



**Université Mostefa Ben Boulaid -
Batna 2**

**Faculté des Sciences de la Nature
et de la Vie**

**Département d'Écologie et
Environnement**

**MASTER 1 : ECOPHYSIOLOGIE ET
DEVELOPPEMENT DES PLANTES**

**Cours : Le Développement Des Plantes Et Mécanismes
Génétiques De La Reproduction Sexuée**

Mme : MARREF Ch.

Sommaire

Partie I : Le développement des plantes

- A. Plan d'organisation de la plante**
- B. Du zygote à l'embryon**
- C. De l'embryon à la plante**
- D. Les méristèmes : mises en place et fonctionnement**
- E. Induction florale**
- F. Génétique de la redétermination du méristème apical**
- G. Les gènes d'identité du méristème floral**
- H. Architecture de l'inflorescence**
- G. Les gènes homéotiques à boîte (MADS)**

**Partie II : Mécanismes génétiques de la reproduction
sexuée.**

- A. Notion de fleur : origine et évolution**
- B. Développement des organes reproducteurs et sa régulation génétique**
 - 1. Formation de l'anthere et du pollen**
 - 2. Formation de l'ovule et du sac embryonnaire**
- C. Concept de carpelle (angiospermie),**
- D. Fécondation, formation de la graine et du fruit**
- E. Développement et maturation du fruit : contrôle génétique et hormonal du développement**
- F. Stratégies de la pollinisation**
- G. Systèmes de reproduction et contrôle génétique**
 - 1. Incompatibilités polliniques (contrôle génétique et moléculaire)**
 - a. Systèmes sporophytiques**
 - b. Systèmes gamétophytiques**
 - 2. Stérilités mâles et interactions nucléo cytoplasmiques**
- H. Apomixie**
- I. Déterminisme du sexe chez les plantes**



Partie I
Le développement des
plantes

A. Plan d'organisation de la plante

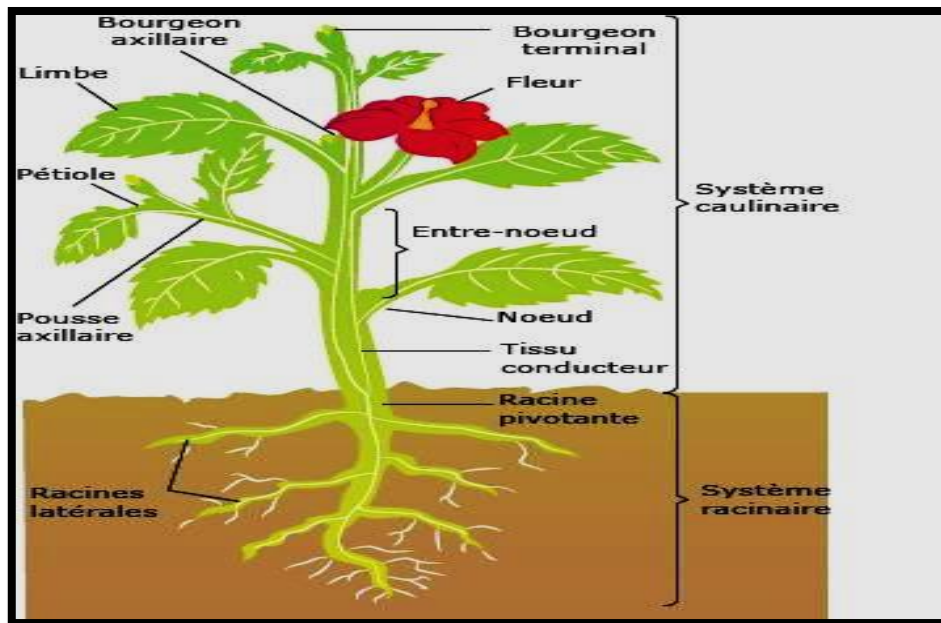


Fig 01 : Organisation de la plante

Le développement d'une plante se déroule de façon :

- **Harmonieuse** : La taille relative des organes est proportionnée Rapport Racine/Tige constant ;
- **Coordonnée** : L'apparition séquentielle des organes (les fleurs apparaissent après les feuilles) ;
- **Reproductible** : Entre les différents individus d'une espèce donnée.

1- La Tige

Organe végétatif généralement aérien, porte les bourgeons, les feuilles, et au moment de la reproduction les organes reproducteurs : fleurs, fruits, graines. La tige est constituée d'une succession de nœuds et d'entre-nœuds. Elle est également le lieu de transit de la sève brute et de la sève élaborée vers d'autres organes.

1-1-Bourgeons :

Ils assurent la croissance et la ramification des tiges, selon la position ou leur localisation sur la tige on distingue :

- **Bourgeon terminal** : Il assure la croissance de la tige en longueur ;
- **Bourgeon axillaire (latéral)** : Il se situe à l'aisselle de feuille ;
- **Bourgeon adventif** : Ce sont des bourgeons invisibles et latents, ils n'apparaissent qu'à la suite de blessures.

1-2- Classification (différents types de tiges)

a- Selon la Consistance

- **Les tiges herbacées** : Leurs couleur plutôt verte, de faible épaisseur et souple (pas de lignine) Concerne principalement les Monocotylédones mais aussi les Dicotylédones annuelles/ bisannuelles ;
- **Les tiges ligneuses** : Elles procèdent une couleur brune, en général de plus grosse épaisseur et rigide ne concerne que les Dicotylédones (présence de lignine) **tige herbacée** ;

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

b- Selon le port (Orientation de la croissance)

* **La tige aérienne** : Elle peut être Dressée ou érigée ; Rampante ou stoloniforme (pouvant s'enraciner) ; Grimpante (s'élevant sur les supports voisins à l'aide de vrilles ou de crampons)

c- Selon le milieu où elle se trouve

Une tige aérienne, une tige souterraine, une tige aquatique, les tiges souterraines se répartissent en 3 catégories :

- **Le rhizome** : Tige souterraine et horizontale, émettant des rameaux aériens et des racines adventives (chiendent) ;
- **Le tubercule** : Tige ou portion de tige renflée (pomme de terre) ;
- **Le bulbe ou oignon** : Tige courte, en forme de plateau charnu et qui porte les feuilles serrées les unes contre les autres et entièrement écailleuses ou uniquement écailleuses à la base (oignons). Le bulbe est également composé d'un bourgeon plus ou moins central, également porté par le plateau.

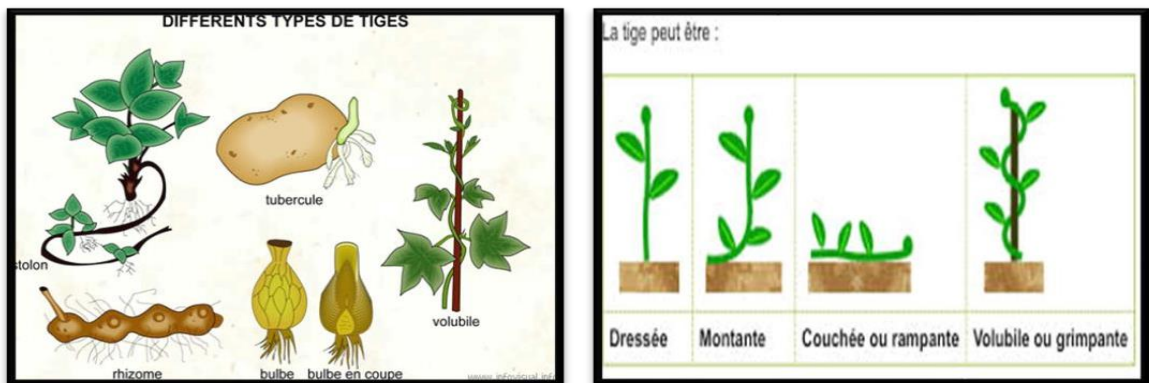


Fig 02 : Les différents types de tige

2- La feuille

2-1- Définition

La feuille est un organe végétatif aérien, généralement aplati de couleur verte, assure la photosynthèse. Est un véritable laboratoire où se réalise la transformation de la sève brute en sève élaborée grâce aux échanges gazeux entre la feuille et le milieu ambiant.

2-2- Structure

Une feuille est constituée de plusieurs parties :

- Une gaine partie plus ou moins renflée, relie le reste de la feuille à la tige au niveau du nœud, reliant deux petits appendices appelés stipules
- Le pétiole ; axe cylindrique plus ou moins aplati
- Le limbe ; partie souvent plate ayant souvent une plus grande surface.
- Les nervures ; d'une section souvent cylindrique, elles sillonnent le limbe.

2-3- Classification (différentes sortes de feuilles)

a- Selon la gaine

- **Feuille engainante** : Gaine très développée, entourant la tige, le cas des feuilles des monocotylédones.

b- Selon le pétiole

- **Feuille sessile** : Feuille sans pétiole
- **Division du limbe** : Le limbe est dit **simple** s'il est en une seule pièce, ou **composé** s'il est découpé en plusieurs petites feuilles ou **folioles**. Selon la disposition des folioles sur l'axe principal de la feuille ou *rachis*, on dit que le limbe est : **Penné**, si les folioles sont disposées comme les barbes d'une plume ; **Palmé** si elles sont disposées comme les doigts de la main (marronnier) ; **Bord du limbe** : La forme générale du

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

limbe n'est pas toujours régulière. Son bord est très souvent incisé, ondulé, cilié ou découpé plus ou moins profondément. On distingue plusieurs types dont on cite les plus importants.

c- Selon le Types de nervation

- **Limbes à nervation pennée** : Ils possèdent une nervure principale portant des nervures secondaires ;
- **Nervation pennée** ;
Limbes à nervation digitée ou palmée : Ils présentent des nervures qui rayonnent à partir d'un même point ;
- **Les limbes à nervation parallèle** : Les nervures parcourent le limbe parallèlement les unes aux autres ;
Se rencontre principalement chez les Monocotylédones.
- **La phyllotaxie** : Est la disposition des feuilles sur la tige. Les feuilles, régulièrement disposées le long de la tige, permettent de définir différents modes de disposition phyllotaxique ;
- **Disposition alterne** : Une seule feuille est insérée à chaque nœud ;
- **Disposition opposée** : Les feuilles sont disposées par deux et insérées à chaque nœud (verticille composé de 2 feuilles) l'une en face de l'autre disposition opposée décussée ;
- **Disposition Verticillée** : Plus de deux feuilles sont insérées simultanément à chaque nœud.

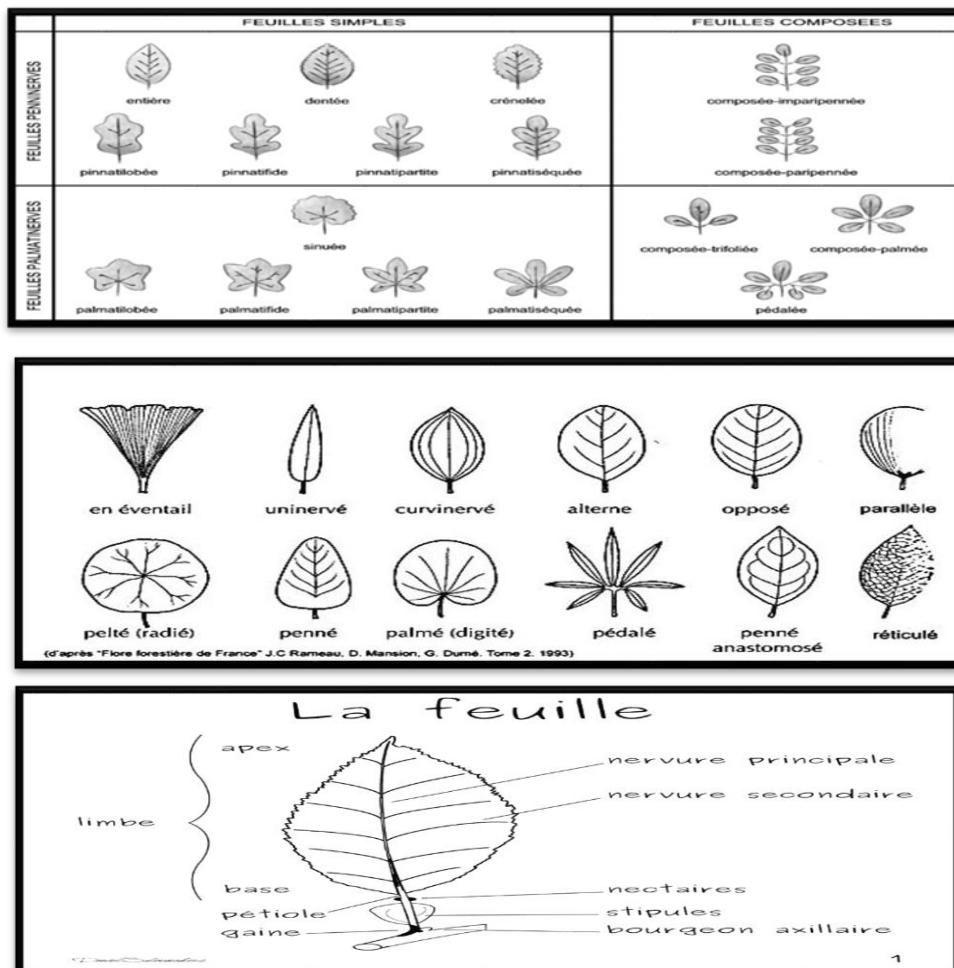


Fig 03 : Les différents types de feuilles et de nervures

3- Racine (système racinaire)

3-1- Définition

Organe végétatif généralement souterrain, L'ensemble des racines forme le système racinaire de la plante et permet la fixation du végétal dans le sol ainsi que l'absorption de l'eau et des substances dissoutes nécessaires au développement de la plante. Pour rappel, la racine ne porte jamais de feuilles et n'a pas de nœuds.

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

3-2- Structure : On distingue quatre zones sur une racine en croissance :

- a. **Une zone de croissance, terminale effilée (point végétatif)** formée de petites cellules indifférenciées qui se multiplient activement et qui sont protégées par la **coiffe**. La coiffe protège le méristème racinaire pendant la croissance de la racine en évitant le contact immédiat avec les particules solides du sol. La desquamation continue de la coiffe facilite la progression de la racine dans le sol.
- b. **Une zone d'élongation**, de quelques millimètres où le début de différenciation cellulaire
- c. **Une zone pilifère**, garnie de nombreux poils absorbants permettant les échanges entre la racine et le sol. Les poils au début de la zone pilifère sont courts (ils viennent de se former) et ceux situés à l'endroit où la zone pilifère s'achève sont plus longs et flétris. Ils disparaîtront prochainement.
- d. **Une zone subéreuse**, dépourvue de poils, mais où apparaissent des ébauches de jeunes racines, les racines secondaires (ramifications).

3-3- Le système racinaire (différents types de racines)

a. Selon L'origine des racines

- **Racines embryonnaires :** Qui proviennent de l'évolution de la radicule de l'embryon ; elles sont persistantes.
- **Racines adventives :** Formées sur une partie quelconque du végétal (tiges, feuilles, etc.). (Maïs, fraisier, lierre).

b. Selon l'organisation (structure) du système racinaire

L'organisation du système racinaire se présente sous différentes formes :

- **La racine pivotante :** Une racine importante qui se développe et qui forme un pivot central sur lequel viennent se greffer de petites racines secondaires. C'est le cas par exemple pour le chêne ou le radis. C'est le cas également pour le cacaoyer (*Theobroma cacao*).
- **Les racines fasciculées :** Plusieurs racines d'importance égale, disposées en faisceau, portent de nombreuses radicelles (épicéa, maïs).

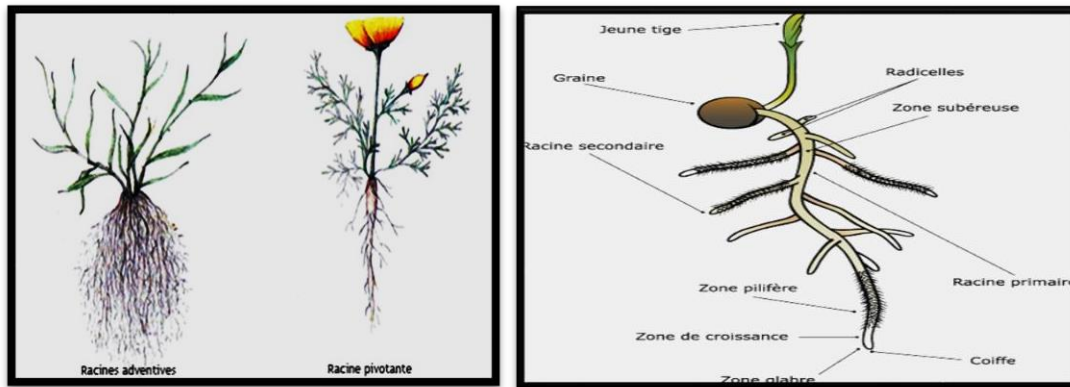


Fig 04 : Le système racinaire et les différents types de racine

B. Du zygote à l'embryon

1- Définition de la reproduction sexuée

La reproduction sexuée permet de donner naissance à un nouvel être vivant grâce à la rencontre d'un organisme mâle et d'un organisme femelle (c'est la fécondation). C'est le cas des plantes à fleurs : les étamines (parties mâles de la fleur) fabriquent du pollen qui viendra féconder un ovule présent dans le pistil (partie femelle de la fleur).

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

2- Organisation de l'organe reproducteur (fleur)

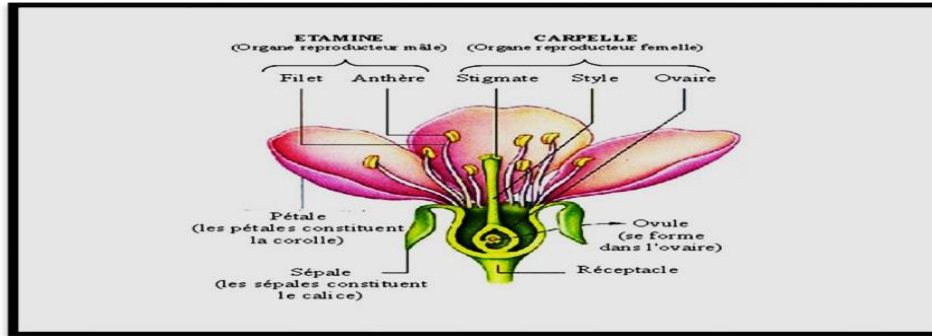


Fig 05 : Organisation florale

La fleur comprend des pièces florales situées sur le réceptacle qui est l'extrémité renflée du pédoncule floral. Le pédoncule est inséré sur la tige à l'aisselle d'une petite feuille appelée : bractée. Les pièces florales sont disposées selon 4 cycles appelés verticilles. De l'extérieur vers l'intérieur, on distingue :

- a. **Le Périclype** : Il comprend deux verticilles de pièces stériles.
 - **Le calice** : Il est formé par les sépales, pièces verdâtres, d'aspect foliacé.
 - **La corolle** : Elle est constituée de pétales sont des pièces non chlorophylliennes mais ils sont colorés par des pigments. A la base de chaque pétale, une glande microscopique, le nectaire, sécrète un liquide sucré : le nectar.
- b. **Les Organes reproducteurs** : Ils se répartissent en deux verticilles de pièces fertiles.
 - **L'androcée** : Il est formé de l'ensemble des étamines. Chaque étamine comprend le filet, fin et allongé, surmonté d'une partie élargie : l'anthère. L'anthère est constituée de 2 sacs polliniques qui contiennent le pollen.
 - **Le gynécée** : Il est formé par un ensemble de petits organes verts : les carpelles.

Chaque carpelle est constitué d'une partie renflée, l'ovaire celui-ci est surmonté d'un style terminé par le stigmate (piste d'atterrissage du pollen). L'ovaire contient les ovules.

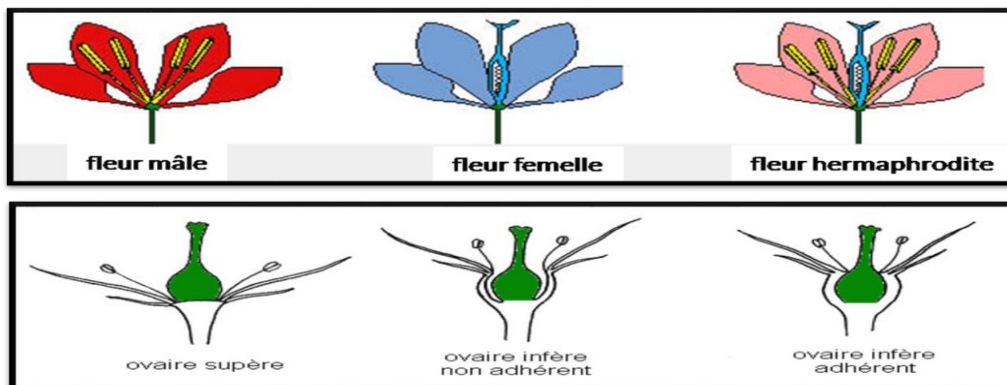


Fig 06 : Différents types de fleurs

3- Répartition des sexes

- **Fleur hermaphrodite** : Lorsque chacune des fleurs contient à la fois des organes mâles (androcée) et des organes femelles (gynécée). **Exp** : Oranger, Cerisier, Pommier, Tulipe. La majorité des cas.
- **Fleur unisexuée** : Lorsque la fleur comprend uniquement des organes mâles ou des Organes femelles.
- **Plante monoïque** : Lorsque chaque plante porte les 2 types de fleurs unisexuées. **Exp** : Noisetier, Maïs, Bouleau.
- **Plante dioïque** : Lorsqu'il existe des plantes portant uniquement des fleurs unisexuées mâles et des plantes portant des fleurs unisexuées femelles. **Exp** : Saule, Ortie, Mercuriale, Dattier.

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

- **Fleurs asexuées** : Fleurs sans pièces fertiles (ni androcée ni gynécée).
- **Fleurs apétales** : Fleurs sans pétales ; **Fleurs asépales** : Fleurs sans sépales.
- **Fleurs pentacycliques** : cinq verticilles de pièces florales (un de sépale, un de pétale, deux étamines, et un de carpelle)
- **Fleurs actinomorphe** : quand une fleur à deux côtés symétriques ; **Fleurs zygomorphe** : quand une fleur à plusieurs plans de symétrie ; **Fleurs asymétrique** : quand une fleur n'a aucun plan de symétrie.

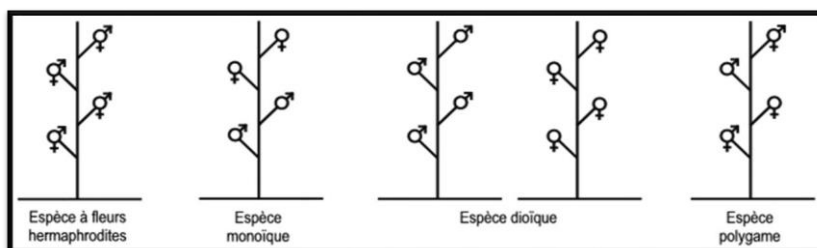


Fig 07 : Répartition des sexes

4- Gamétogénèse

La gamétogénèse est un ensemble des processus contribuant à la formation des gamètes mâle et femelle à partir d'une cellule originelle dite cellule mère.

4-1- Les organes reproducteurs mâles (étamines)

Elles sont formées d'un filet et **une anthère** (partie fertile de l'étamine et le siège de formation des grains de pollen) avec **quatre sacs polliniques**. Les grains de pollens se forment dans les étamines. La différenciation commence à partir d'un méristème (cellules à caractère embryonnaire) limité par une couche de cellules appelées « épiderme », l'anthère présente alors quatre bosses correspondant aux quatre futurs sacs polliniques. Dans chaque bosse, quelques cellules sous épidermiques à caractère embryonnaires se différencient en **archéosporés**. Chaque **archéospore** se divise tangentiellement et donne : une cellule externe ou pariétale destinée à former les diverses couches cellulaires de la paroi du sac, et une cellule interne ou cellule mère (**sporogène**) dont la multiplication donne quatre **microspores diploïdes** entourées de cellules nourricières. Par **la méiose** ces microspores évoluent en **tétra- spores haploïdes** qui vont continuer à se diviser, au moins une fois, par une simple mitose asymétrique pour donner **une cellule végétative** (grosse cellule) possède une paroi rigide et épaisse à double couche **exine** (externe et fortement ornementée) et **intine** (interne), et elle englobe la plus petite dite **une cellule génératrice** qui est dotée d'une paroi très mince. A la différence de la cellule génératrice, la cellule végétative est riche en organites.

Quand les fleurs sont fonctionnelles pour les organes reproducteurs mâle et femelle, les grains de pollens seront libérés dans l'atmosphère par déchirure des sacs polliniques.

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

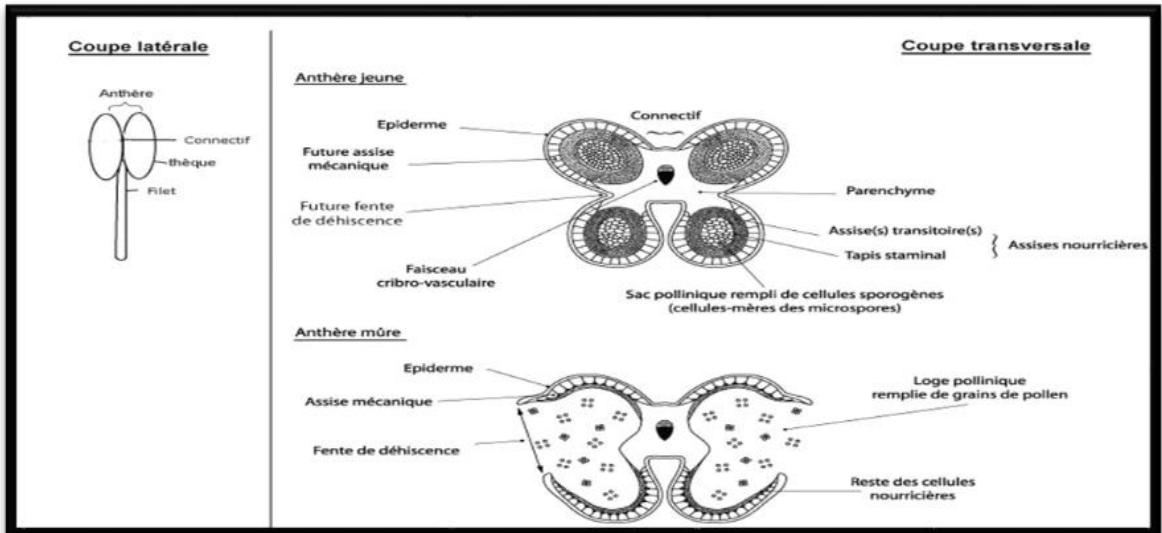


Fig 08 : Coupe transversale schématique d'une anthere

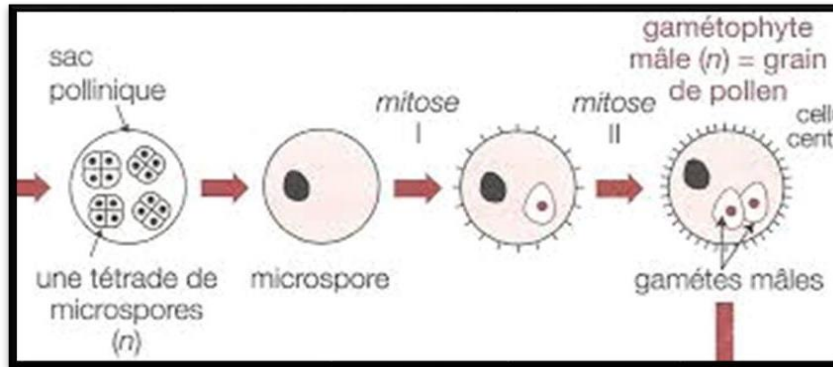


Fig 09 : Etapes de la formation d'un grain de pollen

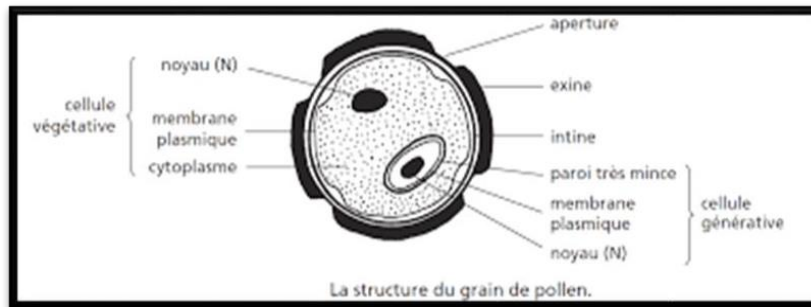


Fig 10 : La structure d'un grain de pollen mature

4-2- Les organes reproducteurs femelles (carpelles ou gynécée)

Chez les Angiospermes, le carpelle est constitué de deux parties : la basale creuse contient le ou les ovules et la sommitale forme le pistil constitué de style et des stigmates. L'ovule est de forme ovoïde, limité extérieurement par deux téguments (parfois un seul) interrompus par un micropyle. **L'ovule** contient le gamétophyte femelle haploïde ; le **sac embryonnaire (macrospore)**.

4-2-1- Structure de l'ovule

- **Placenta** : partie de l'ovaire à laquelle sont fixés les ovules, directement ou par l'intermédiaire d'un funicule ;
- **L'ovule** est fixé à la paroi de l'ovaire par le **funicule** (petit pédoncule) ;
- **Le hile** est l'extrémité du funicule (endroit où commence la partie ovoïde) ;
- Par le funicule passe le faisceau conducteur qui alimente l'ovule ;

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

- La bifurcation (ramification) du faisceau s'appelle **la chalaze** ;
- L'ovule est entouré de **téguments** ;
- **Le micropyle** est l'endroit où passe le tube pollinique (ouverture dans les téguments de l'ovule) ;
- **Le raphé** est la soudure entre le tégument et le funicule ;
- **Le nucelle** est le tissu nourricier ;
- **Sac embryonnaire** : gamétophyte femelle ;

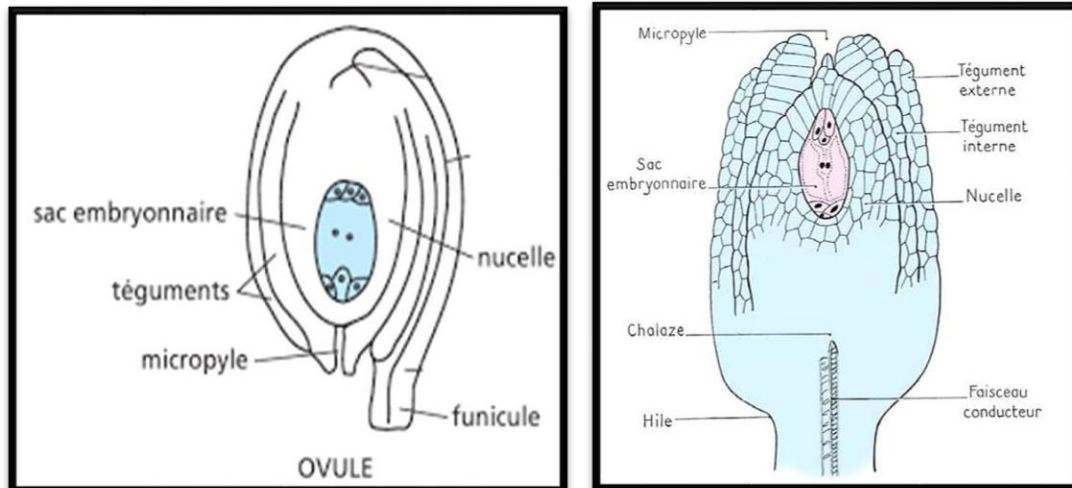


Fig 11 : Structure générale d'un ovule

4-2-2- Formation de la mégaspore (macrospore)

Une cellule sous épidermique située dans l'axe du nucelle sous le micropyle, appelé **l'archéospore**, subit deux divisions par une cloison transversale, la cellule inférieure (**sporogène** (cellule mère)), subit une méiose et donne quatre macrospores disposées en file, dans l'axe de l'ovule. La cellule inférieure donnera le sac embryonnaire, les autres dégénèrent.

4-2-3- Formation du sac embryonnaire

Les huit noyaux résultent de trois divisions successives par mitose d'une mégaspore (macrospore) se séparent par un cloisonnement. Ils se disposent par tétrade aux deux extrémités de la cellule ; un noyau de la tétrade supérieure se rapproche de d'un noyau de la tétrade inférieure et fusionnent pour donner le noyau secondaire du sac (cellules accessoires). Les trois noyaux des deux pôles qui restent vont s'individualiser formant des cellules. L'une des cellules (**La Centrale**) du pôle micropylaire donne le gamète femelle ou **Oosphère**, les deux autres, **Les Synergides** sont chargées de guider le tube pollinique en émettant une substance Chimiotactique. Les trois cellules inférieures (du pôle chalazien) constituent **Les Antipodes**. L'ensemble des cellules formées constitue le gamétophyte femelle « **sac embryonnaire** ».

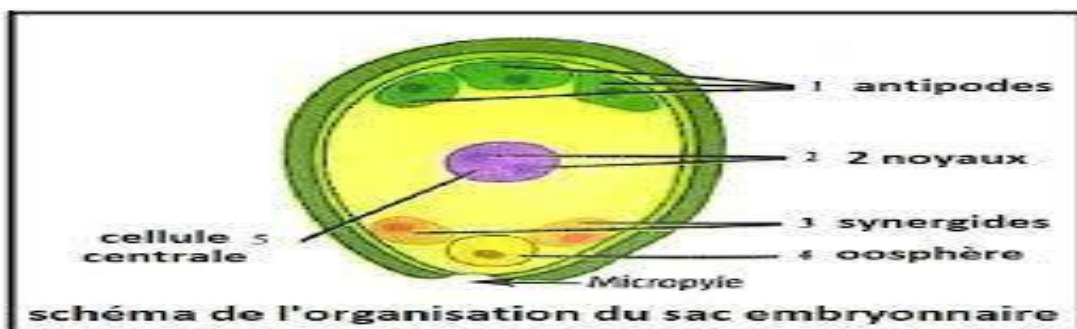


Fig 12 : Formation du sac embryonnaire

4-3-3- Pollinisation

A maturité le sac pollinique s'ouvre par les fentes de déhiscence et libère les grains de pollen. La

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

pollinisation est le processus de transport du pollen (gamétophyte mâle) de l'étamine jusqu'aux stigmates (élément récepteur femelle), permettant ainsi la fécondation de la fleur receveuse.

La pollinisation peut se faire, par le vent (**anémophilie**), par l'eau (**hydrophilie**), par les animaux (**zoophilie**) ou par l'homme (**manuelle**). Dans le cas de la **zoophilie**, les animaux impliqués le plus souvent sont des insectes (**entomophilie**), parfois des oiseaux (**ornithophilie**).

On peut distinguer deux types de pollinisation.

4-3-3-1- Pollinisation autogame

C'est-à-dire que les grains de pollen fécondent l'ovule de la même fleur. Ce cas est possible seulement si la fleur est **hermaphrodite**.

4-3-3-2- Pollinisation hétérogame

Le grain de pollen d'une fleur A féconde l'ovule d'une fleur B. Ce type de pollinisation est obligatoire chez les fleurs **unisexuées**, il est aussi fréquent chez les fleurs **bisexuées**.

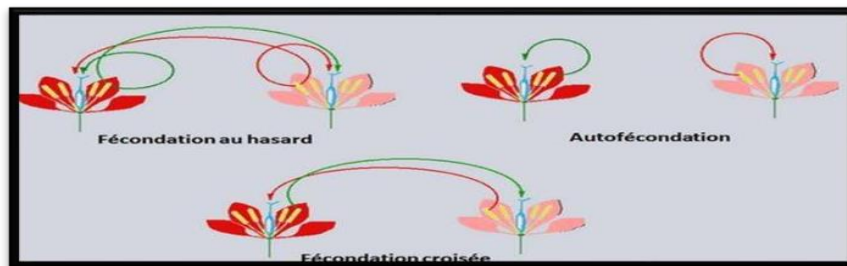


Fig 13 : Différents types de pollinisation (autogame et hétérogame)

5- La double fécondation

Processus caractéristique des Angiospermes consistant en l'union simultanée des deux gamètes mâles (**cellules spermatisques**), véhiculé par le tube pollinique, à deux cellules du sac embryonnaire : l'un avec l'**oosphère** ou gamète femelle et l'autre avec la **cellule centrale**. Avant la double fécondation il y a une phase marquée par la formation d'un tube pollinique qui s'enfonce dans le style jusqu'à l'ovaire. Ce tube pollinique constitue le vecteur des deux gamètes mâles issus de la division en deux noyaux reproducteurs que renfermait le grain de pollen ; par chimiotactisme il atteint un ovule, pénètre généralement par le micropyle et décharge son contenu dans une des deux synergides du sac embryonnaire.

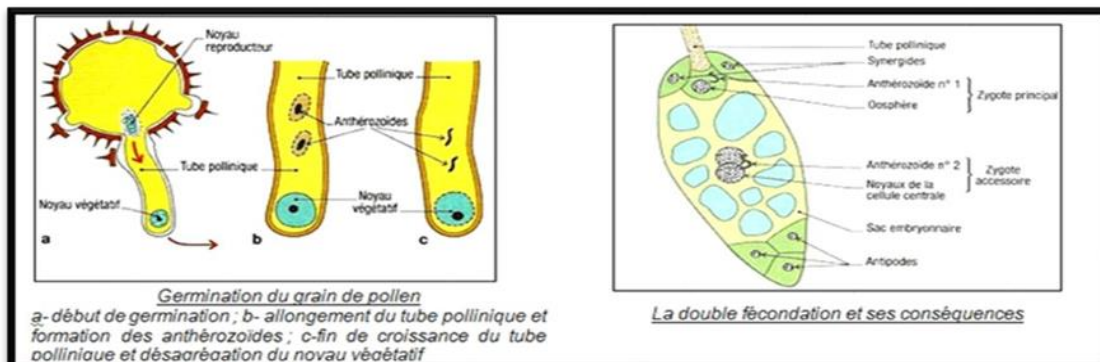


Fig 14 : La germination de grain de pollen

La double fécondation proprement dite consiste alors en la fusion d'une **cellule spermatisque avec l'oosphère** et de la **seconde cellule spermatisque avec la cellule centrale**. La fécondation de l'oosphère aboutit à la formation d'un **zygote diploïde** qui évoluera en un **embryon (2n)**. Celle de la cellule centrale donne le **zygote-albumen (3n)** (ou **zygote accessoire**), ce dernier est à l'origine de l'**albumen**, tissu nourricier gorgé de réserve.

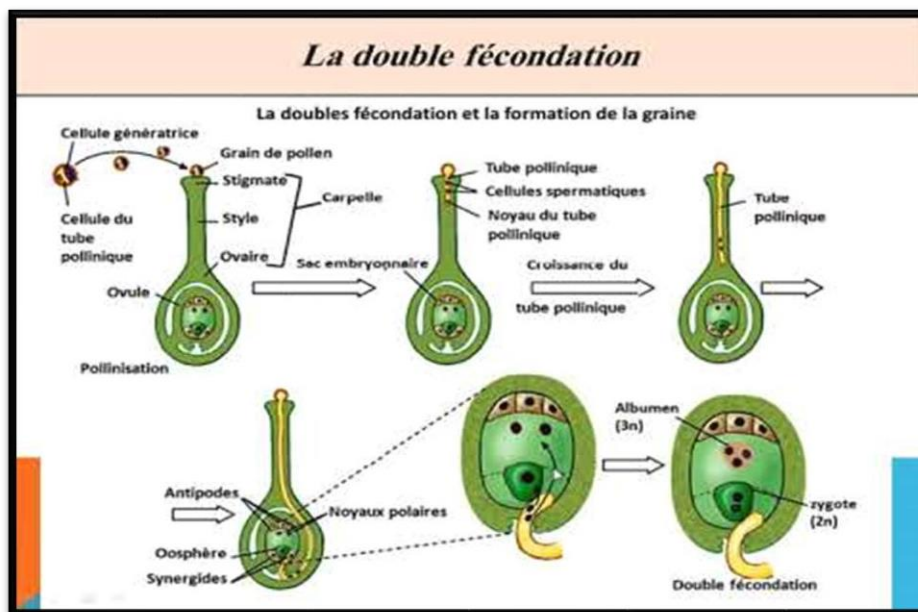


Fig 15 : Processus de la double fécondation

La présence d'un albumen fonctionnel est indispensable au bon développement de l'embryon. Cet albumen peut être résorbé (graine exalbuminée) ou être très visible dans la graine (embryon et ses cotylédons n'occupant qu'une partie du volume de la graine). Après la fécondation les synergides et les antipodes dégèrent. L'ovaire se transforme en fruit, l'ovule se transforme en graine. L'œuf principal se développe par mitose, pour donner l'embryon qui est constitué d'une radicule, d'une tigelle, de deux cotylédons et d'un bourgeon terminal (gemme). L'œuf secondaire se développe par mitose pour donner l'**albumen**.

Le sac embryonnaire cède la place à l'embryon et l'albumen. Le nucelle régresse. Les téguments de l'ovule deviennent les téguments de la graine. L'essentiel du volume de la graine est occupé par les deux cotylédons pour certaines espèces, ou par l'albumen pour d'autres. L'albumen et les cotylédons sont des tissus riches en réserves nutritives. Ils assurent la nutrition de l'embryon au moment de la germination de la graine.

Après l'accumulation des réserves, la graine subit une dessiccation et rentre dans une vie ralentie. Ainsi la graine est une forme de dissémination et de résistance. Durant la vie ralentie, les rythmes de la nutrition et de la respiration sont très faibles (faible niveau d'absorption d'oxygène et faible niveau de rejet de CO_2).

Lorsque les conditions sont favorables, la graine germe, elle passe de la vie ralentie à la vie active. L'embryon se nourrit durant les premiers jours de la germination des réserves de la graine. La croissance de l'embryon donne lieu à une plantule constituée de racines, tige, cotylédons, feuilles et bourgeon terminal. Les réserves s'épuisent au fur et à mesure de la croissance de la plantule. Après le développement des racines et des feuilles, la plantule devient autonome sur le plan de nutrition. Ainsi, l'absorption de l'eau et des sels minéraux se fait au niveau des racines, la photosynthèse a lieu au niveau des feuilles.

C. De l'embryon à la plante

1- Développement de l'embryon

Le zygote principal va subir une première mitose transversale pour donner deux cellules superposées.

- Une cellule basale située du côté du micropyle, qui, en se divisant, donne une file de cellules qui constituent le **suspenseur**,

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

- Une cellule terminale qui, en se divisant, donne un petit massif méristématique l'**embryon globuleux**. Cet embryon globuleux change de forme à mesure que ses organes se différencient. Il devient un embryon cordiforme.

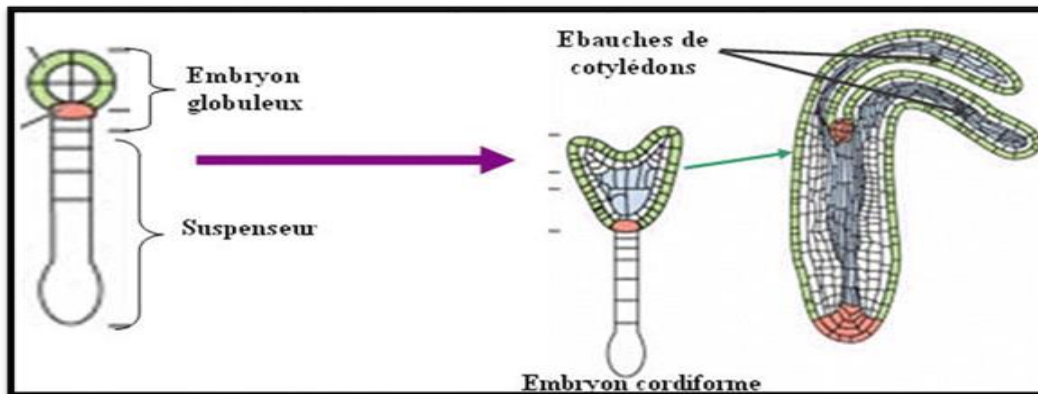


Fig 16 : Développement de l'embryon

- Du côté du suspenseur, il y a formation de la racicule
- Une (Monocotylédone) ou deux (Dicotylédones) ébauches de cotylédons se forment. Les cotylédons sont les premières feuilles de la plantule.
- Gemmule (bourgeon terminal) se forme du côté des cotylédons. C'est l'ébauche de la tige feuillée.

La racicule et de la gemmule, en se développant, forment la **plantule**. Le zygote accessoire va donner une masse de cellules inorganisées, à rôle nourricier l'**albumen**. Est un tissu transitoire qui, suivant les espèces, s'accroît plus ou moins vite par rapport à l'embryon mais qui, finalement, sera digéré par ce dernier soit pendant la formation de la graine, soit à sa germination.

2-Formation de la graine

Suivant le tissu de réserve que constitue la graine on peut citer trois sortes :

- **Graines albuminées** : Lorsque les réserves sont localisées dans l'albumen. Dans ce cas les cotylédons ne sont pas gorgés de réserves.
- **Graines exalbuminées** : Lorsque les réserves de l'albumen sont digérées et stockées dans les cotylédons. Dans ce cas, l'albumen est réduit et les cotylédons sont développés.
- **Graines à périsperme** : Lorsque les réserves de l'albumen sont digérées et sont stockées dans le nucelle entourant le sac embryonnaire.

3-Le devenir des téguments de l'ovule

- Le tégument externe de l'ovule (primine), s'épaissit et durcit
- Le tégument interne de l'ovule (secondine) reste mince et transparent

Devenir du zygote principal : embryon
Devenir du zygote accessoire : albumen (tissu nourricier)
Devenir de l'ovaire : fruit
Devenir des téguments de l'ovule : téguments de la graine
Devenir des parois de l'ovaire : péricarpes du fruit

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

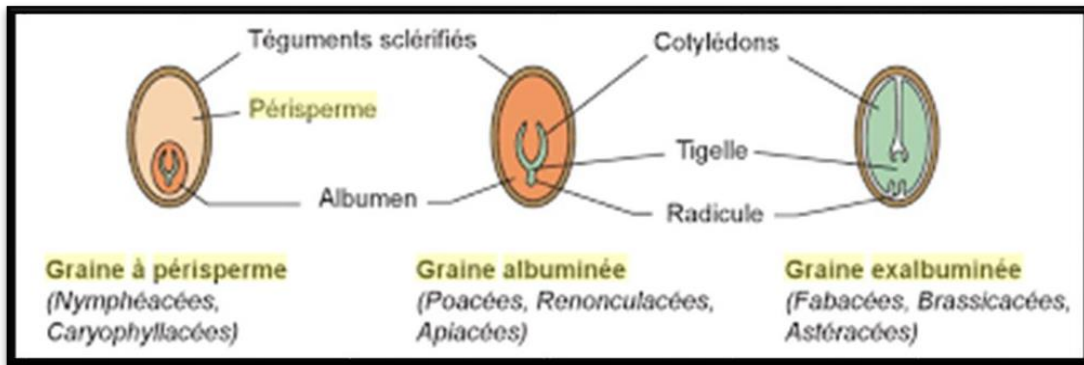


Fig 17 : Les différents types de graine

D. Les méristèmes : mises en place et fonctionnement

1- Les méristèmes

Les plantes se développent grâce à des méristèmes qui sont de petits groupes de cellules non différenciées qui se divisent. Dans le reste de la plante, les cellules se différencient en fonction de leur situation : cellules de surface (épiderme), cellules de remplissage (parenchyme), cellules conductrices de la sève (phloème, xylème), ... et cessent de se diviser. Ces méristèmes se trouvent dans les bourgeons, aux extrémités des racines et sur la longueur des tiges et des racines.

On distingue deux types de méristèmes : **Les Méristèmes Primaires** et **Les Méristèmes Secondaires**.

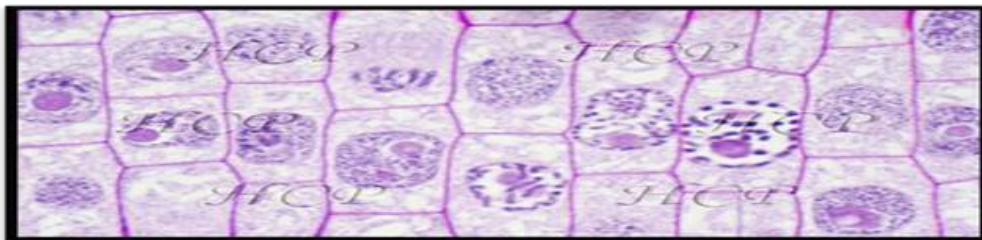


Fig 18 : La cellule méristématique

1-1- Le méristème primaire

Les méristèmes primaires sont localisés à l'extrémité des tiges et des racines et ils assurent la croissance en longueur. Les cellules du méristème primaire sont petites et isodiamétriques. Elles sont parfaitement jointives (pas de méats). Elles possèdent un noyau central occupant une partie importante du volume cellulaire. L'appareil vacuolaire est réduit et il est constitué par de très petites vacuoles qui sont soit sphériques soit disposés en un très fin réseau. Les mitochondries sont nombreuses et il n'existe pas de plastes différenciés.

1-1-1- Méristème racinaire

L'allongement des racines se fait par son extrémité au niveau du méristème racinaire, ce dernier il est uniquement **histogène**. Il ne produit pas d'organes latéraux donc il n'est pas **organogène**. A l'extrémité des racines, on distingue :

- **Une coiffe**, qui protège le méristème contre la rugosité du sol. Entre celle-ci et les poils absorbants, on observe une zone **quiescente** (sans division cellulaire) ;
- **Une zone de multiplication ou de division**, juste au-dessus de la coiffe, comprend le méristème apical et les méristèmes qui en dérivent. C'est à cet endroit que se fait l'absorption des sels minéraux ;
- **Une zone d'élongation**, au-dessus de la zone de division cellulaire, les cellules du méristème deviennent plus longues et permettent à la racine de s'enfoncer dans le sol ;

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

- Une **zone de différenciation**, avant d'avoir terminé leur croissance, les cellules commencent à se spécialiser.

Les racines latérales se forment de manière endogène à quelque distance de l'apex à partir du **péricycle** (assise cellulaire située entre l'écorce et la stèle). Le péricycle initie les ramifications de la racine. La structure et le fonctionnement des ramifications sont identiques à celui du méristème apical de la racine.

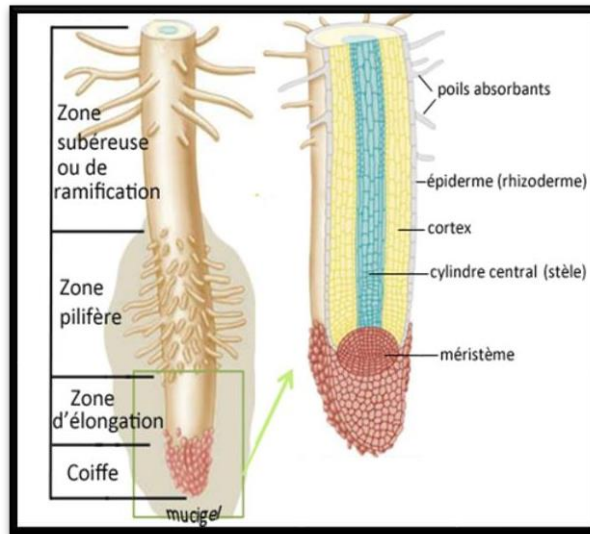
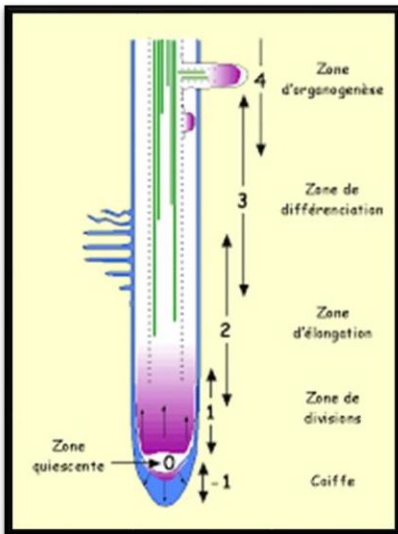


Fig 19 : Différentes zone à l'extrémité Fig 20 : Le méristème apical racinaire d'une racine

1-1-2- Méristème caulinaire

Le méristème caulinaire (de la tige) est responsable de l'édification de la partie aérienne de la plante, de lui, apparaissent des cellules qui en se multipliant et en se différenciant donneront **les tiges, les feuilles, les bourgeons axillaires et les bourgeons floraux**, il est donc **histogène et organogène**. De manière tout à fait répétitive et indéfinie, jusqu'à la mort de la plante. Une coupe longitudinale d'un méristème végétatif caulinaire sous forme d'un dôme de 0.5 à 3 mm, montre l'existence de trois zones essentielles :

- Une **zone axiale (Za)**, avec deux couches superficielles, **les tunicas T1 et T2** et le **corpus C** ;
- Une **zone latérale (ZL)**, entourant la zone axiale (**Za**), la partie à droite correspond à l'apparition d'une feuille (**ZLF**). On distingue des divisions périclines (cloisons parallèles à la surface) ;
- Un **méristème médullaire (Mm)**, aux mitoses peu fréquentes formant des files empilés de cellules à l'origine de la moelle centrale **M** ;

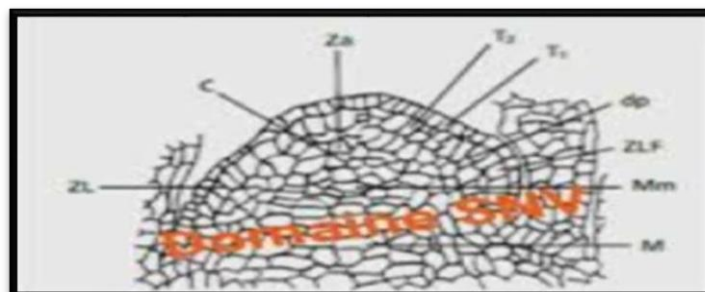


Fig 21 : Différentes zone du méristème caulinaire

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

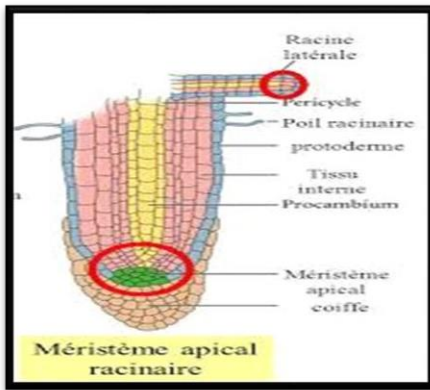


Fig 22 : Méristème apical racinaire

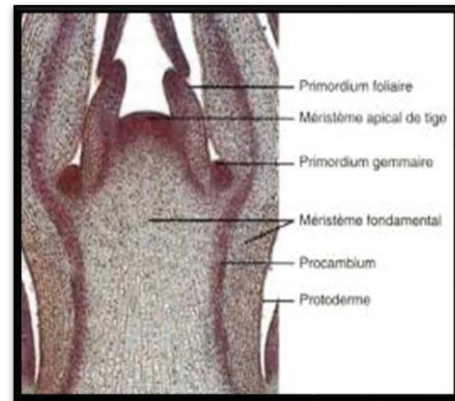


Fig 23 : Méristème caulinaire

1-2- Les méristèmes secondaires

Coaxiaux avec les organes, ils sont le siège de cloisonnements tangentiels. Le fonctionnement des méristèmes secondaires modifie les structures primaires qui deviennent ainsi des structures secondaires ;

Les méristèmes secondaires assurent la croissance des organes en largeur. Ils n'existent que chez les « Gymnospermes » et les « Angiospermes dicotylédones ». Les méristèmes secondaires sont constitués de cellules à contour rectangulaire disposées en rangées régulières. La vacuole est très développée dans le cas des méristèmes secondaires et le noyau est localisé à la périphérie des cellules.

Les méristèmes secondaires sont constitués de deux assises génératrices :

- **L'assise subérophellodermique** : Elle forme vers l'extérieur le suber ou liège ayant un rôle de protection et vers l'intérieur le phelloderme ayant un rôle de réserve ou d'assimilation. Dans les racines, cette assise se forme le plus souvent à partir du péricycle ; dans la tige, par contre, elle se forme superficiellement sous l'épiderme ;
- **L'assise libéroligneuse** : Elle forme vers l'extérieur le liber secondaire et vers l'intérieur. Le xylème secondaire ;

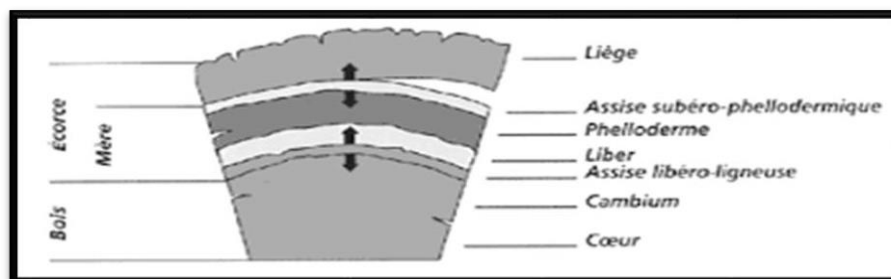


Fig 24 : Méristème secondaire : L'assise subérophellodermique et L'assise libéroligneuse

E. Induction florale

1-Introduction

L'induction florale est un phénomène physiologique qui fait qu'un bourgeon à feuille évolue en bouton à fleur. Chez les Angiospermes, l'induction florale est responsable de la floraison, donc de la reproduction sexuée. Ainsi, l'étroite régulation de la période de floraison mène à un processus reproductif efficace, permettant le développement de graines dans des conditions environnementales optimales. Chez les plantes annuelles, l'induction florale est aussi le début de la sénescence.

2- Produits de contrôle de l'induction florale

- **Gibbérelline (Ga)** : Hormones les plus impliquées dans le contrôle de la floraison. Les **gibbérellines** (de *Gibberella fujikuroi*) sont une famille de phytohormones. Le composé actif est appelé **acide gibbérellique**. Les gibbérellines sont nommées G ;

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

- **Cytokinines (Ck)** : Hormone appliquée à faible dose, elles ont souvent un effet stimulateur ;
- **Auxine** : elle est presque toujours inhibitrice de la floraison. Elle joue un rôle majeur dans le contrôle de leur croissance. Elle intervient dès les premiers stades de l'embryogenèse puis contrôle aussi bien l'organisation du méristème apical (phyllotaxie) et la ramification des parties aériennes de la plante (dominance apicale), que la formation de la racine principale, l'initiation des racines latérales et des racines adventives (rhizogénèse). L'auxine intervient également dans les tropismes en réponse à la gravité (gravitropisme) ou à la lumière (phototropisme). Ces multiples effets à l'échelle de la plante résultent du contrôle qu'elle exerce sur la division cellulaire, l'élongation cellulaire et certaines étapes de différenciation ;
- **Ethylène** : selon les végétaux, il stimule ou inhibe la mise à fleur.

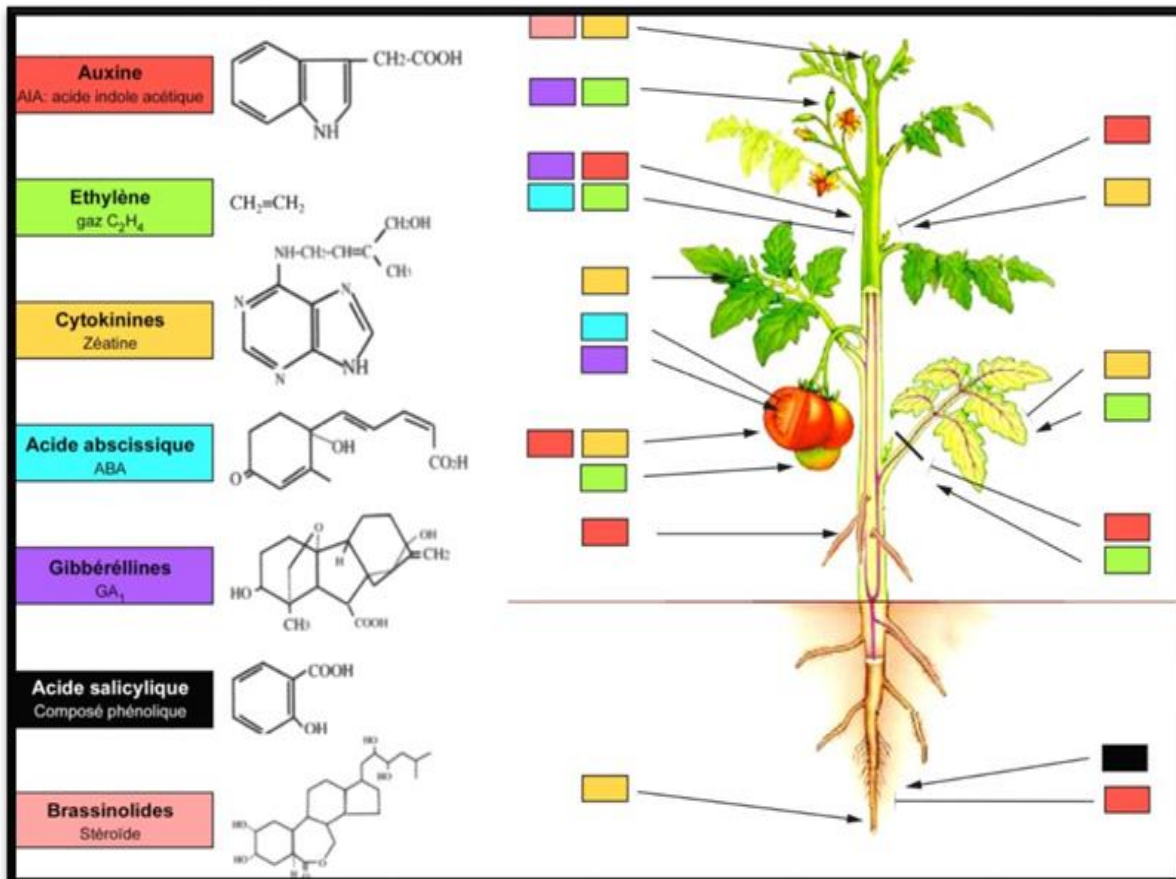


Fig 25 : Interaction hormonale au cours de la morphogénèse

F. Génétique de la redétermination du méristème apical

1- Les cellules souches végétales

Les cellules souches végétales sont des cellules indifférenciées présentes dans le méristème des plantes. On pourrait donc implanter un maximum de cellules souches végétales dans une seule plante et donc augmenter considérablement leur régénération et peut-être l'accélérer. Une cellule souche normale est une cellule indifférenciée se caractérisant par la capacité à engendrer des cellules spécialisées par différenciation cellulaire et une capacité à se maintenir par prolifération dans l'organisme (auto-renouvellement). Les cellules souches peuvent se distinguer en fonction de leur potentiel de différenciation :

- **Les cellules souches totipotentes** : pouvant donner tout type cellulaire, et donc un organisme entier ;
- **Les cellules souches pluripotentes** : capables de donner tous les types cellulaires sauf les annexes embryonnaires ;

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

- **Les cellules souches multipotentes** : susceptibles de donner différents types de cellules, mais spécifiques d'un lignage cellulaire donné ;
- **Les cellules souches unipotentes** : qui ne peuvent pas ne donner qu'une seule sorte de cellule (elles peuvent cependant, comme toute cellule souche, s'auto-renouveler).

2- Gènes homéotiques influant sur l'identité du méristème

Le méristème des plantes est un tissu spécialisé dans la croissance constitué de cellules souches. Ces cellules d'abord indifférenciées vont se diviser par mitoses et se spécialiser. Le méristème apical caulinaire est celui relatif à la partie aérienne des végétaux : feuilles, tiges, bourgeons, fleurs. Trois gènes homéotiques principaux vont permettre la transition du méristème végétatif en méristème d'inflorescences : APETALA₁, LEAFY et AGAMOUS. Le gène LFY code un régulateur de transcription et s'accumule dans les régions périphériques du méristème apical d'inflorescence, cela continuellement dans le développement. Ce gène interagira de manière synergique avec AP₁ dont l'ARNm, contrairement à celui de LFY s'accumule tout d'abord de manière diffuse dans les jeunes primordiaux floraux avant de se restreindre aux deux premiers verticilles dès l'apparition des premiers sépales. AP₁ jouera aussi un rôle, ultérieurement dans la différenciation des organes des deux premiers verticilles.

Le méristème floral primaire sera d'abord produit par l'action synergique de AP₁ et de LFY. Il sera accompagné par l'apparition des pétales et sépales. Plus tard, AG spécifiera la partie plus centrale du méristème. Il a été observé qu'un autre gène, SHOOT MERISTEMLESS (STM), encodant une protéine KNOTTED entrerait en jeu conjointement avec AG pour en définir le domaine d'action.

G. Les gènes d'identité du méristème floral

1- Introduction

Les **Gènes Homéotiques des plantes à fleurs** participent, comme les gènes de développement HOX chez les animaux, à l'organisation des plantes à fleurs. Ils sont conservés chez les différentes espèces et permettent une meilleure compréhension de l'évolution florale.

2- Origine et découvert

Si les résultats des études au sujet des gènes **Hox** des animaux font parler d'eux depuis plusieurs décennies, les découvertes quant aux gènes homéotiques des plantes à fleurs sont-elles plutôt récentes. Ce n'est en effet qu'en 1988 que paraît l'étude de George W. Haughn et Chris R. Somerville concernant la première version du modèle ABC. Trois ans plus tard, en 1991, c'est au tour d'Enrico S. Coen et d'Elliot M. Meyer witz de publier leurs résultats. De nombreuses études ont ensuite suivi, précisant les processus menant à la floraison et ses différents acteurs.

Ces expériences, le plus souvent réalisées sur la plante modèle *Arabidopsis thaliana*, révèlent la nécessité de trois classes de gènes à la floraison : les gènes jouant un rôle dans la spécification du méristème, ceux régissant l'identité des organes et enfin les gènes cadastraux. Deux informations capitales quant au développement des fleurs chez les angiospermes sont connues : pour qu'ait lieu la floraison, il faudra d'abord que le méristème, à l'origine végétatif, se modifie en méristème d'inflorescences, cela sous l'action de gènes homéotiques ; ce n'est qu'ultérieurement qu'une autre série de gènes homéotiques se chargeront de définir l'identité des organes floraux.

La floraison représente chez la plante le passage à la maturité sexuelle. En effet, la fleur est le siège du système reproductif : les étamines produisent le pollen et le pistil produit.

H. Architecture de l'inflorescence

1-Introduction

L'inflorescence (du latin *inflouescere* : fleurir) est la disposition des fleurs sur la tige d'une plante à fleur. Cette disposition, dont le motif s'apparente à une fractale, est souvent caractéristique d'une famille, par exemple le spadice des Aracées, et lui a parfois donné son nom : l'ombelle est

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

l'inflorescence typique des Ombellifères (aujourd'hui Apiacées), le capitule celle des Composées (aujourd'hui Astéracées).

On distingue les inflorescences **indéfinies** et les inflorescences **définies**, selon que l'axe principal de l'inflorescence est terminé par un bourgeon ou par une fleur.

L'inflorescence est un des moyens d'attraction des pollinisateurs par l'effet de groupe qu'elle procure. Ce rassemblement de fleurs augmente généralement le taux des visites et la diversité des pollinisateurs, car il offre à ceux-ci une mine concentrée de ressources plus visibles et une facilitation de l'atterrissage. De plus, l'inflorescence simule une grande fleur plus prometteuse de récompenses (nectar, pollen).

2-Inflorescence simple

2-1- Inflorescence Indéfinis ; Monopodiale ; Racémeux

Dans une inflorescence indéfinie, l'axe principal se termine par un bourgeon et s'allonge, en théorie indéfiniment, en émettant latéralement des fleurs ou des axes secondaires portant des fleurs. Ce sont les fleurs de la base qui s'ouvrent les premières, les autres fleurs s'ouvrent successivement de la base vers le sommet. Le type de l'inflorescence indéfinie est la grappe.

2-2- Inflorescence Définis ; Sympodiale ; Déterminé

Dans une inflorescence définie, l'axe principal se termine par une fleur, qui fleurit en premier, et sa croissance s'arrête. Les autres fleurs apparaissent successivement vers la périphérie sur des rameaux secondaires, qui peuvent être parfois très courts. Le type de l'inflorescence définie est la cyme. On parle de **ramification sympodique**.

3-Inflorescence composée

Lorsque les inflorescences portées par l'axe principal et les axes secondaires sont de même type, on parle d'inflorescence composée, homogène, homomorphe ou homotactique ; dans le cas contraire il s'agit d'inflorescence composée mixte ou hétérotactique.

Tous les types de combinaisons peuvent se rencontrer. Parfois, l'inflorescence composée tend à simuler une fleur simple (voir le cas de l'edelweiss).

- a) **Homogènes (Panicule : grappe de grappes ; Ombelle : d'ombellules ; Epi d'épillets.)**
- b) **Mixtes (Thyrse : grappe de cymes ; Panicule d'épillets ; Corymbe de capitules ; Epi de cymes ; Epi de glomérules.)**

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

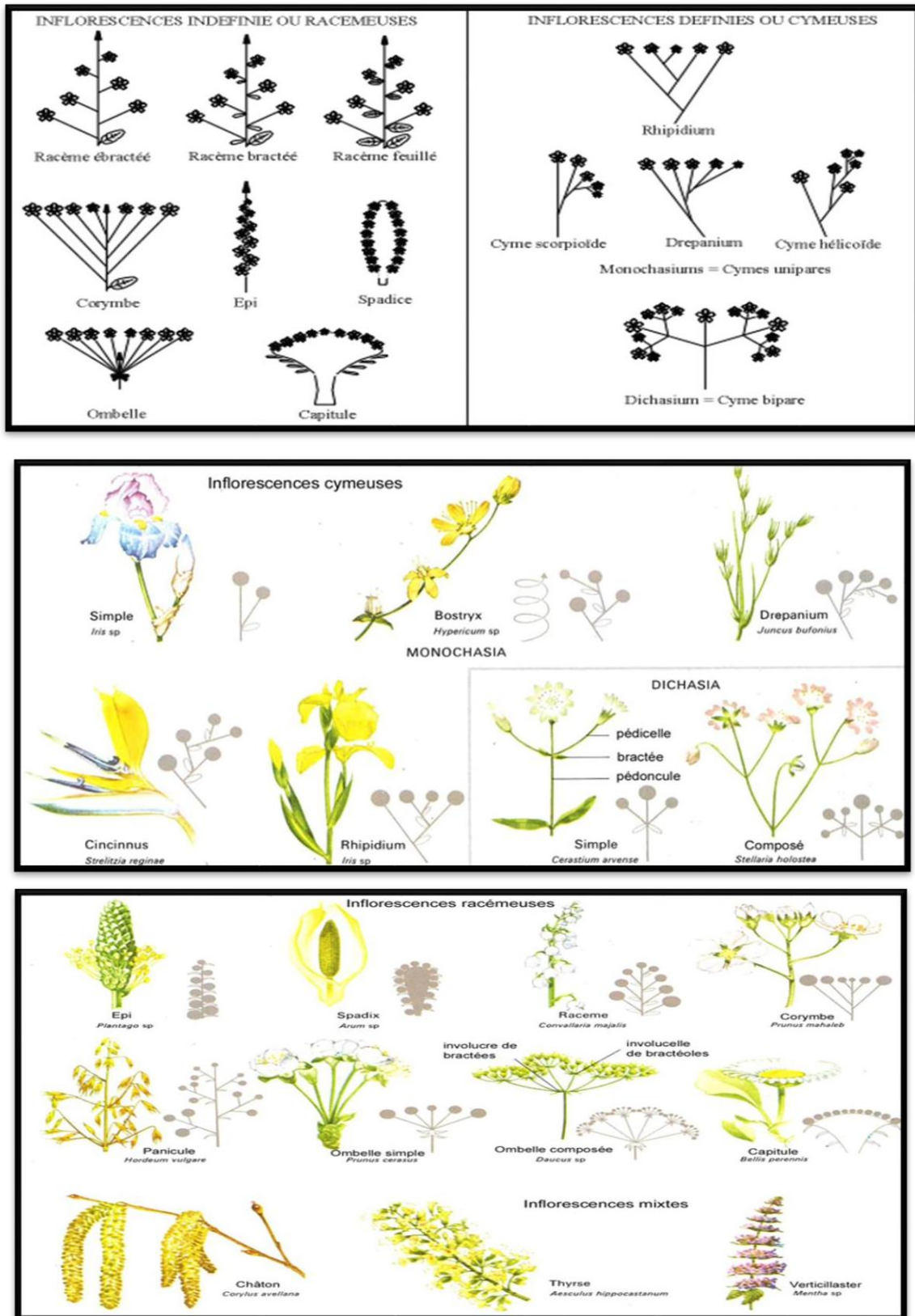


Fig 26 : Les différents types d'inflorescences

4- La formule florale (voir TD)

La formule florale est une méthode permettant de représenter la structure d'une fleur à l'aide de chiffres, de lettres et de symboles divers, en présentant les informations importantes à propos de la fleur

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

sous une forme compacte. La formule florale peut servir à représenter une espèce particulière, mais elle peut être généralisée pour caractériser des taxons de niveau plus élevé, en indiquant généralement des plages pour les nombres de pièces florales. La formule florale est l'une des deux manières de décrire la structure des fleurs mises au point au cours du XIX^e siècle, l'autre étant le diagramme floral. Le format des formules florales diffère selon les auteurs, mais elles visent toutes à présenter les mêmes informations.

5- Le diagramme floral (voir TD)

Le diagramme floral est une représentation schématique de l'organisation des pièces florales d'une fleur. Il a été défini par John Henry Schaffner en 1916¹. Il permet d'identifier facilement la famille d'une plante.

Les différentes pièces florales sont schématisées en position anatomique comme pour une coupe transversale de la fleur de l'extérieur vers l'intérieur (les numéros correspondent au dessin ci-contre) :

- L'axe de l'inflorescence, correspondant au pédoncule floral (s'il est absent, on le dessine en pointillés) toujours représenté en haut : avec la bractée, il définit l'axe de la fleur ;
- La bractée (si elle est absente, on la dessine en pointillés) toujours représentée en bas : avec le pédoncule, elle définit l'axe de la fleur (ce qui est important pour les fleurs zygomorphes) ;
- Les bractéoles (si elles sont présentes) ;
- Les sépales, dessinés en forme de croissants de lune évidés ;
- Les pétales, dessinés en forme de croissants de lune pleins ;
- Les étamines, représentées par des ronds évidés ;
- Le gynécée, dessiné en coupe transversale.

I. Les gènes homéotiques à boîte (MADS)

1- Le model ABC

Décrit en 1988 par George W. Haughn et Chris R. Somerville, le modèle ABC est celui qui explique les procédés moléculaires et génétiques menant à la différenciation des organes floraux. La fleur se compose de quatre verticilles : le calice, la corolle, l'androcée et le gynécée. Selon ce modèle, l'identité de chacun de ces verticilles est contrôlée par des gènes homéotiques, plusieurs appartenant à la famille de gènes MADS-box. Ils sont regroupés en trois classes, A, B et C dont l'action a un impact sur les premiers et seconds verticilles pour A, les deuxièmes et troisièmes verticilles pour B et le troisième et quatrième pour C. Récemment les classes D et E ont été rajoutées. Elles auraient un impact quant à l'ovule pour D et un rôle un peu plus global quant à E dont l'effet s'étend en fait sur les quatre verticilles.

Dans ces classes se retrouvent plusieurs gènes : APETALA₁, APETALA₂, APETALA₃, PISTILLATA, AGAMOUS, FLORAL BINDING PROTEIN₇, FLORAL BINDING PROTEIN_{1L} et SEPALATA₃. Ils seront regroupés de telle manière à ce que : **Classe A : AP₁ et AP₂ ; Classe B : AP₃ et P₁ ; Classe C : AG ; Classe D : FBP₇ et FBP_{1L} ; Classe E : SEP₃**

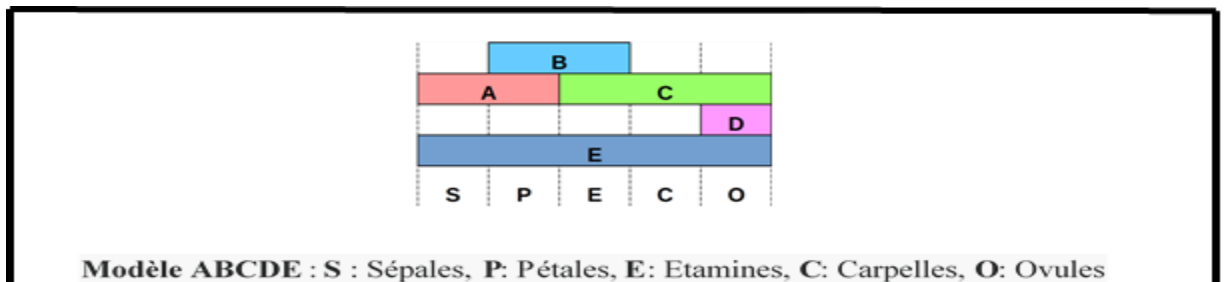


Fig 27 : Le model ABC

Les gènes ABC sont des gènes homéotiques qui codent des facteurs de transcription qui ont un rôle dans l'organisation de la fleur. Mis à part AP₂ qui ne fait pas partie de la famille MADS-BOX,

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

tous ont un domaine MADS codé par MADS-BOX qui permettra ainsi la liaison à l'ADN sous la forme de dimères. Ils ont de plus un second domaine appelé K qui aura un rôle dans les interactions interprotéiques. Le domaine MADS est composé d'une séquence de 56 acides aminés dont 9 ont été observés chez tous les membres de la famille.

La floraison implique trois classes de gènes : **Les gènes de l'identité du méristème**, ceux de l'identité des organes et enfin les gènes cadastraux dont le rôle est de réguler spatialement l'expression des gènes de l'identité des organes floraux. **Les deux premières classes sont homéotiques**, leurs gènes codent ainsi pour des facteurs de transcription qui produisent différentes protéines dont le résultat sera l'organisation florale finale. Mais avant de pouvoir définir l'identité des organes de la fleur, il faudra d'abord que le méristème végétatif transitionnel en méristème d'inflorescences.

2- Les gènes homotypiques qui influent sur les organes

Maintenant que le méristème est prêt à produire les différents verticilles, c'est au tour des gènes du modèle ABC d'entrer en jeu. La combinaison de ces catégories de gènes permet la spécification des organes. Comme dit précédemment les gènes AP₁, AP₃, PI, AG, FBP₇, FBP_{1L} et SEP₃ font partie de la famille gènes MADS, les facteurs de transcription produits par AP₂ seront eux de la famille AP₂/EREBP. Chacun des verticilles sera le résultat de l'action conjointe d'un ou de plusieurs gènes. Si les premières études ont principalement été réalisées sur la fleur *Arabidopsis thaliana*, beaucoup d'autres ont été adaptées sur d'autres espèces telles que *Antirrhinum majus* ou encore *Petunia*. Les gènes homéotiques retrouvés dans les études seront ainsi souvent des homologues de ceux d'*Arabidopsis*

2-1- Classe A

Chez *Arabidopsis thaliana*, les deux gènes APETALA₁ et APETALA₂ influent sur les deux premiers verticilles. Tout comme AG, AP₁ jouera aussi un rôle dans l'identification du méristème. AP₂ lui aura en fait un impact sur les quatre verticilles et même sur l'apparition de feuilles. De leur action conjuguée seront produites les sépales et pétales.

Chez *Antirrhinum majus*, les gènes homologues seront respectivement SQUAMOSA (SQUA) pour AP₁ ainsi que LIPLESS₁ et LIPLESS₂ pour AP₂.

Dans le cas de *Petunia*, de véritables homologues de AP₁ n'ont pas encore été clairement identifiés. L'inhibition d'AGAMOUS dans les deux premiers verticilles serait due à l'activité de BLIND. Quant à AP₂, trois gènes similaires ont été isolés : PhAP_{2B}, homologue à AP₂ autant au niveau de la séquence que dans le patron d'expression ainsi que PhAP_{2B} et PhAP_{2C}.

2-2- Classe B

Chez *Arabidopsis thaliana*, les gènes APETALA₃ et PISTILLATA sont responsables de la production des pétales et étamines. Chez *Antirrhinum majus*, ce sont DEFICIENS (DEF) et GLOBOSA (GLO) qui se chargeront de la différenciation des seconds et troisièmes verticilles.

2-3- Classe C

Chez *Arabidopsis thaliana*, le gène AGAMOUS est responsable de l'apparition des étamines et des carpelles. Lorsque le gène AG est mis sous silence, l'androcée et le gynécée seront remplacés par des pétales et des sépales. De même, AG ayant un rôle dans la détermination du méristème, celui-ci se développera de manière indifférenciée au niveau du centre de la fleur.

Chez *Antirrhinum majus*, le gène équivalent à AGAMOUS et PLENA. Récemment, un autre gène, FARINELLI, a été défini comme un second gène du groupe C. Ces deux gènes vont aussi agir de manière redondante dans la prévention de l'expression des gènes du groupe B dans le quatrième verticille.

Chez *Petunia*, comme chez *Antirrhinum majus*, le troisième et quatrième verticille sont contrôlés par plusieurs gènes ayant un patron d'expression similaire. Les homologues d'AG seront PMADS₃ et FLORAL-BINDING protéine₆ (FBP₆).

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

2-4- Classe D

Les gènes FLORAL BINDING PROTEIN⁷ et FLORAL BINDING PROTEIN^{1L} ont été découverts en 1995. Il a été observé qu'ils auraient un effet sur le développement de l'ovule chez les pétunias. Des gènes équivalents ont aussi été retrouvés chez *Arabidopsis thaliana*, mais avec un rôle plus important puisqu'ils contrôlent aussi le développement des carpelles en plus de celui de l'ovule. Ils joueraient aussi un rôle dans l'élaboration de structures facilitant la dispersion des graines.

2-5- Classe E

Découverts en 1994 lors d'une étude d'interférence par ARN chez les tomates et les pétunias, l'expression de SEP₃ est nécessaire dans les quatre verticilles floraux.

Tous les mécanismes de la floraison ne sont pas encore connus mais l'on peut observer la conservation générale d'une sorte de Bau plan floral. Le modèle ABCDE semble en effet être retrouvé chez toutes les espèces, les gènes homéotiques étant homologues entre eux. Aussi, comprendre la phylogénie des gènes homéotiques régulant l'organisation florale tels que ceux de la famille MADS-BOX permet une meilleure compréhension de l'origine et de l'évolution des angiosperme



**Partie II : Mécanismes génétiques
de la reproduction sexuée.**

A. Notion de fleur : origine et évolution

1- L'origine de la fleur

La fleur représente l'organe de reproduction chez les plantes à fleurs. Les étamines produisent les grains de pollen qui contiennent les cellules reproductrices mâles, tandis que le pistil abrite l'ovule. La fécondation est généralement croisée, c'est-à-dire que dans la plupart des cas, une plante ne peut pas s'auto-féconder.

La fleur est constituée de pétales, d'étamines avec les sacs polliniques (contenant des cellules reproductrices mâles), et des pistils ou carpelles avec les ovaires (contenant des cellules reproductrices femelles) et les stigmates. La fleur est un ensemble de feuilles modifiées.

Lorsqu'un grain de pollen (**gamétophyte mâle**) se dépose sur la partie terminale du pistil, le stigmate (ce qui constitue la pollinisation), il germe et forme un long tube pollinique dans lequel se forment deux gamètes mâles. Quand l'extrémité du tube pollinique arrive au contact de l'ovule, les gamètes mâles pénètrent à l'intérieur, pour atteindre le sac embryonnaire (**gamétophyte femelle**) ,il contenant sept cellules, dont l'une est l'oosphère (gamète femelle, homologue de l'ovule des animaux). L'un des deux gamètes mâles féconde l'oosphère, dont le développement donnera l'embryon, tandis que l'autre fusionne avec une grande cellule à deux noyaux (œuf albumen), qui fournira les réserves de la graine. Les deux gamètes formeront alors un embryon qui par la suite deviendra une graine. Cette graine formera ainsi la nouvelle plante.

Si les conditions sont favorables, la graine germe : le premier organe à apparaître est une petite racine appelée radicule. L'embryon se développe en une jeune plantule qui vit sur les réserves nutritives de la graine jusqu'à ce que ses premières feuilles lui permettent de réaliser la photosynthèse.

Une **plantule** ou **jeune pousse** est une jeune plante sporophyte ne comportant que quelques feuilles issue de l'embryon d'une graine, son développement commence avec la germination de la graine. La plantule est constituée de trois parties principales : la radicule, la tige, issue de l'hypocotyle, d'un collet et les cotylédons.

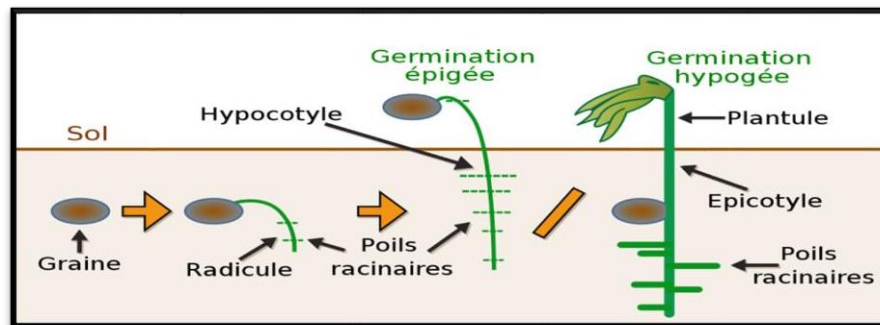


Fig01 : La germination de la graine

2-L'évolution de la fleur

Les angiospermes sont un groupe monophylétique, apparu relativement récemment et qui s'est rapidement diversifié en co-évoluant avec les insectes ou d'autres animaux pollinisateurs anthophiles, pour donner les environ 250 000 espèces actuelles de plantes à fleur.

Les plus anciens fossiles de plante à fleur sont *Archaeofructus*, probablement aquatique et datée depuis 120 millions d'années (début du crétacé). Cette fleur découverte en Chine n'avait ni pétales ni sépale mais des carpelles, et des étamines dispersés le long d'une tige, non ancrés sur un même point. *Montsechia vidalii* découverte dans les Pyrénées espagnoles est également une plante aquatique datant de 130 millions d'années. Par la méthode phylogénétique de la reconstitution des états ancestraux, des chercheurs ont fait le portrait-robot du plus ancien ancêtre commun de toutes les fleurs, il y a 140 millions d'années, qui s'avère être une fleur hermaphrodite dont la majorité des pièces florales ne sont pas insérées en spirale mais

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

en verticille, ce qui contredit la théorie du botaniste américain Charles Edwin Bessey qui suggère que les Angiospermes sont monophylétiques, dérivant d'une fleur primitive de type Magnolia.

3- La reconstitution de la fleur de l'ancêtre commun des Angiospermes

La reconstruction indique que la fleur de l'ancêtre commun des Angiospermes actuelles était bisexuée, présentait une symétrie radiale (fleur actinomorphe), avec vraisemblablement au moins 4 verticilles de 3 tépales pour le périanthe. Les étamines (au moins une dizaine) étaient disposées en plusieurs verticilles (au moins 4 verticilles de 3 étamines, soit la même organisation que le périanthe). Le gynécée était composé de plusieurs carpelles libres (Fig. 03 et 05). La figure 02 montre une représentation possible de cette fleur. La combinaison de caractères au niveau de la fleur de l'ancêtre commun des Angiospermes est unique, elle ne se retrouve ni chez les fossiles, ni chez les espèces actuelles.

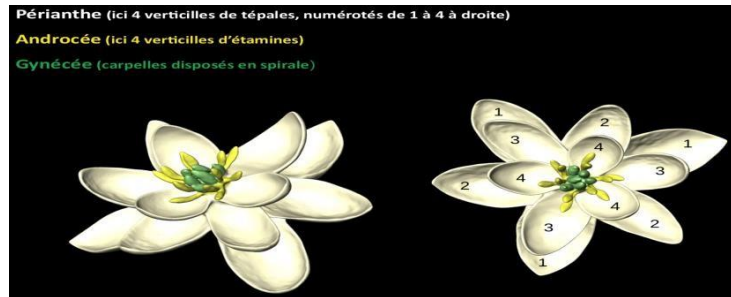


Fig 02 : Résultat de la reconstruction de la fleur de l'ancêtre commun des Angiospermes actuelles

Remarque : Il est essentiel de noter que certains caractères (comme la couleur, la forme ou la taille relative des pièces) n'ont pas été reconstruits, et sont ici représentés de façon arbitraire.

4-L'évolution du sexe

Si la parcimonie ne permettait pas de trancher sur la question des pièces fertiles de cette fleur, les reconstructions basées sur des modèles probabilistes d'évolution indiquent que la fleur de l'ancêtre commun des Angiospermes était très probablement bisexuée, avec des étamines et des carpelles au sein de la même structure. Ce résultat est intéressant du point de vue botanique car la question divise depuis longtemps les spécialistes, mais il illustre également un point intéressant en biologie évolutive : *Amborella* est certes le groupe frère de toutes les Angiospermes actuelles, mais ce n'est en aucun cas l'image de l'ancêtre commun des plantes à fleurs.

La lignée conduisant à *Amborella* s'est séparée du reste des Angiospermes il y a environ 140 millions d'années, ce qui permet d'envisager un certain nombre de transformations au niveau des caractères morphologiques dans cette lignée. Les groupes taxonomiques divergeant à la base des arbres phylogénétiques sont souvent mal interprétés comme « proches » de l'ancêtre commun : ils ne partagent pas les caractères dérivés apparus plus tard dans la phylogénie, ce qui est aussi le cas de l'ancêtre commun, mais ils peuvent posséder un certain nombre de caractères dérivés qui leur sont propres (autapomorphies) et qui les différencient de l'ancêtre commun. *Amborella*, et de manière générale les espèces situées à l'extrémité des branches correspondant aux nœuds profonds de l'arbre comme les nénuphars ou les magnolias ont ainsi un certain nombre de caractères dérivés qui les différencient de l'ancêtre commun des Angiospermes, les fleurs unisexuées étant un exemple chez *Amborella*.

Nous avons vu précédemment que la fleur de l'ancêtre commun des Angiospermes, telle que reconstruite ici, ne correspondait à aucune espèce actuelle ou fossile. Cette morphologie a donc évolué, et les fleurs de quelques nœuds profonds ont également été reconstituées, avec la même approche. Les résultats obtenus indiquent que les différentes trajectoires évolutives initiales correspondent toutes à une simplification (réduction du nombre d'organes) par rapport à la fleur de l'ancêtre commun. L'évolution est souvent vue comme un phénomène entraînant une complexification croissante des organismes, mais nous avons de nombreux exemples illustrant le cas contraire chez les êtres vivants.

B. Développement des organes reproducteurs et sa régulation génétique

1-Formation de l'anthère et du pollen

1-1- L'anthère

Elle est la partie terminale de l'étamine, organe mâle de la fleur, qui produit et renferme le pollen. L'anthère est fixée au filet de l'étamine par le « connectif », soit par sa base (anthère basifixe), soit par son milieu (anthère médifixe ou dorsifixe). Elle est composée de deux thèques possédant chacun deux sacs polliniques avant maturité, nombre constant chez les Angiospermes. Ceux-ci fusionnent à maturité pour donner deux loges (anthère biloculaire), parfois une seule (anthère uniloculaire). Elles s'ouvrent, généralement par déhiscence, pour répandre les grains de pollen à l'extérieur. La forme des anthères est très variable : elles peuvent être allongées, globuleuses, réniformes, disciformes, quadricorne¹, etc. Dans certains cas, les anthères modifiées peuvent jouer un rôle dans l'attraction des insectes pollinisateurs : anthères stériles colorées ou charnues de certaines fleurs.

1-2- Le pollen

Chez les plantes à graines, l'élément mobile mâle produit par la fleur : ce sont des grains minuscules (20 à 55 µm de diamètre en général), de forme plus ou moins ovoïde, initialement contenus dans l'anthère à l'extrémité des étamines.

Le grain de pollen est le gamétophyte mâle, il produit et contient les gamètes mâles haploïdes (n), et permet leur déplacement. On le considère parfois à tort comme un gamète. Le grain de pollen est homologue des gamétophytes chez d'autres groupes d'Embryophytes (par exemple du prothalle des fougères) et chez certaines algues. Il fait partie de la phase haploïde du cycle de vie des plantes à graines. Il constitue une génération gamétophytique au sens botanique du terme. Chez certaines plantes à fleurs, la germination du grain de pollen commence souvent avant même qu'il ne quitte le microsporangium, avec la cellule générative formant les deux.

2-Formation de l'ovule et du sac embryonnaire

2-1- La formation de l'ovule

En botanique, l'**ovule** est un organe qui contient le gamète femelle. Il s'agit du macrosperme des Spermaphytes. Il renferme le gamétophyte femelle (le sac embryonnaire) qui contient le gamète femelle : l'oosphère.

L'ovule des végétaux est très différent d'un gamète animal : il est composé d'un sac embryonnaire composé de cellules haploïdes correspondant à un gamétophyte, formé à partir d'une mégaspore. Celui-ci est entouré d'un nucelle diploïde, puis d'un ou deux enveloppe(s) ou tégument(s) diploïde(s), s'ouvrant sur l'extérieur par une ouverture appelée micropyle.

- **Ovules nus** : Chez les Gymnospermes, l'ovule est nu, c'est-à-dire qu'il n'est pas protégé par un ovaire.
- **Ovules et ovaire** : Chez les Angiospermes, l'ovule est enfermé dans un ovaire. Il est relié à ce dernier par un funicule, qui contient des vaisseaux conducteurs qui aboutissent au niveau d'une zone appelée chalaze.

2-2- Le sac embryonnaire

En botanique, un sac embryonnaire est une partie de l'ovule des angiospermes qui renferme le gamète femelle (ou oosphère) et les cellules qui l'accompagnent (synergides, antipodes). Le sac embryonnaire est un gamétophyte femelle des angiospermes avec une partie embryonnaire. Il est formé de 7 cellules : 2 synergides et l'oosphère du côté micropylaire, 3 antipodes du côté opposé et une cellule végétative dicaryotique soit un total de 8 noyaux. Au cours de la reproduction après la double fécondation, le sac embryonnaire produit l'embryon d'un côté et l'albumen d'un autre.

Il dérive généralement d'une seule mégaspore formée dans le nucelle (sporange) et qui a subi 3 mitoses successives (70 % des espèces). La mégaspore ne subit que deux mitoses ; les antipodes et un noyau polaire sont absents. D'autres sont formés à partir de 2 (Album).

Selon le groupe végétal :

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

- Dans la division des gymnospermes, le gamétophyte femelle ou prothalle (n) est issu de la division mitotique de la mégaspore viable. Le prothalle développe un ou plusieurs archégonés et chacun a une oosphère ou gamète femelle.
- Dans la division des angiospermes, la mégaspore viable subit trois caryocinèses, pour former un sac embryonnaire avec huit noyaux haploïdes, puis la cytokinèse est produite donnant naissance au mégagamétophyte ou gamétophyte femelle constitué de 7 cellules: l'oosphère, deux cellules synergides, une demi-cellule avec deux noyaux polaires et trois cellules antipodales (antipodes).

3-Concept de carpelle (angiospermie)

3-1- Le carpelle

Le carpelle est une enveloppe protectrice d'origine foliacée enfermant les ovules chez les Angiospermes. Les carpelles constituent le quatrième verticille de la fleur et leur groupement constitue le gynécée ou pistil. Le carpelle se transforme en fruit après la fécondation. Dans l'évolution des Spermaphytes, l'apparition de cette protection supplémentaire des ovules est une caractéristique fondamentale des Angiospermes. En opposition, chez les Gymnospermes (plantes à ovules nus), il n'y a ni carpelle ni fleur mais des cônes et des graines.

3-2- Structure de la Carpelle

Le carpelle comprend trois parties :

- a- L'ovaire** ; une cavité clos qui abrite les ovules insérés au niveau des placentas. La loge ovarienne (= 1 carpelle) est qualifiée d'uniovulée lorsqu'elle ne contient qu'un ovule et de pluriovulée dans le cas contraire.
- b- Le style** ; en forme de colonne, qui relie l'ovaire aux stigmates. Il y a autant de styles que de carpelles et ils peuvent être soudés n'en formant plus qu'un ou deux de libres (stigmate unique ou bifide).
- c- Le stigmate** ; situé à l'extrémité du style, il n'a pas d'épiderme et est souvent visqueux et muni de papilles afin de mieux capter le pollen lors de la pollinisation. Il peut être uni- ou pluripartite.

D. Fécondation, formation de la graine et du fruit

1-Pollinisation et fécondation

La graine est un organe reproducteur qui se développe à partir d'un ovule, généralement après fécondation. Les ovules sont produits tant par les angiospermes (plantes à floraison vraie) que par les gymnospermes (qui comprennent les conifères). Chez les angiospermes, les ovules sont entièrement enfermés dans l'ovaire, alors que chez les gymnospermes, les ovules sont "à nu" et généralement disposés par paires sur la face supérieure et près de la base de chaque écaille des cônes femelles. Comme les cônes ne s'ouvrent qu'au moment de la pollinisation et, plus tard, lors de la dissémination des graines, l'expression "à nu" est toute relative.

Le développement de la graine débute par la fécondation, c'est-à-dire l'union d'un noyau mâle haploïde provenant d'un grain de pollen et d'un noyau femelle haploïde à l'intérieur de l'ovule et la formation subséquente d'un nouvel organisme diploïde. La fécondation doit être précédée de la pollinisation, c'est-à-dire de l'arrivée d'un grain de pollen sur le stigmate de la fleur femelle chez les angiospermes ou à proximité du micropyle de l'ovule chez les gymnospermes. Il convient de bien faire la différence entre les deux processus distincts de la pollinisation et de la fécondation. Chez la plupart des angiospermes, l'allongement du tube pollinique est rapide et l'intervalle entre pollinisation et fécondation n'est que de quelques jours ou même de quelques heures.

2-Développement de la graine chez les angiospermes

Au moment de la fécondation, un ovule d'angiosperme type consiste en une ou deux enveloppes protectrices : Les téguments : est un tissu central ; Le nucelle : tissu de nutrition.

Souvent, les téguments et le nucelle ne sont pas clairement différenciés qu'au niveau du micropyle, c'est-à-dire du pore minuscule dans lequel, chez de nombreuses espèces, le tube pollinique pénètre pour atteindre le nucelle. L'ovule est fixé à la paroi de l'ovaire par un filament, le funicule. La méiose de la

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

cellule mère dans le nucelle, suivie de plusieurs divisions cellulaires mitotiques, conduit à la formation du sac embryonnaire, une structure comportant sept cellules et huit noyaux haploïdes, qui occupe la partie centrale du nucelle. Lorsque le tube pollinique atteint le sac embryonnaire, il libère deux gamètes mâles.

L'un de ces gamètes s'unit à l'un des noyaux du sac embryonnaire - l'oosphère - pour former un zygote, qui se développe par la suite pour former la plante embryonnaire diploïde. L'autre gamète mâle s'unit à deux autres noyaux femelles - les noyaux polaires - pour former une cellule triploïde qui se transforme par la suite en endosperme, un tissu qui fait office de réserve alimentaire pour l'embryon en développement. Les cinq noyaux restants du sac embryonnaire (les deux synergides et les trois antipodes) ne jouent aucun rôle dans le développement de la graine. La fécondation de l'oosphère et la triple fusion avec les noyaux polaires sont l'une et l'autre nécessaires à la formation d'une graine viable.

La transformation de l'ovule fécondé en graine mûre se manifeste dans les divers tissus de la façon suivante (de l'extérieur vers l'intérieur) :

- a) Les téguments de l'ovule deviennent le tégument de la graine. Ce dernier consiste parfois en deux enveloppes distinctes, l'une externe généralement épaisse, le testa, et l'autre interne généralement mince et membraneuse, le tegmen. Le testa protège l'intérieur de la graine du dessèchement, des chocs ou de l'action des champignons, des bactéries et des insectes jusqu'à ce qu'il se déchire au moment de la germination. Les angiospermes présentent cependant une grande variabilité tégumentaire.
- b) Le nucelle persiste parfois chez certains genres sous la forme d'une mince enveloppe ; le périsperme ; qui recouvre la face interne du tégument et fournit des réserves nutritives à l'embryon. Toutefois, chez la plupart des angiospermes, il disparaît rapidement, sa fonction étant remplie par l'endosperme.
- c) L'endosperme se développe d'ordinaire plus rapidement que l'embryon pendant la période suivant immédiatement la fécondation. Il accumule des réserves nutritives et renferme, en son plein développement, des quantités substantielles d'hydrates de carbone, de graisses, de protéines et d'hormones de croissance.
- d) L'embryon occupe la partie centrale de la graine. Son degré de développement au moment où la graine parvient à maturité varie considérablement d'une essence à l'autre. Chez certaines, il est possible de distinguer tous les éléments de la plante rudimentaire : la radicule, qui deviendra la racine primaire au moment de la germination, les feuilles primordiales ou cotylédons, la plumule, à partir de laquelle se développera la pousse primaire, et enfin l'hypocotyle, qui relie les cotylédons et la radicule.

Si l'embryon absorbe toutes les réserves nutritives de l'endosperme, les cotylédons épais et charnus deviennent généralement les principaux organes de stockage de la nourriture et occupent presque la totalité de la cavité interne de la graine. Quoi que la fonction de stockage à l'intérieur de l'embryon soit normalement remplie par les cotylédons, elle est totalement accomplie par l'hypocotyle.

La graine mûre peut donc être constituée de tissu diploïde issu de l'arbre mère (le tégument, testa et tegmen, et le périsperme), de tissu triploïde (l'endosperme) et de tissu diploïde issu de la nouvelle combinaison génétique propre à la descendance embryonnaire. Toutefois, le périsperme (presque toujours) et l'endosperme (assez souvent) peuvent être absents. Les constituants essentiels de toutes les graines sont l'embryon, l'enveloppe protectrice (le tégument) et une réserve de substances nutritives, qui peuvent être stockées, dans les cotylédons, l'hypocotyle, l'endosperme ou le périsperme.

3-Développement du fruit chez les angiospermes

Le développement de la graine fécondée s'accompagne normalement du développement du fruit. Dans le cas le plus simple, la paroi ovarienne s'épaissit pour former le péricarpe. Celui-ci peut être :

- a) Déhiscents, s'ouvrant alors à maturité pour libérer les graines qu'il contient. C'est ainsi le cas de la capsule (d'Eucalyptus, par exemple), un fruit multiloculaire dérivé d'un ovaire syncarpe, et de la gousse des légumineuses (par exemple de Cassia), dérivée d'un carpelle unique et qui se fend le long de deux sutures. Au moment de la déhiscence, le péricarpe peut être sec, semi-charnu ou charnu. Les capsules semi-charnues ou charnues sont communes dans les régions tropicales humides et sont souvent associées à la formation d'une pulpe (arille ou sarcotesta) de couleur, de saveur et d'odeur variées autour de la graine.

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

Indéhiscents sont sec, étroitement soudé à la graine. C'est ainsi le cas de l'akène, un petit fruit dur monosperme à péricarpe membraneux, de la samare, qui ne distingue de l'akène que par le prolongement de son péricarpe en forme d'aile, et de la noix, un fruit monosperme assez gros à péricarpe ligneux ou coriace (par exemple Shorea, Quercus).

- b) Indéhiscents sont charnus, souvent caractérisés par une couleur, une odeur et un goût particuliers, qui attirent les oiseaux et les animaux frugivores. On distingue deux catégories de fruits de ce type : la baie, qui comporte une peau externe et une masse charnue interne contenant des graines à tégument dur (par exemple Diospyros ou Pouteria), et la drupe, dont la couche interne du péricarpe est sclérifiée afin de protéger les graines (par exemple Prunus). Le tégument, qui n'a aucune fonction protectrice dans une drupe, est d'ordinaire parcheminé ou membraneux. Les différentes couches du péricarpe d'une drupe type sont l'épicarpe (la peau), le mésocarpe (la chair) et l'endocarpe (le noyau). Le noyau peut être réellement dur comme de la pierre, comme chez Gmelina, ou avoir la texture du cuir, comme chez Mangifera.

4-Dissémination des graines d'angiospermes

Il existe donc une très grande variété de fruits chez les angiospermes. Cette variété s'explique en grande partie par la nécessité d'une dissémination des graines. Les jeunes plants ont souvent du mal à survivre et à croître sous l'arbre mère, en raison de l'absence de lumière et de l'intense compétition racinaire. La dissémination sur une vaste étendue permet presque à coup sûr à quelques graines de trouver des conditions propices à leur germination et à leur survie, même si la grande majorité périt par suite de conditions défavorables, de la compétition ou de leur destruction par les animaux ou les maladies.

- a. **La dissémination par le vent :** Elle est facilitée lorsque les graines sont très légères et petites, comme chez Eucalyptus, ou que le tégument (Salix, Ceiba, Dyera) ou le péricarpe (Triplochiton, Pterocarpus, Koompassia, Casuarina, Fraxinus) comportent des ailes ou des poils servant à prolonger le vol. Il existe aussi des fruits ailés grâce à l'élargissement de sépales persistants (chez la plupart des diptérocarpacées) ou de pétales persistants.
- b. **La dissémination par les animaux :** Les fruits comestibles charnus et les graines arillées se prêtent fort bien à la dissémination par les oiseaux ou les mammifères. Après ingestion par les animaux, les graines, protégées par un tégument ou un endocarpe dur, traversent souvent sans dommage l'appareil digestif et sont déposées dans les fèces à une distance considérable du lieu d'ingestion. Dans de nombreux cas, les sucs digestifs contribuent même à la germination en amollissant le tégument. Dans certains pays, les chèvres en pâture libre mangent les gousses de Prosopis et répandent les graines indistinctement sur de vastes étendues ; l'excellente faculté germinative de ces graines et l'agressivité dont font preuve les jeunes plants peuvent alors transformer les plantes de ce genre en de redoutables indésirables. L'enfermement des chèvres en enclos et la récolte des graines sous contrôle strict permettent généralement de résoudre le problème. Dans d'autres cas, l'animal mange les fruits, mais rejette les noyaux ou les graines ; toutefois, il transporte souvent le fruit à une certaine distance de l'arbre mère avant de laisser tomber les graines. Les rongeurs détachent les noix ou les graines des arbres et les stockent ; beaucoup sont par la suite mangées, mais un certain nombre sont épargnées et peuvent germer.
- c. **La dissémination hydrique :** L'eau contribue couramment à disséminer certaines essences poussant le long des cours d'eau, tout comme la gravité à l'égard des fruits gros et lourds tombant sur des pentes raides.

E. Développement et maturation du fruit : contrôle génétique et hormonal du développement

1-Fonction du fruit

Le fruit favorise la reproduction de l'espèce, en protégeant la ou les graines et en favorisant leur dissémination. La protection des graines en formation se fait contre les animaux (le jeune fruit n'attire pas les animaux) et les contraintes climatiques. Le fruit mûr favorise ensuite la dissémination des graines. Cette dissémination se fera d'une manière spécifique au type de fruit :

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

- Par le biais des animaux pour les fruits en général colorés, sucrés (mûres) ou riche en nutriments (châtaigne) ;
- Par le vent pour les fruits disposant de parachute (pappus ou akène de pissenlit) ou d'une aile (samare d'érable) ;
- Par l'eau pour les fruits flotteurs (noix de coco).

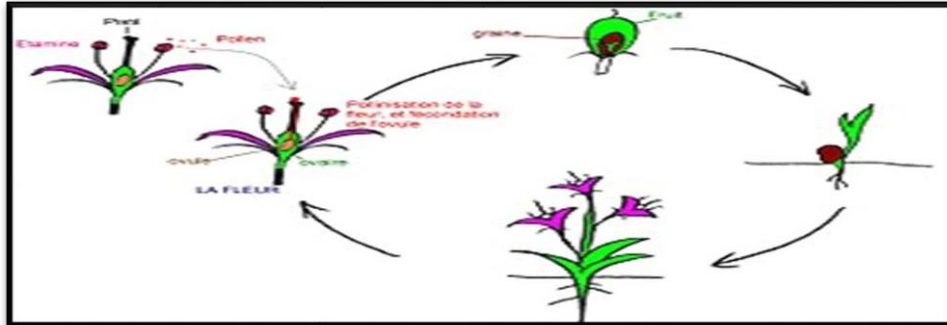


Fig 09 : Le fruit dans le cycle de reproduction.

2-Formation du fruit

Le fruit se forme à partir de la fleur qui a été pollinisée. Il peut se présenter sous différentes formes : drupe, baie, gousse, capsule, akène, etc.

La formation du fruit résulte de la transformation du pistil après la fécondation, ou parfois sans fécondation (on parle dans ce cas de parthénocarpe). C'est plus précisément la paroi de l'ovaire (partie du pistil qui renferme l'ovule) qui devient la paroi du fruit, appelée péricarpe, entourant les graines. L'épiderme externe de cette paroi devient l'épicarpe, le parenchyme devient le mésocarpe, et l'épiderme interne, l'endocarpe. Selon les transformations de cette paroi, on obtient les différents types de fruits énumérés ci-après.

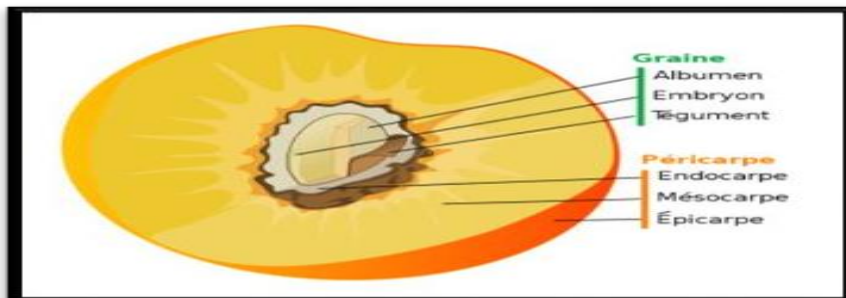


Fig 10 : Structure schématique d'une drupe typique, la pêche, montrant à la fois le fruit et la graine.

Le **péricarpe** est la paroi du fruit issue de la transformation après la fécondation de la paroi de l'ovaire. Pour les faux-fruits, il résulte de la transformation du réceptacle floral. Le péricarpe est formé de trois couches :

- L'**Epicarpe**, généralement coloré, usuellement nommé la peau ; la paroi extérieure d'un fruit ; Il recouvre la couche appelée mésocarpe.
- Le **Mésocarpe**, qui donne la partie juteuse des fruits charnus ; la partie intermédiaire du fruit communément appelée **pulpe** quand il s'agit de fruits charnus.
- L'**Endocarpe**, parfois lignifié et appelé noyau. Il dérive de la transformation du parenchyme de la paroi de l'ovaire. Est un tissu du fruit entourant la graine. Il permet notamment de différencier une baie d'une drupe parmi les fruits charnus. S'il est sclérifié, il forme un noyau autour de la graine (le fruit sera une drupe).

3- Contrôle génétique et hormonal du développement

3-1- La morphogenèse végétale et l'établissement du phénotype

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

Le phénotype morphologique d'un individu est le résultat des interactions entre l'expression du génotype et son contrôle par l'environnement. L'établissement de ce phénotype met en jeu un ensemble de processus biologiques dont des gènes sont responsables (mitose, métabolisme cellulaire, action d'hormones, mise en place des structures de l'organisme). Les gènes gouvernent à la fois les grands traits de l'organisation et les détails de la structure, en permettant la synthèse de protéines spécifiques aux diverses échelles qui constituent l'organisme (cellules, tissus, organes, plan d'organisation). L'expression de ces gènes est soumise à des facteurs externes (abiotiques ou biotiques) dont la variabilité s'ajoute à la diversité **allélique** pour aboutir à une diversité phénotypique individuelle.

L'étude de la morphogenèse des végétaux permet d'aborder dans un cadre intégré ces différents phénomènes qui contribuent à l'établissement du phénotype. La diversité morphologique des végétaux La morphologie d'un végétal dépend en partie des caractéristiques génétiques de l'espèce. En fonction de leur environnement, des individus d'une même espèce peuvent avoir une morphologie différente. Des réponses morphologiques semblables peuvent être obtenues avec des végétaux d'espèces différentes placés dans un même environnement. La morphogenèse associe la division et la croissance cellulaire au niveau de territoires spécialisés La mitose est localisée dans les méristèmes. Elle permet de produire :

- Des cellules qui vont ensuite se différencier et participer à la croissance et à la structuration de l'organisme (feuilles, tiges, racines) ;
- Des cellules qui restent indifférenciées et qui vont à leur tour constituer des méristèmes (apical ou axillaire).

* **Limites** : la description détaillée des cellules différenciées, les mécanismes de la différenciation cellulaire et de l'organogénèse, la morphogénèse des feuilles, le contrôle du fonctionnement du méristème et la croissance en épaisseur, ne sont pas au programme.

* **Activités envisageables** : Réalisation d'expériences permettant d'identifier les zones de croissance en longueur. Observation microscopique de méristèmes. Dans la tige, la croissance cellulaire est contrôlée par une hormone : l'**auxine**. La paroi des cellules végétales en extension est essentiellement composée de polysaccharides, dont la cellulose et les hémicelluloses. La pression de turgescence cellulaire et la plasticité pariétale permettent la croissance cellulaire.

L'auxine, facteur de croissance ou hormone végétale, contrôle la croissance cellulaire. Elle est synthétisée par l'apex des tiges. Elle possède une double action :

- Une action à court terme sur la plasticité pariétale ;
- Une action à plus long terme sur l'expression de gènes qui participent aux divers événements du métabolisme nécessaires à la croissance.

* **Limites** : Les détails des mécanismes de synthèse et de construction de la paroi (métabolisme de la cellulose, de la construction de la paroi ainsi que la diversité des molécules qui la composent), les mécanismes détaillés des échanges hydriques et la notion de potentiel hydrique, les mécanismes moléculaires détaillés de l'action de l'auxine sur la paroi, ne sont pas au programme.

* **Activités envisageables** : Réalisation de préparations et (ou) observation de cellules végétales. Mise en évidence de la paroi cellulosique : cellulose, lamelle moyenne. Mise en évidence de la turgescence cellulaire. Obtention et/ ou observation de protoplastes. Étude des expériences historiques de la mise en évidence d'une hormone végétale : l'auxine. Le développement du végétal est influencé par la répartition des hormones en interaction avec les facteurs de l'environnement La répartition inégale de l'auxine dans les tissus, conséquence d'un éclaircissement anisotrope, permet une croissance orientée. Les ramifications naturelles ou provoquées sont sous la dépendance d'un changement de répartition des hormones dans le végétal qui conduit à un changement de morphologie. **La totipotence** des cellules végétales permet le clonage. Les proportions des différentes hormones (rapport des concentrations d'**auxine** et de **cytokinine**) contrôlent l'organogénèse (tige, racines).

* **Limites** : les mécanismes d'action des **cytokinines** ne sont pas au programme.

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

* **Activités envisageables** : Réalisation et (ou) analyse d'expériences montrant le rôle de l'auxine sur la croissance différentielle entre les deux faces d'un organe. Réalisation et (ou) analyse d'expériences de clonage de végétaux.

3-2- Le développement post-embryonnaire des Angiospermes

De la jeune plante à la plante différenciée L'étude est limitée aux Angiospermes. On s'intéresse à la croissance et à la différenciation de la jeune plante issue de la germination.

L'étude de la mise en place des structures végétatives de la tige feuillée et de la racine est conduite en relation avec les travaux pratiques correspondants. Il s'agit de présenter les mécanismes qui accompagnent croissance et développement chez les Angiospermes : **mérèse, auxèse**, différenciation.

Organisation et fonctionnement des apex racinaire et caulinaire. Les caractères cytologiques des cellules méristématiques sont présentés mais le contrôle hormonal du fonctionnement des méristèmes est exclu. On présente les approches génétiques relatives au fonctionnement du méristème apical caulinaire (cas d'*Arabidopsis thaliana*). On souligne la mise en place de méristèmes latéraux, mais les types de ramification et leurs conséquences sur le port du végétal sont hors programme. Le phénomène de dominance apicale n'est que mentionné.

Grandissement cellulaire et histogénèse. Il s'agit ici de préciser les processus cytologiques et physiologiques du grandissement cellulaire et de la différenciation en se limitant à l'exemple de l'auxine. L'approche historique de la mise en évidence expérimentale de l'auxine et du phototropisme n'est pas au programme. L'influence des conditions du milieu se limite à l'étude du phototropisme caulinaire et du gravitropisme racinaire.

Méristèmes secondaires et croissance en épaisseur. La mise en place et le fonctionnement du cambium et du phellogène sont présentés. Cette étude de la croissance en épaisseur complète ainsi celle de la croissance en longueur, abordée dans les deux points précédents.

3-3- Contrôle de l'élongation cellulaire

- **L'action de l'auxine**

La paroi des cellules végétales est principalement composée de polysaccharides (celluloses, pectines, et hémicelluloses) dont l'organisation lui apporte une certaine rigidité. Sous l'action de l'auxine cette structure se modifie, la paroi devient plastique c'est-à-dire déformable de façon irréversible. L'élongation des cellules est alors possible grâce à la pression de turgescence exercée sur la paroi cellulaire par l'eau contenue dans la vacuole. L'auxine agit aussi à long terme sur la croissance des cellules en contrôlant l'expression de certains gènes qui codent pour des enzymes catalysant la synthèse des molécules de la paroi.

- **L'influence de la lumière : le phototropisme**

L'éclairement interagit avec l'auxine et induit une croissance orientée du végétal. L'auxine se répartit préférentiellement sur la face non éclairée du végétal. L'élongation des cellules y est stimulée entraînant une courbure du végétal vers la lumière.

3-4- Contrôle de l'organogénèse

L'auxine n'agit pas seule sur le développement du végétal. L'organogénèse est déterminée par le rapport des concentrations en auxine et en cytokinine, une autre hormone. On parle de balance hormonale.

- **Au sein de la plante**

L'auxine est répartie selon un gradient basipète : sa concentration décroît de l'extrémité (apex) de la tige à la base du végétal. La forte concentration d'auxine au niveau du bourgeon terminal (ou apical) inhibe le développement des bourgeons dits axillaires, sous-jacents. C'est la dominance apicale. Plus les bourgeons sont éloignés du sommet de la plante et plus ils peuvent se développer : des ramifications apparaissent sur la tige.

- **En culture *in vitro***

Grâce à la propriété de totipotence des cellules végétales, il est possible d'orienter l'organogénèse en jouant sur la balance hormonale. Une forte concentration d'auxine par rapport à celle de cytokinine stimule

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

la formation de racines ou rhizogenèse tandis qu'un rapport faible entraîne au contraire la caulogenèse c'est-à-dire la formation de tiges.

F. Stratégies de la pollinisation

1- La pollinisation par les animaux ou Zoogamie

Dans la nature 90 % des plantes à fleurs sont pollinisées par des animaux, principalement des insectes⁶, les espèces végétales ayant développé des organes floraux parfois extrêmement complexes afin d'attirer les pollinisateurs. Si de nombreuses plantes présentent des mécanismes de reproduction végétative, ceux-ci ne sont généralement pas suffisants pour assurer la pérennité de l'espèce dans le long terme⁶. Il apparaît dès lors que le maintien des interactions existantes entre les plantes et leurs animaux pollinisateurs, soit crucial pour la conservation de nombreuses Angiospermes.

1-1- Entomogamie ou Entomophilie

Les caractéristiques d'une plante qui se fait polliniser par l'intermédiaire d'un insecte ; 90 % des espèces d'Angiospermes utilisent ce type de pollinisation entomophile.



Fig 12 : Entomogamie ou Entomophile

1-2- Ornithogamie ou Ornithophilie

La pollinisation par l'intermédiaire d'oiseaux se fait par le bec pointu tels les oiseaux-mouches ou les souimangas sont aussi d'importants visiteurs des fleurs. Lorsque leur long bec effilé plonge au fond de la corolle afin d'y puiser le nectar, leur tête se frotte aux étamines et, inmanquablement, le pollen adhère à leurs plumes. Les fleurs ornithophiles sont souvent roses ou rouges, les couleurs que les oiseaux perçoivent le mieux.



Fig 13 : Ornithogamie ou Ornithophile

1-3- Chiroptérogamie ou Chiroptérophilie

Les Caractéristique d'une pollinisation par l'intermédiaire de chauves-souris. L'importance de la pollinisation par les chauves-souris est beaucoup plus importante qu'elle n'y paraît. Leur grande diversité, les niches écologiques variées et leur abondance en sont la principale cause.



Fig 14 : Chiroptérogamie ou Chiroptérophilie

1-4- Pollinisation par le vent : Anémogamie

La méthode la plus simple, mais la moins efficace, consiste à produire des quantités massives de pollen afin que le vent les transporte à bon port. La plante dépense ainsi beaucoup d'énergie à produire du pollen ; en revanche, elle n'a pas besoin de façonner des structures complexes pour attirer des pollinisateurs comme des fleurs colorées, du nectar ou des parfums odorants. Environ 10 % des espèces s'en remettent au vent pour assurer leur pollinisation,

1-5- Pollinisation par l'eau : Hydrogamie ou hydrophyllie

Quelques rares espèces de plantes aquatiques dispersent leur pollen dans l'eau. Leur pollen est de forme très allongée, ce qui permet aux courants de le transporter d'une plante à l'autre (espèces marines et espèces lacustres).

2-Autogamie et Allogamie

La pollinisation peut être de type **Allogame** (l'ovule est fécondé par du pollen en provenance d'une autre plante) ou **Autogame** (le pollen féconde les organes femelles d'une même fleur ou d'autres fleurs d'une même plante).

La plupart des plantes à fleurs étant hermaphrodites, on pourrait penser que l'autogamie est pour elles la solution de reproduction la plus simple. Pourtant, dans bien des cas, elles font tout pour échapper à ce type de pollinisation, qui assure certes la continuation et la stabilité de l'espèce, mais au prix d'un appauvrissement comparable à l'endogamie chez les humains. On pense en particulier que les plantes autogames seraient incapables de s'adapter à des conditions nouvelles, créées notamment par des modifications climatiques. La stratégie allogame peut prendre des formes très variées. On notera cependant que de nombreuses fleurs, pour des raisons de sécurité, pratiquent à la fois l'allogamie et l'autogamie, tandis que d'autres, apparemment de plus en plus nombreuses, sont exclusivement autogames.

Comment faire pour qu'un ovule ne soit pas fécondé par son propre pollen ? Les plantes utilisent pour cela des moyens très divers, parfois complémentaires (on ne citera pas ici les plantes dioïques, pour lesquelles le problème est forcément résolu puisque les fleurs mâles et femelles ne sont pas sur le même individu) :

3-1'Auto-incompatibilité

C'est le cas le plus fréquent, rencontré chez la moitié des angiospermes chez qui on a recherché ce trait. Ce phénomène physiologique dirigé par un système génétique survient lorsqu'un grain de pollen partage un ou plusieurs allèles communs avec la fleur sur le stigmate de laquelle il a été déposé. Un mécanisme permettant d'éviter la fécondation se met alors en place : soit le grain de pollen ne germe pas (il n'est pas hydraté par le style), soit il produit un tube pollinique qui n'atteindra jamais l'ovule (formation de bouchon de callose bloquant la progression de celui-ci).

On distingue actuellement 3 types d'auto-incompatibilité :

***Gamétophytique** : Le pollen porte un seul allèle, celui porté par son génome ;

***Sporophytique** : Le pollen porte les deux - ou plus - allèles portés par le père ; Cependant il existe des relations de dominance entre les allèles d'une même espèce.

***Auto-incompatibilité post-zygotique** : Qui regroupe tous les mécanismes conduisant à la mort systématique des embryons issus d'auto-fécondation ou de fécondations entre apparentés

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

(Est-ce uniquement l'observation de l'expression de la dépression de consanguinité ou bien de réels mécanismes génétiques ?).

***La Dichogamie (disjonction des sexes dans le temps) :** Les organes sexuels mâles et femelles ne sont pas fonctionnels en même temps. En général, ce sont les organes mâles qui mûrissent avant les organes femelles, phénomène appelé *protandrie*. Le phénomène est facilement visible sur les géraniums, dont les stigmates se développent alors que les étamines ont déjà disparu. Le phénomène inverse est appelé *protogynie* (hellébore, magnolia).

***L'Herkogamie (disjonction des sexes dans l'espace) :** Les organes mâles et femelles sont disposés de telle façon que l'insecte ne peut atteindre en même temps les anthères et les stigmates.

***L'Hétérostylie :** Les fleurs, toutes hermaphrodites, présentent des formes diverses imposant le croisement. C'est notamment le cas de la primevère commune (*Primula vulgaris*), dont certaines fleurs ont un long style et de courtes étamines, tandis que d'autres ont au contraire un style court et de longues étamines.

G. Systèmes de reproduction et contrôle génétique

1-Incompatibilités polliniques (contrôle génétique et moléculaire)

Chez beaucoup de plantes qui pourraient, morphologiquement, réaliser au hasard l'autofécondation ou la fécondation croisée, des systèmes d'incompatibilité génétique permettent de favoriser ou même de rendre obligatoire la fécondation croisée. Ces systèmes se situent au niveau de la germination ou du développement du grain de pollen sur le stigmate. Ces systèmes font appel à des gènes d'incompatibilité (S) existant sous forme de nombreux allèles ($S_1, S_2, S_3, \dots, S_x$). Ils peuvent être classés en deux processus : l'**Auto-incompatibilité Gaméphytique** et l'**Auto-incompatibilité Sporophytique**.

a. Systèmes Sporophytiques

Auto-incompatibilité Sporophytique : Les plantes hétérozygotes disposent pour le gène S de deux allèles. Le pollen, gaméphyte mâle haploïde, ne contient qu'un de ces allèles. Mais une partie des composants de sa paroi a été synthétisée par les cellules nourricières du pollen (le tapis) au cours de sa formation. Ces cellules étaient diploïdes et contenaient donc les deux allèles. Si l'un des deux allèles de la plante diploïde qui a généré le pollen est le même que l'un des deux allèles de l'ovaire (diploïde), le développement du tube pollinique sera bloqué et la fécondation ne pourra avoir lieu. Dans ce cas, l'autofécondation est impossible. Seule la fécondation entre deux plantes éloignées disposant d'allèles différents est possible. Le schéma ci-dessous montre un cas dans lequel un allèle diffère.

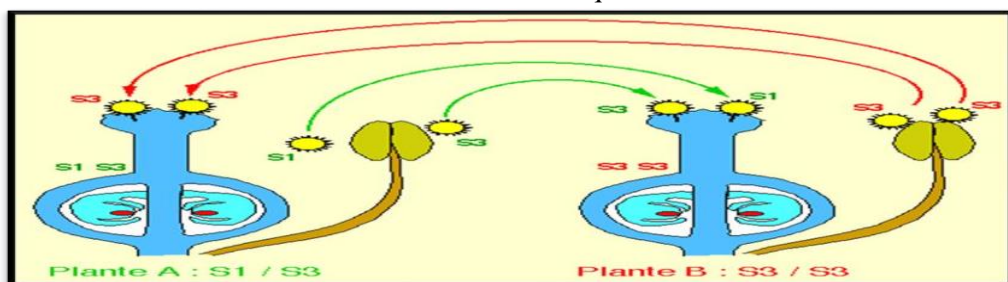


Fig 15 : Auto-incompatibilité sporophytique

Explication de la figure : La plante A (S_1/S_3) produit des grains de pollen S_1 ou S_3 qui contiennent dans leur paroi des produits synthétisés par le tapis diploïde et correspondant aux deux allèles S_1 et S_3 . Aucun grain de pollen ne peut germer sur la plante B (S_3/S_3) car tous contiennent des produits d'origine S_3 . Il en est de même pour le croisement inverse.

b. Systèmes Gaméphytiques

Auto-incompatibilité Gaméphytique : Les plantes hétérozygotes diploïdes disposent pour le gène S de deux allèles. Le pollen, gaméphyte mâle haploïde, ne contient qu'un de ces allèles. Si l'allèle du pollen est le même que l'un des deux allèles de l'ovaire (diploïde) de l'organe femelle, le développement

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

du tube pollinique sera bloqué et la fécondation ne pourra avoir lieu. Dans ce cas, l'autofécondation est impossible. Seule la fécondation entre deux plantes éloignées disposant d'allèles différents est possible. Le schéma ci-dessous montre un cas dans lequel un allèle diffère entre les deux plantes.

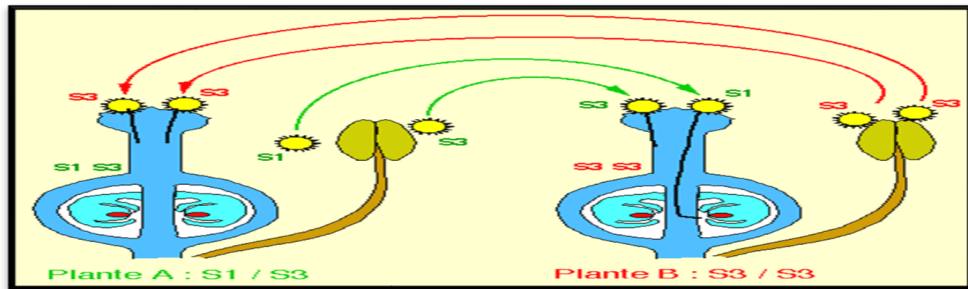


Fig 16 : Auto-incompatibilité gamétophytique

Explication de la figure : La plante A (S_1/S_3) produit des grains de pollen S_1 ou S_3 . Seul le pollen S_1 pourra germer puis féconder la plante B (S_3/S_3). En revanche, la plante B (S_3/S_3) ne produit que des grains de pollen S_3 . Ils ne pourront germer sur la plante A (S_1/S_3) car l'ovaire diploïde contient l'allèle S_3 .

2-Stérilités mâles et interactions nucléo cytoplasmiques

On parle de **stérilité mâle** à propos de plantes incapables de se reproduire par autopollinisation, du fait d'une stérilité des éléments mâles des fleurs.

La stérilité-mâle est utilisée par les sélectionneurs pour produire des variétés hybrides chez des espèces cultivées **Autogames** (le blé) ou **Allogames** (carotte, chicorée, chou et colza, fenouil, oignon, poireau, radis). Ceci permet d'obtenir l'effet de vigueur des hybrides F_1 ou hétérosis pour des variétés F_1 .

Le pollen peut ne pas être fonctionnel, ou il peut y avoir des anomalies structurales des organes de reproduction mâles (par exemple : anomalie au niveau du tapis nourricier (tapetum) des anthères).

Le caractère mâle stérile existe naturellement chez certains individus de nombreuses espèces végétales sauvages ou cultivées (betterave, carotte, fenouil, maïs, oignon, etc.). Ces individus ne peuvent assurer leur descendance s'ils vivent seuls. S'ils vivent au sein d'une population et s'ils n'appartiennent pas à une espèce strictement autogame, ils peuvent être fécondés par des individus normaux (mâles fertiles) et assurer ainsi leur descendance.

2-1- Mainteneur de stérilité (Restaurateur de la fertilité)

Le parent qui maintient la stérilité est appelé **Mainteneur De Stérilité**. Cependant, certaines plantes, croisées avec une lignée mâle-stérile, donnent une descendance homogène mâle-fertile. Ces plantes sont dites **Restauratrices De Fertilité**. Chez les espèces cultivées pour leur graine (colza, tournesol), le sélectionneur est obligé d'utiliser une lignée restauratrice de fertilité pour que la descendance de l'hybride F_1 ne soit pas stérile et qu'elle puisse produire des graines dans le champ de l'agriculteur. Chez les espèces cultivées pour leurs feuilles ou leur racine, le sélectionneur n'est pas obligé d'utiliser une lignée restauratrice de fertilité. En général, il ne l'utilise pas.

2-2- Stérilité mâle cytoplasmique ou CMS

Le phénotype mâle-stérile est transmis par la mère de manière homogène. La mitochondrie joue un rôle essentiel dans cette stérilité.

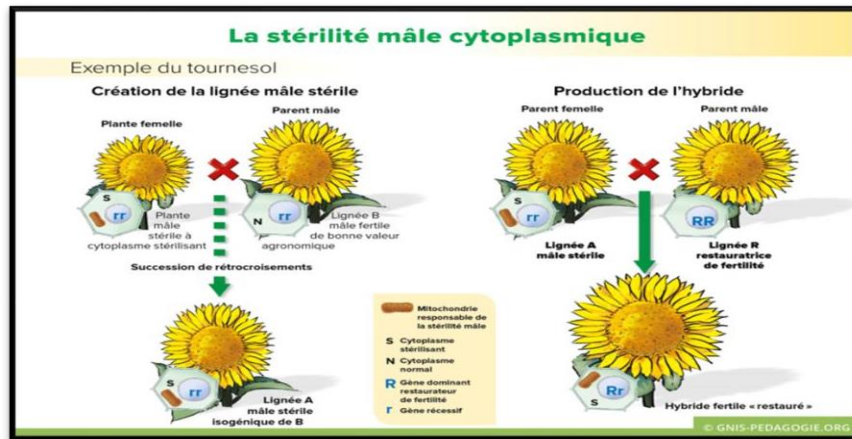


Fig 17 : Stérilité male cytoplasmique ou CMS

2-3- Stérilité mâle nucléaire

Lorsque la stérilité est d'origine génique :

- Soit elle est sous la dépendance d'un gène récessif, le gène dominant est alors le restaurateur,
- Soit elle est sous la dépendance d'un gène dominant et il n'y a pas de restaurateur.

2-4- L'hybridation est la fécondation croisée de l'ovule d'une plante par du pollen d'une autre plante de la même espèce

a- Naturelle pour les plantes allogames

Les plantes allogames privilégient la fécondation croisée. Elle a lieu pour les plantes qui ont des pieds mâles et femelles séparés, ce sont des espèces dioïques, comme l'asperge. La dissémination du pollen est réalisée par le vent et les insectes.

Chez certaines espèces dites monoïques comme le maïs, les fleurs mâles et femelles sont séparées, mais présentes sur un même pied. La fécondation croisée est favorisée car les organes mâles et femelles d'une même plante ne viennent pas à maturité en même temps.

Enfin, pour des espèces où les fleurs sont bisexuées, il peut exister des barrières physiologiques ou physiques à l'autofécondation (luzerne, orchidées, primevère), imposant là encore la fécondation croisée.

b- Provoquée par le sélectionneur pour les plantes autogames :

Le sélectionneur, lorsqu'il croise deux plantes pour associer des caractères intéressants, réalise une fécondation croisée ou hybridation.

Dans le cas du blé par exemple, les deux géniteurs étant choisis, le sélectionneur va castrer manuellement les fleurs d'un épi, c'est-à-dire retirer toutes les étamines contenant le pollen. Cette plante constituera la plante femelle. Il récupère ensuite le pollen de l'autre parent, qu'il dépose sur le stigmate de l'épi castré.

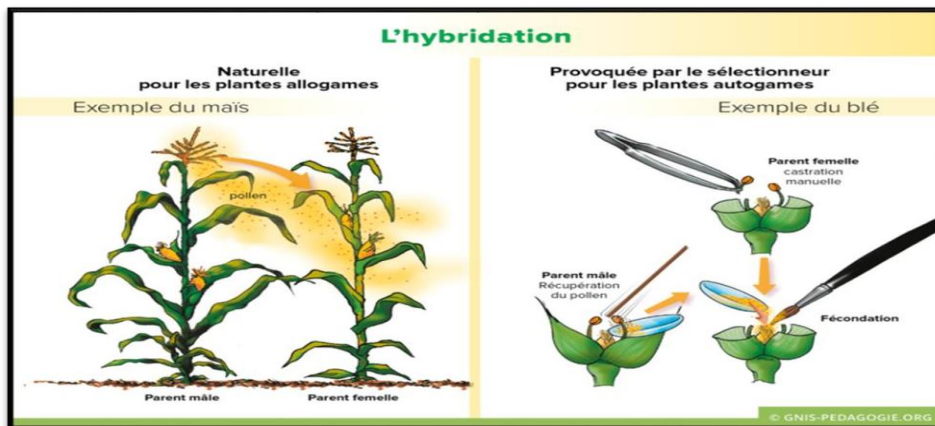


Fig 18 : L'hybridation

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

H. Apomixie

En botanique, l'**Apomixie** (du grec *apo*, « à l'écart » et *mixis*, « mélange ») ou **Apogamie** (du grec *apo*, « à l'écart » et *gamos*, « union »), est une forme de multiplication asexuée, sans fécondation ni méiose, qui fait intervenir la graine sans qu'il y ait union entre gamètes mâles et femelles. La pollinisation ne conduit pas à la formation d'une graine contenant un embryon hybride, mais stimule le développement de l'une des cellules diploïdes de l'ovule qui reproduit ainsi le génotype strictement maternel. L'apomixie est un type particulier de parthénogenèse.

La méiose modifiée crée des graines génétiquement identiques à la plante mère. Bien que les avantages évolutifs liés à la reproduction soient perdus (élimination des mutations délétères, brassage génétique augmentant le potentiel adaptatif), l'apomixie transmet des mutations somatiques, permettant ainsi une forme d'évolution. Elle favorise aussi la colonisation de nouveaux milieux assez loin de la plante mère grâce à la propagation des graines.

Les plantes apomictiques sont génétiquement identiques d'une génération à l'autre, certaines lignées ont les caractères d'une espèce à part entière et maintiennent des différences phénotypiques avec leurs congénères **Apomictes**, tout en ayant entre elles des différences plus minimes que celles existantes entre les espèces de la plupart des genres. Les **Apomictes** sont donc souvent appelés **micro-espèces**.

Dans certains genres, il est possible d'identifier et de nommer des centaines voire des milliers de micro-espèces, qui peuvent être regroupées sous le nom d'**espèces agrégées**, généralement répertoriées dans les flores sous la convention (Par exemple : la ronce commune, *Rubus fruticosus* agg.).

I. Déterminisme du sexe chez les plantes

1-Le mystérieux sexe des fleurs

Chez les plantes à fleurs, le sexe n'est pas à traiter à la légère. Agriculteurs et jardiniers le savent : pour qu'un noisetier femelle produise des noisettes, il faut planter au moins un plant mâle (non productif) dans le voisinage. Le pommier, en revanche, est hermaphrodite, mais pas auto-fécondable : il vous faudra donc deux pommiers voisins (mais cette fois-ci identiques) pour que chacun d'entre eux vous procure une bonne récolte. D'autres, comme le melon, présentent sur le même plant des fleurs strictement mâles et des fleurs strictement femelles. Jusqu'ici, on n'avait pas la moindre idée des mécanismes génétiques attribuant tel ou tel sexe aux fleurs.

C'est donc un terrain quasi inexploré qu'Abdelhafid Bendahmane et son équipe de l'Institut des sciences des plantes à Saclay ont commencé à prospecter. Après des années d'études et de croisements de différents mutants du concombre et du melon, ils ont identifié trois gènes qui déterminent la formation du sexe chez ces plantes. Leurs travaux font déjà l'objet de nombreuses applications agronomiques, un domaine où la question de la sexualité des plantes, qui conditionne leur fécondation, est cruciale.

En **2008**, l'équipe identifie un premier gène, qu'elle baptise **M** (pour monoécie). **M** bloque en effet le développement des étamines et conduit à des fleurs femelles. En **2009**, c'est le tour du **gène G** (pour gynécoécie), qui, empêche le développement du pistil et conduit à la formation de fleurs mâles. Reste à comprendre comment les sexes sont répartis sur le plant : il doit exister un mécanisme qui décide que, dans les fleurs mâles, **G** s'exprime et pas **M**, et que, dans les fleurs femelles, **M** s'exprime et pas **G**.

Pour identifier et localiser le mécanisme qui permet la cohabitation des sexes, l'équipe se penche sur une variété de concombre où elle est absente : il existe en effet des plants de concombre entièrement mâles. Qu'est-ce qui les différencie des plants monoïques ? La méthode du clonage positionnel pointe un gène atrophié chez les concombres mâles : le **gène A** (pour androécie). Il s'agit d'un gène impliqué dans la synthèse de l'éthylène, un gaz qui sert par exemple à faire mûrir les fruits cueillis verts. Serait-ce lui, le responsable de la cohabitation des sexes ?

Développement des plantes et mécanismes génétiques de la reproduction sexuée

2-Influence de l'environnement

Pour le vérifier, l'équipe mute ce gène chez des plants de melon et obtient, effectivement, des melons portant uniquement des fleurs mâles. Plus fort : s'ils mettent le plant mâle en contact avec de l'éthylène au moment de la formation des fleurs, ils provoquent la formation de fleurs femelles. Enfin, les scientifiques observent que, chez les melons monoïques, le gène A s'exprime effectivement sur les branches latérales (où poussent les fleurs femelles), mais pas sur la tige principale (où poussent les fleurs mâles). L'expression de A serait donc bien dépendante de l'environnement, et déterminerait la fabrication d'éthylène, responsable de la féminisation des fleurs.

Restait à comprendre les relations troubles entre ces trois gènes A, G et M. En effectuant plusieurs types de mutations, les généticiens observent que M ne s'exprime que si G ne s'exprime pas, et que G ne s'exprime que si A ne s'exprime pas. « En fait, ces trois gènes constituent une chaîne. A inhibe G, et G inhibe M », explique Abdelhafid Bendahmane. A est sous l'influence de l'environnement. S'il s'exprime dans un plant possédant les deux gènes G et M, il bloque l'action de G. G empêchant la formation de pistil et inhibant l'action anti-étamine de M, on obtient une fleur avec pistil et sans étamines : une fleur femelle. Si A ne s'exprime pas, alors G s'exprime et empêche M de s'exprimer : on obtient des fleurs mâles. « Ce que nous avons mis en évidence, souligne Abdelhafid Bendahmane, c'est un mécanisme finalement assez simple de détermination sexuelle reposant sur seulement trois gènes. »



Fig 18 : Chez les fleurs de melon, la détermination sexuelle repose sur trois gènes : G, M et A.

Dans les fleurs mâles, G s'est exprimé et a inhibé M. Pour les fleurs femelles, c'est l'inverse : M a pu s'exprimer parce que A a inhibé G. Chez les fleurs hermaphrodites, le gène A a subi une mutation entraînant le développement d'organe mâle dans les fleurs femelles. Au-delà de ces considérations théoriques, la découverte ouvre d'énormes possibilités en agronomie. En témoignent les trois brevets qui ont déjà été déposés par l'équipe : ils proposent des méthodes pour produire différentes formes sexuelles de cucurbitacées et ainsi améliorer la production de semences ou créer des espèces plus productives.

« La mutation du gène G conduit par exemple à la production de plantes complètement femelles. La mutation du gène A donné des plantes complètement mâles. Ces plantes peuvent être utilisées pour faciliter la production des semences hybrides », indique Abdelhafid Bendahmane. Ces semences, dites F1, sont obtenues en croisant des variétés d'intérêts complémentaires, par exemple une variété résistante contre une maladie et une autre à haut rendement. Disposer de plantes mâles d'une variété et d'une plante femelle de l'autre variété permet d'être certain que les semences obtenues sont des croisements de ces deux variétés, et non pas issues de possibles autofécondations.