les tissus générés.

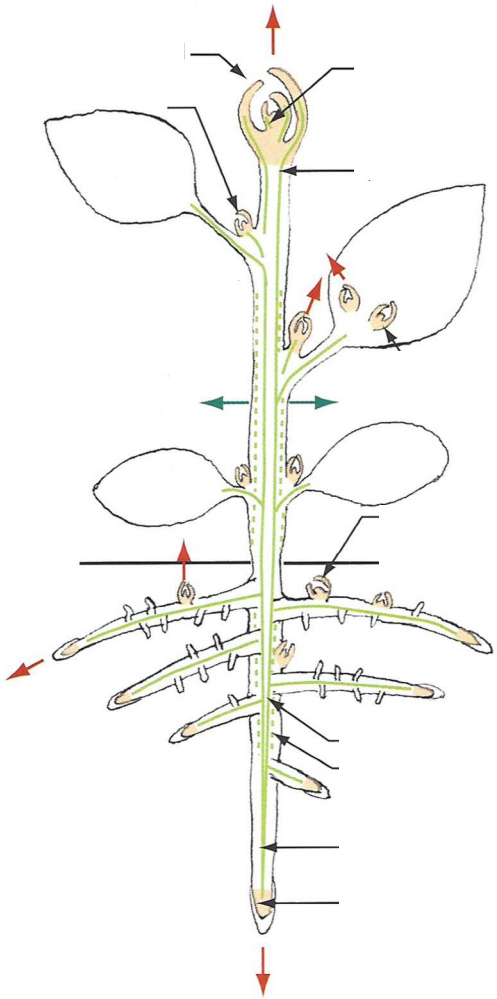
1. Les caractéristiques des territoires méristématiques

a. Des tissus à localisation propre, souvent en amas terminaux

- Localisation souvent **terminale** : **MAC, MAR**
- Ou localisation **latérale** : **méristème axillaire**

→ **Croissance en longueur** (faible épaississement)

+ **Procambium** =



localisation des méristèmes chez une dicotylédone (d'après Kerstetter et Hake, 1997, *Plant Cell* 9 : 1001-1010)

FIGURE 10. Localisation des méristèmes chez une Eudicotylédone.
D'après PEYCRU *et al.* (2010a)

- *On notera que cette figure comprend les **méristèmes primaires** mais aussi les **méristèmes secondaires**.*
- *Les **méristèmes adventifs** sont des **bourgeons néoformés par dédifférenciation de cellules sur des organes (feuilles, racines…)** ; c'est un phénomène plutôt rare (qui peut être impliqué dans la reproduction asexuée – voir chapitre 14).*

b. Les cellules méristématiques, des cellules indifférenciées

Caractéristiques :

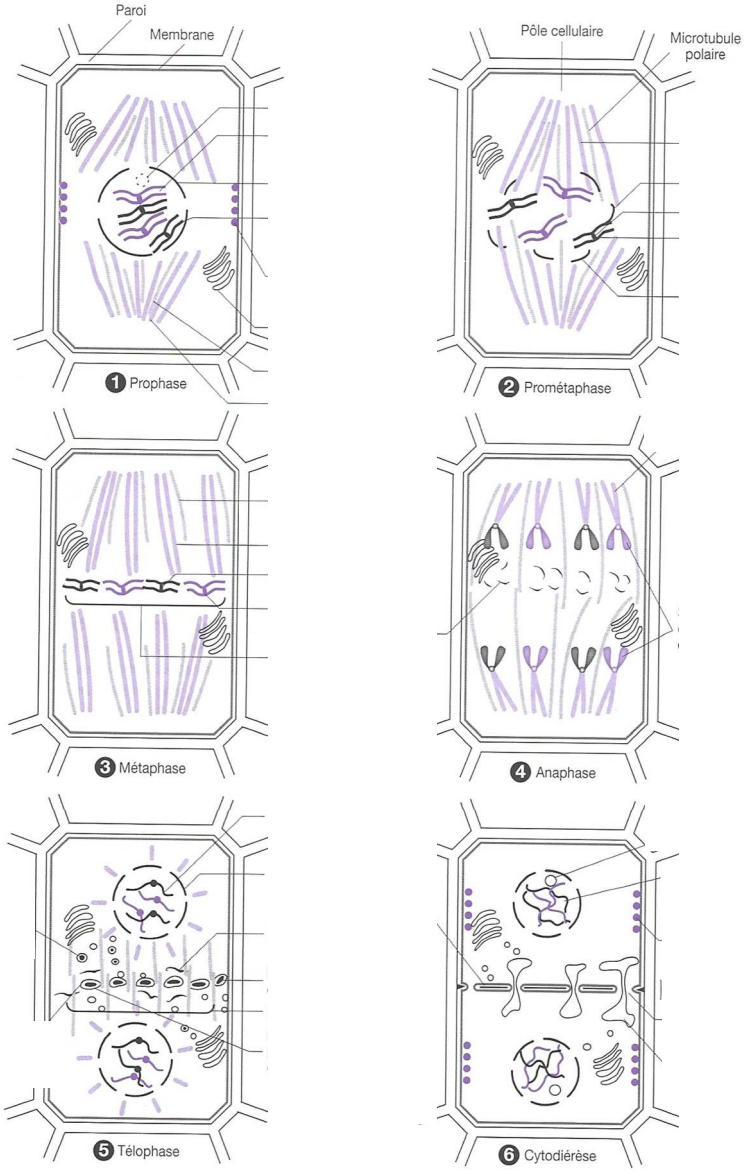
-
-
-
-
-
-
-

On appelle **vacuome** ***l'ensemble des vacuoles d'une cellule***.

Compartiments et structures propres à la cellule végétale

FIGURE 11bis. Structure schématique d'une cellule méristématique.
D'après ROBERT & ROLAND (1998a).

c. La mérèse, une prolifération cellulaire par mitoses



Mitose dans une cellule végétale (2n = 4)

FIGURE 13. Mitose dans les cellules végétales. D'après BREUIL (2007).

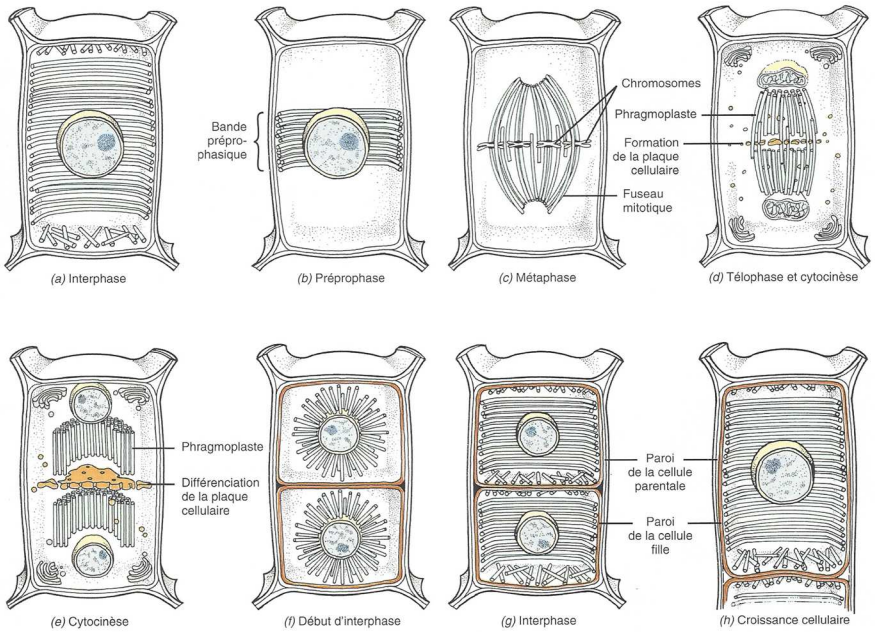


FIGURE 14. Évolution de la répartition des microtubules au cours du cycle cellulaire. D'après RAVEN *et al.* (2007b).

Figures 13-14 : le **phragmoplaste** est ici légendé dans son **sens anglo-saxon**, c'est-à-dire qu'il s'agit du ***réseau de microtubules tel qu'il est organisé au moment de la convergence des vésicules lors de la formation de la plaque cellulaire***. Ce réseau **sert de « rail » à la migration des vésicules**.

Au **sens français** (que j'ai retenu), le mot **phragmoplaste** est ***simplement synonyme de « plaque cellulaire »***.

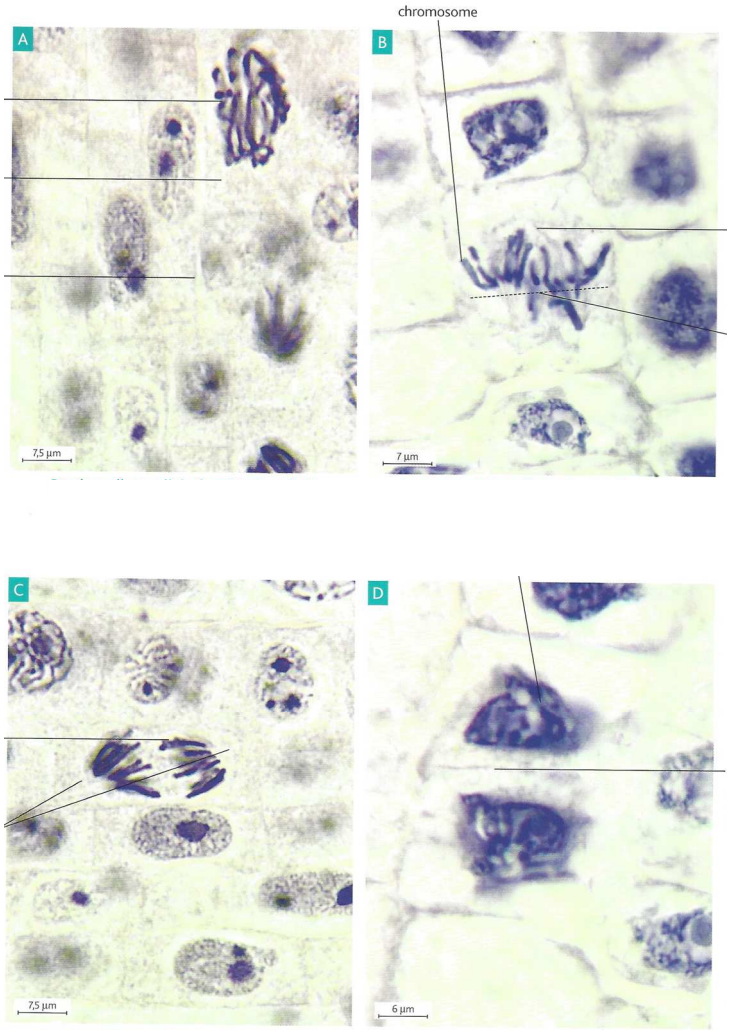


FIGURE 15. Mitose dans les cellules végétales. D'après BOUTIN *et al.* (2015).

d. Des tissus présentant des divisions anticlines et périclines

Divisions périclines :

Divisions anticlines :

FIGURE 16. Divisions anticlines et périclines. D'après BREUIL (2007).

e. Des tissus autoentretenus permettant un développement indéfini

Développement indéfini :

f. Des tissus histogènes mais pas toujours organogènes

α. La production de nouveaux tissus qui s'allongent et se différencient : le caractère histogène des méristèmes

β. La production, au niveau caulinaire, de nouveaux organes : le caractère organogène des méristèmes caulinaires

g. Des tissus protégés

α. Une protection dans des bourgeons pour les méristèmes aériens

β. Une protection par une coiffe pour le méristème apical racinaire (MAR)

2. Organisation et fonctionnement d'un méristème primaire : le méristème apical caulinaire

a. Organisation et double zonation du méristème apical caulinaire (MAC)

α. La zonation ZC/ZP/ZM

Critères utilisés :

-

-

Zonation :

-

-

-

β. La zonation *corpus-tunica*

Critères utilisés :

-

-

Zonation :

-

-

FIGURES 17-18. La double zonation du MAC et son fonctionnement. D'après BREUIL (2007).

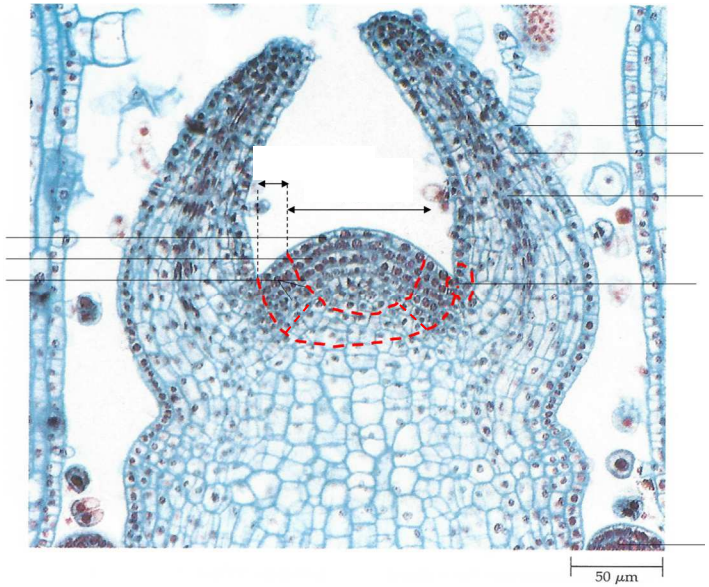


FIGURE 19. Le MAC de *Coleus* en CL (MO). D'après RAVEN *et al.* (2007b).

γ. Une activité mitotique qui perdure dans le procambium et le méristème fondamental

Méristème fondamental :

b. Un méristème apical histogène et organogène qui assure la mise en place de nouveaux phytomères (= modules)

α. Le phytomère (= module), unité de base de l'organisation de la tige herbacée

Phytomère = module :

⮝ **FIGURE 20. Les phytomères (= modules).** D'après RAVEN *et al.* (2007b).

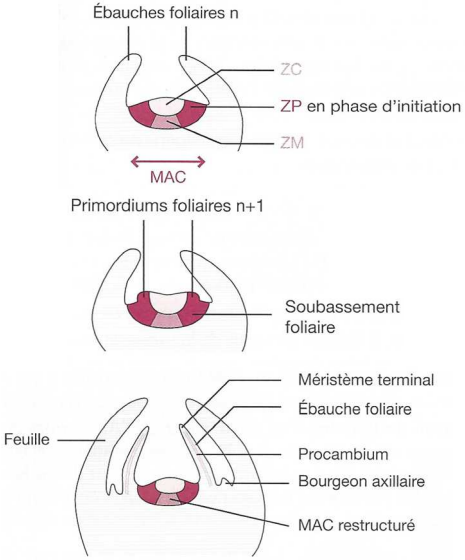
β. Modalités de mise en place d'un nouveau phytomère : une activité répétitive et indéfinie

⮝ **FIGURE 21. Fonctionnement du développement de l'axe caulinaire.**
D'après PEYCRU *et al.* (2010a).

(1) **Formation du sous-bassement foliaire** :
- **multiplication** des **cellules de la ZP** (**divisions** surtout **anticlines**)
⇒ **Élargissement** du méristème

(2) **Initiation du primordium foliaire** :
- **Divisions périclines**, surtout en **L2** ⇒ **perte** de la **forme hémisphérique** du méristème
⇒ **Apparition d'excroissances** en surface = **primordia foliaires** (*qui poursuivront ensuite leur croissance et différenciation en jeunes feuilles*)

(3) **Régénération du méristème** :
- **méristème** réduit à sa **taille minimale** (amputé des parties périphériques transformées en primoridia)
- **régénération** du **secteur périphérique** entamé (divisions variées)
- **ré-acquisition** de la **forme bombée** (divisions variées)



⮝ **FIGURE 22. Étapes de mise en place d'ébauches foliaires.** D'après DENŒUD *et al.* (2013).

- La taille du méristème végétatif varie dans le temps
- Son activité est dite répétitive (car ***ce sont toujours les mêmes organes qui sont formés***) et **indéfinie** (c'est-à-dire ***apparemment sans fin***).

Remarques :
- Intervalle de temps séparant deux initiations successives = **plastochrone**.
- Intervalle de temps séparant deux apparitions macroscopiques des feuilles = **phyllochrone**.

γ. Le MAC, tissu parent de tous les méristèmes primaires de la tige

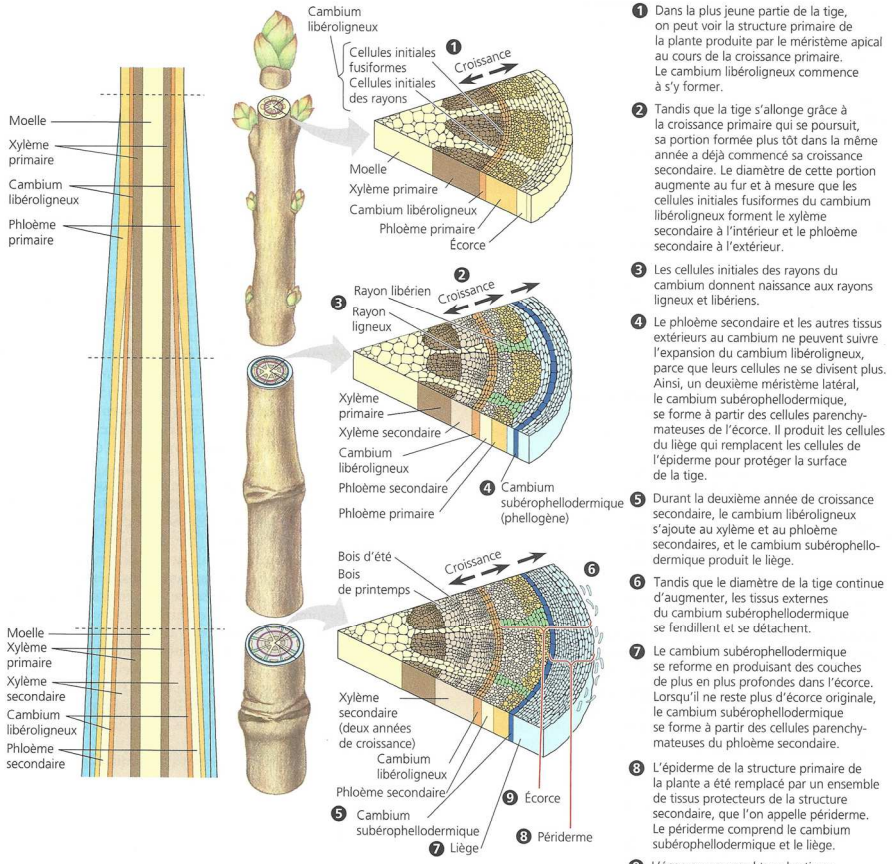
(!) ***toutes les cellules méristématiques de la tige dérivent du MAC***.
[qui, de plus, **s'auto-entretient** lui-même]

Méristèmes primaires dont le MAC est à l'origine :

- Procambium :
- Méristèmes axillaires = latéraux : NB **Dominance apicale** :
(- Méristèmes intercalaires :)

C. Les méristèmes secondaires, des zones de mérèse assurant la croissance en épaisseur des végétaux ligneux

Capacité exigible	✓ **Montrer** que le fonctionnement du cambium permet la production tridimensionnelle de tissus libéro-ligneux.



❶ Dans la plus jeune partie de la tige, on peut voir la structure primaire de la plante produite par le méristème apical au cours de la croissance primaire. Le cambium libéroligneux commence à s'y former.

❷ Tandis que la tige s'allonge grâce à la croissance primaire qui se poursuit, sa portion formée plus tôt dans la même année a déjà commencé sa croissance secondaire. Le diamètre de cette portion augmente au fur et à mesure que les cellules initiales fusiformes du cambium libéroligneux forment le xylème secondaire à l'intérieur et le phloème secondaire à l'extérieur.

❸ Les cellules initiales des rayons du cambium donnent naissance aux rayons ligneux et libériens.

❹ Le phloème secondaire et les autres tissus extérieurs au cambium ne peuvent suivre l'expansion du cambium libéroligneux, parce que leurs cellules ne se divisent plus. Ainsi, un deuxième méristème latéral, le cambium subérophellodermique, se forme à partir des cellules parenchymateuses de l'écorce. Il produit les cellules du liège qui remplacent les cellules de l'épiderme pour protéger la surface de la tige.

❺ Durant la deuxième année de croissance secondaire, le cambium libéroligneux s'ajoute au xylème et au phloème secondaires, et le cambium subérophellodermique produit le liège.

❻ Tandis que le diamètre de la tige continue d'augmenter, les tissus externes du cambium subérophellodermique se fendillent et se détachent.

❼ Le cambium subérophellodermique se reforme en produisant des couches de plus en plus profondes dans l'écorce. Lorsqu'il ne reste plus d'écorce originale, le cambium subérophellodermique se forme à partir des cellules parenchymateuses du phloème secondaire.

❽ L'épiderme de la structure primaire de la plante a été remplacé par un ensemble de tissus protecteurs de la structure secondaire, que l'on appelle périderme. Le périderme comprend le cambium subérophellodermique et le liège.

❾ L'écorce comprend tous les tissus extérieurs au cambium libéroligneux.

Croissance secondaire d'une tige. On peut retracer la croissance secondaire d'une tige en examinant les sections dans lesquelles apparaissent en succession ses parties vieillissantes. (On observerait les mêmes changements si l'on pouvait suivre la formation et le développement de la partie la plus jeune, près de l'extrémité, pendant les trois prochaines années.)

FIGURE 23. Croissance secondaire d'une tige. D'après RAVEN et al. (2007b)

Méristèmes secondaires = assises génératrices :

*Parfois appelés « **cambiums** / **cambia** » au sens large*
*– mais à éviter : à réserver au seul **cambium libéro-ligneux***

(a) Formation du cambium.

(b) Mise en place de la structure secondaire.

(c) Structure secondaire après fonctionnement des deux assises génératrices.

Étapes de la croissance en diamètre d'une racine et d'une tige.

Trois étapes de la croissance en diamètre d'une racine (à gauche) et d'une tige (à droite) de Dicotylédone sont ici schématisées sur des coupes transversales. Les figurés utilisés sont ceux définis au TP 13, § 13.1.

(a) Dans la racine, le cambium (en bleu foncé) apparu par dédifférenciation à la face interne du phloème primaire, a contourné le xylème primaire vers l'extérieur ; dans la tige, des cellules situées entre le xylème et le phloème primaires ont formé le cambium intrafasciculaire.

(b) Dans la tige, seul le cambium intrafasciculaire (en trait continu) a produit des tissus conducteurs secondaires ; des divisions du parenchyme cortical voisin du cambium intrafasciculaire ont formé le cambium interfasciculaire.

(c) Le phellogène (en bleu clair) a fonctionné produisant du liège sur sa face externe ; le fonctionnement du cambium a formé un manchon continu de tissus conducteurs. Seule la disposition du xylème et du phloème primaires permet de distinguer tige et racine en structure secondaire. La figure TP13.9a montre une coupe de racine de Vigne correspondant à ce stade ; sur la coupe de la tige de la figure TP 13.9b, la production des tissus secondaires est intermédiaire entre les stades schématisés ici en b et en c.

FIGURE 24. Mise en place et fonctionnement des assises secondaires.
D'après PEYCRU *et al.* (2010a)

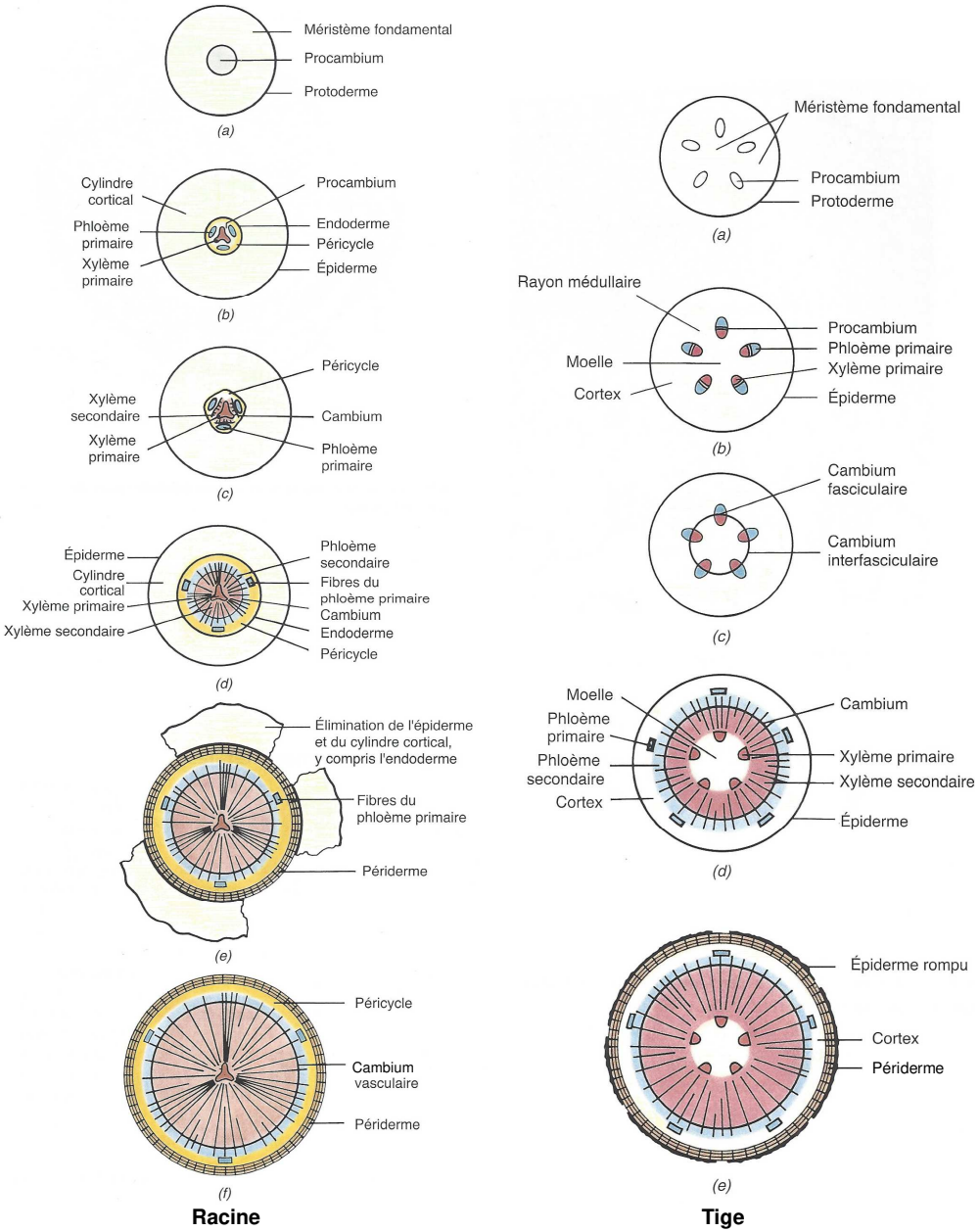


FIGURE 24bis. Vue d'ensemble du DPE d'une Angiospermes ligneuse en CT.
D'après RAVEN *et al.* (2007b)

1. Origine et mise en place des méristèmes secondaires

a. Mise en place du cambium libéroligneux (ou cambium au sens strict)

α. Au niveau de la tige : un héritage procambial et une dédifférenciation du parenchyme cortical

- Mise en place du **cambium** chez les '**dicotylédones**' **âgées**
- Origine au niveau des **tiges** :

>

>

- **Pachyte*** initialement **discontinu** ; devient peu à peu **continu**

* Pachyte :

β. Au niveau de la racine : une dédifférenciation du péricycle et du parenchyme médullaire

- Origine : **dédifférenciation du péricycle** et du **parenchyme médullaire**
- **Pachyte** immédiatement **continu**
- Ne peut intervenir qu'**au-dessus de l'assise pilifère = dans la zone subéreuse**

b. Mise en place de l'assise subéro-phellodermique (ou phellogène) : dédifférenciation de tissus variés

- Mise en place **plus tardive** que celle du **cambium**
- **Tiges** (+ certaines racines) : **Dédifférenciation** de **parenchyme cortical** et de **cellules compagnes phloémiennes**
- Dans de nombreuses **racines** : **Dédifférenciation** du **péricycle**
  (> **élimination** du **parenchyme cortical** et des **tissus de revêtement primaires**)

Attention, ne pas confondre :

- L'**assise subérophellodermique** (évitez l'anglicisme ~~« cambium » subérophellodermique~~) aussi appelée le **phellogène**, ***méristème secondaire mettant en place le liège (et le phelloderme)***.
- L'**assise subéreuse**, ***tissu primaire de revêtement (unistratifié) qui se met en place dans la zone subéreuse de la racine primaire d'Eudicotylédone***.

2. Des cellules initiales de section transversale parallélépipédique et aux divisons lentes : exemple du cambium

a. Des cellules allongées et vacuolisées

FIGURE 25. Cytologie des cellules cambiales. D'après CAMEFORT (1977)

b. Des divisons lentes, dans toutes les directions, quoique majoritairement périclines dues aux initiales fusiformes

- **Divisions assez lentes**
- **Croissance tridimensionnelle** permise par :

>

>

>

NB **Méristème II** (comme méristème I) = **tissu auto-entretenu** (***autorenouvellement du stock cellulaire***)

• **Elles se divisent lentement** selon trois modes de cloisonnement (Fig.) : divisions *longitudinales tangentielles* périclines (90 % des divisions, croissance en épaisseur), divisions *longitudinales radiales* anticlines (7 %, croissance en circonférence) et divisions *transversales* (3 %, croissance en longueur).

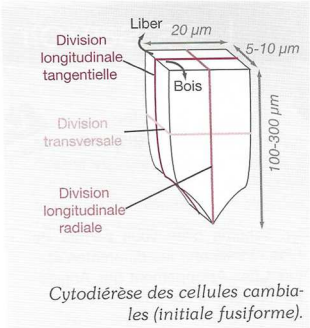


FIGURE 26. Cloisonnement tridimensionnel des initiales cambiales.
D'après GODINOT *et al.* (2010)

3. Des assises histogènes qui mettent en place des tissus secondaires de manière asymétrique

a. Mise en place de xylème II (= bois) et de phloème II (= liber) par le cambium libéroligneux

FIGURE 29. Fonctionnement du cambium : une vision simplifiée.
D'après CAMPBELL & REECE (2004)

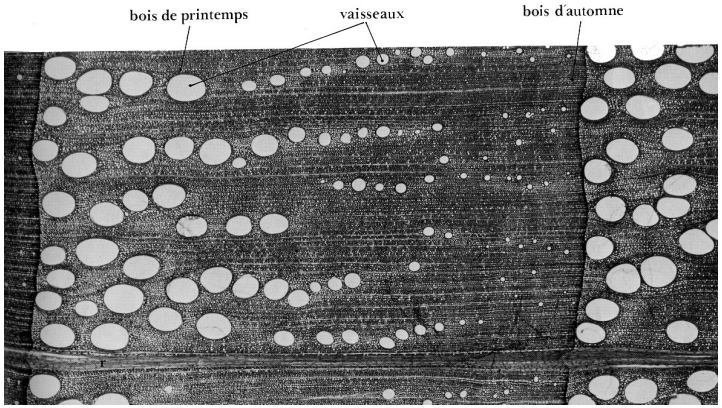


FIGURE 30. Gros plan sur un cerne. (r = rayon ligneux). D'après ROLAND *et al.* (2008)

- Le **cambium** met en place du **xylème II** (ce qui inclut tous ses types cellulaires) **côté interne** et du **phloème II** (ce qui inclut également ses divers types cellulaires) **côté externe**.

b. Mise en place de liège (= suber) et de phelloderme par le phellogène

Liège = Suber :
Phelloderme :

NB ***Phelloderme + phellogène + liège = périderme***

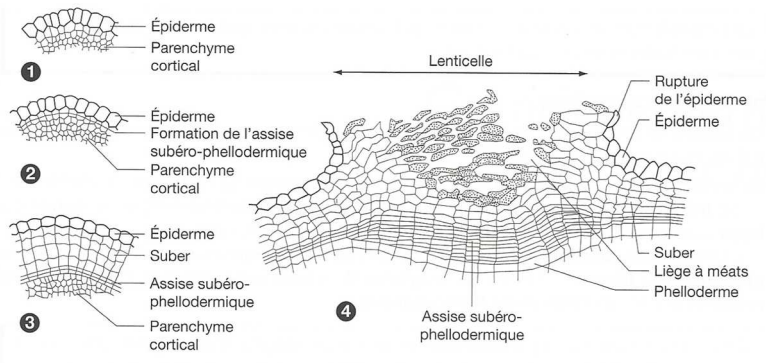


FIGURE 31. Le phellogène et les tissus qui en dérivent. D'après BREUIL (2007)

4. Des assises caractérisées par un fonctionnement saisonnier

a. Cas du cambium

- Fonctionnement **du printemps à l'automne** ; **quiescence** en **hiver** / fonctionnement **annuel**
- **Xylème II** → **cernes** (1 cerne = 1 année de fonctionnement)
  Bois initial = **bois de printemps** : présence de **gros vaisseaux**
  Bois final = **bois d'automne (ou d'été)** : **vaisseaux plus petits**

b. Cas du phellogène

- Le plus souvent : fonctionnement **qqs années**, puis **renouvellement** (avec mise en place d'un **nouveau phellogène**)

Bilan (adapté du programme)	✓ L'activité des **méristèmes secondaires** met en place les **tissus secondaires**.

TABLEAU I. Comparaison des méristèmes primaires et secondaires.

Caractéristiques	Méristèmes primaires	Méristèmes secondaires
Diversité et localisation		
Type de croissance		
Type de développement		
Type de cloisonnements		
Origine		
Tissus mis en place		

TABLEAU II. Comparaison des cellules méristématiques primaires et secondaires.
D'après PEYCRU *et al.* (2010a)

	Méristèmes primaires	Cambium
Localisation	Apex racinaire et caulinaire	Parties âgées des racines et des tiges
Forme	Section polygonale	Allongée pour les initiales fusiformes
Taille	20 à 30 µm	100 µm pour les initiales fusiformes ; 15 à 50 µm pour les initiales radiales
Rapport nucléoplasmique	≥ 1	< 1
Vacuome	Réduit à quelques vésicules	Une ou deux grandes vacuoles
Paroi	Mince, pecto-cellulosique	Mince, pecto-cellulosique
Plastes	Proplastes	Proplastes
Réserves	Absentes	Quelques lipides

D. L'architecture et le port de la plante, des caractéristiques en partie contrôlées par le fonctionnement des méristèmes

Capacités exigibles	✓ **Mettre en relation** phyllotaxie et captation d'énergie ✓ **Comparer** le port d'un arbre et d'un buisson et **caractériser** les processus impliqués

1. L'architecture des végétaux

a. La notion de port végétal : l'organisation générale d'une plante

Port :

b. Quelques grands types de ports : herbe, arbre, buisson, liane…

Port herbacé (herbe) :
Plantes ligneuses : **- port arborescent (arbres) :** **- port buissonnant (buisson) :** **- port arbustif (arbuste) :**
Port lianescent (liane) :

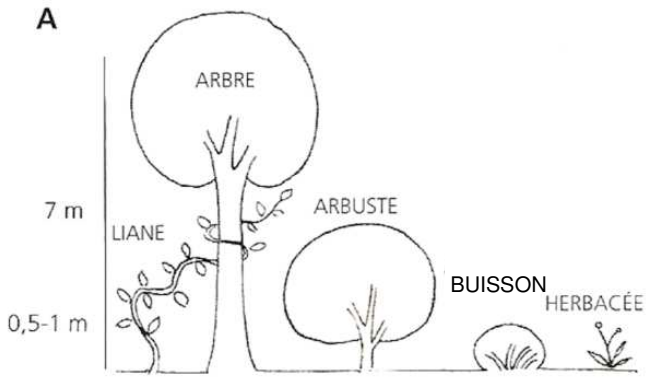


FIGURE 31bis. Principaux types de ports. D'après MEYER *et al.* (2008), modifié

c. La phyllotaxie : la disposition des feuilles sur la tige (ou le rameau feuillé)

Phyllotaxie :

- Disposition **alterne** :

- Disposition **opposée** :

- Disposition **opposée-décussée** :

- Disposition **verticillée** :

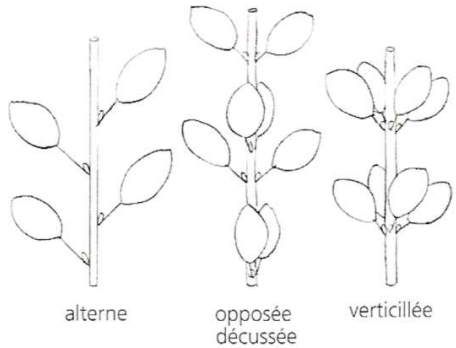


FIGURE 31ter. Principaux types de ports. D'après MEYER *et al.* (2008), modifié

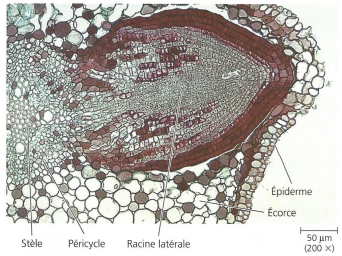
2. Une mise en place de ramifications due à des méristèmes latéraux qui assurent l'extension des surfaces d'échanges de la plante

Ramification :

a. La ramification des racines, un processus augmentant la surface d'absorption racinaire dû à des méristèmes latéraux néoformés

Dédifférenciation :

Dédifférenciation d'une portion de **péricycle** (en face d'un **pôle de xylème I**)
>> formation d'un **méristème apical « latéral »** qui **perfore la racine d'origine** et fonctionne ensuite comme un **MAC**



Formation des racines latérales. Cette coupe transversale d'une racine de Saule (*Salix sp.*) montre la formation d'une racine latérale à partir du péricycle, couche périphérique de la stèle (MP).

FIGURE 32. Ramification de la racine. D'après CAMPBELL & REECE (2004) et MEYER *et al.* (2008)

b. La ramification des tiges, un processus augmentant la surface de captation lumineuse et contrôlant le port du végétal, en lien avec le développement de méristèmes axillaires

α. Modalités de ramification de la tige

i. Croissance monopodiale vs. sympodiale (diachasiale / monochasiale)

Développement de **bourgeons axillaires** → mise en place de ***nouveaux axes feuillés*** (= **rameaux**)

Croissance monopodiale :
Croissance sympodiale :
- Monochasiale :
- Dichasiale :

Tableau à remplir avec l'encadré E (ne pas oublier un exemple de chaque !)

FIGURE 33. Croissances monopodiale vs. sympodiale d'un rameau.
http://slideplayer.fr/slide/3219764/ (consultation août 2017)

ii. Notion de dominance apicale : un phénomène responsable d'une croissance monopodiale chez beaucoup de plantes herbacées (non ramifiées)

Dominance apicale :

β. Comparaison des processus à l'œuvre dans la mise en place d'un port arborescent ou buissonnant (acrotonie et hypotonie vs. basitonie et épitonie)

- **Type « arbre »** :
  > **rameaux secondaires** en haut du tronc ; **forte dominance apicale** les **premières années**
  > **acrotonie***
  > **hypotonie***

(!) **Rameaux** plutôt **obliques**

***Acrotonie :**
***Hypotonie :**

- **Type « buisson »** :
  > **faible allongement de la tige primaire** la **première année** ; **orientation horizontale** de la tige principale **possible**
  > **basitonie***
  > **épitonie***

(!) **Rameaux** plutôt **verticaux**

***Basitonie :**
***Épitonie :**

γ. Ramification et mise en place de la phyllotaxie, des processus augmentant la surface de captation lumineuse

Bilan (adapté du programme)	✓ La mise en place de **méristèmes latéraux** permet l'**extension** des **surfaces d'échanges** de la plante avec son milieu. ✓ La **phyllotaxie**, le **mode de croissance** et de **ramification** sont des **processus** responsables du **port du végétal**.

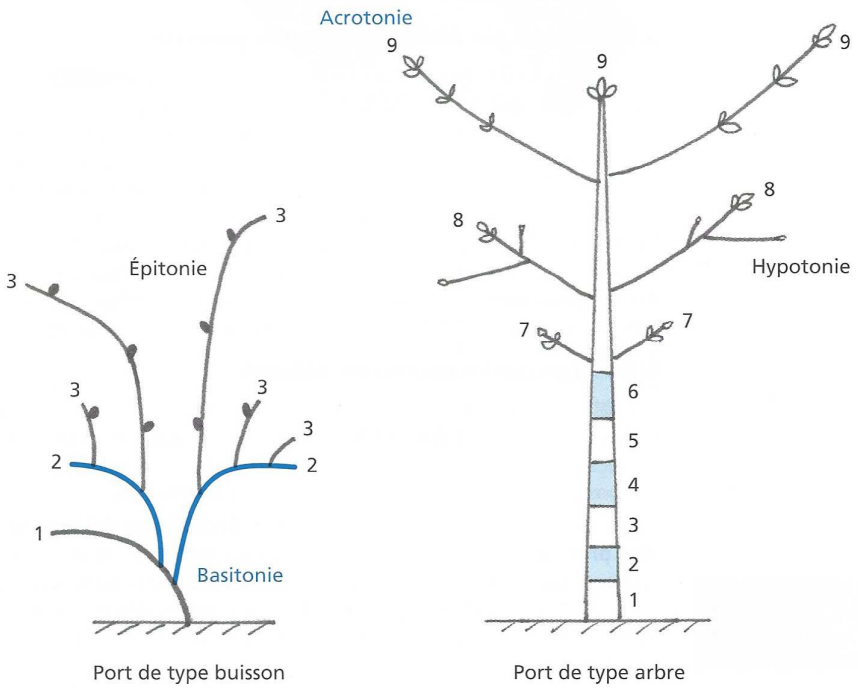
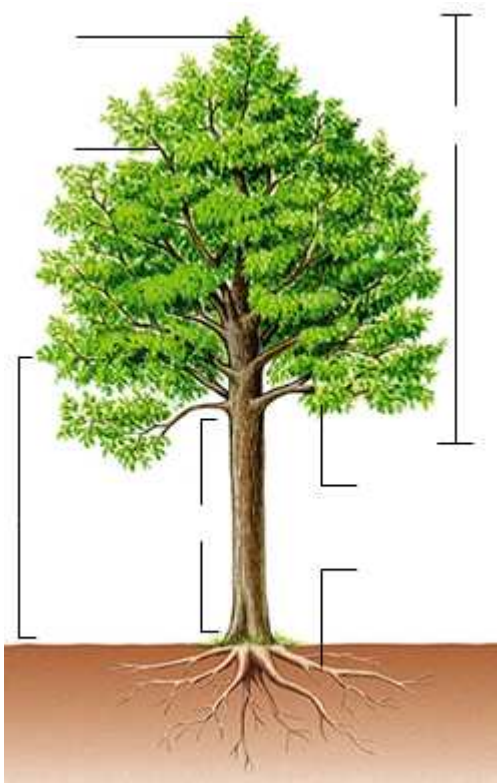


FIGURE 34. Ports buissonnant et arborescent : processus à l'œuvre.
D'après PEYCRU *et al.* (2010a)

FIGURE 35. Hypotonie : développement préférentiel des bourgeons inférieurs. © *Planet-vie* (consultation janvier 2018)

FIGURE 36. Épitonie : développement préférentiel des bourgeons supérieurs. © *Planet-vie* (consultation janvier 2018)

Encadré F *Le vocabulaire descriptif d'un arbre*



http://5fr.eu/Encyclopedie_Universelle/page/ARBRE.1581/ (consultation novembre 2015)

II. Allongement des organes par auxèse, et histogenèse par différenciation cellulaire

Auxèse :
Histogenèse :
→ Différenciation :

A. L'auxèse, l'élongation des cellules qui permet la croissance en longueur

Capacités exigibles	✓ **Établir**, à l'aide de résultats expérimentaux, les principaux processus cellulaires de l'auxèse. ✓ **Montrer** les rôles à court et long terme de l'auxine dans les mécanismes d'auxèse.

1. Une localisation post-méristématique des zones de croissance en longueur

a. Une croissance subapicale dans les racines

b. Une croissance intercalaire dans la tige qui permet l'allongement des phytomères

2. Mécanismes de grandissement cellulaire

- Voir TD étude des effets cellulaires de l'auxine.

Vous devez impérativement revoir :
- L'organisation et la composition de la **paroi végétale** (chapitre 2)
- Ses **modalités de mise en place** (chapitre 2)
- La notion de **potentiel hydrique** et ses composantes (chapitre 2)

a. Un processus qui fait appel à la pression de turgescence

Turgescence cellulaire : *État viable des cellules végétales*

La notion de potentiel hydrique doit être maîtrisée. C'est la composante osmotique qui agit ci. On rappelle que l'eau se déplace toujours dans le sens des potentiels hydriques décroissants, allant des compartiments où les solutés sont les moins concentrés (osmolarité faible) vers les compartiments où les solutés sont les plus concentrés (osmolarité forte).

b. Un processus qui suppose une paroi primaire peu épaisse

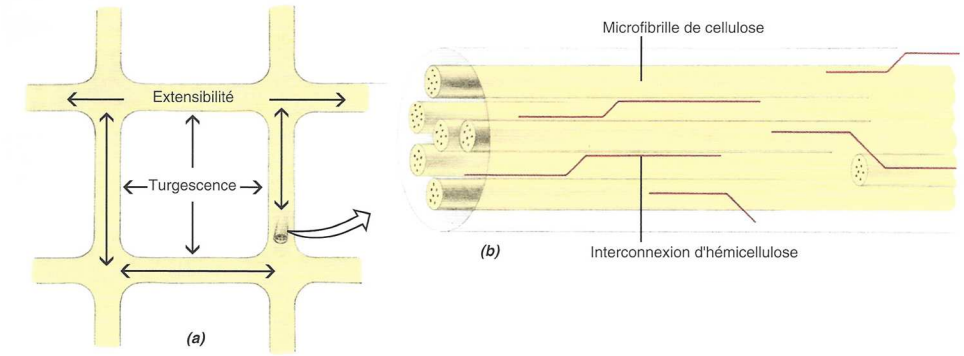
Paroi primaire :

c. Un processus qui suppose un relâchement pariétal

Revoir et maîtriser sur le bout des doigts l'organisation moléculaire de la paroi (chapitre 2 sur les membranes).

Expansines (et non ~~extensines = HRGP~~) =

Hémicellulases =



(a) La pression de turgescence qui règne au sein de la cellule exerce une pression sur les parois cellulaires. (b) L'étirement de la paroi cellulaire est nécessaire pour permettre l'accroissement cellulaire, mais il est limité par les interconnexions d'hémicellulose reliant les microfibrilles de cellulose. (c) Les hormones peuvent accroître les possibilités d'extension en stimulant un clivage réversible des interconnexions d'hémicellulose par la rupture des liaisons hydrogène entre les microfibrilles de cellulose et les ponts d'hémicellulose. La rupture des liaisons hydrogène est induite par une protéine de la paroi cellulaire appelée expansine. Ces modifications permettent aux microfibrilles de cellulose de se séparer les unes des autres, entraînant un accroissement irréversible de la paroi.

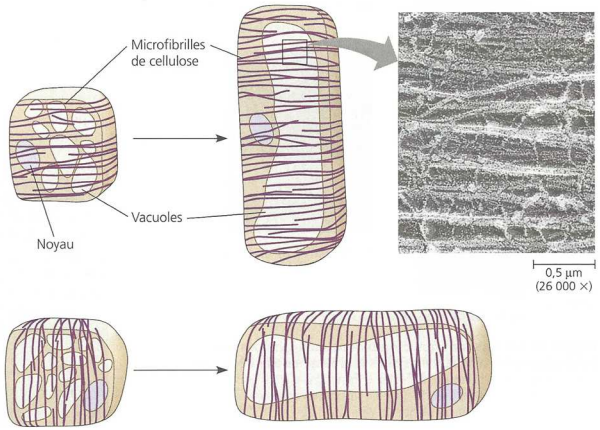
FIGURE 37. Rôle dans expansines dans la désolidarisation des microfibrilles de cellulose. D'après RAVEN *et al.* (2007b)

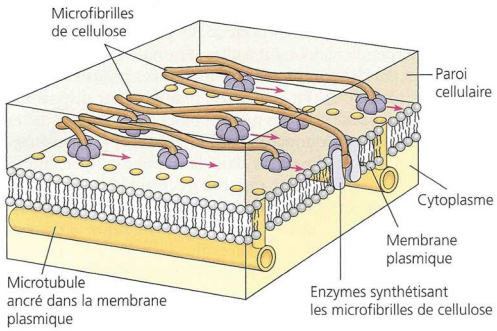
d. Un processus influencé par l'orientation des microtubules

e. Un processus qui suppose la synthèse de nouvelles microfibrilles de cellulose (et autres composés pariétaux) : croissance par intussusception

Intussusception :

Orientation de l'expansion des cellules végétales. C'est principalement l'absorption d'eau qui permet l'expansion des cellules végétales. Dans une cellule en croissance, les enzymes affaiblissent les ponts transversaux de la paroi, qui peut ainsi prendre de l'expansion à mesure que l'eau y pénètre par osmose. La croissance de la cellule se fait surtout perpendiculairement aux microfibrilles de cellulose présentes dans la paroi. Ces microfibrilles sont enchâssées dans une matrice comportant d'autres polysaccharides (non cellulosiques), dont quelques-uns forment les ponts transversaux visibles sur cette micrographie (MET). Le relâchement de la paroi se produit lorsque les protons sécrétés par la cellule activent les enzymes de la paroi. Ces enzymes, à leur tour, rompent les ponts transversaux qui relient les polymères dans la paroi. Les limitations concernant la turgescence étant alors réduites, la cellule peut absorber un surplus d'eau et se dilater. Les petites vacuoles, qui renferment la majeure partie de l'eau, fusionnent et forment la vacuole centrale de la cellule.





Mécanisme hypothétique selon lequel les microtubules orienteraient les microfibrilles de cellulose. Les microfibrilles de cellulose sont synthétisées à la surface de la cellule par des complexes enzymatiques qui peuvent se déplacer sur le plan de la membrane plasmique. Une hypothèse indique que les microtubules forment des « talus » qui obligent les enzymes à se déplacer dans une direction précise. Chaque complexe enzymatique avance ainsi le long d'une rangée de talus, à mesure que la microfibrille qu'il fabrique se met en place en se fixant à d'autres microfibrilles au moyen de ponts transversaux.

FIGURE 38. Microtubules et intussusception. D'après CAMPBELL & REECE (2004)

f. Un processus souvent irréversible qui s'achève par la production d'une paroi secondaire

- *L'auxèse est généralement **irréversible**, sauf dans de **rares cas de dédifférenciation**.*
- **Allongement stoppé** lorsque :

>

>

3. L'auxèse, un processus contrôlé par une hormone végétale : l'auxine

a. L'auxine, une hormone végétale notamment produite par les méristèmes de l'appareil aérien

Hormones végétales (phytohormones) = facteurs de croissance :

Auxines (notamment acide indole-3-acétique = **AIA**) : production par le **MAC** (et aussi les jeunes feuilles)
→ contrôle de l'**auxèse** et de la **dominance apicale**

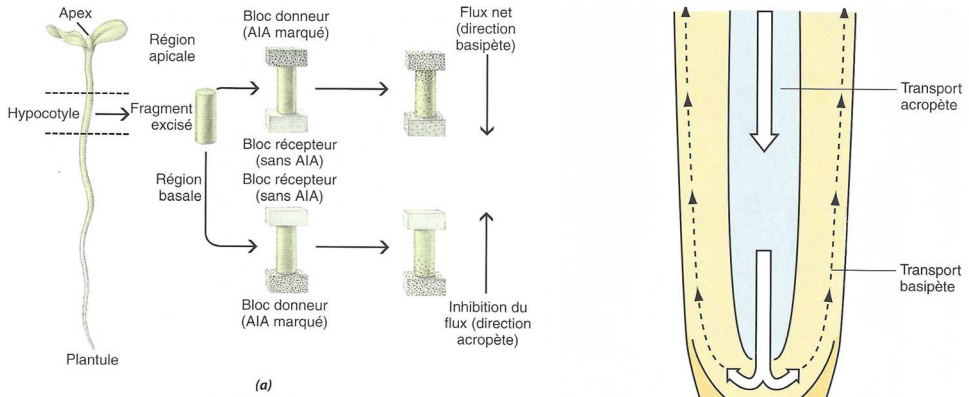
b. L'auxine, une hormone végétale qui se déplace selon deux modalités [*hors programme*]

Modalités de **transport de l'auxine** :

-

-

NB Transport polarisé : **emprunte l'apoplasme** (nécessité d'**entrée dans la cellule**).
*L'auxine entre et sort de la cellule sous **forme protonée (AIAH)** par simple **diffusion** ou bien **sous forme ionisée (AIA⁻)** par des **protéines de transport (PIN, AUX)***



Transport des auxines (a) Preuve expérimentale du transport orienté de l'auxine dans la tige, représentée ici par un segment d'hypocotyle de plantule. Ces segments sont placés entre deux blocs d'agar. Le bloc donneur contient une auxine marquée par radioactivité. L'importance du transport est estimée par l'accumulation de la radioactivité dans le bloc récepteur après un temps donné. Le déplacement basipète (polaire) est beaucoup plus rapide que le mouvement acropète (non polaire). (b) Dans la racine, le transport non polaire (acropète) de l'AIA passe par le phloème du cylindre conducteur, alors que son transport polaire (basipète) s'effectue dans les cellules de l'épiderme et du parenchyme cortical.

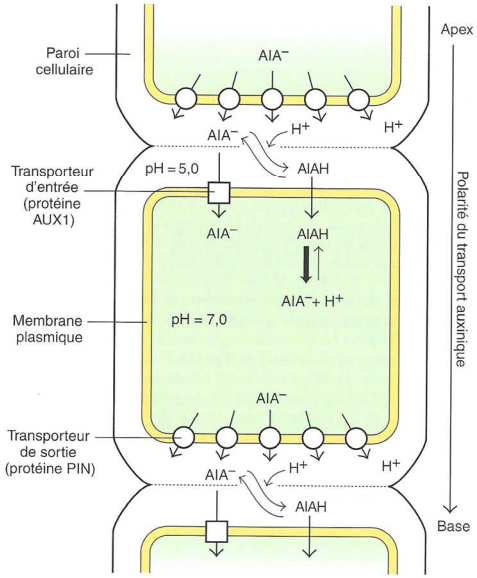


Schéma montrant le transport polaire de l'auxine L'AIA associé à un proton (AIAH) pénètre dans la cellule par diffusion passive et/ou par transport actif secondaire sous sa forme anionique (AIA^-) grâce à un transporteur d'entrée (protéine AUX1). La forme anionique (AIA^-) est prédominante dans le cytosol, dont le pH est neutre. Les anions ne sortent des cellules que par leur extrémité basale, grâce à des transporteurs de sortie (protéines PIN).

FIGURE 40. Transport polarisé de l'auxine. D'après RAVEN *et al.* (2007b)

Encadré G Les facteurs de croissance ou hormones végétales

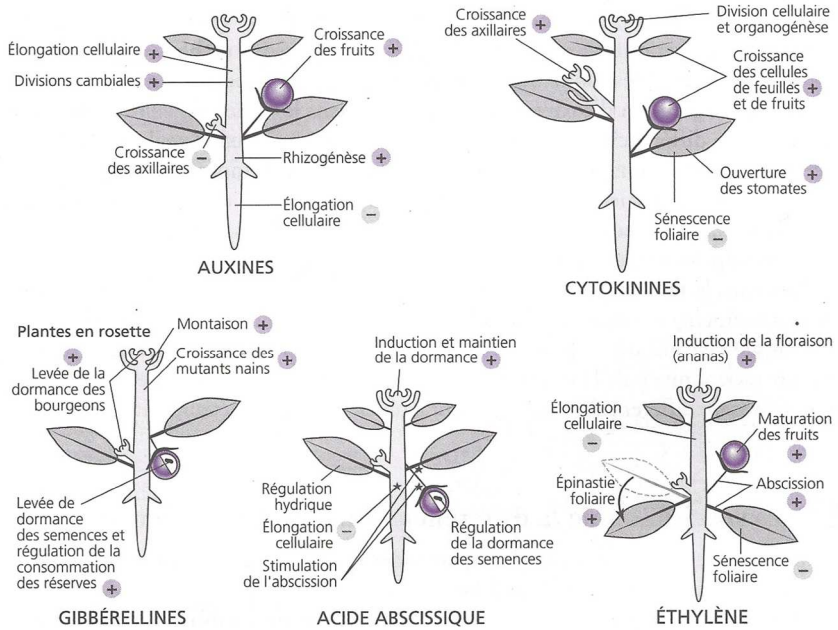
(Pour aller plus loin : d'après DUCREUX, 2002, et MEYER et al., 2008)

Approfondissement

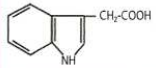
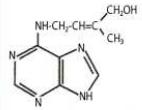
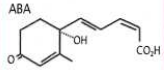
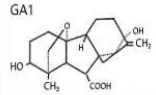
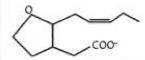
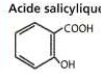
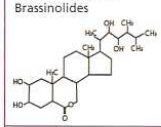
Les activateurs de croissance (ou hormones végétales)

La notion d'hormone reste encore discutée chez les plantes. Chez l'animal, les hormones sont des substances organiques agissant à faible dose et secrétées par des glandes endocrines spécialisées dans le milieu intérieur pour être adressées à un tissu ou des cellules spécifiquement sensibles à leur action.

Chez les végétaux, cette définition est difficile à appliquer. Les lieux de synthèse sont mal définis, même si l'on considère que l'auxine est majoritairement synthétisée au niveau des méristèmes, les fonctions multiples et les mécanismes d'action mal élucidés. On sait néanmoins utiliser ces substances pour réguler certaines fonctions, agir sur la différenciation/dédifférenciation cellulaire, modifier le comportement des plantes dans un cadre agronomique. Pour éviter toute ambiguïté quant au réel statut des hormones végétales, on utilise plus généralement les termes d'activateurs ou de régulateurs de croissance.



Principales fonctions attribuées à cinq des activateurs de croissance. (D'après une illustration de J. Guern.)

Phytohormones	Biosynthèse et transport	Effets biologiques
Auxine (AIA : acide indolacétique) 	• Synthèse connue à partir du tryptophane, dans les feuilles jeunes, les primordiums et les graines en développement, mais d'autres voies de synthèse existent. • Transport polarisé de cellule à cellule et transport à longue distance par le phloème.	+ Élongation cellulaire caulinaire Activité cambiale Croissance des fleurs et des fruits Rhizogenèse (racines adventives) Dominance apicale − Élongation cellulaire racinaire Abscission Floraison de certaines espèces
Cytokinines (CK) Zéatine : 	• Synthèse par la voie des terpènes à partir d'un précurseur en C5. • Les cytokinines sont des dérivés de l'adénine (ATP) avec un groupement isoprène en position N⁶. • Synthèse dans les tissus jeunes ou méristématiques (apex racinaires, bourgeons, cambium, graines en développement). • Transport par le xylème.	+ Croissance cellulaire des feuilles, des fruits, des bourgeons axillaires Division cellulaire, organogenèse Ouverture des stomates Floraison de certaines espèces − Sénescence foliaire Dominance apicale
Éthylène Gaz C_2H_4 $H_2C = CH_2$	• Synthétisé à partir de la méthionine dans les tissus sénescents ou soumis à un stress. • Transport par diffusion.	+ Maturation des fruits Abscission (feuille, fruit) Sénescence (feuille, fleur) Ouverture des fleurs − Élongation cellulaire caulinaire et racinaire
Acide abscissique (ABA) 	• Synthèse par la voie des terpènes à partir d'un précurseur en C40. • L'ABA est un sesquiterpène synthétisé à partir des caroténoïdes du plaste (voie non mévalonique) dans les feuilles matures en réponse à des stress abiotiques, les tiges, les racines, les graines et fruits en développement). • Transport par le phloème et le xylème.	+ Induction et maintien de la dormance Fermeture des stomates Allocation des assimilats des feuilles aux graines en formation Synthèse de protéines de réserves dans les graines − Élongation cellulaire ; action antagoniste des gibbérellines
Gibbérellines Acide gibbérellique GA_1 	• Synthèse par la voie des terpènes à partir d'un précurseur en C20. • Les GA sont des diterpènes cycliques • Synthèse dans la tige feuillée, les jeunes feuilles des bourgeons apicaux, les graines et les fruits en développement, les apex racinaires. • Transport par le xylème et le phloème.	+ Croissance et élongation cellulaire de la tige feuillée (montaison) Croissance des mutants nains Induction de la germination de graines Régulation de la consommation des réserves des graines de céréales Floraison de plantes de jours longs
Jasmonate 	• Dérivé volatile d'acides gras insaturés (acide linolénique). • Synthèse dans toutes les parties de la plante.	+ Synthèse de protéines de défenses Accumulation de protéines de réserves − Croissance des tiges, des racines, Germination des graines
Systémine Petit peptide (18 AA)	• Petit peptide produit dans les tissus blessés.	+ Défense systémique
Acide salicylique 	• Synthèse par la voie de l'acide shikimique. • L'acide salicylique est un composé phénolique.	+ Activation des gènes de défense contre les agents pathogènes Défense systémique Croissance racinaire
Brassinostéroïdes Brassinolides 	• Synthèse par la voie des terpènes à partir d'un précurseur en C30. • Les Brassinostéroïdes sont des hormones stéroïdes. • Présent dans le pollen, les graines immatures, les feuilles, les tiges, les racines et les fleurs.	+ Division et élongation cellulaires Élongation du tube pollinique Élongation de la tige feuillée Morphogenèse foliaire Production d'éthylène − Croissance et développement des racines Différenciation vasculaire
Polyamines Spermine $H_2N(CH_2)_3NH(CH_2)_4NH(CH_2)_3NH_2$ et putrescine $H_2N(CH_2)_4NH_2$	• La spermine est formée par la voie de synthèse de l'éthylène. • La putrescine est formée par décarboxylation de l'arginine et de l'ornithine. • Présentes dans toutes les cellules. Souvent conjuguées aux acides phénoliques.	+ Division cellulaire Tubérisation Initiation de racines et tiges adventives Embryogenèse Réaction d'hypersensibilité Floraison de certaines espèces − Sénescence des tissus

c. L'auxine, une hormone codée en concentration qui agit différemment selon le tissu cible

⮝ **FIGURE 41. Effet de l'auxine en fonction du type d'organe.** D'après BREUIL (2007)

d. L'auxine, une hormone végétale dont on peut proposer un modèle d'action (dans les cellules en élongation de la tige) : favorisation de l'acidification des parois et régulation génétique

ABP (*Auxin Binding Protein*) :

Bilan (adapté du programme)	✓ L'**auxèse** ou **grandissement cellulaire** repose sur des **modifications pariétales**, des **flux hydriques** et une **néosynthèse de composants matriciels**. ✓ L'**auxèse** est sous le **contrôle** d'une **phytohormone**, l'**auxine.**

⮝ **FIGURE 42. Action de l'auxine sur l'élongation d'une cellule caulinaire.** D'après BREUIL (2007)

B. La différenciation des cellules, processus qui permet l'élaboration de tissus spécialisés ou histogenèse

Capacités exigibles	✓ **Présenter** les étapes et les mécanismes de la différenciation d'un vaisseau de xylème ; ✓ **Montrer** que les modifications de la paroi sont un élément majeur de la différenciation des cellules chez les angiospermes.

1. Caractères généraux de la différenciation

-
-
-
-
-

2. Une filiation cellulaire qui remonte toujours aux méristèmes, et même aux cellules embryonnaires

FIGURE 43. Cellules dérivant du MAC. D'après CAMPBELL & REECE (2004), légèrement modifié.
[Ce document est très simplifié]

3. Un exemple de différenciation : la xylogenèse, production de vaisseaux de xylème stimulée par l'auxine

- **Xylème I** : dérive du **procambium**
- **Xylème II** : dérive du **cambium**

Étapes de **différenciation** :

(a)

(b)

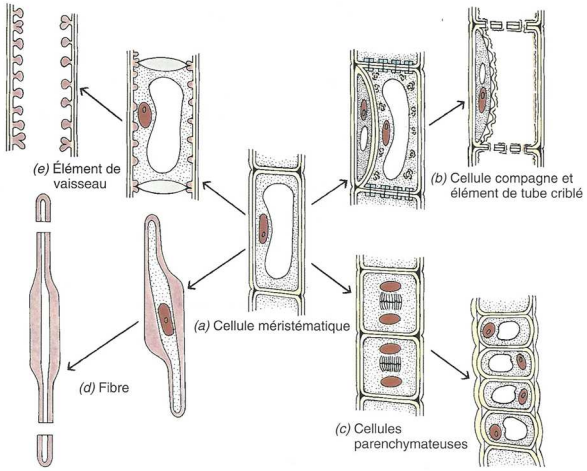
(c)

(d)

FIGURE 44 (bas). La xylogenèse, différenciation du xylème I. D'après RAVEN *et al.* (2007b)

*Notons que l'**auxine** stimule la **xylogenèse**. Les **cytokinines** interviennent dans une moindre mesure et modulent la **taille des vaisseaux**.*

4. Une diversité de cellules issues des cellules procambiales ou cambiales : un aperçu



Différenciation des cellules Divers types de cellules peuvent provenir d'une cellule méristématique du procambium ou du cambium. (a) La cellule méristématique dessinée ici (au centre), avec une seule vacuole centrale, est représentative des cellules méristématiques du cambium. Les cellules procambiales possèdent normalement plusieurs petites vacuoles. On a représenté ici quatre types différents de cellules : (b) élément de tube criblé avec cellule compagne, (c) cellule parenchymateuse, (d) fibre et (e) élément de vaisseau. Les cellules méristématiques, précurseurs de ces cellules, ont la même composition génétique. Les différents types cellulaires se différencient les uns des autres parce que des lots de gènes différents s'expriment dans chacun d'eux.

FIGURE 45. Cellules dérivant du procambium ou du cambium. D'après RAVEN *et al.* (2007b)

Bilan (adapté du programme)	✓ La **différenciation cellulaire** correspond à la **spécialisation structurale** et **fonctionnelle** des **cellules**.

III. Environnement et plasticité phénotypique des Angiospermes au cours du DPE

Phénotype :
Environnement :
♥ **Plasticité phénotypique :**

A. Le DPE des Angiospermes : un développement sous influence environnementale

Capacités exigibles	✓ **Montrer** que le développement indéfini des végétaux permet une plasticité morpho-anatomique en relation avec l'environnement ✓ **Distinguer**, à partir de l'analyse d'exemples, accommodation, adaptation et convergence morphologique. ✓ **Établir** que la production des tissus conducteurs secondaires par le cambium est liée aux variations saisonnières. ✓ **Montrer** que les variations du milieu influencent la relation anatomie/physiologie au sein d'une feuille (exemples : feuille d'ombre et de lumière, index stomatique).

1. Les Angiospermes, des organismes fixes et à développement indéfini, soumis aux fluctuations environnementales

2. Typologie des modalités d'action de l'environnement sur la morphogenèse et le phénotype

a. L'accommodation, une modulation de l'expression génétique par l'environnement

α. Notions d'accommodation et d'accommodat

(!) Pas de modification de l'IG !

Accommodation :
Accommodat :

β. L'anémomorphose, un exemple d'accommodation en conditions de vent importantes

Anémomorphose :

FIGURE 48. Anémomorphose et port en drapeau.
Document emprunté à J. SEGARRA, *source inconnue.*

γ. Mise en évidence de la réversibilité d'une accommodation : cas des expériences transplantation de Marguerites de BONNIER

exemples d'accommodation

A-B. expérience de Bonnier : une touffe de marguerite (*Leucanthemum vulgare,* Astéracées) de la région parisienne est fragmentée en deux, l'une est cultivée sur place, l'autre en montagne, sous un climat alpin. Les individus nouvellement formés par multiplication végétative (donc de même génotype) sont grands en plaine (**A**) et nains en altitude (**B**). Ces deux phénotypes sont des accommodats.

FIGURE 49. Expérience de transplantation de BONNIER. D'après MEYER *et al.* (2008).

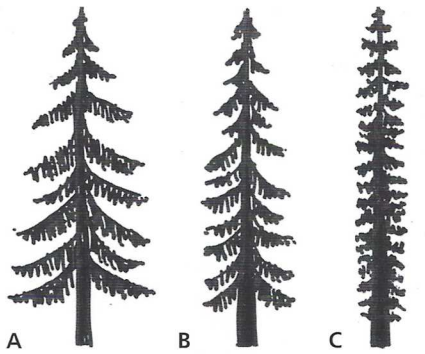
b. L'adaptation, une caractéristique héréditaire acquise par sélection naturelle au cours de l'évolution

α. Notions d'adaptation (évolutive) et d'écotype

Adaptation (évolutive) :
Écotype :

Attention au finalisme !

β. La morphologie des Épicéas en lien avec l'altitude, un exemple d'adaptation



morphologie d'épicéas adaptés à différentes altitudes dans le Jura
A. forme pyramidale de basse altitude. **B.** forme intermédiaire d'altitude moyenne. **C.** forme columnaire de haute altitude. Chaque forme constitue un écotype (*d'après Sciences de la Vie et de la Terre, première S, de Didier*).

FIGURE 50. <u>Trois morphologies typiques d'Épicéas issus du processus d'adaptation : plaine (A), colline (B), montagne (C)</u>. D'après MEYER *et al.* (2008).

c. Les convergences évolutives, des adaptations acquises indépendamment en réponse à des contraintes environnementales semblables

α. Notion de convergence (évolutive) (et de convergence « morphologique »)

Convergence (évolutive) :

β. L'adaptation des végétaux à la sécheresse, un exemple de convergences évolutives

Xérophytes :

Diversité :
-

-

-

>

>

>

>

>

>

-

>

>

>

>

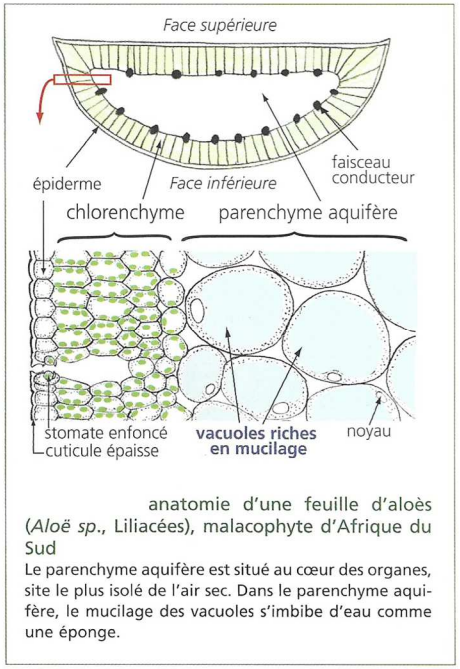
>

-

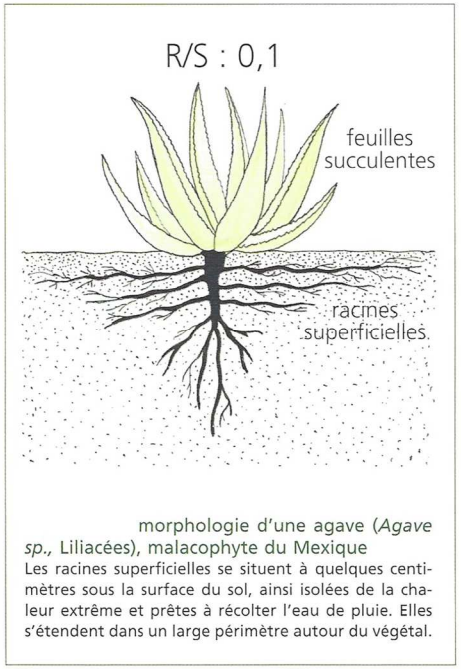
⮝ **FIGURE 51. <u>Diversité des xérophytes</u>.** D'après MEYER *et al.* (2008).

⮝ **FIGURE 53. <u>Enroulement et ouverture des feuilles d'Oyat + schéma en figurés conventionnels</u>.**
D'après MEYER *et al.* (2008) et BOUTIN *et al.* (2010)

⮝ **FIGURE 54. <u>Coupe transversale de limbe de Joubarbe</u>.** D'après BOUTIN *et al.* (2010) et original.



anatomie d'une feuille d'aloès (*Aloë sp.*, Liliacées), malacophyte d'Afrique du Sud
Le parenchyme aquifère est situé au cœur des organes, site le plus isolé de l'air sec. Dans le parenchyme aquifère, le mucilage des vacuoles s'imbibe d'eau comme une éponge.

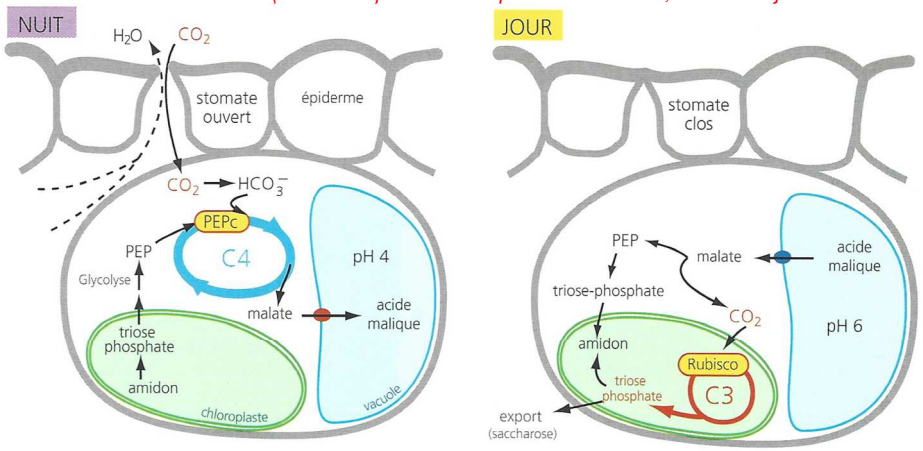


morphologie d'une agave (*Agave sp.*, Liliacées), malacophyte du Mexique
Les racines superficielles se situent à quelques centimètres sous la surface du sol, ainsi isolées de la chaleur extrême et prêtes à récolter l'eau de pluie. Elles s'étendent dans un large périmètre autour du végétal.

⮝ **FIGURE 55. <u>Adaptations morpho-anatomiques des malacophytes</u>.** D'après MEYER *et al.* (2008).

Encadré B — Le métabolisme CAM, un découplage temporel entre captation du CO_2 (la nuit) et assimilation réductrice (le jour)

(Pour aller plus loin : d'après MEYER et al., 2008… déjà tombé à l'écrit !)



photosynthèse CAM pendant la nuit (air à 10 °C et 30 % d'humidité relative) et le jour (30 °C, 5 %) dans une cellule de chlorenchyme

La nuit, l'hydrolyse de l'amidon permet la formation du PEP à rôle d'accepteur du CO_2. Le jour, l'amidon est restauré à partir des sucres C3. La décarboxylation du malate libère du CO_2, qui sera assimilé dans le chloroplaste, et forme du pyruvate qui est converti en PEP puis en triose-phosphate par les réactions inverses de la glycolyse. Le triose-phosphate est transporté dans le chloroplaste où il entre dans la synthèse d'amidon.

L'import du malate (ion) dans la vacuole est actif (couplage avec des pompes à protons), son export est supposé passif. Dans la vacuole, il devient l'acide malique.

FIGURE a. Adaptation métabolique des malacophytes : le métabolisme CAM [*pour information : hors programme*]. D'après MEYER *et al.* (2008).

3. Les rythmes saisonniers, un cas de facteur environnemental modulant le DPE des Angiospermes : illustration au travers du fonctionnement cambial

Cf. plus haut

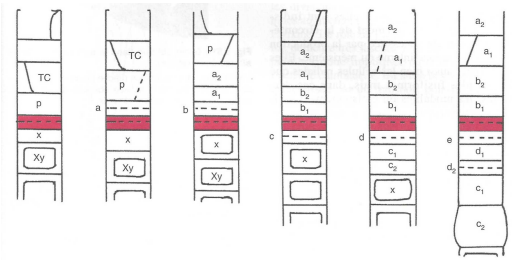


FIGURE 56. Fonctionnement cambial et saisonnalité. D'après ROBERT & CATESSON (2000).

4. Un impact des facteurs environnementaux sur la relation anatomie-physiologie : cas des feuilles d'ombre et de lumière

α. Une accommodation en lien avec la quantité de lumière reçue : cas des feuilles d'un même arbre ou d'arbres proches d'un même lieu

Feuilles de lumière (cime, périphérie)	Feuilles d'ombre (base, intérieur)

Indice stomatique :

$$IS = \frac{\textit{nombre de cellules de garde}}{\textit{nombre de cellules de garde} + \textit{nombre de cellules épidermiques au sens strict}}$$

FIGURE 57. Feuilles de lumière et d'ombre. D'après MEYER *et al.* (2008). [*Seulement le schéma*]

β. Une adaptation chez les espèces héliophiles et sciaphiles

Plantes de lumière = héliophiles (du gr. *helios*, le soleil) **:**
Plantes d'ombre = sciaphiles (du gr. *skia*, l'ombre) **:**

γ. Aspects physiologiques (métaboliques) de l'impact de la lumière : notion de point de compensation à la lumière

Végétaux sciaphiles : **point de compensation à la lumière proche de 0**.

Point de compensation à la lumière :
Éclairement saturant :

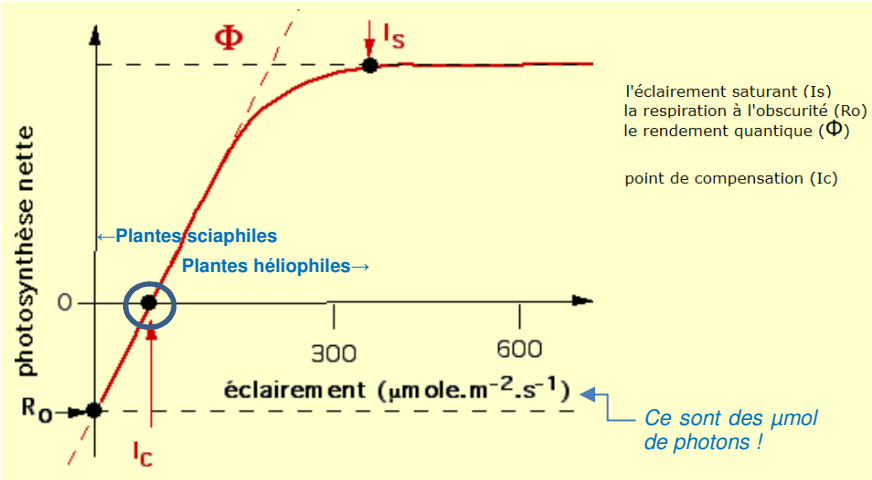


FIGURE 58. Impact de la lumière et notion de point de compensation.
http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Photosynthese-cours/06-facteurs.htm (cons. février 2017)

Bilan (adapté du programme)	✓ Les **variations morphologiques**, **anatomiques** et **physiologiques** des **organes** d'une **même espèce** sont sous la **dépendance** des **conditions du milieu** au cours de leur **développement**.

B. Le phototropisme caulinaire, un exemple de modulation du DPE des Angiospermes par la répartition d'une ressource, la lumière

Capacités exigibles	✓ **Mettre en évidence**, avec des données expérimentales, le rôle de l'auxine dans le phototropisme caulinaire et ses mécanismes ; ✓ **Présenter** un modèle d'interactions cellulaires et moléculaires expliquant la courbure phototropique.

1. En guise d'introduction : un panorama des « mouvements » végétaux [*pour information ?*]

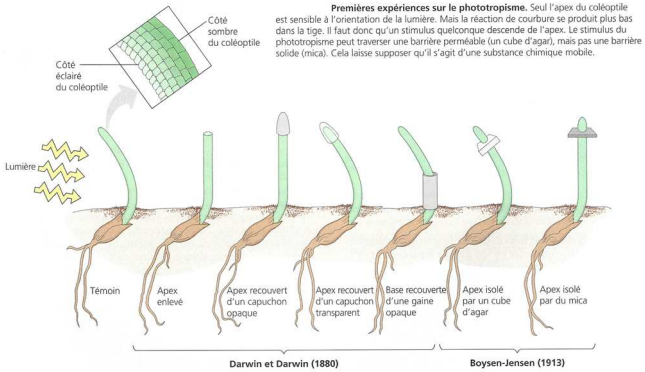
Mouvements =

Tropismes :
- Phototropisme :
- Gravitropisme = géotropisme (du gr. *gê*, la terre) **:**
- Thigmotropisme :
Nasties :
- Nyctinasties :
- Thigmonasties :
Héliotropisme :
Thigmomorphogenèse :

PLAGIOTROPISME :
ORTHOTROPISME :

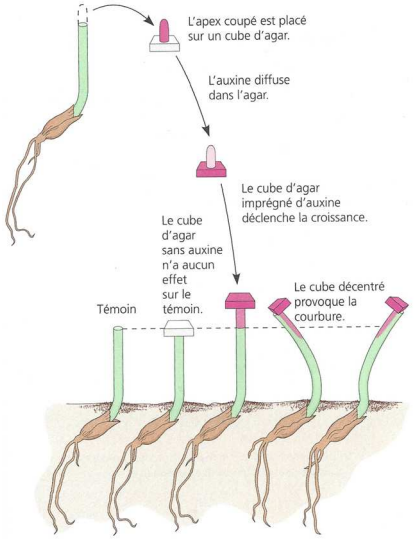
2. Étude expérimentale du phototropisme positif de la tige

Coléoptile :



Premières expériences sur le phototropisme. Seul l'apex du coléoptile est sensible à l'orientation de la lumière. Mais la réaction de courbure se produit plus bas dans la tige. Il faut donc qu'un stimulus quelconque descende de l'apex. Le stimulus du phototropisme peut traverser une barrière perméable (un cube d'agar), mais pas une barrière solide (mica). Cela laisse supposer qu'il s'agit d'une substance chimique mobile.

FIGURE 59. Expériences de DARWIN (1880) et BOYSEN-JENSEN (1913).
D'après CAMPBELL & REECE (2004).



Expériences de Went. Une substance chimique (représentée en rose) capable de passer dans un cube d'agar provoque l'allongement du coléoptile lorsque l'on remplace l'apex par le cube. Si le cube est décentré sur le coléoptile décapité et gardé dans l'obscurité, le coléoptile se courbe comme s'il réagissait à un éclairage latéral. La substance est une hormone appelée auxine. Elle provoque l'allongement des cellules de la pousse.

FIGURE 60. Expériences de WENT (1926).
D'après CAMPBELL & REECE (2004).

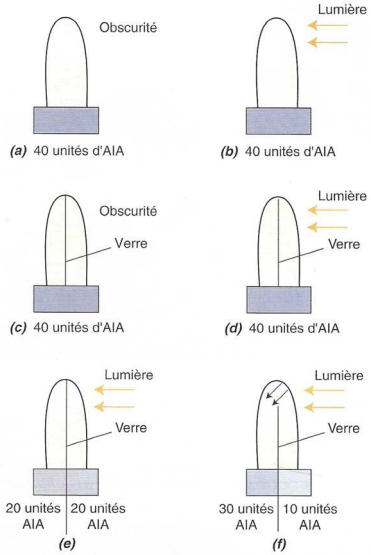


FIGURE 61. Expériences de BRIGGS (1964).
D'après RAVEN *et al.* (2007b).

Spectre d'action révélant le rôle de la lumière bleue dans le phototropisme. (a) La courbure d'une plante vers la source lumineuse est régie par un photorécepteur de la lumière bleue appelé phototropine. Dans ce spectre d'action correspondant au phototropisme du coléoptile du Maïs (*Zea mays*), on peut constater que seules des longueurs d'onde inférieures à 500 nm (bleu et ultraviolet) réussissent à provoquer une courbure de la pousse. **(b)** Les photographies du haut ont été prises au début de l'expérience ; celles du bas, après une exposition de 90 minutes à une lumière latérale de la couleur indiquée.

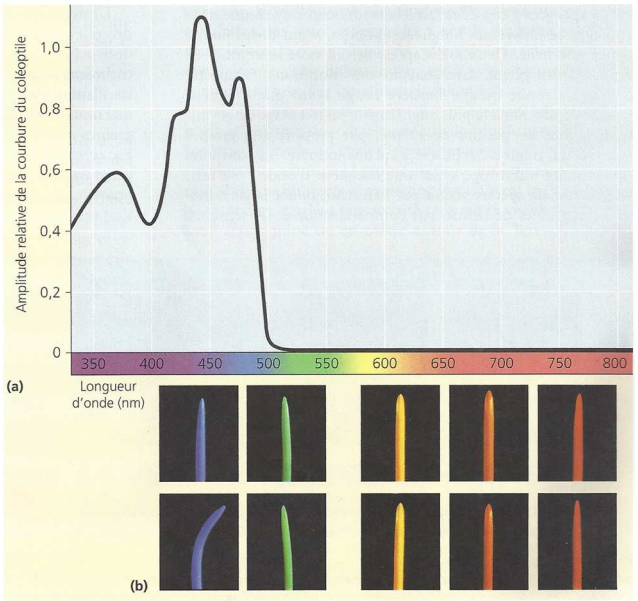


FIGURE 62. Mise en évidence du rôle de la lumière bleue dans le phototropisme.
D'après CAMPBELL & REECE (2004).

a. Le phototropisme, une réponse à une répartition anisotrope de l'éclairement

b. Le phototropisme, un processus supposant une courbure due à une auxèse différentielle des deux côtés d'une tige

c. Le phototropisme, un processus supposant la captation de l'anisotropie de lumière au niveau apical (méristématique)

d. Le phototropisme, un processus médié par l'auxine

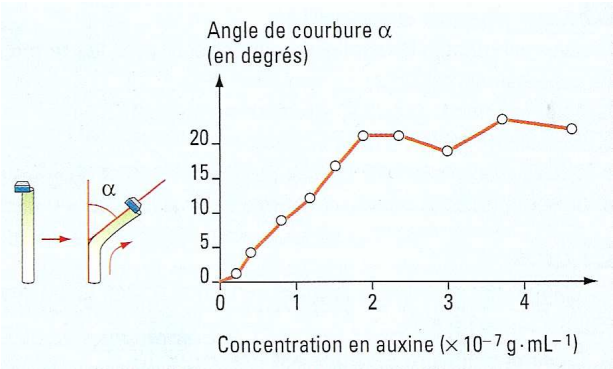
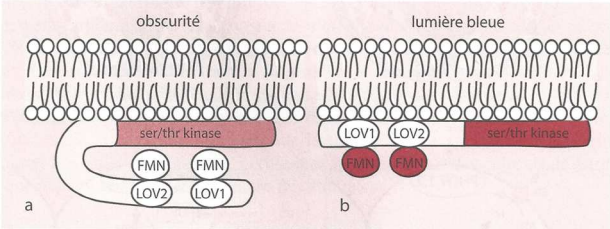


FIGURE 63. Le test avoine de WENT (1926).
À l'époque de WENT, l'axe des abscisses correspondait au temps de dépôt du bloc d'agar chargé en « facteur diffusible ».
D'après DUCO *et al.* (2001).

e. Le phototropisme, un processus impliquant une modification de la répartition de l'auxine et donc un transport latéral de l'auxine

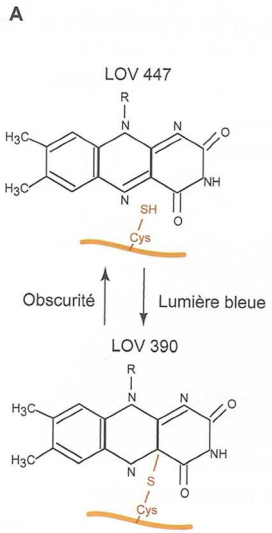
f. Le phototropisme, un processus supposant une détection de radiations bleues [par les phototropines]

Les phototropines sont des photorécepteurs à la lumière bleue impliquées dans la régulation des processus servant à optimiser l'efficacité photosynthétique des végétaux pour adapter leur croissance en fonction de leur environnement lumineux.



Perception de la lumière bleue par les phototropines.
Ces protéines possèdent dans la partie N-terminale une région avec deux domaines LOV et dans la partie C-terminale un domaine ser/thr kinase. Suite à la perception de la lumière bleue par les deux chromophores FMN, la protéine change de conformation, ce qui permet au domaine ser/thr kinase de la protéine de pouvoir interagir avec des protéines substrat. **FMN** : Flavine MonoNucléotide ; **LOV** : domaine Light, Oxygen, Voltage.

FIGURE 64. Les phototropines.
D'après MOROT-GAUDRY, PRAT *et al.* (2009b). *Le détachement de la membrane de la conformation activée de la protéine n'est pas représenté.*



A : Formes non covalente et covalente de la FMN suite à une photo-excitation par la lumière bleue ; B : Perception de la lumière bleue et activation par auto-phosphorylation de la phototropine

FIGURE 65. Les phototropines : autre vision.
D'après RICHARD *et al.* (2012).

Phototropines :

Protéines membranaires extrinsèques
Deux conformations :

-

-

>

>

Effet probable des **phototropines activées** (au niveau **cytosolique**) :

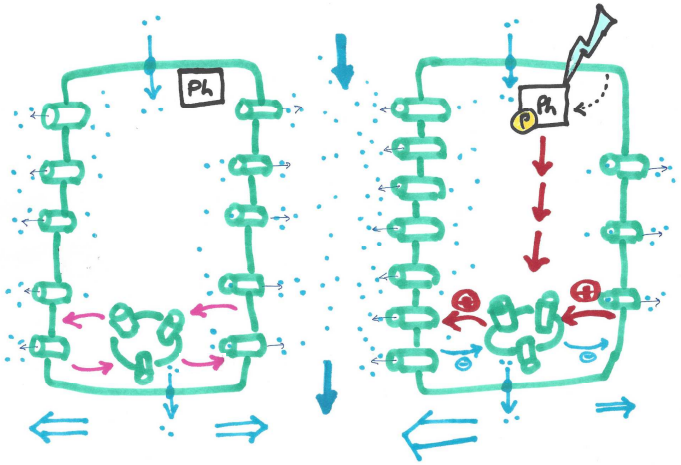


FIGURE 66. Modèle ultra-simplifié des conséquences de l'activation des phototropines sur le transport latéral d'auxine. *Figure originale compilée de multiples sources.*

3. Bilan : modèle simple de fonctionnement de la courbure phototropique

Conséquences d'un éclairage anisotrope :

-

-

-

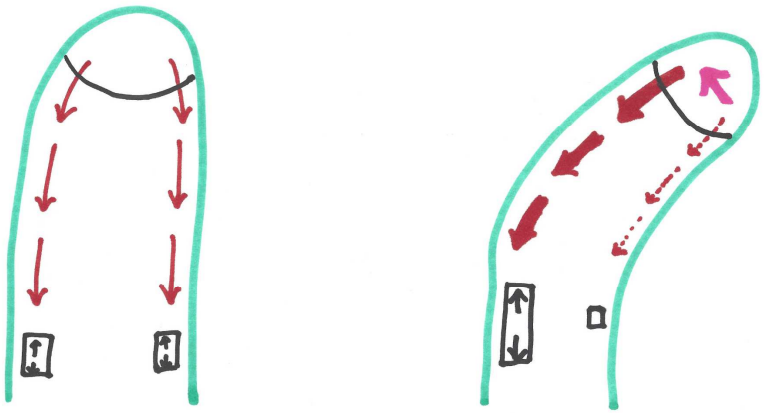


FIGURE 67. Le phototropisme : modèle global. *Figure originale.*

Bilan (adapté du programme)	✓ Le **phototropisme** est une **croissance orientée** liée à une **auxèse différentielle**. ✓ La **lumière**, **facteur externe**, induit une **répartition différentielle** de l'**auxine**.

C. Des processus de DPE comparables dans l'appareil racinaire par rapport à l'appareil caulinaire

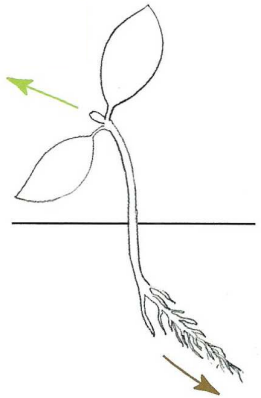
1. Un DPE qui fait appel à un méristème apical racinaire (MAR) et aux trois processus du développement : mérèse, auxèse, différenciation

- Revoir I.A.2. et l'encadré C.

2. Une possibilité de ramification par des méristèmes latéraux (néoformés)

- Revoir I.D.2.a. et la figure 32.

3. Un contrôle possible du DPE par l'environnement : l'exemple du gravitropisme positif (lui aussi médié par l'auxine)



Vue schématique du phototropisme et du gravitropisme d'un végétal

FIGURE 68. Phototropisme et gravitropisme dans les racines et les tiges.
D'après MEYER *et al.* (2008). [à compléter]

Détection de l'orientation de la racine = due à des **amyloplastes (statolithes)** situés dans ***certaines cellules de la columelle (= partie centrale de la coiffe)*** : les **statocytes**

*Les **amyloplastes appuieraient sur le REG** et/ou la **membrane plasmique** où ils susciteraient **l'ouverture de canaux ioniques mécano-dépendants** (ces **amyloplastes lourds** exerceraient la **pression à l'origine de l'ouverture** des canaux). Les mécanismes fins de **transduction** sont complexes et en grande partie discutés.*

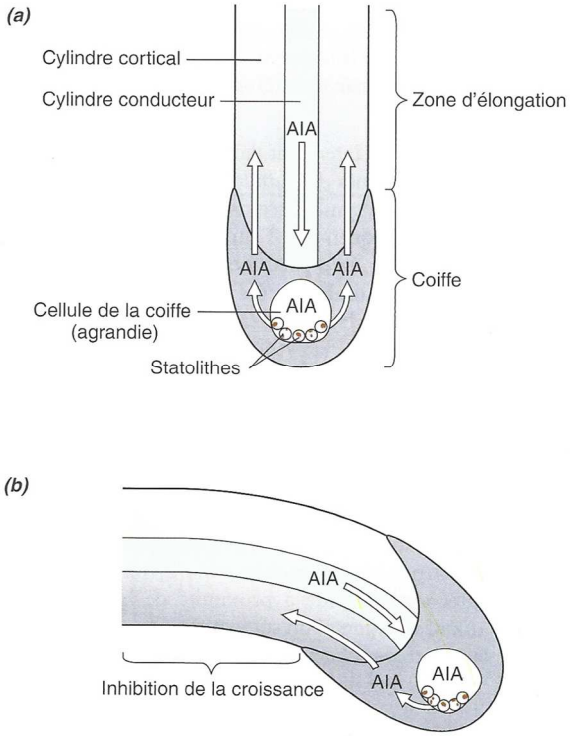
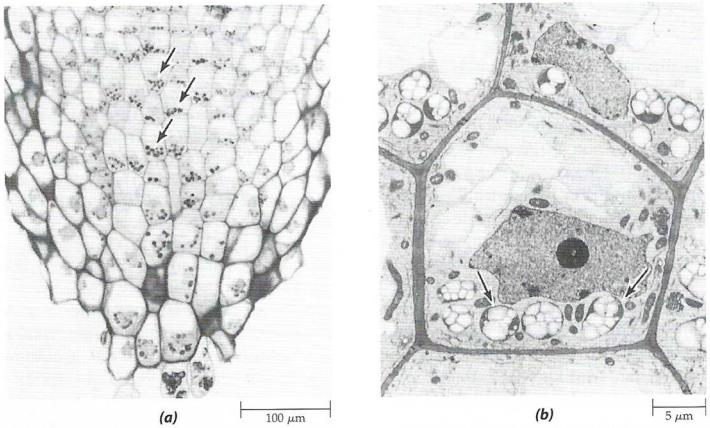


FIGURE 70. Contrôle auxinique du gravitropisme racinaire.
D'après RAVEN *et al.* (2007b).

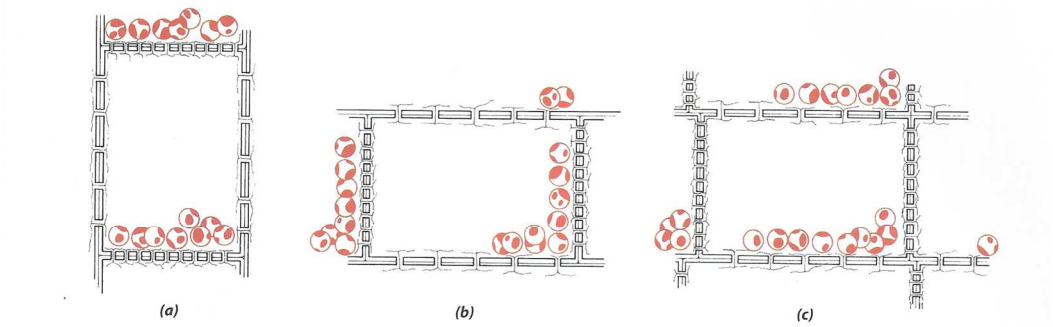
*Le rond blanc représenté dans la coiffe correspond globalement à la **columelle**, même si une seule cellule (un **statocyte**) a été ici représentée.*

Rappelons que, contrairement à ce qui se passe dans la ~~tige~~, les fortes concentrations d'auxine inhibent l'auxèse dans la racine ! (Revoir la figure 41).



Amyloplastes (a) Micrographie d'une coupe longitudinale de la coiffe de la racine primaire de haricot, Phaseolus vulgaris. Les flèches montrent des amyloplastes (plastes contenant de l'amidon) qui se sont déposés à proximité des parois transversales de la colonne centrale de cellules (columelle) de la coiffe. (b) Micrographie électronique de cellules de la columelle d'une coiffe semblable à celle qui est représentée en (a) Les amyloplastes (flèches) sont visibles au fond des cellules, près des parois transversales. On voit nettement les grains d'amidon à l'intérieu des amyloplastes.

FIGURE 71. <u>Les amyloplastes de la columelle (partie centrale de la coiffe), acteurs probables de la détection du champ de pesanteur</u>.
D'après RAVEN *et al.* (2007b).



Amyloplastes et gravité Réponse à la pesanteur des amyloplastes dans les cellules de la columelle de la coiffe. (a) Les amyloplastes se déposent normalement le long des parois transversales dans la coiffe d'une racine s'allongeant verticalement vers le bas. Si la racine est placée horizontalement, (b) et (c), les amyloplastes glissent vers les parois normalement verticales, mais qui sont maintenant parallèles à la sur du sol. Ce déplacement des amyloplastes peut jouer un rôle importar dans la perception de la pesanteur par les racines.

FIGURE 72. <u>Contrôle gravitropique par les amyloplastes des statocytes</u>.
D'après RAVEN *et al.* (1998b).

Bilan (adapté du programme)	✓ Les **modalités cellulaires** et **moléculaires** du **développement** ainsi que l'influence des **facteurs du milieu** se retrouvent dans le **développement** de **l'appareil racinaire**.

Schémas-bilans généraux (simples)

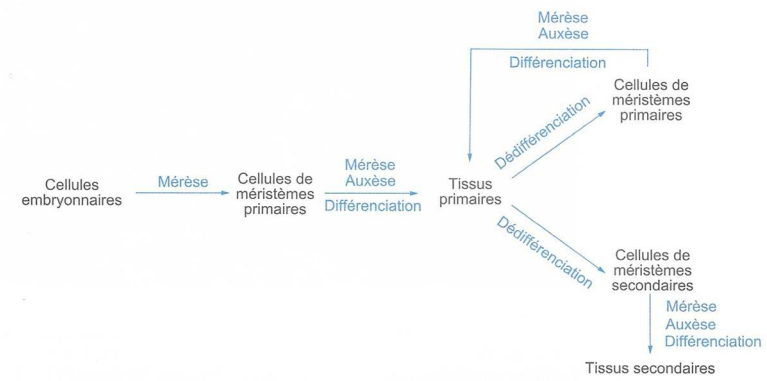


FIGURE 73. <u>Processus du développement post-embryonnaire végétal et filiation des grands types de tissus</u>.
D'après PEYCRU *et al.* (2010a).

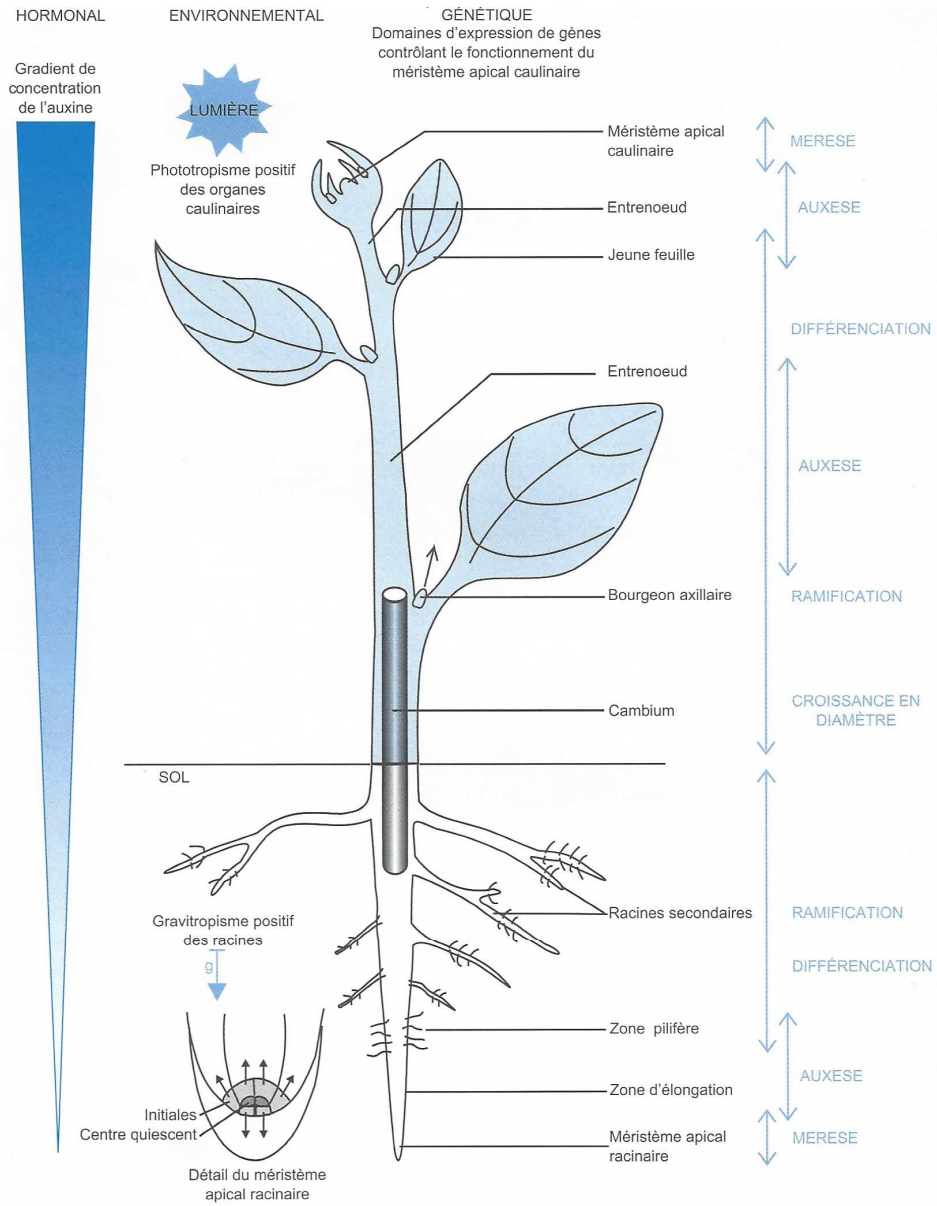


Figure de synthèse Le développement post-embryonnaire des Angiospermes et son contrôle.

FIGURE 74. Le DPE des Angiospermes (et son contrôle). D'après PEYCRU *et al.* (2010a).

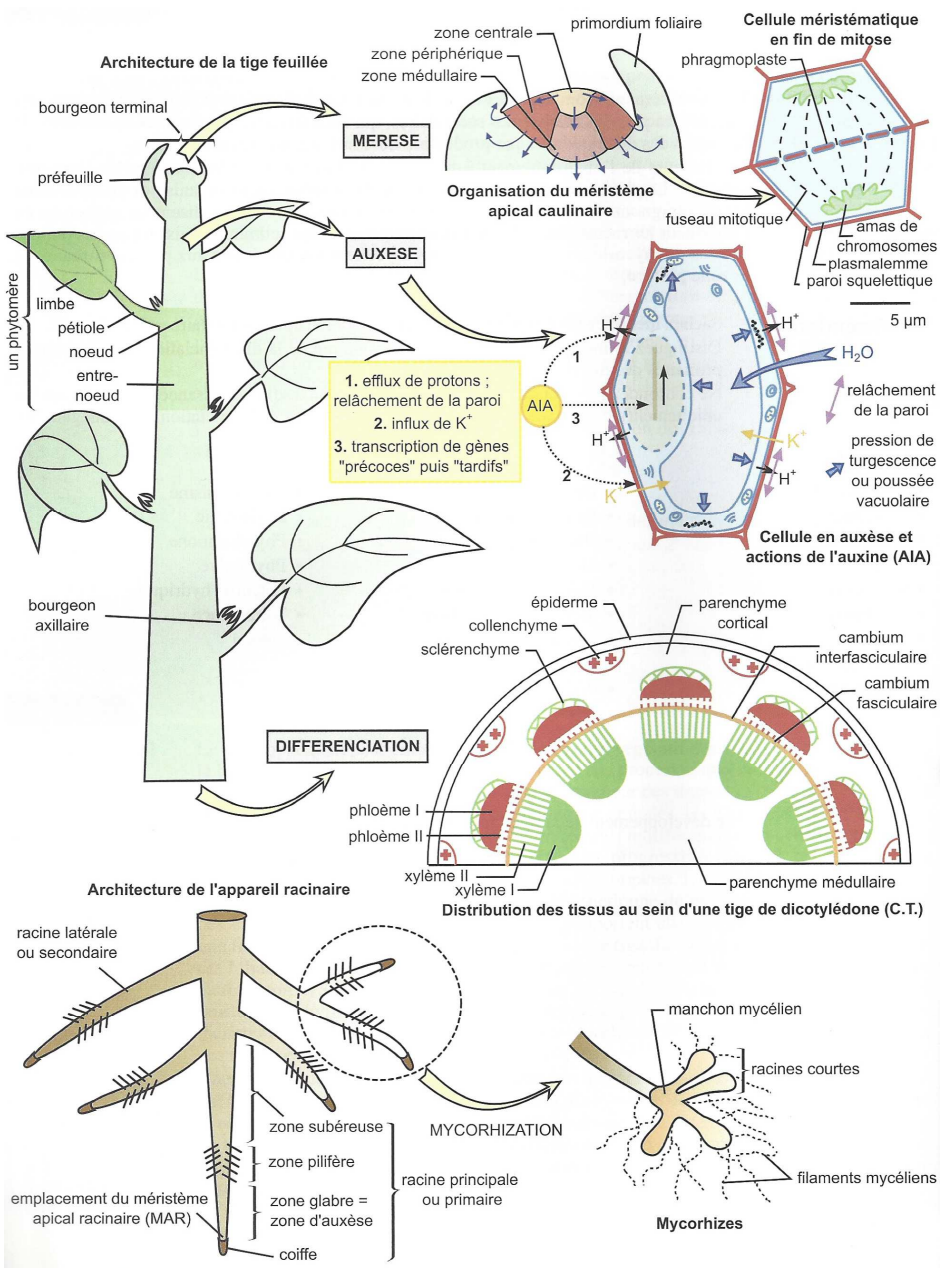


FIGURE 75. Le DPE des Angiospermes. D'après PEYCRU *et al.* (2014).

Schémas-bilans plus précis

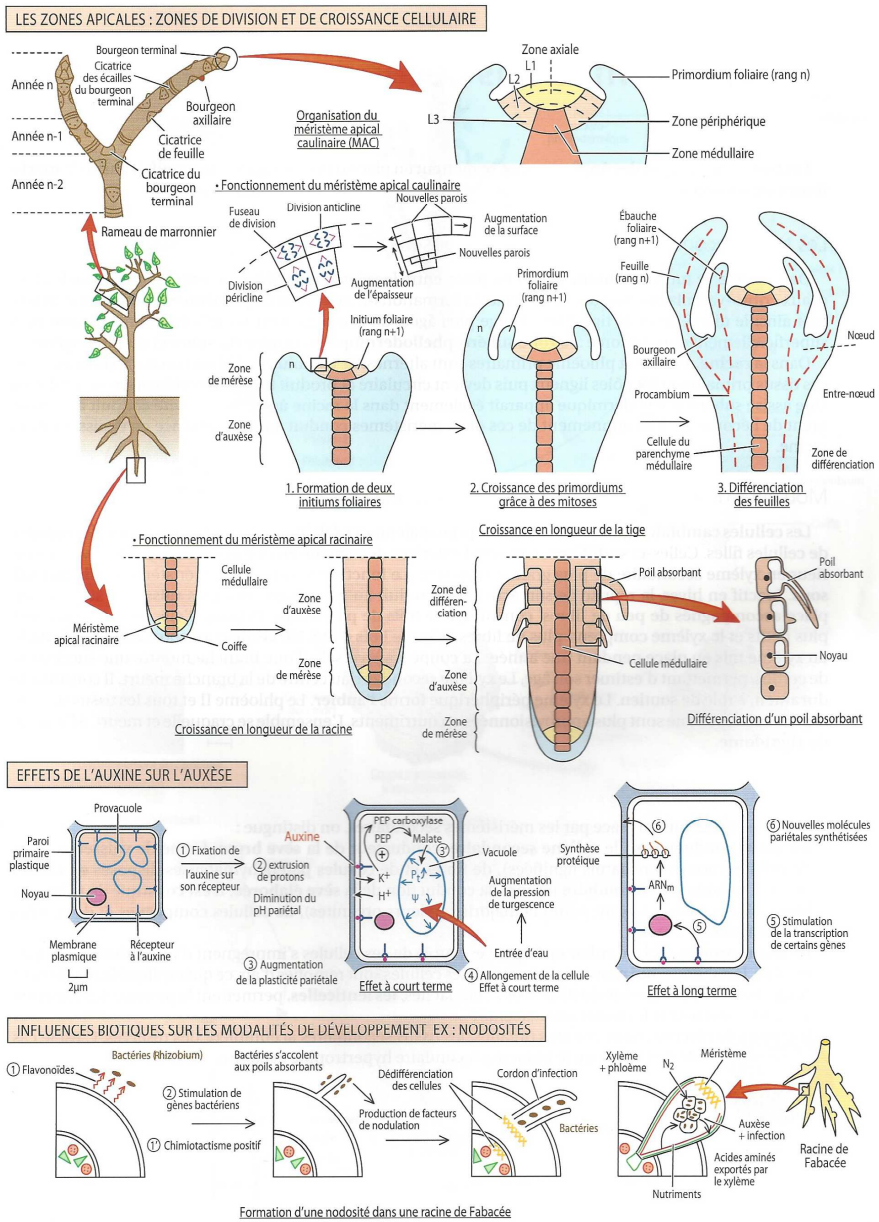


FIGURE 76. Méristèmes primaires et croissance en longueur. D'après SAINTPIERRE *et al.* (2017).

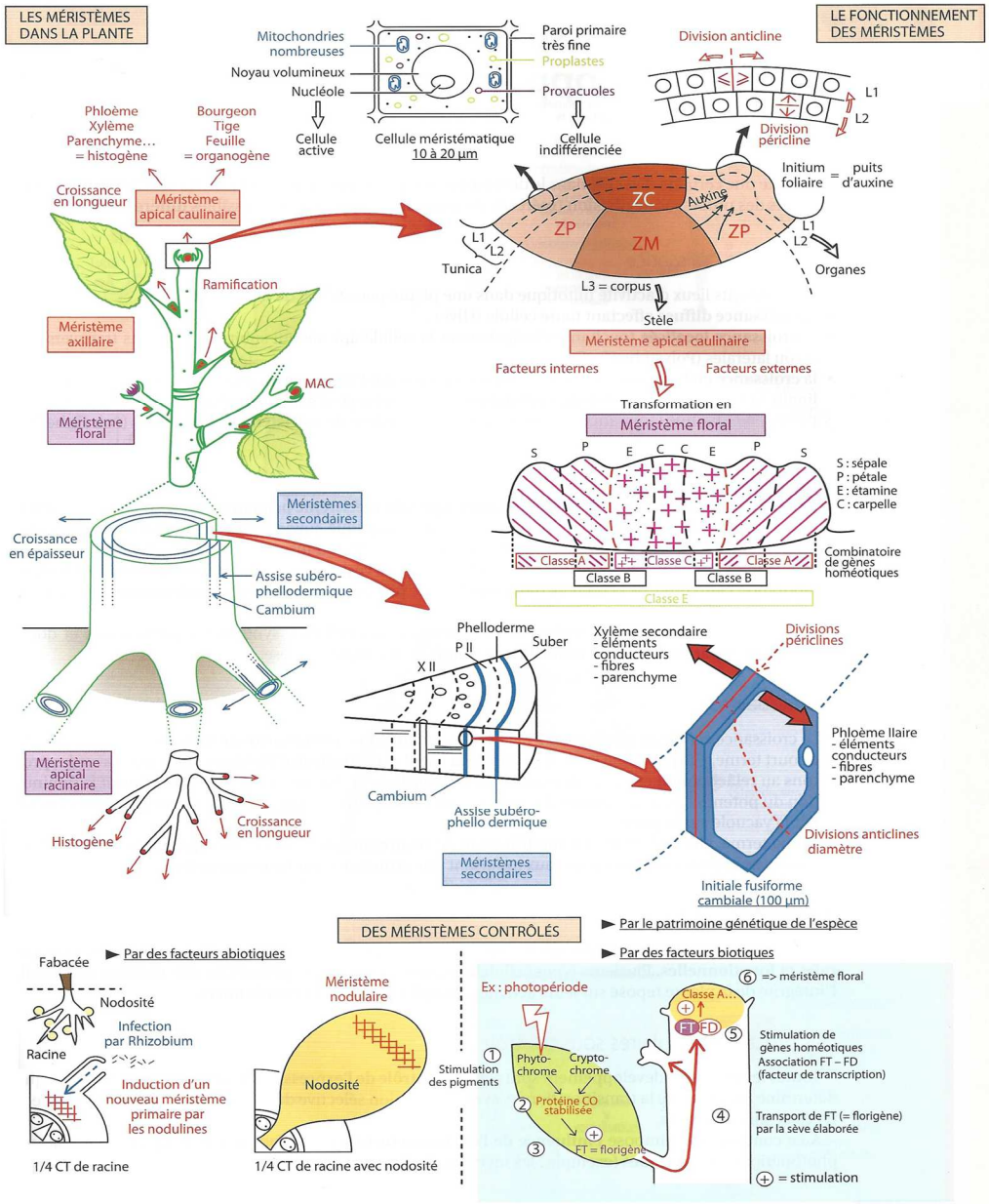


FIGURE 77. Méristèmes et croissance en longueur. D'après SAINTPIERRE *et al.* (2017).

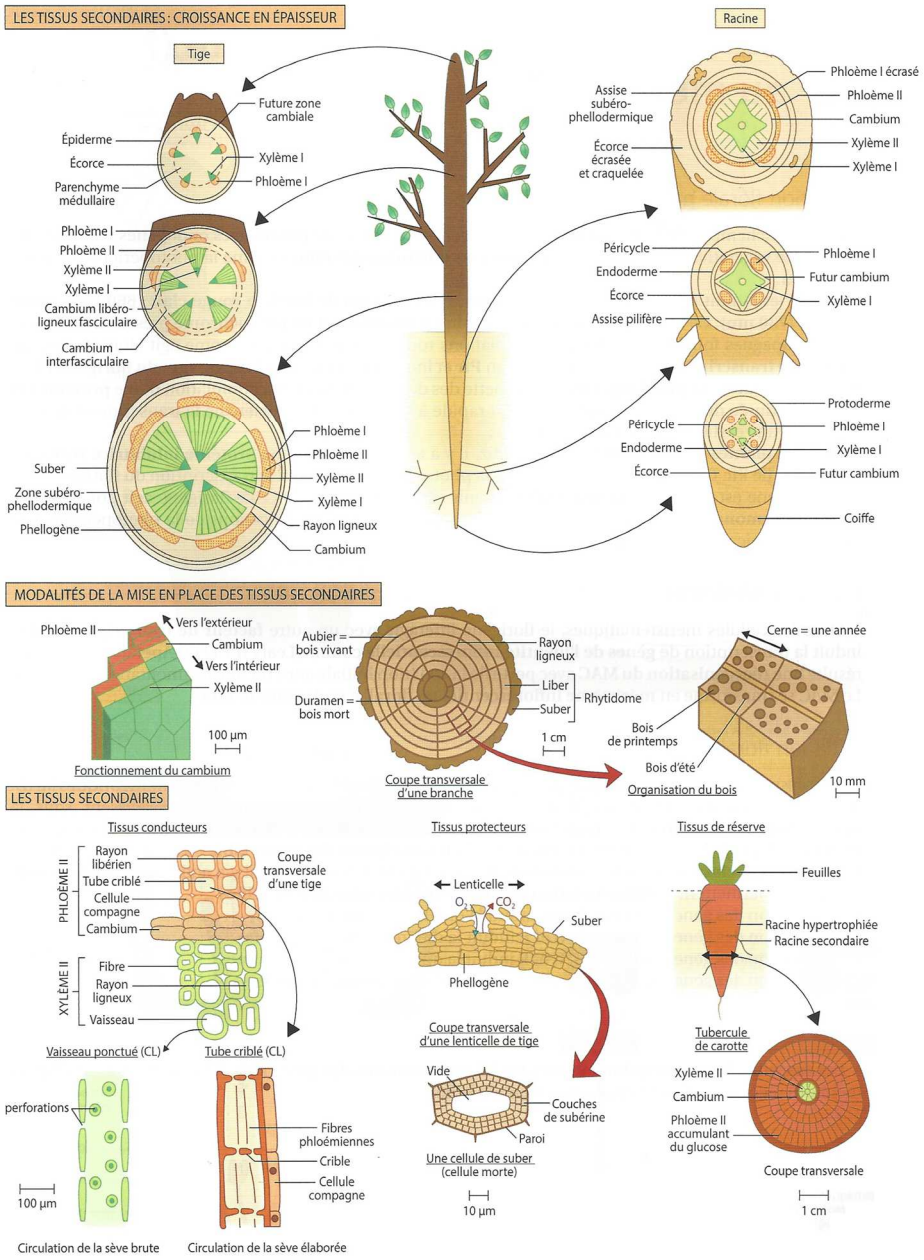


FIGURE 78. Méristèmes secondaires et croissance en épaisseur.
D'après SAINTPIERRE *et al.* (2017).

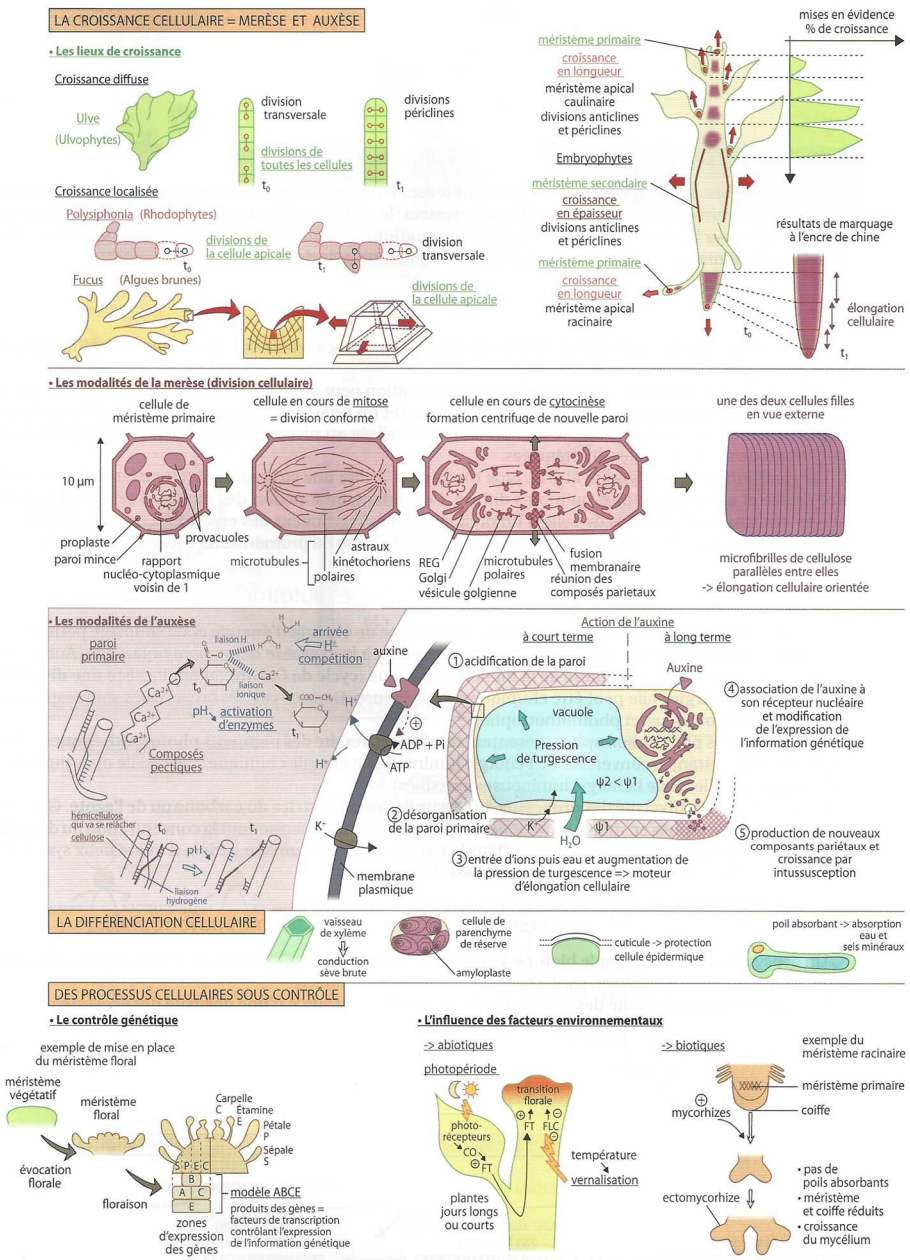


FIGURE 79. Auxèse, mérèse, différenciation. D'après SAINTPIERRE *et al.* (2017).
[Pas exactement adapté à votre programme, mais je n'ai rien modifié]

Références

ALBERTS, B., A. JOHNSON, J. LEWIS, M. RAFF, K. ROBERTS & P. WALTER (2004). *Biologie moléculaire de la cellule. Quatrième édition.* Traduction de la quatrième édition américaine (2002) par F. LE SUEUR-ALMOSNI. Flammarion, Paris. Première édition américaine 1983 (1986 1e édition française).

BERTHET, J. (2006). *Dictionnaire de Biologie.* De Boeck Université, Bruxelles (Belgique).

BOUTIN, V., J.-F. FOGELGESANG, J.-F. BEAUX & F. RIBOLA (2010). *Atlas de Biologie végétale BCPST 1re et 2e années.* Dunod, Paris.

BOUTIN, V., L. GERAY, Y. KRAUSS & C. VILBERT (2015). *Atlas de biologie BCPST 1re et 2e années.* Dunod, Paris.

BREUIL, M. (2007). *Biologie 1re année BCPST-véto.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

BREUIL, M. (2009). *Biologie 2e année BCPST-véto.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

BUCHANAN, B. B., W. GRUISSEM & R. L. JONES (dir.) (2015). *Biochemistry and Molecular Biology of Plants.* Wiley, New York, USA – Blackwell, Oxford, UK, 2e edition (1e edition 2002).

CAMEFORT, H. (1977). *Morphologie des végétaux vasculaires. Cytologie. Anatomie. Adaptations.* Doin, Paris, 2e édition (1e édition 1962).

CAMEFORT, H. & H. BOUÉ (1980). *Reproduction et biologie des végétaux supérieurs. Brophytes. Ptéridophytes. Spermaphytes.* Doin, Paris.

CAMPBELL, N. A. & J. B. REECE (2004). *Biologie.* De Boeck Université, Bruxelles, 2e édition (1e édition 1995).

[CAMPBELL, N. A.], J. B. REECE, L. A. URY, M. L. CAIN, S. A. WASSERAMN, P. V. MINORSKY, R. B. JACKSON (2012). *Campbell Biologie.* Adaptation française J. FAUCHER & R. LACHAÎNE. Pearson, Paris (4e edition).

CHASSANY, V., M. POTAGE & M. RICOU (2012). *Mini manuel de Biologie végétale.* Dunod, Paris.

CLESSE, B. (2006). *Glossaire botanique illustré.* Entente nationale pour la Protection de la Nature, Bruxelles (B).

DENŒUD, J., T. FERROIR, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON, M.-L. PONS & F. TEJEDOR (2011). *Biologie-Géologie BCPST-véto 2e année.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

DENŒUD, J., C. GODINOT, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2013). *Biologie-Géologie BCPST-véto 1e année.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

DENŒUD, J., C. GODINOT, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON, M.-L. PONS & F. TEJEDOR (2014). *Biologie-Géologie BCPST-véto 2e année.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

DUCREUX, G. (2002). *Introduction à la botanique.* Belin, Paris.

DUCO, A. (dir.), C. BONNET, P. BRINGER, C. BUSSIÈRE, F. CARIOU, M. CHARLES, A. CLAMENS, J.-P. ESTEBAN, M. GALLIZIA, D. GRANDOUILLET, S. KROGMANN, C. LENNE, J.-F. MOYEN, C. MULNET, D. MULNET, M. NAESSENS & F. SCHMITT, 2001. *SVT Sciences de la Vie et de la Terre Première S.* Belin, Paris.

GALIANA, D., C. LE ROUX & I. MONCHÂTRE (coord. T.-M. BOTREAU) (2015). *Biologie-Écologie Module M72. Bac technologique STAV. La gestion du vivant et des ressources.* Éducagri, Dijon.

GUIGNARD, J.-L. & F. DUPONT (2004). *Botanique. Systématique moléculaire.* Masson, Issy-les-Moulineaux (92), 13e édition (1e édition 1974).

GODINOT, C., H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2010). *Biologie-Géologie 1re année BCPST-véto.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

HELLER, R., R. ESNAULT & C. LANCE (1998). *Physiologie végétale. 1. Nutrition.* Belin, Paris, 6e édition.

HELLER, R., R. ESNAULT & C. LANCE (2000). *Physiologie végétale. 2. Développement.* Belin, Paris, 6e édition.

KLEIMAN, C. (2001). *La reproduction des Angiospermes.* Belin, Paris.

LABERCHE, J.-C. (2004). *Biologie végétale.* Dunod, Paris, 2e édition (1e édition 1999).

LAFON, C. (2003). *La biologie autrement. 100 questions de synthèse.* Ellipses, Paris.

LIZEAUX, C., D. BAUDE (dir.), A. ANDRÉ, C. BRUNET, J.-Y. DUPONT, B. FORESTIER, E. FRANÇOIS, Y. JUSSERAND, G. LÉVÊQUE, P. PILLOT, S. RABOUIN & A. VAREILLE (2012). *Sciences de la Vie et de la Terre Terminale S. Enseignement spécifique.* Bordas, Paris.

MEYER, S., C. REEB & R. BOSDEVEIX (2008). *Botanique. Biologie et physiologie végétales.* Maloine, Paris, 2e édition (1e édition 2004).

MORÈRE, J.-L., R. PUJOL (coord.), J.-C. CALLEN, L. CHESNOY, J.-P. DUPONT, A.-M. GIBERT-TANGAPREGASSOM, G. RICOU, N. TOUZET (dir.) et colloborateurs (2003). *Dictionnaire raisonné de Biologie.* Frison-Roche, Paris.

MOROT-GAUDRY, J.-F. (dir.), F. MOREAU, R. PRAT, C. MAUREL & H. SENTENAC (2009*a*). *Biologie végétale. Nutrition et métabolisme.* Dunod, Paris.

MOROT-GAUDRY, J.-F., R. PRAT (dir.), I. BOHN-COURSEAU, M. JULLIEN, F. PARCY, C. PERROT-RECHENMANN, M. REISDORF-CREN, L. RICHARD & A. SAVOURÉ (2009*b*). *Biologie végétale. Croissance et développement.* Dunod, Paris.

PEYCRU, P. (dir.), J.-F. FOGELGESANG, D. GRANDPERRIN, B. AUGÈRE, J.-C. BAEHR, C. PERRIER, J.-M. DUPIN & C. VAN DER REST (2010*a*). *Biologie tout-en-un BCPST 1re année.* Dunod, Paris, 2e édition (2009), réimpression corrigée (2010) (1e édition 2006).

PEYCRU, P. (dir.), J.-C. BAEHR, F. CARIOU, D. GRANDPERRIN, C. PERRIER, J.-F. FOGELGESANG & J.-M. DUPIN (2010*b*). *Biologie tout-en-un BCPST 2e année.* Dunod, Paris, 2e édition (1e édition 2007).

PEYCRU, P., D. GRANDPERRIN, C. PERRIER (dir.), B. AUGÈRE, T. DARRIBÈRE, J.-M. DUPIN, C. ESCUYER J.-F. FOGELGESANG, & C. VAN DER REST (2013). *Biologie tout-en-un BCPST 1re année.* Dunod, Paris, 3e édition (1e édition 2006).

PEYCRU, P., D. GRANDPERRIN, C. PERRIER (dir.), B. AUGÈRE, J.-F. BEAUX, F. CARIOU, P. CARRÈRE, T. DARRIBÈRE, J.-M. DUPIN, C. ESCUYER, J.-F. FOGELGESANG, S. MAURY, É. QUÉINNEC, E. SALGUEIRO & C. VAN DER REST (2014). *Biologie tout-en-un BCPST 2e année.* Dunod, Paris, 3e édition (1e édition 2007).

RAVEN, P. H., G. B. JOHNSON, J. B. LOSOS, S. S. SINGER (2007*a*). *Biologie.* De Boeck, Bruxelles.

RAVEN, P. H., R. F. EVERT & S. E. EICHHORN (2007*b*). *Biologie végétale.* De Boeck, Bruxelles. Traduction de la 7e édition américaine par J. Bouharmont, révision C. Evrard.

RICHARD, D. (dir.), P. CHEVALET, S. FOURNEL, N. GIRAUD, F. GROS, P. LAURENTI, F. PRADÈRE & T. SOUBAYA (2012). *Biologie. Tout le cours en fiches. Licence. CAPES. Prépas.* Dunod, Paris, 2e édition (1e édition 2010).

ROBERT, D. & J.-C. ROLAND (1998*a*). *Biologie végétale. Caractéristiques et stratégie évolutive des plantes. **1**. Organisation cellulaire.* Doin, Paris, 2e édition (1e édition 1989).

ROBERT, D., C. DUMAS & C. BAJON (1998*b*). *Biologie végétale. Caractéristiques et stratégie évolutive des plantes. **3**. La reproduction.* Doin, Paris, 2e édition (1e édition 1994).

ROBERT, D. & A.-M. CATESSON (2000). *Biologie végétale. Caractéristiques et stratégie évolutive des plantes. **2**. Organisation végétative.* Doin, Paris, 2e édition (1e édition 1990).

ROLAND, J-C., F. ROLAND, H. EL MAAROUF-BOUTEAU & F. BOUTEAU (2008). *Atlas. Biologie végétale. **2**. Organisation des plantes à fleurs.* Dunod, Paris, 9e édition (1e édition 1977).

SEGARRA, J. (dir.), É. CHAUVET, C. COLSON-PROCH, M. HUILLE, M. LABROUSSE, F. LOUET, F. METZ & E. PIÈTRE (2014). *Biologie BCPST 1re année.* Ellipses, Paris.

SEGARRA, J., E. PIÈTRE (dir.), G. BAILLY, O. CHASSAING, D. FAVRE, T. JEAN, F. METZ & C. MEUNIER (2015). *Biologie BCPST 2e année.* Ellipses, Paris.

TAIZ, L. & E. ZEIGER (dir.) (2010). *Plant physiology.* Sinauer Associates, Sunderland (Massachussetts, USA), 5e édition (1e édition 1991).

Plan du chapitre

Objectifs : extraits du programme 1
Introduction 2

I. Le DPE des Angiospermes, un processus indéfini et zoné où interviennent des méristèmes 5
A. Nature et localisation des processus impliqués dans le DPE des axes primaires d'une Angiosperme 5
1. Préalable : rappel de l'organisation générale d'une Angiosperme herbacée adulte 5
2. Localisation et coopération des processus du DPE dans les racines primaires : organisation fonctionnelle de l'apex racinaire 6
3. Localisation et coopération des processus du DPE dans les tiges primaires 8
a. Une mérèse localisée dans les bourgeons 8
b. Une croissance itérative et modulaire par l'allongement des entre-nœuds (zones d'auxèse) 10
c. Une différenciation tissulaire (histogenèse) mais aussi en organes (organogenèse) en aval des bourgeons 10
B. Les méristèmes primaires, des zones de mérèse assurant la croissance en longueur et le développement indéfini de la plante 10
1. Les caractéristiques des territoires méristématiques 10
a. Des tissus à localisation propre, souvent en amas terminaux 10
b. Les cellules méristématiques, des cellules indifférenciées 11
c. La mérèse, une prolifération cellulaire par mitoses 12
d. Des tissus présentant des divisions anticlines et périclines 14
e. Des tissus autoentretenus permettant un développement indéfini 14
f. Des tissus histogènes mais pas toujours organogènes 14
α. La production de nouveaux tissus qui s'allongent et se différencient : le caractère histogène des méristèmes 14
β. La production, au niveau caulinaire, de nouveaux organes : le caractère organogène des méristèmes caulinaires 14
g. Des tissus protégés 15
α. Une protection dans des bourgeons pour les méristèmes aériens 15
β. Une protection par une coiffe pour le méristème apical racinaire (MAR) 15
2. Organisation et fonctionnement d'un méristème primaire : le méristème apical caulinaire 15
a. Organisation et double zonation du méristème apical caulinaire (MAC) 15
α. La zonation ZC/ZP/ZM 15
β. La zonation corpus-*tunica* 15
γ. Une activité mitotique qui perdure dans le procambium et le méristème fondamental 16
b. Un méristème apical histogène et organogène qui assure la mise en place de nouveaux phytomères (= modules) 16
α. Le phytomère (= module), unité de base de l'organisation de la tige herbacée 16
β. Modalités de mise en place d'un nouveau phytomère : une activité répétitive et indéfinie 16
γ. Le MAC, tissu parent de tous les méristèmes primaires de la tige 17
C. Les méristèmes secondaires, des zones de mérèse assurant la croissance en épaisseur des végétaux ligneux 18
1. Origine et mise en place des méristèmes secondaires 18
a. Mise en place du cambium libéroligneux (ou cambium au sens strict) 18
α. Au niveau de la tige : un héritage procambial et une dédifférenciation du parenchyme cortical 18
β. Au niveau de la racine : une dédifférenciation du péricycle et du parenchyme médullaire 18
b. Mise en place de l'assise subéro-phellodermique (ou phellogène) : dédifférenciation de tissus variés 18
2. Des cellules initiales de section transversale parallélépipédique et aux divisons lentes : exemple du cambium 20
a. Des cellules allongées et vacuolisées 20
b. Des divisons lentes, dans toutes les directions, quoique majoritairement périclines dues aux initiales fusiformes 20
3. Des assises histogènes qui mettent en place des tissus secondaires de manière asymétrique 20
a. Mise en place de xylème II (= bois) et de phloème II (= liber) par le cambium libéroligneux 21
b. Mise en place de liège (= suber) et de phelloderme par le phellogène 21
4. Des assises caractérisées par un fonctionnement saisonnier 22
a. Cas du cambium 22
b. Cas du phellogène 22
D. L'architecture et le port de la plante, des caractéristiques en partie contrôlées par le fonctionnement des méristèmes 23
1. L'architecture des végétaux 23
a. La notion de port végétal : l'organisation générale d'une plante 23
b. Quelques grands types de ports : herbe, arbre, buisson, liane… 23
c. La phyllotaxie : la disposition des feuilles sur la tige (ou le rameau feuillé) 24
2. Une mise en place de ramifications due à des méristèmes latéraux qui assurent l'extension des surfaces d'échanges de la plante 24
a. La ramification des racines, un processus augmentant la surface d'absorption racinaire dû à des méristèmes latéraux néoformés 24
b. La ramification des tiges, un processus augmentant la surface de captation lumineuse et contrôlant le port du végétal, en lien avec le développement de méristèmes axillaires 25
α. Modalités de ramification de la tige 25
i. Croissance monopodiale vs. sympodiale (dichasiale / monochasiale) 25
ii. Notion de dominance apicale : un phénomène responsable d'une croissance monopodiale chez beaucoup de plantes herbacées (non ramifiées) 25
β. Comparaison des processus à l'œuvre dans la mise en place d'un port arborescent ou buissonnant (acrotonie et hypotonie vs. basitonie et épitonie) 27
γ. Ramification et mise en place de la phyllotaxie, des processus augmentant la surface de captation lumineuse 28

II. Allongement des organes par auxèse, et histogenèse par différenciation cellulaire 29
A. L'auxèse, l'élongation des cellules qui permet la croissance en longueur 29
1. Une localisation post-méristématique des zones de croissance en longueur 29
a. Une croissance subapicale dans les racines 29
b. Une croissance intercalaire dans la tige qui permet l'allongement des phytomères 29
2. Mécanismes de grandissement cellulaire 29
a. Un processus qui fait appel à la pression de turgescence 29
b. Un processus qui suppose une paroi primaire peu épaisse 29
c. Un processus qui suppose un relâchement pariétal 29
d. Un processus influencé par l'orientation des microtubules 30
e. Un processus qui suppose la synthèse de nouvelles microfibrilles de cellulose (et autres composés pariétaux) : croissance par intussusception 30
f. Un processus souvent irréversible qui s'achève par la production d'une paroi secondaire 31
3. L'auxèse, un processus contrôlé par une hormone végétale : l'auxine 31
a. L'auxine, une hormone végétale notamment produite par les méristèmes de l'appareil aérien 31
b. L'auxine, une hormone végétale qui se déplace selon deux modalités [*hors programme*] 31
c. L'auxine, une hormone codée en concentration qui agit différemment selon le tissu cible 33

d. L'auxine, une hormone végétale dont on peut proposer un modèle d'action (dans les cellules en élongation de la tige) : favorisation de l'acidification des parois et régulation génétique 33
B. La différenciation des cellules, processus qui permet l'élaboration de tissus spécialisés ou histogenèse 34
1. Caractères généraux de la différenciation 34
2. Une filiation cellulaire qui remonte toujours aux méristèmes, et même aux cellules embryonnaires 34
3. Un exemple de différenciation : la xylogenèse, production de vaisseaux de xylème stimulée par l'auxine 34
4. Une diversité de cellules issues des cellules procambiales ou cambiales : un aperçu 35

III. Environnement et plasticité phénotypique des Angiospermes au cours du DPE 35
A. Le DPE des Angiospermes : un développement sous influence environnementale 35
1. Les Angiospermes, des organismes fixes et à développement indéfini, soumis aux fluctuations environnementales 35
2. Typologie des modalités d'action de l'environnement sur la morphogenèse et le phénotype 35
a. L'accommodation, une modulation de l'expression génétique par l'environnement 35
α. Notions d'accommodation et d'accommodat 35
β. L'anémomorphose, un exemple d'accommodation en conditions de vent importantes 36
γ. Mise en évidence de la réversibilité d'une accommodation : cas des expériences transplantation de Marguerites de BONNIER 36
b. L'adaptation, une caractéristique héréditaire acquise par sélection naturelle au cours de l'évolution 37
α. Notions d'adaptation (évolutive) et d'écotype 37
β. La morphologie des Épicéas en lien avec l'altitude, un exemple d'adaptation 37
c. Les convergences évolutives, des adaptations acquises indépendamment en réponse à des contraintes environnementales semblables 38
α. Notion de convergence (évolutive) (et de convergence « morphologique ») 38
β. L'adaptation des végétaux à la sécheresse, un exemple de convergences évolutives 38
3. Les rythmes saisonniers, un cas de facteur environnemental modulant le DPE des Angiospermes : illustration au travers du fonctionnement cambial 41
4. Un impact des facteurs environnementaux sur la relation anatomie-physiologie : cas des feuilles d'ombre et de lumière 42
α. Une accommodation en lien avec la quantité de lumière reçue : cas des feuilles d'un même arbre ou d'arbres proches d'un même lieu 42
β. Une adaptation chez les espèces héliophiles et sciaphiles 42
γ. Aspects physiologiques (métaboliques) de l'impact de la lumière : notion de point de compensation à la lumière 43
B. Le phototropisme caulinaire, un exemple de modulation du DPE des Angiospermes par la répartition d'une ressource, la lumière 43
1. En guise d'introduction : un panorama des « mouvements » végétaux [*pour information ?*] 43
2. Étude expérimentale du phototropisme positif de la tige 44
a. Le phototropisme, une réponse à une répartition anisotrope de l'éclairement 46
b. Le phototropisme, un processus supposant une courbure due à une auxèse différentielle des deux côtés d'une tige 46
c. Le phototropisme, un processus supposant la captation de l'anisotropie de lumière au niveau apical (méristématique) 46
d. Le phototropisme, un processus médié par l'auxine 46
e. Le phototropisme, un processus impliquant une modification de la répartition de l'auxine et donc un transport latéral de l'auxine 47
f. Le phototropisme, un processus supposant une détection de radiations bleues [par les phototropines] 47
3. Bilan : modèle simple de fonctionnement de la courbure phototropique 48
C. Des processus de DPE comparables dans l'appareil racinaire par rapport à l'appareil caulinaire 49
1. Un DPE qui fait appel à un méristème apical racinaire (MAR) et aux trois processus du développement : mérèse, auxèse, différenciation 49
2. Une possibilité de ramification par des méristèmes latéraux (néoformés) 49
3. Un contrôle possible du DPE par l'environnement : l'exemple du gravitropisme positif (lui aussi médié par l'auxine) 49

Schémas-bilans généraux (simples) 51
Schémas-bilans plus précis 53
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes 55
Références 56
Plan du chapitre 57
Plan simplifié 58
Plan très simplifié 59

Plan simplifié

Objectifs : extraits du programme 1
Introduction 2

I. Le DPE des Angiospermes, un processus indéfini et zoné où interviennent des méristèmes 5
A. Nature et localisation des processus impliqués dans le DPE des axes primaires d'une Angiosperme 5
1. Préalable : rappel de l'organisation générale d'une Angiosperme herbacée adulte 5
2. Localisation et coopération des processus du DPE dans les racines primaires : organisation fonctionnelle de l'apex racinaire 6
3. Localisation et coopération des processus du DPE dans les tiges primaires 8
B. Les méristèmes primaires, des zones de mérèse assurant la croissance en longueur et le développement indéfini de la plante 10
1. Les caractéristiques des territoires méristématiques 10
2. Organisation et fonctionnement d'un méristème primaire : le méristème apical caulinaire 15
C. Les méristèmes secondaires, des zones de mérèse assurant la croissance en épaisseur des végétaux ligneux 18
1. Origine et mise en place des méristèmes secondaires 18
2. Des cellules initiales de section transversale parallélépipédique et aux divisons lentes : exemple du cambium 20
3. Des assises histogènes qui mettent en place des tissus secondaires de manière asymétrique 20
4. Des assises caractérisées par un fonctionnement saisonnier 22
D. L'architecture et le port de la plante, des caractéristiques en partie contrôlées par le fonctionnement des méristèmes 23
1. L'architecture des végétaux 23
2. Une mise en place de ramifications due à des méristèmes latéraux qui assurent l'extension des surfaces d'échanges de la plante 24

II. Allongement des organes par auxèse, et histogenèse par différenciation cellulaire 29
A. L'auxèse, l'élongation des cellules qui permet la croissance en longueur 29
1. Une localisation post-méristématique des zones de croissance en longueur 29
2. Mécanismes de grandissement cellulaire 29
3. L'auxèse, un processus contrôlé par une hormone végétale : l'auxine 31
B. La différenciation des cellules, processus qui permet l'élaboration de tissus spécialisés ou histogenèse 34
1. Caractères généraux de la différenciation 34
2. Une filiation cellulaire qui remonte toujours aux méristèmes, et même aux cellules embryonnaires 34
3. Un exemple de différenciation : la xylogenèse, production de vaisseaux de xylème stimulée par l'auxine 34
4. Une diversité de cellules issues des cellules procambiales ou cambiales : un aperçu 35
III. Environnement et plasticité phénotypique des Angiospermes au cours du DPE 35
A. Le DPE des Angiospermes : un développement sous influence environnementale 35
1. Les Angiospermes, des organismes fixes et à développement indéfini, soumis aux fluctuations environnementales 35
2. Typologie des modalités d'action de l'environnement sur la morphogenèse et le phénotype 35
3. Les rythmes saisonniers, un cas de facteur environnemental modulant le DPE des Angiospermes : illustration au travers du fonctionnement cambial 41
4. Un impact des facteurs environnementaux sur la relation anatomie-physiologie : cas des feuilles d'ombre et de lumière 42
B. Le phototropisme caulinaire, un exemple de modulation du DPE des Angiospermes par la répartition d'une ressource, la lumière 43
1. En guise d'introduction : un panorama des « mouvements » végétaux [*pour information ?*] 43
2. Étude expérimentale du phototropisme positif de la tige 44
3. Bilan : modèle simple de fonctionnement de la courbure phototropique 48
C. Des processus de DPE comparables dans l'appareil racinaire par rapport à l'appareil caulinaire 49
1. Un DPE qui fait appel à un méristème apical racinaire (MAR) et aux trois processus du développement : mérèse, auxèse, différenciation 49
2. Une possibilité de ramification par des méristèmes latéraux (néoformés) 49
3. Un contrôle possible du DPE par l'environnement : l'exemple du gravitropisme positif (lui aussi médié par l'auxine) 49

Schémas-bilans généraux (simples) 51
Schémas-bilans plus précis 53
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes 55
Références 56
Plan du chapitre 57
Plan simplifié 58
Plan très simplifié 59

Plan très simplifié

Objectifs : extraits du programme 1
Introduction 2

I. Le DPE des Angiospermes, un processus indéfini et zoné où interviennent des méristèmes 5
- **A. Nature et localisation des processus impliqués dans le DPE des axes primaires d'une Angiosperme** 5
- **B. Les méristèmes primaires, des zones de mérèse assurant la croissance en longueur et le développement indéfini de la plante** 10
- **C. Les méristèmes secondaires, des zones de mérèse assurant la croissance en épaisseur des végétaux ligneux** 18
- **D. L'architecture et le port de la plante, des caractéristiques en partie contrôlées par le fonctionnement des méristèmes** 23

II. Allongement des organes par auxèse, et histogenèse par différenciation cellulaire 29
- **A. L'auxèse, l'élongation des cellules qui permet la croissance en longueur** 29
- **B. La différenciation des cellules, processus qui permet l'élaboration de tissus spécialisés ou histogenèse** 34

III. Environnement et plasticité phénotypique des Angiospermes au cours du DPE 35
- **A. Le DPE des Angiospermes : un développement sous influence environnementale** 35
- **B. Le phototropisme caulinaire, un exemple de modulation du DPE des Angiospermes par la répartition d'une ressource, la lumière** 43
- **C. Des processus de DPE comparables dans l'appareil racinaire par rapport à l'appareil caulinaire** 49

Schémas-bilans généraux (simples) 51
Schémas-bilans plus précis 53
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes 55
Références 56
Plan du chapitre 57
Plan simplifié 58
Plan très simplifié 59

© Tanguy JEAN. Les textes et les figures originales sont la propriété de l'auteur. Les figures extraites d'autres sources restent évidemment la propriété des auteurs ou éditeurs originaux.
Document produit en janvier 2018 • Dernière actualisation : novembre 2019.
Contact : Tanguy.Jean4@gmail.com
Adresse de téléchargement : https://www.svt-tanguy-jean.com/

Ces données sont placées sous licence *Creative Commons Attribution – Pas d'Utilisation commerciale 4.0 CC BY NC* qui autorise la reproduction et la diffusion du document, à condition d'en citer explicitement la source et de ne pas en faire d'utilisation commerciale.