La régulation hormonale  
du développement des végétaux supérieurs

*Introduction - Généralités*

# I. Facteurs de contrôle du développement et leurs effets

Dvpt = correspond d’avantage au mécanisme de croissance de manière qualitatif.

Chez les végétaux, les mécanismes de croissance sont reproductibles malgré qu’il y ait une grande variabilité du fait que les végétaux sont fixés ; ils s’adaptent à leur environnement.

La reproductibilité se fait à peu près pour des conditions environnementales identiques.

La croissance se fait sous un certain ordre, les organes apparaissent de façon séquencée.

Le système racinaire est le premier à se dvpt, puis la tige, et enfin les organes foliaires.

Les mécanismes de croissance font que le dvpt de la plante est relativement harmonieux. Un rapport d’équilibre entre la partie aérienne et la partie souterraine est notable pour l’espèce donnée.

#### Les facteurs de contrôle :

*Les facteurs de contrôle externes* = facteurs de l’environnement

-Effet trophique (T°, lumière….)

Conditionnent l’intensité du métabolisme et donc de la croissance

-Effets mécaniques (vent,…)

-Effets signaux

Modification du milieu extérieur => signal qui influence le développement de la plante

Avec effets directs ou indirects => hormones

*Les facteurs de contrôle internes*

-Lié à la constitution génétique des individus, à leur génome

-Le génome contient une information de bas = protéines, enzymes, acteurs de transcription capable de : \*Percevoir et intégrer les signaux externes

\*Coordonner leurs effets.

# II. Hormones végétales : généralités

#### La notion d’hormone

Substance organique biologiquement active et qui a pour caractéristiques e présenter :

-Une activité à très faible concentration (=> aucun rôle énergétique ni nutritif)

-Une synthèse réalisée par l’organisme lui-même

-Un transport de son site de synthèse à son site d’action (cellules cibles)

#### Similitudes et Différences avec les hormones animales

-Poids moléculaire < 500

-Structure chimique différente sauf pour les brassinostéroïdes proches des stéroïdes animaux

-Produite dans différentes régions de l’organisme

-Parfois actives sur leur lieu de synthèse et sur leur site d’action

-Action moins ciblée que celle des hormones animales (balance hormonale, antagonisme, synergie…)

-Effets diversifiés = effets pléiotropiques

-Peu d’hormones végétales (6 grdes familles) par rapport aux hormones animales (40 grdes familles)

#### La notion de médiateurs chimiques

-Substances qui n’ont pas encore obtenu le statu d’hormones végétales « vraies » : les polyamines, le jasmonate, le salycate, les oligosaccharide.

La régulation hormonale  
du développement des végétaux supérieurs

*Les auxines*

# I. Découverte des auxines

DARWIN (1980)

Expérience sur le coléoptile d’avoine (étui protecteur de la jeune tige) exposé à la lumière unilatérale.

Dans les jeunes tiges des graminées, une partie est sensible –l’apex- aux facteurs environnementaux extérieurs (notamment la lumière).

Lorsque les conditions d’éclairement sont inégalement réparties, la croissance est différentielle.

BOYSEN-JENSEN (1910-1911)

Expérience sur quelque chose de comparable à l’influx nerveux des animaux.

PAAL (1919)

Expérience avec une lumière unilatérale

Sensibilité à une dysimétrie interne

🡺 L’apex est sensible soit à des facteurs environnementaux, soit à des facteurs internes à la plante. La plante mesure l’inégalité et est capable d’envoyer un signal provoquant la courbure du coléoptile.

PAAL dit que dans tous les cas de figures, ce signal travers un bloc de gélose, donc le signal qui migre est chimique hydrosoluble.

On en a conclu l’existence de médiateurs chimiques synthétisés par la plante lors de modifications des facteurs.

SÖDING (1923)

Tout ce qui a été mis en évidence par ses prédécesseurs concernait des réactions de courbure. Il met en évidence que cela s’applique à la croissance verticale sans courbure. Dans l’apex, un ou des médiateurs chimiques hydrosolubles sont synthétisées.

# II. Structure chimique des auxines

## 1. Forme libre

=> Acide Indole 3 Acétique (AIA)

Synthétisé à partir de l’aa Tryptophane

Répandu et synthétisé par tous les végétaux, mais c’est pas tjrs la forme la plus active.

## 2. Formes conjuguées

L’auxine libre est capable de lier à différents substrats et la plupart du temps à des sucres (en particulier des glucoses => indole 3 acétyl glucose).

## 3. Auxines non indoliques

Certaines molécules synthétisées par les plantes elles-mêmes ont exactement les mêmes rôles et propriétés que l’auxine sauf que ce sont des molécules chimiques complètements différentes.

Il n’y a plus qu’un seul cycle à 6 carbones.

# III. Métabolisme des auxines

## 1. Les sites de synthèse

Dans les organes en croissance aériens, peu dans les organes souterrains.

A l’apex, dans les zones de multiplication actives (bourgeons, méristèmes)

## 2. Biosynthèse de l’AIA

*Pas apprendre par cœur les molécules*

*Ni les caractéristiques des voies des crucifère et de la tryptanine*

3 voies possibles :

-la plus courante et commune 🡺 celle du milieu

-caractéristiques de tous les végétaux.

-à partir du tryptophane c’est une étape de transaminasation pour perdre le radical amine, puis décarboxylation, puis oxydation.

-la voie propre aux crucifères (famille à part)

-la voie de la tryptanine : décarboxylation puis transamination.

-existe chez de très nombreux végétaux.

## 3. Le transport de l’AIA

Mis en évidence par une expérience simple. (WEIJ en 1934)

🡺 Transport de l’auxine vers la base des organes.

🡺 Transport de la base vers la tige, mais en mettant une faible concentration d’auxine.

L’auxine en provenance de jeunes tiges, circule de haut en bas dans le cylindre central des racines puis remonte dans la région corticale de manière symétrique mais en faible dose favorable à la croissance des racines.

## 4. Dégradation de l’AIA

### A. Photooxydation de l’auxine

En cas d’intensité lumineuse trop importante, l’auxine peut être dégradée en diverses formes. L’auxine est rarement exposée aux radiations lumineuses.

### B. Oxydation par les auxines-oxydases

La voie de dégradation indispensable est réalisée par un certains nombre de systèmes enzymatiques (auxines oxydases).

Dégradation de chaîne latérale (2 produits formés). L’oxygène est apporté par les péroxydases. L’AIA est oxydée après être passé sous forme ionique.

Dégradation du noyau indolique avec ouverture de cycle.

Les auxines subissent un auto-contrôle (système auto-régulateur) de la part du végétal.

# IV. Manifestations physiologiques des auxines

## 1. Action sur l’élongation

### A. Action au niveau des organes

Organes : Racine/Tige. => *voir graphique sur le poly*

Quand on augmente les concentrations en auxine, au delà du maximum de stimulation on repart sur une courbe descendante.

La croissance se déroule suivant des conditions plus qu’optimales (supra-optimales).

Pour les dicot, plus on augmente la teneur en auxine, moins on stimule la croissance des feuilles. (on glisse vers les doses toxiques)

Pour les monocot, elles sont moins sensibles aux doses d’auxines.

### B. Effet sur la paroi squelettique

2 manières :

-Elasticité / notion de déformation réversible

-Plasticité / notion de déformation irréversible une fois la déformation subie.

Expérience de HEYN : *voir schémas sur le poly*

L’auxine améliore la souplesse de la paroi squelettique.

### C. Rôle dans les phénomènes de tropismes

#### a. Généralités sur les tropismes

Réaction de la plante ou organe en réponse à un stimulus environnemental.

L’anisotropie : quand un facteur environnemental est réparti de manière non uniforme (ex : lumière).

=> L’organisme de la plante est capable de percevoir ce facteur de milieu et oriente sa croissance en fonction de cette anisotropie.

=> La croissance conduit à une courbure qq soit le facteur et l’importance d’anisotropie (<=> croissance différentielle).

Tropisme négatif si la réponse à la courbure est dans le sens contraire à la direction du stimulus.

Tropisme positif si la réponse à la courbure est dans le sens de la direction du stimulus.

Phénomènes particulièrement important car les végétaux sont fixes. Question de survie.

#### b. Action sous le phototropisme (voir poly)

L’auxine migre sous l’effet de la lumière. Dans le cas d’anisotropie, il y a une ≠ de concentration d’auxine synthétisée par l’apex dans le bloc de gélose (posé sous l’apex).

On récupère plus d’auxine dans la moitié opposée à la source lumineuse.

=> soit la lumière dégrade l’auxine

=> soit l’auxine fuit la source lumineuse

Phototropisme positif du coléoptile

On observe une courbure car l’auxine stimule l’élongation des tiges dans des doses infinitésimales.

Spectre d’action de la courbure du coléoptile d’avoine

#### c. Action sur le gravitropisme (voir poly)

Quand on maintient une jeune racine à l’horizontal, on s’aperçoit qu’au niveau de la coiffe, l’auxine est accumulée vers le bas de la coiffe (le côté dans le sens de la gravité).

La racine va se courber et s’enfoncer plus rapidement dans le sol.

## 2. Action sur la prolifération cellulaire

### A. Action cambiogène

L’auxine a une action particulière : action cambiogène. Agis sur la multiplication cellulaire au niveau de certains méristèmes secondaires.

Jamais de cambium, ni apparition de tissus secondaires quand la plante n’est pas stimulée par les auxines.

La présence des auxines déclenchent la saison végétatives et la mise en place de nouveaux tissus conducteurs secondaires chez les arbres après une période hivernale.

### B. Auxines et culture de tissus

Culture des tissus végétaux (GAUTHERET)

### C. Développement du péricarpe des fruits

Au moment de la fécondation, l’ovaire contenant l’ovule synthétise des auxines qui vont servir à provoquer la multiplication cellulaire au niveau du péricarpe (paroi) chez les fruits charnus.

Dvpment du réceptacle floral.

### D. Abscission des feuilles et des fruits

Intervention des auxines dans le mécanisme qui conduit à la chute des feuilles et fruits chez les arbres à maturité.

Tant que l’équilibre est favorable aux auxines, les feuilles et les fruits restent en place sur l’arbre. Quand c en faveur de l’acide abscissique et l’éthylène il y a chute.

## 3. Action sur la différenciation

### A. Action sur l’histogenèse

Surtout principalement pour la mise en place des tissus conducteurs.

### B. Action sur l’organogenèse

#### a. Action sur la caulognèse

L’apparition des tiges et des bourgeons peut être stimulée par les auxines à des doses très faibles (environ même ordre de grandeur que pour stimuler les racines).

L’auxine n’intervient pas toute seule dans la stimulation de la caulogenèse mais en même temps et surtout grâce à des cytokinines.

#### b. Action sur la rhizogenèse

Tout ce joue entre un équilibre entre la cytokinine et l’AIA.

En faveur des cyto => formation de la tige

En faveur des auxines => formation des racines via la rhizogenèse.

## 4. Résumé des principaux effets de l’auxine

*Voir tableau dans le poly*

# V. Mode d’action des auxines

**Reconnaissance du signal hormonal par une cellule cible = récepteur**

=> liaison hormone cellule cible

=> affinité entre récepteur et hormone

Spécificité vis-à-vis de l’hormone

=> constituant structural du récepteur capable de se lier à l’hormone

**Propriétés auxiniques et règles structurales**

=> structure indolique pas indispensable

=> un noyau non saturé avec double liaison adjacente à la chaîne latérale

=> chaîne latérale carboxylée avec carboxyle hors du plan

=> chaîne latérale avec nombre C pair

**Liaison auxine récepteur**

-Covalente entre 2 points d’attache : le carboxyle et un H en position ortho

-Ionique : charge négative sur le carboxyle et charge positive à 0n55nm du carboxyle

-Type « enzyme-substrat »

Les récepteurs seraient des protéines car les seules à pouvoir répondre aux exigences de spécificité.

La liaison active la protéine => Changement conformationelle => Réponse physiologique

**Les récepteurs des auxines**

1. Les ATP-ases membranaire

Si présence d’auxine en dose stimulatrice dans un organe => acidification des tissus qui accumulent l’auxine => sécrétion de protons => passage des protons de part et d’autre de la paroi cellulaire.

2. Les protéines plasmalemmiques libres

-Les auxines dans la cellule vont se lier à des protéines plasmalemmique. L’ensemble (auxine + protéine) migre en direction du noyau de la cellule et conduit à l’augmentation de l’expression d’un certain nombre de gène (peut conduire à une surexpression).

-Chaîne de transduction du signal auxinique mal connue

-Mécanisme du contrôle de la transcription par l’AIA plus ou moins identifié.

La régulation hormonale  
du développement des végétaux supérieurs

*Les gibberellines*

# I. Historique de la découverte

1926 : Suite à une maladie qui faisait que les cultures de riz étaient atteintes de gigantismes. Champignon parasite (ascomycètes).

1938 : Découverte d’un mélange non purifié de gibbérellines (YABUTA et SUMIKI)

1955-56 : Découverte des mutants nains du maïs et du concombre (PHINNEY et WEST)

1955-56 : Purification et Identification de l’acide gibbérellique GA3 (BRIAN puis CROSS)

# II. Structure et biosynthèse

Le noyau gibbane, une structure quasi unique dans la chimie des substances naturelle.

## Multiplicité des gibbérellines naturelles

-GAnuméro : numéro qui correspond à la chronologie de leur découverte (sauf pour GA3).

-Un même végétal contient 8 à 10 formes ≠, présentes selon le stade de développement.

-Ces ≠ formes ont des activités ≠

## Transport

-Non polarisé

-Sève brute

-Voie symplasmique (passe par les communications intercellulaires)

# III. Propriétés physiologiques

## A. Allongement des entrenœuds

Découverte difficile car synthèse un peu partout dans la plante.

Utilisation de composés chimiques a effet retardant de croissance (ex : phosphon, chlorure de chlorocholine).

=> mise en évidence du nb d’entrenœuds (identique en plante naine et plante taille normale).

La tige chez la plante naine possède les entrenœuds emboités les uns dans les autres.

Les gibbérellines au niveau des entrenœuds stimulent la multiplication cR, puis le grandissement des cellules pour retrouver une taille normale.

## B. Germination

Les gibbérellines contrôlent la germination d’une graine. La radicule est le premier organe qui sort avant que la plantule apparaît. Pour que la radicule puis la plantule puissent percer les téguments de la graine et apparaître, il faut une certaine qté d’nrj pr sortir.

Il faut des réserves oxydables par les mitochondries mais la plupart ne le sont pas (comme l’amidon, les lipides…). Il faut rendre ces réserves plus solubles : les gibbérellines interviennent, et rendent les réserves de la graine accessibles à l’embryon.

Au moment de la germination, le(s) cotylédon(s) est(sont) stimulé(s) et déclenche(nt) la synthèse de gibbérellines et ces dernières déclenchent la synthèse de systèmes enzymatiques (tous de la famille des hydrolases : amidon en glucose, AG en sous-unités oxydables, protéines en aa oxydés).

## C. Action stimulatrice

-Sur la floraison

-Sur l’obtention de fruits parthénocarpiques

Soit le fruit évolue sous l’action des auxines, soit sous l’action des gibbérellines ; l’hormone impliquée est en fonction de l’espèce considérée.

# IV. Mode d’action

Il y a des récepteurs de gibbérellines au niveau du réticulum endoplasmique.

Supposition d’un rôle au niveau du code génétique pr déclencher des synthèses métabolique (ARN) et d’enzymes.

# V. Modification des taux de gibbérellines par génie génétique

-Amélioration de la productivité chez les céréales.

-Obtention de variétés semi-naines

Possibilités :

\*Résistantes à la verse

\*Amendements azotés utilisés pour le remplissage des grains.

## A. Réduire la biosynthèse

Construction anti-sens chez *Arabidopsis thaliana*

=> inhibition de la synthèse de GA3.

## B. Augmenter le catabolisme

Transformation d’une variété de riz (2003-Japon) par surpdocution de GA2 oxydase une enzyme du catabolisme des GA

Construction génique associant le gène de la GA2 oxydase au promoteur de synthèse des GA dans les tiges de riz.

La régulation hormonale  
du développement des végétaux supérieurs

*Les cytokinines*

# I. Découverte et nature chimique

1941 : SKOOG de l’Université du Wisconsin

Culture *in vitro* du tabac

Essais sur des explants de tige => cal mais contaminations fréquentes

Essais sur des explant de moelle => cal sans recloisonnements cellulaires

Essais sur des explant de moelle + lait de coco => cal avec recloisonnements cellulaire

1954-1955 : Travaux de MILLER sur l’ADN

Découverte de la kinétine active sur la division cellulaire

1963 : LETHAM isole la 1ère cytokinine naturelle = la zéatine

Base commune des cytokinines : 6-amino purine

# II. Lieux de synthèse

Assez complexe ; en partie commune avec la voie de synthèse des aa.

Le lieu de synthèse privilégié est le système racinaire ; il y a donc une voie de transport privilégié (sève brute).

# III. Manifestations physiologiques

## A. Action sur la mérèse

Pour l’apparition d’un cal, et observer la multiplication des cellules, il faut combiner les auxines et le cytokinines.

Le rapport entre auxines et cytokinines va orienter la multiplication cellulaire de façon à voir des cal qui s’orientent vers la production de racines ou de bourgeons/tiges.

-Si auxine majoritaire : apparition de racines

-Si cytokinines majoritaire : apparition de bourgeons et tiges.

-Si rapport = 1 : un cal indifférencié sur lequel il faut rajouter des auxines (pr racines) ou cytokinines (pr bourgeons et tiges).

Les auxines et cytokinines sont les hormones les plus utilisés en culture *in vitro*.

## B. Action sur l’auxèse latérale foliaire

Expérience sur des disques foliaires de haricots

Croissance latérale car augmentation en largeur de la taille des explants foliaires.

## C. Action anti-sénescence

Expérience de RICHMOND et LANG

La pigmentation persiste après plusieurs jours quand la feuille est dans de l’eau et de la cytokinine (=> stimule métabolisme jeune et retard de vieillissement des cellules)

-Activent la production de la chlorophylle

-Stimulent le métbolisme des jeunes pousses

-Favorisent le dvpt des jeunes feuilles

-Améliorent le déchargement des glucides par le phloème => meilleure répartition des glucides dans la plante

Expérience de MOTHES (1961)

Application localisée des cytokinines à des feuilles : les feuilles vivent plus longtemps

=> Mobilisation des métabolites depuis les lieux de stockage vers la zone traitée

=> Rétention des métabolites au niveau de la zone de traitement

-Favorisent la dominance apicale (du bourgeon terminal par rapport aux autres)

## D. Autres actions

Action sur la caulogènese

Néoformation des bourgeons

Action sur la rhizogenèse

Limitation / Inhibition

# IV. Modification des taux de cytokinines par génie génétique

-Ralentir le vieillissement

-Surproduction de cytokinines

Limitées ou modérée dans le temps

-Inhibition par stratégie anti-sens du gène de cytokinine oxydase

Catabolisme réduit

La régulation hormonale  
du développement des végétaux supérieurs

*L’éthylène*

# I. Historique de la découverte

Depuis longtemps on connait les ptés agro de l’éthylène. A la fin du XIXème siècle on découvrait ses effets.

1886 : NELJUBOW

Effet des gaz d’éclairage sur la morphologie et la croissance des végétaux.

=> Raccourcissement et épaississement des tiges, perte du géotropisme négatif = la triple réponse

1924 : DENNY

Action exogène connue depuis les années 1920-30.

=> Jaunissement des citrons

**Applications agro découvertes à l’époque :**

Maturation des fruits

Floraison des arbres ; manguiers, ananas,…

Chute des feuilles

Levée e la dormance des bourgeons : pomme de terre

# II. Nature chimique et biosynthèse

Hormone particulière

-Un gaz C2H4 (molécule unique et irremplaçable)

-Transport uniquement passif (diffusion)

-Aucun processus de détoxification nécessaire

-Hormone générale à tout le règne végétal

Biosynthèse à partir de la Méthionine

# III. Manifestations physiologiques

**Ethylène = hormone de la maturation des fruits**

-Production d’éthylène par les plantes (agrumes…) évaluée à 2.104 tonnes par an.

-Production provenant des véhicules et des industries : 15.104 tonnes par an.

Si trop d’éthylène dans l’air et que l’on veut une longue conservation :

-Stocker les fruits dans une pièce ventilée (=> fruitiers ventilés)

-Stocker les fruits en chambre froide pr diminuer la synthèse et le métabolisme de l’éthylène

**Ethylène = hormone de l’abscission**

-Dépend d’une balance hormonale entre l’AIA et Ethylène-Acide abscissique

**Ethylène = hormone mixte**

-Effets positifs : initiation de la floraison, maturation des fruits

-Effets négatifs : inhibition de la croissance, abscission, sénescence

# IV. Mode d’action

## Applications biotechnologiques

*Contrôle de la maturation des fruits par génie génétique*

**\*Obtenir des fruits à maturation différée (maturation plus tardive)**

Sous-expression des gènes d’ACC synthétase (acide cyclo-propane carboxylique synthétase)

ou

Surexpression d’un gène bactérien (*Pseudomonas*) d’ACC désaminase

**\*Obtenir des fruits à maturation avancée**

Apport d’éthylène (appli indus pr la banane récolté verte)

ou

Utilisation de promoteurs de gènes spécifiques

La régulation hormonale  
du développement des végétaux supérieurs

*L’acide abscissique*

# I. Découverte de l’ABA

1960 : Travaux de WAREING

Cause de l’arrêt de la croissance des arbres en automne et de l’entrée en dormance des bougeons végétatifs.

=> Découverte de **la dormine** = extrait d’acide

1963 : Travaux d’ADDICOT

Chute prématurée du fruit du cotonnier qui rend le coton inapte à la transformation industrielle.

**=> Acide abscissique** = responsable

# II. Nature chimique et biosynthèse

# III. Manifestations physiologiques

Provoque avec l’éthylène l’abscission des fruits. Il code pr un certains nombre d’enzymes (cellulases, pectinases) qui détruisent la base du pétiole pr faire en sorte que le fruit tombe au sol.

Manifestations physiologiques :

Hormone d’abscission

Facilitant de dormance

Hormone de sénescence

Anti-gibbérellique

Signal de détresse => Hormone mixte

**Dans le cas de stress hydrique :**

Fermeture des stomates

-ABA active un canal calcique au niveau du plasmalemme

=> entrée de Ca2+ dans le cytoplasme

-En retour ouverture d’un canal K+ sortant et de canaux anioniques

Fermeture du canal K+ entrant

-Résultat global => fuite du K+ => fermeture du stomate

# IV. Mode d’action

-Récepteur situé dans la membrane plasmique sur la face extérieure

-Structure moléculaire du récepteur inconnue

La régulation hormonale  
du développement des végétaux supérieurs

*Les brassinostéroïdes*

# I. Découvertes des BRs

1930 : Découverte de divers pollens qui sont actifs sur al croissance de segments d’organes végétaux.

1070 : Isolés pour la 1ère fois du pollen de Colza *Brassica napus* 🡪 les brassines

1979 : Caractérisation du brassinolide, 10mg obtenus à partir de 225kg de pollen de colza

1982 : Caractérisation de la castastérone à partir du pollen de châtaigne

# II. Nature chimique et biosynthèse

Les brassinostéroïdes sont des hormones particulières. Leur structure chimique se rapproche des stéroïdes appartenant au règne animal.

Ce sont des stérols = alcools polycycliques avec noyau stérol (A,B,C,D), voisins des triterpènes.

Précurseur = le squalène

Des analogies structurales avec la 20-hydroxyecdysone l’hormone de mue chez les insectes.

=> la castatérone inhibe la mue chez les insectes.

Le brassinolide = molécule la plus active et la plus répandue.

40 structures actives connues, présents chez les algues, fougères, gymnospermes et angiospermes.

# III. Manifestations physiologiques

-Action sur la division cellulaire

-Action sur l’élongation cellulaire

-Action sur la différenciation des tissus vasculaires

-Inhibiteur de la croissance racinaire

-Accélèrent la sénéscence (feuilles) 🡪 effet antagoniste des cytokinines

-Rôle dans la fertilisation => fécondation ovule impossible

-Accélération du mouvement de la sève élaborée ou brute => meilleure absorption des nutriments

-Germination plus rapide des graines (brassinostéroïdes et gibbérellines sont les seules)

-Aident la plante à se défendre de toute attaque par des agents pathogènes (bactéries, champginons,…)

# IV. Mode d’action

-Récepteurs plasmalemmiques

-Contrôle de l’expression génique

Travaux sur le soja : transcription du gène BRU1 augmentée après apport de BRs mais pas après apport d’AIA, de cytokinines, de GA ou d’ABA