

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Larbi Tebessi Tébessa

Faculté des sciences exactes et de la nature et de la vie

Cours : Plante dans son environnement

Destinée aux Etudiants master Ecophysiologie végétale (Sciences Biologiques)

Boudjabi S

2021 – 2022

Liste des Tableaux

Tableau. 1 Échelle granulométrique de la texture du sol

Tableau .2 Les types de sols et leurs caractéristiques

Liste des Figures

Figure. 1 Les Horizons du sol

Figure. 2 Effet du stress hydrique sur les paramètres morpho-physiologique de la plante

Figure.3 (a) Taux exponentiel de réaction en fonction de la température

Figure.3 (b) Accroissement par étape du taux de réaction en fonction de la température

Figure.4 Températures saisonnières du feuillage de blé et du coton

Figure .5 Données de température diurne enregistrées à Fatehpur, Rajasthan, Inde

Figure .6 Transition du bourgeon végétatif en bourgeon floral

Figure.7 Les étapes de transition du bourgeon végétatif en bourgeon floral

Figure.8 Aspect moléculaire de la vernalisation et son importance dans la floraison

Figure.9 Le rôle des VIN dans la floraison

Figure.10 Les facteurs environnementales et leurs relationavec la floraison

Figure.11 Le photopériodisme chez les plantes

Figure.12 Les intégrateurs de floraison

Figure.13 Modèle de régulation de la floraison par la protéine constant(*O*)

Figure.14 La photopériode est perçue par les feuilles signal = florigène

Figure.15 La structure du phytochrome

Figure.16 Le spectre d'action du P730 etP660 et conversion du photochrome

Figure.17 Contrôles de la lumière dans l'ouverture et fermeture du Stomate

Figure.18Les types de lumières qui stabilisent la protéine CO

Table de matière

Liste des figures

Listes des tableaux

Introduction

Chapitre I Relation sol la plante

I/1/ Le sol et ses composantes

I/ 1/1 La texture du sol

1/2/La structure du sol

1/3/ Les différentes structures du sol

1/3/1/ La structure fragmentaire

1/3/2 Structure particulaire

1/3/3 Structure compacte

I/2/A propos de L'Humus

I/2/1/Les phases de minéralisation de la matière organique dans le sol (formation de l'humus)

I/2/2 Les propriétés de l'humus

I/2/3/ Le rôle de l'humus dans le sol

I/2/4/Les agents de l'humification

I/2/5 Les facteurs intervient dans l'évolution de la matière organique(MO)

I/3 Intérêt agronomique de la matière organique du sol

I/4/ Le complexe argilo humique

I/5Les types de matières organiques dans le sol

I/6 Les horizons du sol

I/7 Les champignons du sol (Notion des mycorhizes)

I/7/1/ Relation racines mycorhizes

I/7/2/Importance des mycorhizes

Chapitre II La plante et les stress environnementaux

II/1 Le déficit hydrique II

II/1/1/ Les mécanismes d'adaptations au déficit hydrique

II/1/2 /Notion d'adaptation et d'acclimatation

II/1/3/Notion de tolérance et résistance

II/1/4 Le rôle des racines dans l'adaptation

II/1/5 Effet du stress hydrique sur la photosynthèse

II/1/6 La biomasse

II/1/7 Les tests physiologiques et biochimiques du stress hydrique et salin

II/1/8 Les outils de détection du stress hydrique

II/1/9 Résumé de l'effet du stress sur les paramètres morpho-physiologique de la plante

II/2/ Le stress salin

II/ 2 /1 Les trois grands types de sols affectés par les sels

II/2/2 L'origine de la salinité

II/2/3Quels sont les signes précurseurs de la salinité sur les plantes

II/2/4/L'effet osmotique

II/2/5 La toxicité d ions particuliers

II/2/6/La notion D' épictèses

II/2/7/Les osmoprotecteurs

II/ 3 /Le stress thermique

II/3/1/ Le stress au froid

II/3/2/ Les effets des hausses températures sur les plantes

II/3/2/1/Les mécanismes de tolérance à la chaleur

II/3/2/2/Les processus biochimiques

II/3/2/3/ La stabilité thermique des membranes cellulaires

II/ 3/2/4/Les protéines du choc thermique

II/3/2/5/La photosynthèse et le stress de température élevée

II/3/2/6/Les effets de températures extrêmes sur les cultures

II/3/2/7/ Les effets à long terme de températures élevées sur les cultures

II/4/Le stress biotique

II/4/1/Le stress provoqué par les insectes et maladies

II/4/2/Le stress provoqué par les polluants

Chapitre III La floraison des végétaux

III/1/Les étapes de la transition

III/2 /Les indicateurs de transition (végétatif à floral)

III/ 3 /La vernalisation

III/3/Le photopériodisme et la floraison

III/4/1/Les types de reponses photoperiodique

III/4/2 La photopériode critique

III/4/3 L'approche moléculaire dans la perception du signal

III/5 Notion de photorécepteur

III/5/ 1/ les phytochromes

III/5 /1/1 Généralisation des résultats : Universalité du Phytochrome – Diversité des effets

III/5/1/ 2– Structure du phytochrome

III/5/1/3/Conversion enzymatique P730 – P660 à l'obscurité

III/ 5/1/4 Localisation cellulaire

III/5/1/5 La croissance et le phytochrome

III/5/1/6/ Les types de phytochrome

III/5/ 2/ Les cryptochromes

Chapitre IV Les mouvements chez les végétaux

IV /1 Contrôles de la lumière dans l'ouverture et fermeture du Stomate

IV/2 / L'abscission foliaire

IV/3 Les tropismes

IV/3/1 Le gravitropisme

IV/3/2 Le phototropisme

IV/4 les nasties

IV/4/1 Les nyctinasties

IV/4/2 Les seismonasties

Introduction

Les plantes disposent de plusieurs formes d'adaptations leur permettant de faire face aux facteurs stressant qui existent dans leur milieu de vie. Pour survivre, dans un milieu salé ou un milieu sec, la plante régit de plusieurs mécanismes qui lui permettent d'affronter ces contraintes. D'autre part, les végétaux ont la capacité de percevoir leurs environnements proche. La perception de la gravité est l'exemple le plus parlant qui montre que, les végétaux sont en mesure discriminer leur environnement proche; à savoir que, lorsque une plante croit ses tiges se développent vers le haut alors que les racines vers le bas. Aussi ; la floraison cette phase qui détermine le cycle de vie des plantes représente une étape très importante pour la plante qui fait intervenir plusieurs conditions lumière température etc ... C'est pour comprendre les mécanismes d'adaptation et de plasticité établies par la plante que ce modeste document est réalisé. Il a pour objectif d'éclairer et de montrer les mécanismes biologiques, physiologiques et biochimiques qui sont mis en jeu par les végétaux dans leurs réponses aux facteurs contraignants de leur environnement. Ce document est destiné aux étudiants de master en écophysiologie végétale, espérant qu'à travers ce support de cours on pourra répondre à pas mal de questions qui restent obscures pour nos chers étudiants

Chapitre I Relation sol la plante

I/1/ Le sol et ses composantes

Le sol est un élément de la biocénose forestière, car il abrite la zone racinaire des plantes, indispensable à leur croissance. C'est dire toute l'importance qu'il revêt. L'appréciation des couches supérieures et intermédiaires du sol nous éclaire sur les conditions du milieu

1/1 La texture du sol

- ▣ Le sol comporte 3 phases: une phase solide (minérale et organique),
- ▣ une phase liquide (solution du sol) et une phase gazeuse (air, CO₂, CH₄).
- ▣ On appelle texture la résultante du mélange de terres fines et grossières dont les pourcentages varient d'un sol à l'autre.

Tableau 1. Échelle granulométrique de la texture du sol

| Terre fine | | | | Terre grossière | | |
|------------|------------|----------------|------------|-----------------|-----------|----------|
| argile | limon fin | Limon grossier | Sable fin | Sable grossier | Graviers | cailloux |
| <2µm | 2 – 20 µ m | 20 – 50µm | 50 – 200µm | 0.2 – 2 mm | 2 – 20 mm | >20 mm |

1/2/La structure du sol

- ▣ La structure du sol correspond à la façon dont les argiles et la Matière Organique (MO) et plus particulièrement l'humus sont imbriqués dans le sol.
- ▣ Seule la structure du sol peut être modifiée par ajout de MO et/ou de Ca²⁺. La texture ne peut être modifiée à l'échelle humaine.
- ▣ En présence de sels minéraux (Fe/Al) et de MO les argiles forment des Complexes Argilo-Humiques (CAH).

- ▣ Les argiles peuvent fixer la MO (humus) par adsorption sur/dans leurs feuillets par l'intermédiaire des oxydes et hydroxydes d'Al et de Fe qui forment un revêtement pelliculaire. Plus les argiles sont fins, plus la MO est retenue, et plus la minéralisation est lente.
- ▣ Les CAH s'agglomèrent en agrégats en incorporant des filaments mycéliens, du mucus bactérien (polysaccharides) et des radicelles.

1/3/ Les différentes structures du sol

1/3/1/ La structure fragmentaire

Les agrégats permettent à la fois une rétention de l'eau et des échanges chimiques avec la solution du sol et les racines. C'est la structure la plus intéressante pour l'agriculture.

1/3/2 Structure particulaire

Les particules de terre sont trop grandes et il n'y a pas d'agrégation entre elles (la plage de sable). Sa capacité d'infiltration est très élevée mais sa capacité de rétention très réduite, le sol est donc incultivable.

1/3/3 Structure compacte

À l'opposé de la structure particulaire, les particules sont très fines (grande proportion d'argiles) et s'agglomèrent, elle limite fortement l'infiltration de l'eau dans le sol qui s'engorge, on le dit saturé en eau. Ce sol s'appauvrit en oxygène et devient difficilement pénétrable par les racines

I/2/A propos de L'Humus

- ▣ L'humus se trouve principalement dans la couche supérieure du sol créée et entretenue par la (1) décomposition de la matière organique (MO) fraîche de la litière. Cette décomposition s'effectue par des bactéries, des champignons, des protozoaires (microfaune du sol). Les produits de cette décomposition sont restructurés par polymérisation (réaction de Maillard) en nouveaux produits plus stables, plus complexes, que sont les substances humiques ou humus (acides fulviques et humiques, humine et autres).

- ▣ L'humus (mélange de polymères) forme des micelles chargées négativement réagissant fortement avec les cations comme Ca^{2+} apportant un effet structurant au sol.
- ▣ L'humus est décomposé lentement (minéralisation + CO_2) par la microfaune en présence d' O_2 apportant des nutriments (N, P, S, autres) pour la plante. Si la séquestration de l'humus est forte dans les particules d'argile, sa minéralisation sera d'autant plus lente. La vitesse d'humification comme sa minéralisation est plus rapide avec l'augmentation de l'activité de la microfaune, de la température, de l'humidité et de la quantité d'oxygène.

I/2/1/Les phases de minéralisation de la matière organique dans le sol (formation de l'humus)

- **La minéralisation primaire et humification**

La matière organique se décompose et se minéralise rapidement c'est la minéralisation primaire on obtient des molécules simples CO_2 , K, Ca, PO_4 , nitrates, ces molécules peuvent prendre cinq destinations, soit elle subit un lessivage, ou absorbées par les plantes ou fixés par l'humus et l'argile (CAH) ou perdu dans l'atmosphère ou repris par les microorganismes.

- **Les formes de dégradations de la matière organique dans le sol**

La matière organique fraîche se décompose différemment dans le sol, certaines sont facile a se décomposer, ce qui sert comme aliment énergétique et plastique pour les bactéries, il s'agit des sucres, protéines et aussi cellulose ; ces matières disparaîtront très vite et donnent du CO_2 et eau ; contrairement aux lignines tanins résines qui se décomposent très lentement et moins complètement et laissèrent des résidus.

La plus grande partie de la matière organique fraîche se décompose et se minéralise rapidement c'est la minéralisation primaire : on obtient le CO_2 / H_2O / PO_4 / NO_3 / NH_4 ;K ; Ca etc..... ces éléments se fixent sur l' argile qui est une matière minérale et forment le CAH bien sur sous le control des bactéries on parle de humification par néosynthèse microbienne

D'autre part les résidus peu transformés se fixent sur la matière minérale du sol et par brassage dans le tube digestive des animaux tel le verre de terre et forment une matière humine résiduelle ou héritée et on parle de humification par héritage.

Les composés phénoliques solubles donnent par oxydation et condensation des molécules insolubles ceci aboutit à l'humine d'insolubilisations et on parle de humification par insolubilisation. L'ensemble des trois humines forment la partie la plus insoluble et stable de l'humus, cependant le terme insoluble n'est pas très exacte car elles subissent par les microorganismes en réalité une transformation très lente de l'ordre de 1 à 2% / AN

I/2/2 Les propriétés de l'humus

- ▣ C'est une matière souple, aérée, d'aspect brun foncé à noir (pas forcément dû au Fe), à odeur caractéristique, et qui est relativement résistante à la décomposition. C'est un excellent agent d'amendement naturel des sols (aération, ameublement, décompactant).
- ▣ Il adsorbe bien l'eau et joue un rôle primordial dans la rétention des cations K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , etc. (CEC) en diminuant leur lessivage. C'est un bon support pour les microbes. L'humus est dispersé dans les horizons du sol par les fissures, l'eau et par les animaux fouisseurs (vers de terre) pour générer la terre végétale. Il forme avec les argiles les complexes argilo-humiques (CAH) qui retardent encore plus sa décomposition.
- ▣ L'humus se décompose lentement, mais s'il n'est pas renouvelé par la litière, le sol perdra ses propriétés de terre végétale.
- ▣ L'humus (les acides organiques qu'il contient) solubilisent à leur tour les roches du sol et altèrent la roche-mère

I/2/3/ Le rôle de l'humus dans le sol

- ▣ L'humus et le CAH sont un réservoir de MO et donc d'éléments nutritifs pour les racines de la plante. Son aspect micellaire et sa lente décomposition en font un agent d'amendement. Il améliore la qualité physique de la terre puis génère lentement par minéralisation C, K, N, P, S. Si l'humus est enfoui trop profondément par labour ou est asphyxié dans un sol régulièrement inondé, il se dégrade dans des conditions anaérobies et devient bleuâtre ou verdâtre (réduction du Fe^{3+} en Fe^{2+} , sent mauvais (CH_4 et H_2S et devient toxique pour les racines. Humus et compost vieux c'est la même chose. Il est utile de connaître la quantité totale d'humus et sa qualité. La

mesure du coefficient CEC, comme le rapport C/N, donnent une indication sur la qualité du sol. Les acides organiques qui constituent l'humus lui confèrent les propriétés d'une résine échangeuse de cations Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , K^+ , comme les argiles.

- ▣ En agriculture, pour conserver les propriétés du sol, il faudra procéder à des apports compensatoires de MO.

I/2/4/ Les agents de l'humification

- La microflore : la microflore du sol est composée particulièrement de bactérie, les actinomyces, et certaines algues microscopiques.
- La Faune: la faune du sol elle aussi est divisée en 2 catégories :
La microfaune : des êtres qui ont une taille $< 2\text{mm}$ (protozoaires) et la macrofaune : qui a une taille supérieure à 2mm (Gastéropodes, mammifères)

I/2/5 Les facteurs interviennent dans l'évolution de la matière organique(MO)

- Facteur extrinsèque : c'est essentiellement le climat avec tout ses (Température, évaporation, vent ...), la nature du sol (ph, humidité, la richesse de sol en éléments minéraux et énergétiques).
- Facteur intrinsèque : concernant la nature et la composition des débris organiques, les différents chercheurs sont intéressés à deux éléments essentiels qu'on retrouve dans les débris des végétaux (Carbone et Azote) et ils ont établi un rapport C/N qui permet d'indiquer la vitesse de l'évolution de la MO :
C/N supérieur à 12 ---évolution lente, C/N < 10 ----évolution rapide, C/N de 10 – 12 le rapport le plus favorable.

I/3 Intérêt agronomique de la matière organique du sol

- La matière organique joue un rôle nutritionnel en fournissant des éléments nutritifs par l'intermédiaire des processus de minéralisation (notamment l'azote, le phosphore et le soufre).
- Elle a aussi un effet favorable sur les propriétés physico-chimiques du sol, effet d'autant plus marqué que l'humification de la matière organique est plus poussée.
- Elle régularise l'humidité de tous les types de sol : en favorisant l'évacuation de l'eau en excès des sols argileux. En augmentant la capacité de rétention en eau des sols sableux.

- Elle améliore les qualités chimiques du sol. Par sa réaction acide, l'humus agit sur les caractéristiques chimiques du sol et sur la nutrition des plantes.
- Elle augmente l'activité microbienne : la matière organique constitue, en effet, une source énergétique pour les micro-organismes.

I/4/ Le complexe argilo humique

- ▣ Le CAH est formé d'argiles colloïdales en feuillets dans lesquels sont adsorbés réversiblement la MO humique et des hydroxydes de Fe et d'Al. Ces argiles colloïdales peuvent à leur tour lier et échanger les cations en solution dans le sol qui seraient lessivés sans l'interaction de ces complexes. D'où leur importance cruciale dans l'alimentation racinaire des plantes. Les CAH sont ensuite agglomérés avec d'autres particules du sol (mycélium, polysaccharides, mucus, bactéries, protozoaires, débris, radicelles) en agrégats plus volumineux. La structure du sol est l'arrangement de ces macro-agrégats

I/5 Les types de matières organiques dans le sol

- ▣ MO localisée dans les horizons du sol :
- ▣ MO active O = MO fraîche, minéralisation Rapide

MO lente A = humus (MO réarrangée, polymérisée, minéralisation lente)

MO passive B = humus adsorbé aux très fines particules d'argile dans l'horizon B (peut minéraliser dans des conditions spéciales par apport de MO fraîche).

I/6 Les horizons du sol

- ▣ Les horizons du sol sont décrits sur la base des caractéristiques du sol. Une distinction est généralement établie entre les horizons organiques et les horizons de matière minérale

A Les Horizons organiques

Les horizons organiques sont les horizons supérieurs recouvrant le sol minéral. Ils se distinguent par le degré de décomposition de la matière et la structure des débris végétaux. Les horizons organiques se forment dans diverses conditions de décomposition, mais le régime hydrique du sol en est le facteur principal.

▣ L / Horizon de litière

L'horizon de litière L (litter) est composé de débris végétaux aériens, encore identifiables. Ils peuvent être aérés à l'état sec, agglomérés à l'état humide, ou former des couches comprimées après la fonte des neiges.

▣ F/ Horizon de fermentation

L'horizon de fermentation ou de décomposition F est constitué de débris végétaux aériens aux structures discernables et d'une fine substance organique (10 - 70 %v).

Les processus d'altération se reflètent souvent dans des indices visibles, comme la présence de mycélium. Cet horizon est aéré, aggloméré ou stratifié. Il peut prendre un aspect entremêlé ou feutré sous l'action des hyphes

Les horizons de litière, de fermentation et humifère sont regroupés sous la dénomination d'horizons organiques également appelés couches organiques ou LFH

B/ les horizons minéraux

▣ Horizons de matière minérale

Les horizons de matière minérale sont principalement constitués d'éléments minéraux. Dans les couches supérieures du sol, ils sont mêlés à de la substance organique (humus). La teneur en humus, la structure, la brunification, l'hydromorphie et la migration (lessivage) sont à la clé de leur subdivision. Les signes distinctifs des couches intermédiaires des sols sont la couleur, le stade d'altération, l'hydromorphie, l'éluviation (lessivage) et l'illuviation (enrichissement ou accumulation).

C/ **Horizon organique des sols semi-terrestres et des marais** – Altération sous l'effet de l'eau

Horizon tourbeux / L'horizon tourbeux est constitué de restes de plantes à l'origine de la tourbe. Il contient des substances fibreuses en phase de turbification.

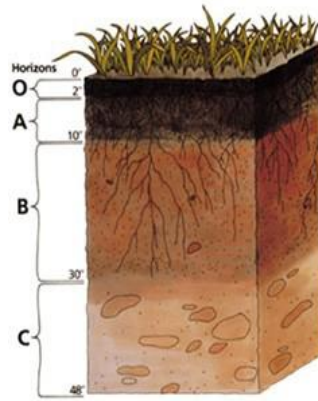


Figure. 1 Les Horizons du sol

O : litière, MO

A : gradients décroissants de MO

B : zone d'accumulation. Les éléments lessivés de A
(MO, Fe, Ca) se concentrent en B.

C : zone de transition vers la
roche-mère. Pas de MO

I/7 Les champignons du sol (Notion des mycorhizes)

- Mycorhizes est une relation symbiotique mutualiste entre un poil adsorbant et le mycélium d'un champignon. Le mycélium (microscopique) du champignon possède des ramifications filamenteuses (hyphes) qui s'étendent dans le sol à plusieurs centaines de mètres de la racine permettant une énorme augmentation de la surface d'échange racinaire (plus de 1000 x).
- Les mycéliums peuvent atteindre une taille considérable et vivre longtemps.
- Le mycélium peut former des fructifications, qui sont les champignons proprement dits.
- Ils ont besoin d'une source de carbone organique pour s'alimenter. L'arbre fournit au champignon les sucres, et ce dernier lui offre en échange des éléments nutritifs N, P, K, Cu,

- Zn et de l'eau qu'il a prélevé, à l'aide de ses hyphes qui couvrent une surface considérable

I/7/1/ Relation racines mycorhizes

- L'environnement racinaire et la vie souterraine (vers de terre, mycorhizes, MO, bactéries et champignons, root-talking) n'intéressent malheureusement que peu de gens. Or un sol sain et riche en biomasse génère des cultures saines et plus résistantes aux maladies. Mis à part leur rognage lors des labours ou du travail sous le rang, on gave souvent les racines avec des fumures mal appropriées qualitativement et quantitativement

I/7/2/Importance des mycorhizes

- Les plantes mycorhizées tolèrent mieux les facteurs stressants.
- Le champignon élabore:- des sucres (mannitol, arabitol), qui rendent les racines plus résistantes au gel. - des antibiotiques et des substances qui augmentent le pouvoir défensif des plantes contre les pathogènes (nématodes, champignons toxiques) contenus dans le sol.
- - des phytohormones (auxine, gibérelline, cytokynine, éthylène) qui favorisent la croissance des plantes.
- Les concentrations élevées d'azote sont défavorables aux mycorhizes. Le champignon et la plante échangent moins d'éléments nutritifs entre eux, et la santé de la plante peut en subir les conséquences. L'utilisation de N est donc délicate.
- Les fongicides (systémiques) ont eux aussi certainement un effet négatif

Chapitre II La plante et les stress environnementaux

On peut définir le stress comme tout agent ou processus physiques ou chimiques qui s'exercent sur le végétal provoquant une agression ou une tension pouvant devenir pathologique et limite la potentialité de la plante voir sa productivité. L'étude des plantes placées dans des conditions appelée physiologie de stress, est un aspect important de l'écophysiologie végétale et ceci pour les raisons suivantes :

- Les plantes répondent souvent au stress en modifiant leurs physiologies et leurs métabolismes.
- L'étude menée sur les plantes en conditions stressantes peut renseigner sur les mécanismes physiologiques normaux, ensuite l'étude de la physiologie de stress contribue à la compréhension des facteurs qui limitent la répartition des végétaux
- En dernier lieu l'agriculture, la capacité des cultures à résister au stress est un facteur important dans la détermination, du rendement

L'évaluation du stress soulève pas mal de difficultés: A quel moment dans un gradient continu de l'environnement, une condition devient elle stressante? Les espèces végétales se comportent très différemment face à leur environnement optimal et leur sensibilité aux valeurs extrêmes. Les plantes sont confrontées continuellement à des variations de températures qui peuvent être élevées (chaleur), ou faible (froid et gel), aussi à des excès d'eau (Inondation, anoxie), ou au contraire un déficit hydrique sans oublier le facteur salinité, radiations, produits chimiques (pesticides, métaux lourds, polluants atmosphériques) et en dernier les stress biotiques dus aux agents pathogènes.

II/1 Le déficit hydrique

Le déficit hydrique est un manque en eau dans le sol, conduisant à plusieurs mécanismes d'adaptation par les plantes. Le stress hydrique peut se produire aussi bien sous l'effet d'un excès d'eau que d'un manque d'eau. Un exemple d'excès d'eau est l'inondation, le stress provoqué par l'inondation est habituellement une réduction de l'apport d'oxygène aux racines. Ce qui limite la respiration et l'absorption de nutriments. Ce type de stress ; excès d'eau et inondation, est peu fréquent dans les zones sèches. Au contraire, le stress provoqué par un déficit ou un manque d'eau est bien plus fréquent dans les nos régions (aride et semi-aride). Pour cela, on assimile le stress de déficit hydrique à l'expression simple : Déficit

hydrique. Cette notion de déficit hydrique nécessite la compréhension de certaines notions liées à l'importance de l'eau dans la plante.

II /1/1/ Les mécanismes d'adaptations au déficit hydrique

Plusieurs façons peuvent être utilisées par les plantes pour répondre aux divers stress. Les conséquences du stress sur la plante dépendent de l'intensité et de la durée du stress, un stress léger et de courte durée : la lésion peut être temporaire et la plante peut reprendre son développement. Un stress important et de longue durée : Le stress peut inhiber la floraison et compromettre la production voir entraver la survie de la plante.

Certaines plantes **échappent** totalement au stress comme les plantes poussant au désert qui sont dites éphémérophytes (durée de vie courte). Ces plantes ont la caractéristique de germer et fleurir immédiatement après les pluies saisonnières. Les paramètres phénologiques, qui caractérise le décalage du cycle vis-à-vis l'événement climatique est **l'évitement** qui consiste à inscrire le cycle végétal à l'intérieur de la période de stress hydrique externe, la plante maintiens son état hydrique interne de façon satisfaisante. Ainsi, les mécanismes d'évitement réduisent l'impact d'un stress bien qu'il soit présent dans l'environnement. Exemple : Les plantes adultes de luzerne *Medicago sativa* (البرسيم) survivent à la sécheresse en développant en profondeur un système racinaire qui peut atteindre la nappe phréatique. Par contre, d'autres plantes produisent des feuilles charnues ayant la capacité de stocker de l'eau. D'autres plantes se couvrent de cuticule (بشرة) épaisses et deviennent pubescentes (feuilles poilues). Les cactus sont un meilleur exemple d'évitement de la sécheresse les feuilles sont représentées par des épines. Les plantes reviviscentes : le protoplasme de la plante est conservé même en cas de forte sécheresse (dessiccation). En cas d'hydratation le protoplasme reprend normalement. Exemple : Certaines fougères

L'esquive permet à la plante de ne pas subir directement la contrainte en réalisant son cycle en dehors de la période sèche. Il permet un développement phénologique rapide

II/1/2 /Notion d'adaptation et d'acclimatation

Les deux termes s'appliquent à la façon dont la plante tolère le stress. Adaptation se rapportent à des modifications de structure ou de fonctions héréditaires : L'adéquation augmente dans un milieu stressant. Exemple : Les modifications morphologiques et physiologiques associées au métabolisme acide de certaines plantes appartenant au Crassulacées ayant des feuilles charnues, sans stipule qui vivent dans les régions

tropicales (généralement, plantes succulentes).L'acclimatation concerne les modifications physiologiques **non** héritables car la capacité de s'acclimater est un caractère génétique.

II/1/3/Notion de tolérance et résistance

La tolérance elle permet à la plante d'assurer normalement ses fonctions physiologiques malgré une dégradation de son état hydrique, la tolérance à faible potentiel hydrique s'effectue par le maintiens du potentiel osmotique sous l'effet de l'accumulation des osmotocums (sucres proline, bêtaine).

La résistance est liée à l'aptitude du génotype qui maintient l'intégrité de ses structures (la membrane, photosynthèse, etc)

II/1/4 Le rôle des racines dans l'adaptation

La morphologie du système racinaire joue un rôle important dans l'alimentation hydrique de la plante, ainsi qu'elle apparait comme un facteur important de variabilité inter et intra spécifique de la tolérance au déficit hydrique. Une meilleure adaptation pour une variété à enracinement profond avec augmentation de la profondeur de l'axe principal permettant une bonne utilisation des réserves en eau des couches profondes.

II/1/5 Effet du stress hydrique sur la photosynthèse

Dans le cas de stress hydrique la photosynthèse diminue suite à la fermeture des stomates, un stress hydrique associé à une forte température permanant entraine un photo endommagement des photosystèmes PS I et PSII cet effet conduit à la dégradation des pigments chlorophylliens. La fermeture des stomates peut être de deux façons, la fermeture hydro passive : suite à une évaporation directe des cellules de garde. Le métabolisme des cellules de garde n'intervient pas dans ce cas. La fermeture hyro-active : intervention du métabolisme qui oriente les flux ioniques d'une manière inverse pour déclencher l'ouverture des stomates. Le phénomène de la fermeture est déclenché par un abaissement du potentiel hydrique dans la plante. La notion de potentiel hydrique se rapporte à l'état de liaison de l'eau dans la plante ; il s'exprime par le potentiel hydrique foliaire. Lors de cette opération, des hormones sont secrétées telle que l'acide abscissique (ABA). Ce dernier joue un rôle important dans la fermeture des stomates suite au stress hydrique.

II/1/6 La biomasse

Le stress hydrique implique une perte dans la biomasse du végétal, une diminution dans la surface des feuilles pour éviter les pertes en eau, diminution dans la longueur des tiges ou chaumes pour les graminées, on distingue une réduction et un retard dans la germination perte dans le nombre de thalles, diminution dans le rendement en grain à la suite de l'avortement des fleurs, mort des ébauches foliaires, on détecte aussi une grande accumulation des sucres et prolines, accélération de la sénescence des feuilles, réduction dans le nombre des épis et le poids de mille grain entraînant une perte accrue dans le rendement en grain

II/1/7 Les tests physiologiques et biochimiques du stress hydrique et salin

- Le taux de déperdition en eau des feuilles
- Turgescence relative des feuilles
- Dosage des sucres
- Dosage de proline
- Dosage des protéines

II/1/8 Les outils de détection du stress hydrique

Certains paramètres biophysiques et physiologiques de la plante comme la photosynthèse, la conductance stomatique, teneur en chlorophylle, le potentiel hydrique foliaire et bien d'autres paramètres sont en étroite relation avec le statut hydrique de la plante et peuvent être utilisés comme des indicateurs pour la détection du stress hydrique. Plusieurs des paramètres biophysiques de la végétation sont estimables par télédétection. La contrainte hydrique va conduire la plante à une adaptation de sa morphologie, ce qui va affecter plusieurs variables biophysiques. Les déficits hydriques longs se traduisent par des changements progressifs dans la structure de la plante, qui visent à réduire sa surface transpirante ou surface foliaire qui est mesurée facilement par son **LAI = Leaf** (Area Index) ou Indice de surface foliaire qui est mesuré à l'aide d'un planimètre. Actuellement on utilise le planimètre digital. En mesurant la surface totale, des feuilles, rapportées à la surface projetée au sol à l'aide de la formule suivante :

$$\text{LAI} = \frac{\text{Surface foliaire}}{\text{Surface au sol}}$$

- **La température du couvert végétal comme indicateur de l'état hydrique :**

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour estimer et mesurer la température d'un couvert végétal, Parmi ces méthodes, l'utilisation du thermomètre infrarouge. Elle présente l'avantage de la rapidité et de la facilité d'acquisition, nécessaire pour un diagnostic hydrique. Généralement, Lorsque la température d'un corps augmente, il émet une radiation sous forme de rayonnement électromagnétique. Les capteurs infrarouges thermiques mesurent cette radiation émise dans la bande infrarouge (IR, 0.7 à 100µm).

- **Canopy Temperature (CT) :**

L'un des premiers indices spectraux IRT utilisé pour l'évaluation de l'état hydrique de la plante est la température du couvert (Canopy Temperature). Sa détermination nécessite uniquement la mesure de la température par thermomètre infrarouge. Cet indice est fortement corrélé au statut hydrique de la plante. Cependant, faute de valeurs de référence, et étant fortement influencé par les conditions du milieu (humidité, vent, température ambiante, etc.), son utilisation pour la détection du stress hydrique et le pilotage de l'irrigation est problématique.

- **Temperature Stress Day (TSD) :**

L'absence de valeurs de référence dans l'utilisation de CT comme indicateur de stress hydrique a amené plusieurs auteurs (Jackson et al., 1983) à développer l'indice TSD à l'aide de plants de référence à proximité de la culture. Ces plants évoluant dans les mêmes conditions agrométéorologiques que le champ est alors bien irrigué tout au long du cycle cultural. Le TSD mesure la différence de température entre le couvert végétal de la culture et le couvert d'une parcelle témoin bien irriguée.

$$TSD = TC - TCt \dots\dots\dots \text{Equation 2}$$

Tc : Température du couvert (°C)

Tct : Température du couvert témoin (°C)

Remarque :La conduite de la culture au voisinage de la capacité au champ entraîne une valeur de TSD nulle. Pour des valeurs de TSD supérieures à 0, Il y a nécessité d'irriguer. Le seuil de démarrage des irrigations est fonction de la plante.

- **Température Condition Index (TCI) :**

L'indice de condition de température ou TCI qui est défini comme étant un indice de sécheresse basé sur la radiation émise et réfléchié par la couverture végétale. Il est utilisé pour estimer la vigueur de la végétation, et par conséquent sa condition hydrique. Le TCI varie dans l'intervalle [0, 100]. Il s'écrit de la manière suivante :

$$TCI = (T_{smax} - T_s) / (T_{smax} - T_{smin}) \times 100 \dots \dots \dots \text{Equation 4}$$

Ts : Température de surface (°C),

Tsmax et Tsmin : Maximum et minimum de Ts sur plusieurs années (°C)

- **Canopy Temperature Variability (CTV):**

Étant donné que le sol n'est pas homogène à l'intérieur d'un champ, le manque d'eau va entraîner une variabilité spatiale de la température du couvert. La variabilité de la température du couvert végétal à l'intérieur d'une parcelle est ainsi utilisée comme un indicateur de stress hydrique à l'intérieur de cette parcelle. Le CTV est l'écart-type de la température moyenne du couvert. $CTV = \delta (T_c) \dots \dots \dots \text{Equation 5}$

δ : Ecart-type

Tc : Température du couvert végétal (°C).

Lorsque la valeur du CTV excède 0.7, le couvert est considéré en stress hydrique. L'un des avantages de l'indice CTV est qu'il ne nécessite pas la mesure de la température de l'air, et peut être calculé avec des valeurs de Tc acquises à partir du thermomètre infrarouge. Les facteurs environnementaux constituant un frein à ces premiers indices précités, des modèles plus complexes, combinant la mesure de la température de surface par des capteurs IRT et la physique de l'évapotranspiration, ont été élaborés. Le plus utilisé est le Crop Water Stress Index (CWSI).

- **Crop Water Stress Index (CWSI):**

Cet indice a été élaboré à partir du bilan d'énergie, à l'aide d'une expression mettant en relation la différence entre la température du couvert végétale et celle de l'air ($T_c - T_a$) et la

radiation nette, la vitesse du vent, le déficit de pression de vapeur de l'air, la résistance aérodynamique et la résistance du couvert.

II/1/9 Résumé de l'effet du stress sur les paramètres morpho-physiologique de la plante

Le stress hydrique affecte la plante sur plusieurs paramètres physiologiques, biochimiques et morphologiques ;

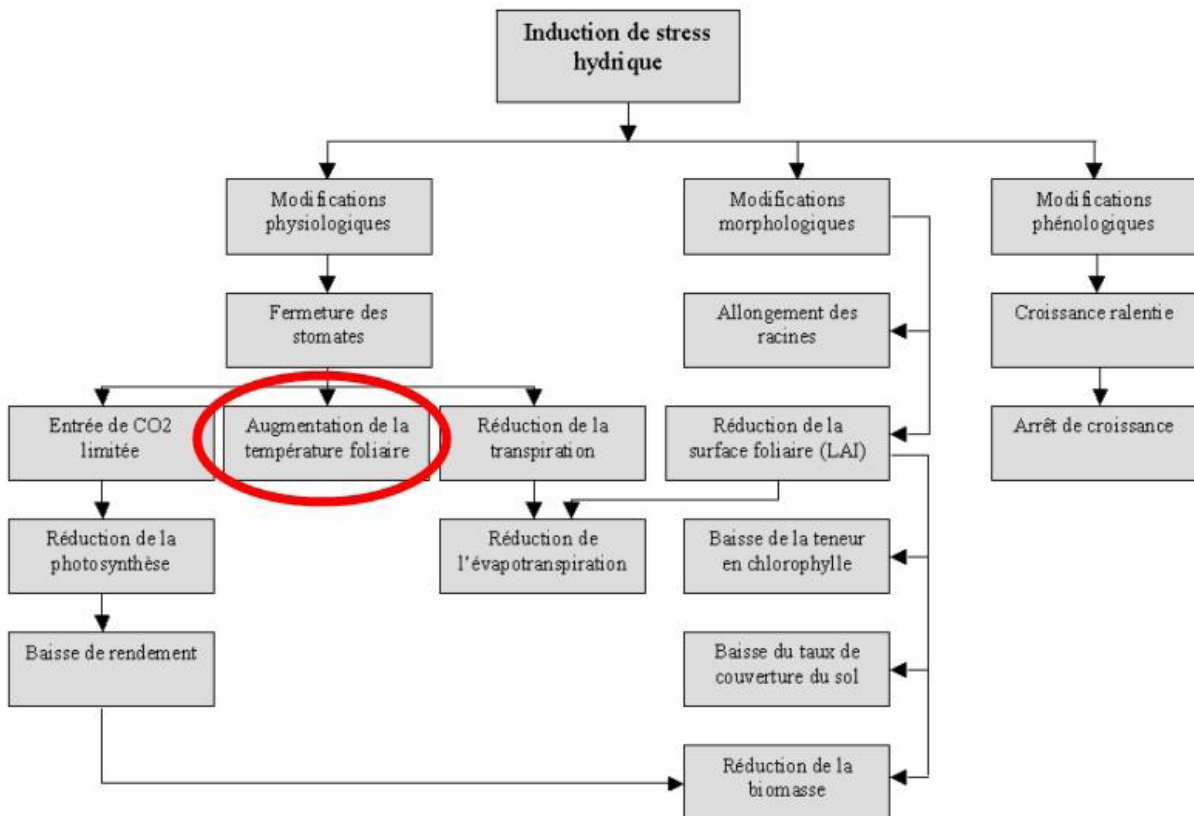


Figure. 2 Effet du stress hydrique sur les paramètres morpho-physiologique de la plante

II/2/ Le stress salin

Qu'est –ce que la salinité

On distingue deux types de salinité des sols. On parle des sols salsodiques qui englobent deux sous catégories, les sols salins et les sols alcalins. La formation des sols salsodiques est en relation avec la présence des ions sodium Na^+ sous l'une ou l'autre de ces formes: Saline (NaCl , Na_2SO_4) ou échangeable et parfois les deux.

- Les sols salins (Solontchaks) ont pour principales caractéristiques leur richesse en sels de sodium neutre (NaCl , Na_2SO_4), mais contenant également des quantités appréciables de chlorures et de sulfates de sodium, calcium, magnésium. Ces sols sont très dominants dans les régions arides et semi arides
- Les sols alcalins (Solonetz) sont riches en sodium échangeable et en revanche pauvres en sels solubles (sels alcalins, carbonates et bicarbonates de sodium Na_2CO_3 principalement). Les sols alcalins se trouvent dans les régions semi arides et sub-humide.

Ces deux types de sols sont regroupés sous le nom de sols salés, on en fait des propriétés physiques, chimiques distinctes, d'où des effets sur les plantes, des traitements pour leur remise en valeur et une distribution géographique et une qualité des aquifères adjacentes différentes

II/ 2 /1 Les trois grands types de sols affectés par les sels

Il s'agit des sols salins, salin –sodiques et des sols sodiques, qui diffèrent en fonction de leurs CE, PSE, SAR, et leurs PH

Tableau .2 Les types de sols et leurs caractéristiques

| Type de sol | Type de sels | CE | PSE | pH | Caractéristiques |
|-------------|---|--------|------------------|-------|--|
| Salin | Présence de sels solubles neutres, de chlorures de sulfate de calcium, de magnésium, de | >4dS/m | < 15 (SAR<13) | < 8.5 | La croissance des plantes est généralement contrainte par une faible infiltration, une faible stabilité et aération des sols. La plupart du temps l'évaporation de l'eau entraîne la formation |

| | | | | | |
|---------------|---|--------|----------------|-------|---|
| | potassium de sodium (calcium et mg dominants) | | | | d'une croûte blanche à la surface du sol connue sous le nom de croûte blanche alcaline. |
| Salin sodique | Grande concentration de sels neutres et d'ions sodium | >4dS/m | > 15 (SAR> 13) | <8. 5 | La croissance des plantes peut être effectuée par des excès de sels et aussi un excès de sodium. Ces types de sols ont des caractéristiques intermédiaires entre sols sodiques et salin. Si les sels solubles sont lessivés et si le SAR des eaux de lessivage est élevé le niveau de salinité baisse, mais le PSE augmente et les sols salin- sodiques sont transformés en sols sodiques |
| Sodique | Faible quantité de sels solubles neutres, grande quantité d'ions sodium | <4dS/m | >15 (SAR> 13) | >8. 5 | C type de sol est le plus affecté par les sels et le plus dégradé. Il présente une dispersion des particules des sols et des pores obstrués.ces phénomènes augmentent avec la profondeur. l'absence des pores dans les sols dispersés rend le sol peu perméable. Le taux d'infiltration est tellement réduit que l'eau tend à former des flaques. Ce type de sol est dit engorgé |

II/2/2 L'origine de la salinité

Il est commode de distinguer trois hypothèses :

-Dans un premier lieu les horizons supérieurs du sol sont salés avant toute intervention humaine.

-Un second cas provient de l'utilisation des eaux usées ou eaux salées dans l'irrigation.

La salinisation par irrigation n'apparaît pas en zone humide car les eaux employées ne sont pas riches en sels et qu'en outre les pluies sont assez abondantes pour lessiver les sols.

Contrairement aux zones arides et semi arides où les pluies sont rares et ne provoquent pas un lessivage suffisant.

-Une troisième situation, les horizons supérieurs sont indemnes de sels au début de la mise en irrigation, les eaux utilisées ne sont pas riches en sels, mais existe des couches sous jacentes salées, Or en irrigation, il est inévitable que l'eau percole en profondeur même si la dose à l'hectare correspond exactement à la consommation de la culture, il est impossible de la répondre de façon rigoureusement uniforme, ce qui signifie que certains points seront sous alimentés tandis que d'autres l'eau s'infiltrera au delà de la zone prospectée par les racines, si le sol n'est pas assez perméable, une nappe d'eau souterraine va se constituer et son niveau s'élèvera avec le temps, un jour viendra où une communication capillaire s'établira entre cette nappe salée et les horizons de culture.

II/2/3 Quels sont les signes précurseurs de la salinité sur les plantes

Comme règle générale on peut considérer que la plupart des plantes sont sensibles à la salinité durant leurs phases de germination et de levée. Au champ, les sols salés peuvent se reconnaître par la croissance en tache des cultures et souvent par la présence de croûte blanche très visibles. L'étendue et la fréquence de ces taches de croissances sont souvent de bonnes indications de la concentration des sels dans le sol, si le niveau de salinité n'est pas suffisant, provoquer ces taches l'allure générale des plantes sera tout de même irrégulière du point de vue vigueur végétative. Les plantes poussant dans des sols salés ont généralement la même allure que celles poussant dans des conditions d'humidité stressante. Cependant le flétrissement de la plante est moins prévalent dans le premier cas, du fait que le potentiel osmotique de la solution sol change de façon graduelle et que les plantes peuvent ajuster leurs taux internes de sels de façon suffisante pour maintenir la rigidité de leurs cellules et éviter le flétrissement. Autre signe visible est le manque de réponse aux fertilisants, en effet, vu que la plupart des nitrates inorganiques et les potassiums sont des sels solubles, leur application augmente souvent le problème de sels en excès. Certains fertilisants organiques tels que le fumier frais contiennent également des sels solubles aggravant encore le phénomène.

II/2/4 L'effet osmotique

Irriguer avec de l'eau chargée en sels réduit la faculté des racines à puiser de l'eau du sol. Entre deux irrigations, alors que l'humidité du sol diminue, les sels de la solution du sol se

concentrent deux à cinq fois leur valeur initiale ; ceci cause une augmentation de la pression osmotique de la solution sol et rend encore plus difficile aux racines l'extraction de l'eau c'est ce qu'on appelle **la sécheresse physiologique**. Les concentrations médiocres dues à l'irrigation avec des eaux saumâtres et salées sont généralement provoquées par ce phénomène de stress osmotique cause par la concentration totale des sels plutôt qu'à cause d'ions particuliers. Le processus de salinisation commence lorsque l'eau s'évapore, laissant des sels qui s'accumulent à la surface du sol ou à proximité, formant dans le profil du sol des croûtes blanches ou des précipités cristallins. La salinité se mesure par la conductivité électrique (CE) du sol ou de l'eau d'irrigation.

Au-delà de 4 mmhos/cm, on parle de condition saline pour le sol. Les plantes qui supportent un milieu salin sont dites : **Halophytes** (*Suaeda maritima* et *Spartina sp.* Certaines plantes halophytes sont considérées comme des régulateurs de salinité. Excrétion des sels par les racines ou dans des glandes à sel.

Les plantes qui ne tolèrent pas le sel sont dites glycophytes (Exemple : le haricot vert *Phaseolus vulgaris*, le riz (*Oryza sativa*) et le maïs (*Zea mays*) .

Il peut y avoir un stress alcalin ; le rapport d'absorption du sodium (SAR) une concentration excessive en sodium, peut provoquer la dispersion des minéraux argileux et entraîner une dégradation de structures du sol ; le risque alcalin est caractérisé par le rapport, les concentrations (méq.l-1) en sodium (facteur de dispersion) et en calcium et magnésium (agents de floculation).

II/2/5 La toxicité d ions particuliers

Des concentrations excessives d'ions sodium et chlorures dans l'eau d'irrigation peuvent causer une toxicité dans la plante; ces ions peuvent être absorbés soit par les racines ou par les feuilles.

- Absorption par les racines. Les ions chlorures peuvent être absorbés par les racines et s'accumulent dans les feuilles provoquant des brûlures aux extrémités des feuilles avec aussi un jaunissement prématuré. En général, la plupart des plantes boisées sont sensibles à ces ions ; alors que la majorité des légumes, plantes fourragères et fibreuses y sont moins sensibles. Les symptômes de toxicité du sodium sont les brûlures de feuilles et dessèchement et la mort des tissus sur les bords extrêmes des feuilles contrairement aux symptômes causés par les ions chlorures qui apparaissent à

l'extrémité des feuilles. Des hautes concentrations en ions sodium dans l'eau d'irrigation peut causer une déficience en ion calcium et potassium.

La présence excessive des ions sodium et chlorures et boriques peut provoquer une augmentation dans le Ph du sol ce qui a un effet indirect sur l'impossibilité d'absorption des ions ferreux, phosphates, zinc et Mn indispensables pour la croissance des végétaux.

- Certaines cultures présentent de dommages foliaires lorsqu'elles sont arrosées par des solutions salines, les dommages vont de la tuerie et brûler les feuilles qui sont en contact avec la solution saline ; les dommages sont plus importants par temps sec, les sels se concentrent à la surface des feuilles.

II/2/6/La notion D' épictèses

Pour assurer son apport en eau, la plante ajuste sa pression osmotique de ses tissus par rapport à la pression osmotique du sol. Ce phénomène nommé épictèse permet à la plante d'assurer une hypertonie constante

Les plantes halophytes présentent un haut pouvoir d'épictèse contrairement aux plantes glycophytes, les ions chlore et sodium sont stockés dans la vacuole cela permet l'établissement d'une pression osmotique interne importante

II/2/7/Les osmoprotecteurs

Les halophytes (occasionnellement les glycophytes) sont capables de lutter contre la déshydratation par la synthèse de composés dits Osmoprotecteurs (ou solutés compatibles), ces composés par leurs concentrations assurent l'ajustement osmotique entre le cytosol et la vacuole (La proline, pinitol, alanine, betaine, Glycine, Sorbitol)

II/ 3 /Le stress thermique

Bien ancrés dans le sol, les végétaux ne se déplacent pas, mais plusieurs adaptations leur permettent de s'adapter à leur environnement, et notamment aux conditions climatiques. Les végétaux ont ainsi développé des véritables stratégies pour résister au froid hivernal.

Le développement d'une résistance des plantes au froid dépend de certaines mesures des propriétés biologiques, ainsi que des modifications internes qui s'effectuent dans l'organisme d'une plante pendant la période pré-hivernale.

L'effet de la température sur les plantes indique que c'est un facteur majeur de répartition des végétaux, qu'ils soient situés aux fortes altitudes, en montagne, ou aux fortes latitudes, près des pôles. La température agit sur de nombreux phénomènes physiologiques : transpiration, photosynthèse, absorption, floraison, germination... La température d'une plante dépend de son espèce et de son stade de développement.*Certaines températures sont caractéristiques : Le zéro de végétation ou de germination : C'est **la température minimale** en dessous de laquelle la croissance est nulle.

Les températures létales : Le maximum possible pour la plante et le minimum sous lesquels la plante meurt (exp 50°C max et -15°C minimum) Mais existent des plantes qui ont colonisé des zones où les températures peuvent atteindre -60°C

Température optimale de croissance : C'est une valeur de température pour laquelle la croissance est la meilleure

II/3/1/ Le stress au froid

Les plantes réagissent différemment aux températures extrêmes. Certaines plantes sont capables de survivre au gel. La croissance et le développement exigent, pour chaque plante, une gamme de température. Température optimale de croissance et de développement. C'est la formation de glace et non la basse température qui endommage les cellules végétales. La formation de glace provoque la rupture des structures cellulaires et entraîne inévitablement la mort de la plante. L'acclimatation est induite par les jours courts, contrôlé par le phytochrome. L'acclimatation se fait par des modifications métaboliques son enclenchées pour permettre à la plante de s'acclimater. On peut citer, l'augmentation de la concentration de phosphates organiques et la conversion de l'amidon en glucides aussi, l'accumulation de **glycoprotéines** rendant le protoplasme plus résistant à la déshydratation, et enfin, l'accroissement de concentration de l'acide abscissique (ABA) et particulièrement pour certains organes de plantes herbacées. Beaucoup de plantes en particulier celles originaires des régions à climat chaud sont endommagées par une exposition à des températures basses mois de zéro degré. Des signes de lésions peuvent revêtir plusieurs formes qui dépendent de l'espèce, l'âge, ainsi que de la durée d'exposition au froid, des signes de chlorose, flétrissement et arrêt de croissance, il apparait aussi un brunissement ou nécrose qui montre la mort des tissus. Le dommage par le froid touche aussi le fonctionnement de la plante, d'où

réduction de la respiration, photosynthèse et perturbation des mouvements de cyclose du cytosol.

Comme il est connue les lipides des membranes sont formés par des acides gras saturés et insaturés. Les Acides gras saturés et les lipides qui les contiennent se solidifient à des températures plus élevées que les acides gras insaturés. Une modification de la membrane passant de l'état fluide à un état de gel (semi cristallin) est marquée par une transition abrupte. La température à laquelle s'effectue la modification est dite température de transition.

Les plantes qui sont sensibles aux basses températures ont tendance à posséder une température de transition élevée du à une proportion importante des acides gras saturés. Ex *Vigna radiata* la Température de transition est 14 degré ainsi la plante pousse mal au dessous de 15 degré

Les plantes résistantes au froid au contraire tendance à renfermer une proportion d'acides gras saturés plus faibles et par conséquent une température de transition plus basse. Durant l'acclimatation la proportion d'acides gras insaturés augmente et la température de transition diminue. Les basses températures **augmentent les liaisons hydrogènes** inter et intra moléculaires et **diminue les liaisons hydrophiles**, il s'établie ainsi un durcissement des chaines lipidiques la membrane passe de l'état fluide à l'état de gel (semi cristallin), il s'effectue une rupture de l'intégrité des canaux membranaires et donc une décompartmentation et une fuite des solutés. Ainsi, le passage de la membrane de l'état liquide à l'état semi cristallin à des températures basses touche l'intégrité des membranes, les canaux sont obtures et par conséquent il s'établie une fuite des solutés. Les photosystèmes et les autres systèmes métaboliques localisés dans les membranes sont déstructurés, les membranes des plantes résistantes ou acclimatées au froid restent fluides et par conséquent elles protègent les fonctions des cellules contre les endommagements. En réalité, Les lipoprotéines des membranes sont souples et à structure rigoureuse, le rôle de la température porte sur deux points dont la disposition réciproque des molécules et la souplesse, voir la fluidité de l'ensemble des structures. L'effet du froid modifie l'activité enzymatique membranaire, par conséquent, il s'établie une modification dans la capacité d'échange entre les compartiments cellulaires ; aussi, l'assemblage des protéines qui constituent les systèmes respiratoires, les photosystèmes et aussi les autres systèmes métaboliques localisés dans la membrane sont déstructurés.

La tolérance au gel est importante en agriculture, En effet, la capacité à résister aux gelées printanières tardives ou automnales précoces peut conditionner le succès d'une culture. En réalité, l'effet du gel agit par la formation de la glace et non pas la basse température en soi qui endommage les cellules végétatives. Des tissus déshydratés peuvent résister aux basses températures zéro degré ou à une congélation très rapide ex immersion dans l'azote liquide (-195 degré) ceci résulte d'une vitrification de l'eau, ce qui signifie que l'eau se solidifie sans former des cristaux de glace ou alors tout cristal qui se forme est tellement petit qu'il est incapable de provoquer un quelconque dommage mécanique aux structures cellulaires

L'acclimatation aux basses températures exige de l'énergie produite par la lumière, et la photosynthèse et implique des modifications de l'expression génique, durant l'acclimatation la synthèse des protéines augmente, ex 8 nouvelles protéines apparaissent dans la luzerne et 3 dans l'épinard. Il existe de bonne raison de penser que l'ABA pourrait être impliqué dans l'acclimatation des organes des végétaux. Il a été remarqué que la teneur de l'ABA augmente dans les tissus acclimatés au gel, aussi un traitement exogène de cals de luzerne par l'ABA augmente le pourcentage de survie des cals traités par le froid, l'ABA induit la synthèse des protéines.

- **Autres effet du froid sur le comportement du végétal**

Effet sur les mouvements des solutés

Les mouvements des solutés qui se déroulent dans les tissus spécialisés (xylème et phloème) ou le long des organes (tige, pétiole) sont affectés par les basses températures d' ou :

- Ralentissement de transport des assimilés
- Augmentation de la viscosité de la sève
- Diminution de la perméabilité des racines
- Diminution du flux d'eau

En microscope électronique on observe que les pores des tubes criblés sont obturés sous l'effet du gel et le transport des métabolites devient difficile par le froid.

Effet sur la respiration

Le rôle de la respiration est de fournir une source d'énergie (ATP) pour toutes les réactions métaboliques, la diminution de la température entraîne une diminution dans la respiration, la mitochondrie perd la capacité à oxyder les substrats du cycle de Krebs. Les perturbations dans le rendement en ATP n'apparaissent que si les cellules sont exposées à de très basses températures provoquant une désorganisation du système membranaire

Effet sur la photosynthèse

L'effet des basses températures ne porte pas directement sur les vitesses de synthèse mais plutôt sur les dégradations des chlorophylles photosensibles qui ne sont plus protégés par un écran de caroténoïdes, une structure membranaire que le froid désorganise.

La thermo sensibilité n'est pas indifférente à l'âge des organes, les jeunes feuilles en formation présentent des dommages pigmentaires.

II/3/2/ Les effets des hausses températures sur les plantes

Les structures des macromolécules et les forces de cohésions assurant leur édifice et leur assemblage sont profondément modifiées par les variations des températures, essentiellement les protéines et les lipides. En effet, toute augmentation de température au-delà d'une certaine valeur provoque la dénaturation des grosses molécules fragiles essentiellement les enzymes, les hausses températures provoquent la rupture des liaisons hydrogènes et augmentent les forces hydrophiles au niveau des membranes par conséquent un état physique plus fluide s'établit, une lésion des parois due à la chaleur peut être mesurée par la fuite des ions, il s'établit une augmentation dans la fonte des lipides membranaires, d'où une rupture des membranes et fuite du contenu cellulaire; l'augmentation de la température implique un déficit hydrique, il s'ensuit une augmentation dans la transpiration qui aboutit à la fanaison ou flétrissement de la plante. L'augmentation de la température aussi, se traduit sur les plantes par une consommation des réserves et une réduction dans l'accumulation de la matière sèche. Les températures élevées sont souvent accompagnées par de hautes radiations et des faibles humidités du sol, ce qui engendre une forte transpiration. Dans de telles conditions, il est très difficile de connaître la part de chaque stress. L'adaptation, pour éviter la surchauffe se fait généralement par **une position plus verticale des feuilles** (cas des graminées), les feuilles s'enroulent verticalement, la production de poils foliaire (pubescence), les surfaces foliaires deviennent cireuses qui réfléchissent la lumière et le rayonnement, production de petites

feuilles découpées pour réduire la perte d'eau par transpiration. Les températures élevées peuvent agir sur le métabolisme de la plante en inhibant la synthèse de la plupart des protéines, La synthèse d'autres protéines est actionnée : les protéines de choc thermique (heat shock proteins HSPs) et l'Ubiquitine. Les dégagements gazeux des activités humaines accroissent substantiellement les concentrations des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, particulièrement le dioxyde de carbone, le méthane, les chlorofluorocarbones et les oxydes nitreux. Les modèles de circulation globale prédisent que ces accroissements de concentrations de gaz à effet de serre augmenteront la température moyenne mondiale. Les températures moyennes globales augmenteront de 0,3°C par décennie au cours du siècle prochain avec une incertitude de 0,2 à 0,5%. Donc, les températures moyennes seraient 1°C au-dessus des valeurs actuelles d'ici 2025 et 3°C d'ici 2100. Quoique les modèles de circulation globale ne soient pas tous d'accord sur la grandeur, la plupart prédisent un réchauffement dû à l'effet de serre. Il existe aussi un accord général sur le fait que le réchauffement global sera plus grand aux latitudes plus élevées qu'aux tropiques. Les divers modèles de circulation globale ont prédit que les effets du réchauffement global varieront de façon diurne et saisonnière ainsi qu'avec l'altitude. Il est aussi possible qu'il y ait une composante autocatalytique au réchauffement global. La photosynthèse et la respiration des plantes et des microbes augmentent avec la température, surtout aux latitudes tempérées. Au fur et à mesure que la respiration croît plus avec la température que ne le fait la photosynthèse, le réchauffement global provoquera probablement un flux de dioxyde de carbone vers l'atmosphère qui constituerait une réaction positive au réchauffement global.

II/3/2/1/Les mécanismes de tolérance à la chaleur

Les plantes de culture sont immobiles. Elles doivent s'adapter aux conditions dominantes du sol et de la météo. Sauf pour le refroidissement dû à la transpiration, les plantes sont incapables d'adapter d'une manière significative la température de leurs tissus. Par contre, les plantes ont mis au point plusieurs mécanismes qui leur permettent de tolérer de plus hautes températures. Ces mécanismes adaptatifs thermotolérants reflètent l'environnement dans lequel une espèce a évolué et ils dictent grandement l'environnement dans lequel une culture peut croître.

Quatre aspects majeurs de thermotolérance ont été étudiés:

- (1) la dépendance **thermique aux niveaux biochimique et métabolique**;
- (2) la **tolérance** thermique en relation avec la **stabilité membranaire**;
- (3) la thermotolérance induite par une augmentation graduelle de température vis-à-vis de la production de **protéines contre le choc thermique**;
- (4) la photosynthèse et la productivité pendant un stress thermique élevé.

II/3/2/2/Les processus biochimiques

Les effets de la température sur les vitesses de réactions biochimiques peuvent être modélisés comme le produit de deux fonctions, une vitesse de réaction progressive croissant exponentiellement et une chute exponentielle résultant d'une dénaturation enzymatique avec l'augmentation de la température (Figure. 3a) La grande préoccupation est de savoir s'il est possible d'accroître la limite supérieure de la stabilité enzymatique pour empêcher la dénaturation.

La défaillance d'un seul système enzymatique critique peut causer la mort d'un organisme. Ce fait peut expliquer pourquoi la plupart des espèces de cultures survivent à des températures élevées prolongées jusqu'à une gamme assez étroite de 40 à 45 °C. La relation entre l'environnement thermique d'un organisme et la dépendance thermique des enzymes a été bien établie

La forme de cette fonction décrit aussi les effets de la température sur la plupart des fonctions biologiques, y compris la croissance et le développement des plantes. La fonction peut être catégorisée par les trois températures cardinales-minimum, optimum et maximum. Les modélisateurs simplifient fréquemment la relation en une fonction incrémentielle linéaire. Cette fonction présente un plateau plutôt qu'un optimum de température (Figure 3.b).

La dépendance thermique de la vitesse apparente de réaction pour des enzymes sélectionnées peut indiquer la gamme thermique optimale pour une plante. La gamme dans laquelle la constante apparente de Michaelis-Menten pour le CO₂ (K_m) est minimale et stable est appelée la fenêtre cinétique thermique. Pour les plantes de culture, **la Fenêtre Cinétique Thermique (FCT)** est généralement établie comme un résultat des changements de la phase lipidique induits thermiquement, de l'activité rubisco et de l'itinéraire de synthèse de l'amidon dans les feuilles et les organes reproductifs.

Chez le coton et le blé, le temps pendant lequel la température du feuillage reste dans la FCT est lié à l'accumulation de matière sèche. Le temps cumulé pendant lequel le feuillage de cultures pluviales est en dehors de la FCT donne l'indice du degré de stress thermique extrême de l'environnement (Figure. 4). L'irrigation est une option de gestion pour réduire l'exposition de la culture au stress thermique. Les températures qui inhibent le métabolisme et la croissance cellulaires pour une espèce C₃ de saison froide comme le blé peuvent ne pas inhiber des espèces C₃ de saison chaude comme le riz (*Oryza sativa* L.) et C₄ comme le sorgho, le maïs (*Zea mays* L.) et la canne à sucre (*Saccharum spontaneum* spp.). L'identification des FCTs de diverses espèces peut aider à l'interprétation des réponses différentielles au stress thermique pour la croissance et le développement des cultures au sein des espèces.

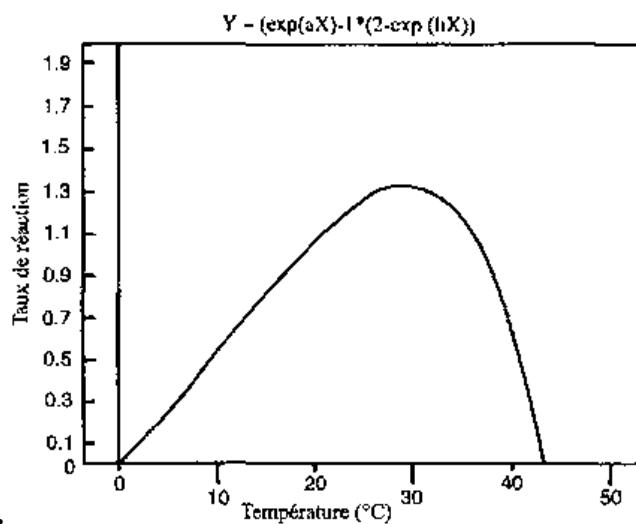


Figure 3. (a) Taux exponentiel de réaction en fonction de la température

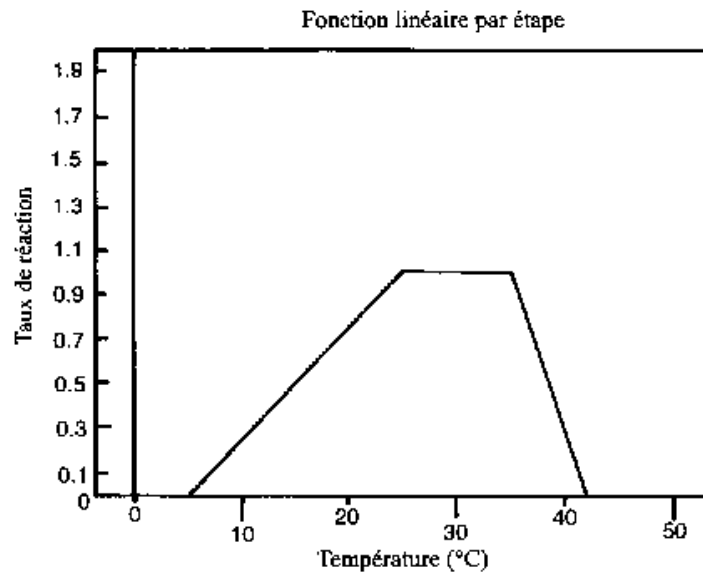


Figure 3.(b) Accroissement par étape du taux de réaction en fonction de la température.

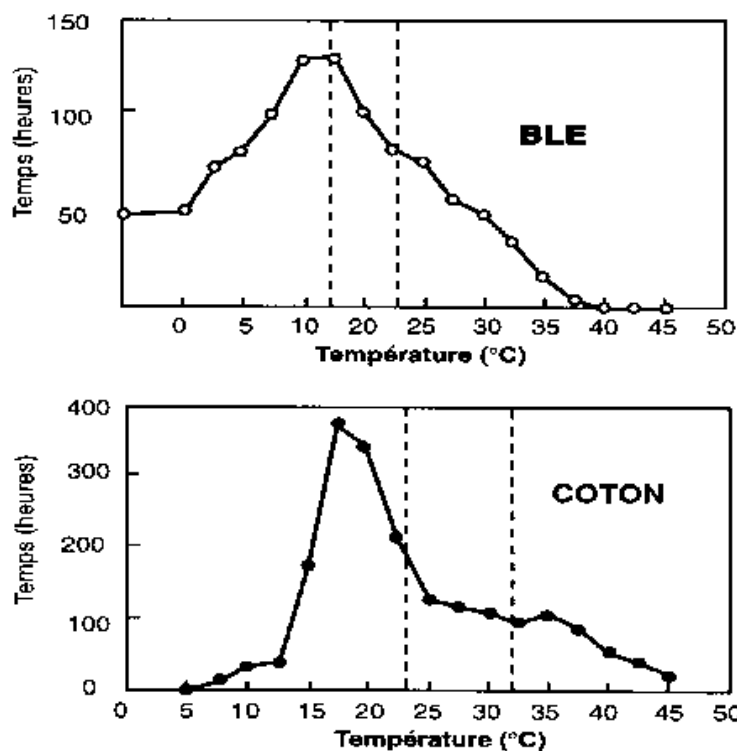


Figure. 4. Températures saisonnières du feuillage de blé et du coton

Les lignes verticales représentent la gamme de températures qui comprend la fenêtre cinétique thermique des espèces spécifiques, déterminée à partir des changements du K_m apparent des enzymes purifiées dus à la température. Les températures du feuillage étaient mesurées dans un champ de vision de 50° avec un thermomètre infrarouge de type Teletemp Model 50 placé à 1,5 m au-dessus de la culture. L'appareil scannait le couvert toutes les minutes et les données étaient moyennées et stockées toutes les 15 minutes. Le thermomètre à infrarouge mesurait une surface de $0,75 \text{ m}^2$, la même surface était continuellement échantillonnée (d'après Burke et al., 1988; reproduit avec autorisation)

II/3/2/3/ La stabilité thermique des membranes cellulaires

Les parois et les membranes des organelles cellulaires jouent un rôle vital dans le fonctionnement des cellules. Tout effet néfaste d'un stress thermique sur les membranes conduit à la rupture de l'activité cellulaire ou à la mort. Une lésion aux parois, due à la chaleur, peut être mesurée par une fuite ionique. Une lésion aux membranes due à un stress soudain de chaleur peut provenir soit de la **dénaturation des protéines membranaires soit de la fonte des lipides membranaires** qui conduit à la rupture des membranes et à la perte du contenu cellulaire.

Le stress thermique peut être oxydant. La peroxydation des lipides membranaires, un symptôme de lésion cellulaire, a été observée à hautes températures. La synthèse renforcée d'un anti-oxydant par les tissus végétaux peut accroître la tolérance cellulaire à la chaleur mais aucun anti-oxydant de la sorte n'a été identifié de façon positive.

Une relation entre la composition en lipides et la température d'incubation a été montrée chez les algues, les champignons et des plantes supérieures. Chez *Arabidopsis* exposé à des températures élevées, la teneur totale en lipides descend environ de moitié et le rapport entre acides **gras non saturés** et **saturés** descend à environ un tiers des niveaux des températures dans la FCT. Une augmentation en **acides gras saturés dans les membranes accroît leur température de fonte et donc la tolérance à la chaleur**. Chez le coton, cependant, la tolérance à la chaleur n'est pas corrélée au degré de saturation en lipides et des différences similaires dans les différences génotypiques de tolérance à la chaleur n'ont pas été reliées à la saturation en lipides des membranes dans d'autres espèces. Chez de telles espèces, un autre facteur que la stabilité membranaire peut limiter la croissance à haute température.

II/ 3/2/4/Les protéines du choc thermique

La synthèse et l'accumulation de protéines furent constatées pendant un stress thermique rapide. On les nomme les 'Heat Shock Proteins' (HSPs). Par après, on a montré que la production accrue de ces protéines a lieu aussi lorsque les plantes subissent une augmentation graduelle de température plus typique de celle expérimentée dans un environnement naturel.

Trois classes de protéines basées sur le poids moléculaire rendent compte de la plupart des HSPs, à savoir HSP90, HSP70 et les protéines à faible poids moléculaire de 15 à 30 kDa (Low Molecular Weight HSP: LMW HSP). Les proportions des trois classes diffèrent au sein

des espèces. En général, les protéines du choc thermique, les HSPs, sont induites par un stress thermique à n'importe quel stade du développement. Dans les conditions d'un stress thermique maximum, les mRNAs des HSP70 et HSP90 peuvent augmenter dix fois et les LMW HSP croissent jusqu'à 200 fois.

En régions arides et semi-arides, les cultures en terres sèches peuvent synthétiser et accumuler des niveaux substantiels de HSPs en réponse à des températures foliaires élevées. La température d'induction pour la synthèse et l'accumulation des HSPs chez le coton cultivé en laboratoire variait de 38 à 41°C. Les déficits en eau du sol mesurés à mi-journée à des températures de 40°C ou plus pendant deux à trois semaines furent utilisés pour étudier les protéines du choc thermique chez le coton cultivé au champ. Une comparaison des combinaisons de polypeptides dans les feuilles de coton cultivé en terres sèches et en irrigué montrèrent qu'au **moins huit nouveaux polypeptides s'étaient accumulés dans à peu près la moitié des feuilles analysées cultivées en sec**. Les polypeptides accumulés dans les feuilles cultivées en sec mais pas dans les feuilles de coton irrigué avaient des poids moléculaires de 100, 94, 89, 75, 60, 58, et 21 kDa. Dans un essai semblable avec du soja cultivé au champ (*Glycine max* (L.) Merr.), plusieurs HSPs furent observées dans les deux traitements, irrigué et en sec, malgré que les niveaux étaient plus hauts dans les traitements non irrigués. Une corrélation entre la synthèse et l'accumulation de HSPs et la tolérance à la chaleur suggère, mais ne prouve pas, que les deux soient liées causalement. On trouve une évidence de plus pour une relation causale dans le fait que certaines différences dans les HSPs de cultivars sont corrélées avec des différences de thermotolérance. Dans des essais génétiques, l'expression de la protéine du choc thermique se regroupe avec la tolérance à la chaleur. Une autre évidence pour le rôle protecteur de la protéine du choc thermique est que les mutants sont incapables de synthétiser les HSPs, et les cellules dans lesquelles la synthèse de HSP70 est bloquée ou inactivée, sont plus susceptibles de lésion thermique.

Le mécanisme par lequel les protéines du choc thermique contribuent à la tolérance à la chaleur est encore incertain. Une hypothèse est que la HSP70 participe aux réactions du déroulement ou d'assemblage/désassemblage d'une protéine dépendante de l'ATP et qu'elles empêchent la dénaturation protéinique pendant le stress. Si ce mécanisme est vrai, alors les protéines du choc thermique peuvent fournir une base importante pour accroître la tolérance à la chaleur des plantes de cultures dans le cas du réchauffement global. **Les LMW HSPs peuvent jouer un rôle structurel pour conserver l'intégrité de la membrane cellulaire**

pendant le stress. D'autres HSPs ont été associées à des organelles particulières telles que les chloroplastes, les ribosomes et les mitochondries. Chez la tomate (*Lycopersicon esculentum* L.), les HSPs s'agglomèrent en une structure granulaire dans le cytoplasme en protégeant peut-être la machine de synthèse des protéines.

II/3/2/5/La photosynthèse et le stress de température élevée

L'assimilation du CO₂ chez les plantes supérieures s'annule généralement lorsque la température atteint 45 – 50° 5 (OPTIMAL 30°), parmi les causes possibles qui expliquent cette inhibition c'est la destruction des membranes cellulaires, d'où une diminution de la photosynthèse et augmentation de la fluorescence, diminution aussi de la chlorophylle a et b

La variabilité des vitesses photosynthétiques foliaires au sein d'une ou entre les espèces n'est pas souvent liée aux différences de productivité. De même, de grandes vitesses photosynthétiques à hautes températures ne supportent pas nécessairement de grandes vitesses d'accumulation de matière sèche. L'optimum des températures pour la photosynthèse est large, supposément parce que les plantes de cultures se sont adaptées à une gamme relativement large d'environnements thermiques. Une augmentation de température moyenne de 1 à 2°C n'aura probablement pas un impact substantiel sur les vitesses de photosynthèse foliaire. De plus, il y a une possibilité pour que la photosynthèse des plantes de cultures puisse s'adapter à une augmentation lente des températures globales moyennes. Dès lors, graduellement ou en se basant sur un couvert végétal fermé, le réchauffement global n'affectera probablement pas les vitesses de photosynthèse par unité de surface foliaire au cours du siècle prochain.

Alors que les vitesses photosynthétiques apparaissent sensibles à la température dans d'autres cultures, le blé et le riz semblent réagir différemment. Chez le blé, il n'y a pas de différences mesurables de vitesses photosynthétiques par unité de surface foliaire ou sur base de la plante entière dans la gamme des températures de 15 à 35°C En ce qui concerne le riz, il y a un petit effet de température sur l'assimilation foliaire du dioxyde de carbone de 20 à 40°C

Une recherche récente a montré une variation importante au sein de cultivars de blé dans le sens d'une réduction de la photosynthèse à très haute température. La photosynthèse d'un germoplasme adapté à des environnements de plus hautes températures était moins sensible à haute température qu'un germoplasme venant d'environnements plus froids. Les génotypes les plus tolérants aux températures élevées avaient les vitesses de photosynthèse foliaire les plus

stables à tous les régimes de températures ou la plus longue durée d'activité de la photosynthèse foliaire après la floraison et des poids de grain élevés.

II/3/2/6/Les effets de températures extrêmes sur les cultures

Il y a deux formes principales de stress de températures extrêmes sur les cultures - la chaleur et le froid. Une augmentation des températures globales peut avoir l'un ou les deux de ces effets intenses: un stress plus fréquent de haute température et un stress moins fréquent de température froide.

Une hausse de température allongera la saison effective de croissance dans les régions où le potentiel agricole est habituellement limité par un stress de température froide. Donc, une température accrue causera un déplacement vers les pôles des limites thermiques de l'agriculture. Ce déplacement vers les pôles sera spécialement important pour les cultures telles que le riz qui a des centres tropicaux d'origine et d'adaptation mais qui sont aussi cultivées aux latitudes tempérées pendant les saisons chaudes. Le réchauffement global sera plus grand dans l'hémisphère nord que l'hémisphère sud parce qu'il y'a plus de surface cultivée aux hautes latitudes dans l'hémisphère nord.

Une température accrue affecterait aussi le calendrier des cultures en régions tropicales. Cependant, aux tropiques, le réchauffement global, quoique prédit de faible ampleur, réduirait probablement la longueur de la saison de croissance effective, particulièrement là où l'on fait plus d'une culture par an. En régions semi-arides et dans d'autres zones agro-écologiques où il y a une large variation des températures diurnes, les modifications relativement petites des températures annuelles moyennes élèveraient de façon marquée la fréquence des lésions dues aux plus hautes températures. Par exemple, la température du couvert végétal est plus haute de 10 à 15°C chez le coton (*Gossypium hirsutum* L.) cultivé en terres sèches que chez l'irrigué. Donc, le réchauffement global réduirait l'accumulation de matière sèche chez le coton cultivé en sec à cause d'une respiration accrue et d'une photosynthèse et d'énergies cellulaires réduites.

En Inde, la saison de croissance du blé est limitée par les hautes températures au semis et pendant la maturation. Comme le blé est cultivé dans une large gamme de latitudes, il est fréquemment exposé à des températures supérieures au seuil du stress de chaleur. Par exemple, le blé pluvial dépend de l'humidité restant dans le sol après la récession des pluies

de mousson en septembre. Les températures maximales et minimales élevées en septembre (environ 34/20°C), qui menacent l'établissement des plantules, accélèrent tôt le développement végétatif, réduisent le couvert végétal, le tallage, la taille des épis et le rendement. D'où, le semis est traditionnellement reporté après la mi-octobre lorsque les couches de semis ont refroidi quoiqu'une grande partie de l'humidité du sol soit perdue. Des températures élevées au cours de la seconde moitié de février (25/10°C), en mars (30/13°C) et en avril (30/20°C) réduisent le nombre de fleurons viables et la durée de remplissage des grains. Le stress de chaleur réduit particulièrement le rendement du blé semé nécessairement en décembre/janvier dans certaines régions à cause du système multiculturel. La situation est la même pour le sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) et le millet perlé (*Pennisetum glaucum* (L.) qui sont exposés à des températures extrêmement élevées au Rajasthan, Inde. Après semis, les températures de l'air et du sol excèdent 40°C et les températures à la surface du sol en mi-journée dépassent régulièrement 50°C (Figure .5). Les effets aigus d'une température élevée sont les plus frappants quand le stress de chaleur se produit pendant la floraison. Chez le riz, le stress de chaleur à l'anthèse empêche la déhiscence des anthères et l'éjection du pollen, ce qui réduit la pollinisation et le nombre de grains. En clair, beaucoup de cultures en régions tropicales sont déjà soumises au stress de chaleur. Si les températures montent plus haut, la défaillance des cultures dans certaines régions traditionnelles deviendrait de plus en plus courante.

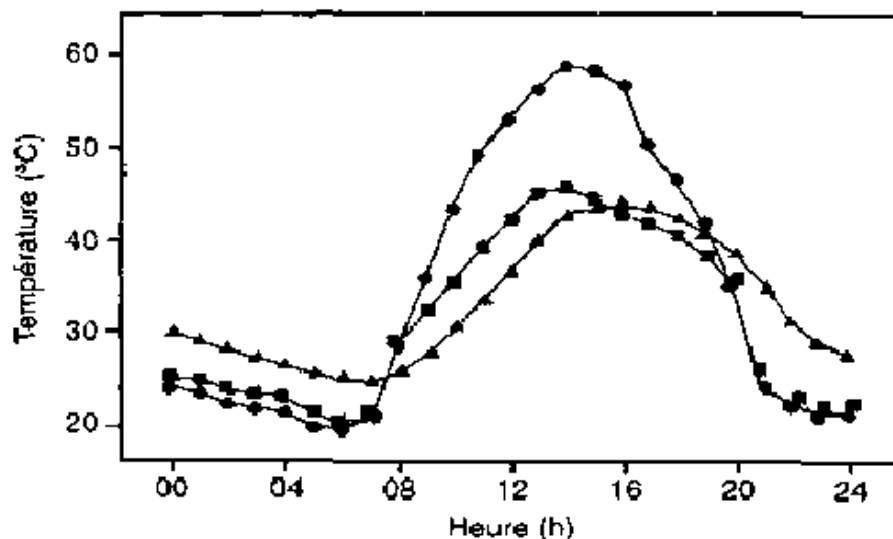


Figure .5. Données de température diurne enregistrées à Fatehpur, Rajasthan, Inde. (Latitude 27°37'N en juin 1989). Chaque mesure est la valeur moyenne de trois thermocouples placés soit à 5 cm de profondeur dans sol (▲), soit à 0,5 cm de profondeur dans sol (●), ou 150 cm au-dessus de la surface du sol (■). (Howarth (1991); reproduit avec autorisation.)

II/3/2/7/ Les effets à long terme de températures élevées sur les cultures

Plus importants que les effets aigus du stress dû à une température extrême sont les effets chroniques de températures continuellement plus chaudes sur la croissance et le développement des plantes. Les effets chroniques d'une haute température comprennent les effets sur la croissance des grains discutée ci-avant. Les rendements de cultures record reflètent clairement l'importance des effets en cours de saison sur les rendements des cultures: les cultures produisent généralement le plus là où les températures sont froides pendant la croissance de la composante récoltée. Les simulations de croissance des cultures montrent que les rendements du riz chutent de 9% par degré de hausse de la température moyenne saisonnière. Cet effet chronique d'une haute température diffère fortement de l'effet aigu d'événements thermiques à court terme parce que les effets de la température saisonnière résultent principalement des effets sur le développement des cultures. Dans la plupart des cultures de grain, il y a une variation génotypique beaucoup plus grande dans les exigences thermiques du développement végétatif que reproductif. Au fur et à mesure de l'augmentation à long terme des températures, les périodes de remplissage des grains diminuent et il semble y avoir peu de perspective pour manipuler cet effet par le biais de la variation génétique existant au sein des espèces.

II/4/Le stress biotique

II/4/1/Le stress provoqué par les insectes et maladies

Les plantes ont développé des stratégies pour lutter contre les insectes et les maladies. Parmi ces stratégies :

Secrétions de métabolites :

-Isoflavonoïdes et d'autres métabolites secondaires appelés Phytoalexines qui aident les plantes à se défendre contre les insectes (bio agresseurs) et les maladies. Exemple : **Acide salicylique**.

II/4/2/Le stress provoqué par les polluants

Métaux lourds : Comme pour les autres stress la sensibilité des plantes aux métaux lourds varie d'une espèce à une autre. Souvent les métaux lourds ne sont pas absorbés par les racines du fait de la sélectivité des membranes des cellules des racines : C'est une forme d'évitement. D'autres espèces (Légumineuses comme *Astragalus*) tolérantes aux métaux lourds, accumulent les métaux, ce sont les espèces accumulatrices.

Pollution de l'air : Les principaux polluants gazeux : CO₂, CO, SO₂, NO₂. Ces derniers pénètrent dans les feuilles par les stomates. Les premiers à être touchés par ces polluants sont les chloroplastes (photosynthèse perturbée).

Chapitre III La floraison des végétaux

La floraison est l'un des caractères qui détermine le cycle de vie des plantes, elle correspond au passage du bourgeon végétatif au bourgeon floral. Le bourgeon comprend un massif de cellules embryonnaires capables de se diviser et donnent naissance à des tiges, racines, ou à une fleur dans ce cas le méristème est dit reproducteur (Figure .6). La plante reçoit des signaux externes pour fleurir (température, lumière), ces signaux sont perçus par des récepteurs endogènes qui contrôlent la floraison, la mise en place de la fleur passe par trois étapes (induction florale, évocation et initiation florale) ; La transition du bourgeon végétatif en bourgeon floral est irréversible

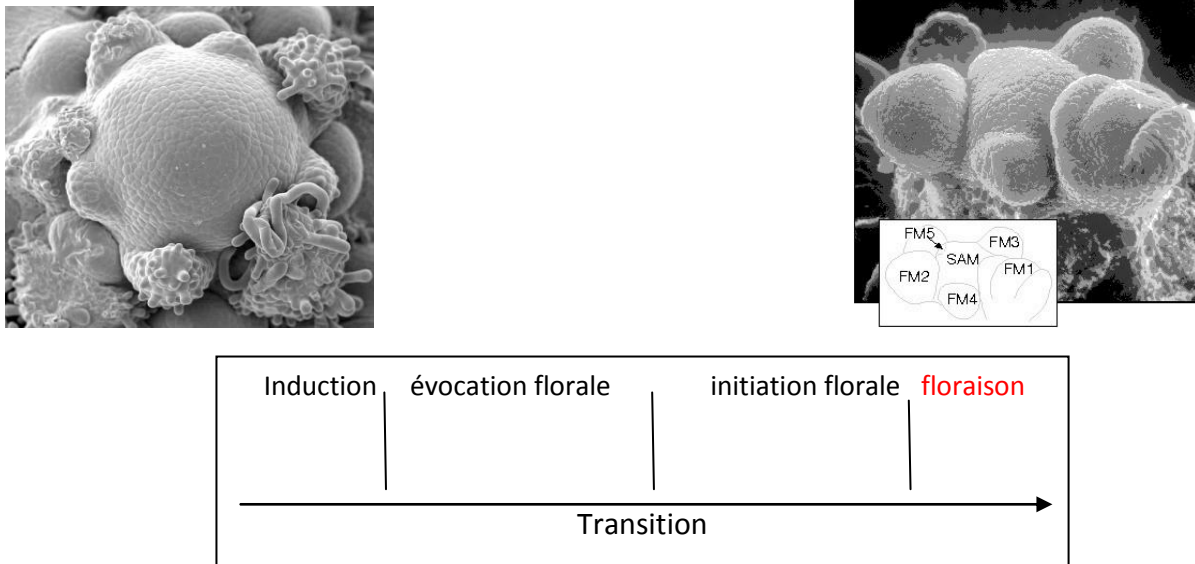


Figure .6 Transition du bourgeon végétatif en bourgeon floral

III/1/Les étapes de la transition

a) L'induction florale correspond au passage du méristème végétatif au méristème floral.

Sous l'effet d'un stimulus externe certains organes de la plante envoient au méristème **un signal de floraison**

b) Evocation florale correspond à la période où le méristème se réorganise en fonction de ce programme ou en fonction de ce signal, elle correspond à la différenciation des ébauches foliaires

c) L'initiation : période où se différencient les ébauches des pièces florales. A cette étape fait suite la floraison qui se manifeste par le développement des pièces florales (sépalés, pétales etc...) c'est l'épanouissement de la fleur (Figure. 7)

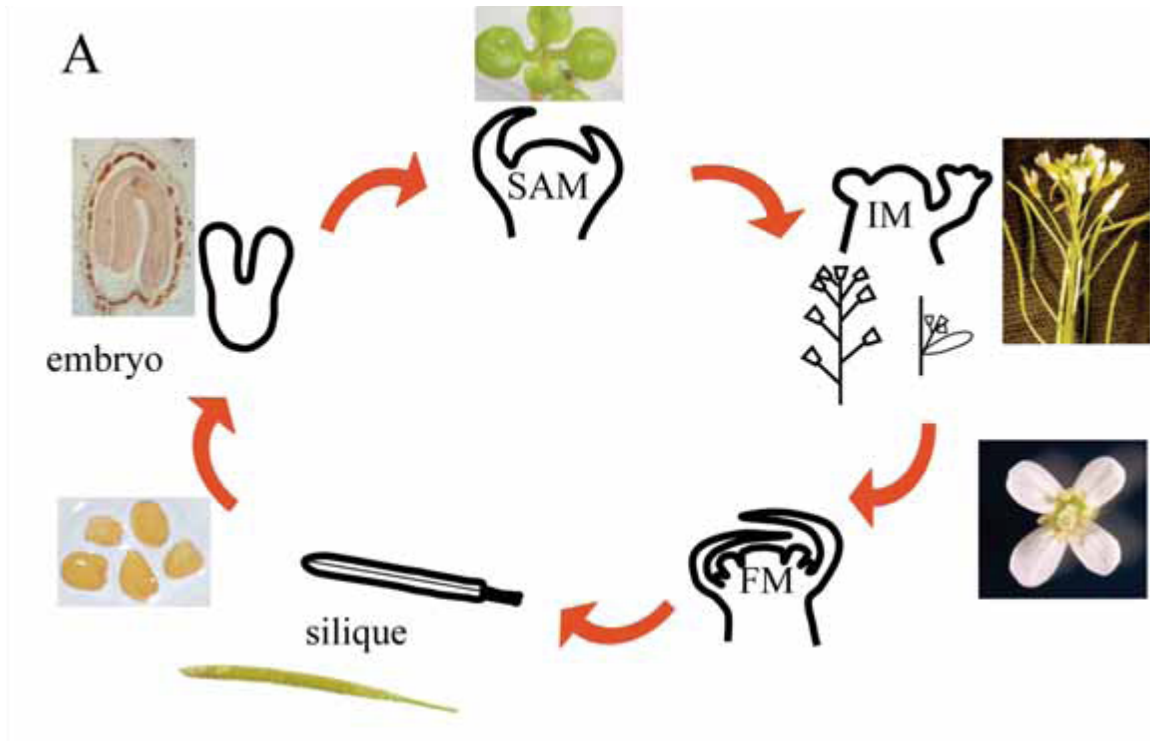


Figure. 7 Les étapes de transition du bourgeon végétatif en bourgeon floral

III/2 /Les indicateurs de transition (végétatif à floral)

Les stratégies de floraison sont déterminées par l'environnement ce qui met en évidence une adaptation des plantes qui sous entend que les plantes sont capables de capter les signaux de l'environnement spécifiques d'une période de l'année. Ces signaux principalement sont la température et la **lumière**, pour la température on évoque **la vernalisation** (orge, blé, pois etc....) et pour la lumière on a la sensibilité à **la photopériode**. On ajoute d'autres facteurs endogènes comme les **hormones les nutriments**.

III/ 3 /La vernalisation

Les études génétiques ont permis d'identifier deux gènes majeurs qui jouent un rôle dans la vernalisation (FLC= FLOWRING, LOCUS, C) et le gène le gène FRI(FRIGIDA).

-Le gène FLC est un inhibiteur de floraison, s'il s'exprime fortement la plante reste à l'état végétatif (cad pas de fleur)

-Le gène FRI induit l'expression du FLC, ainsi les deux gènes coopèrent pour retarder la floraison

La vernalisation correspond à faire baisser le niveau des ARNm codant pour le FLC ce qui permet à la plante de fleurir

Remarque : Dans la graine de *l'Arabidopsis Thaliana* le gène FLC est actif la protéine correspondante bloque les expressions des gènes nécessaires pour la floraison, ainsi la plantule qui naît de la germination ne donne pas de fleur

La transition florale ne peut s'accomplir que si le gène FLC (inhibiteur des gènes de la floraison) est à son tour inhibé dans ces cellules, la protéine FLC est une protéine MADSbox qui réprime directement les gènes FT et SOC1, un autre gène également important le VIN3 qui maintient la répression de la floraison avec FLC durant la vernalisation (Figure. 8).

En effet, c'est le rôle du froid ou vernalisation, le froid déclenche la production d'une protéine VIN 3 qui inhibe transitoirement l'expression du FLC ; dans ce cas deux autres protéines VIN1 et VIN2 prolongent cet effet (Figure. 9). Remarque *l'arabidopsis thaliana* mutante fleurit sans vernalisation car elle synthétise un FLC inactif. Les gènes short végétatif phase (SVP) et FLOWRING LOCUS M. (FLM) ont été caractérisés comme étant des régulateurs majeurs de la floraison en réponse de la température moyenne 23°C

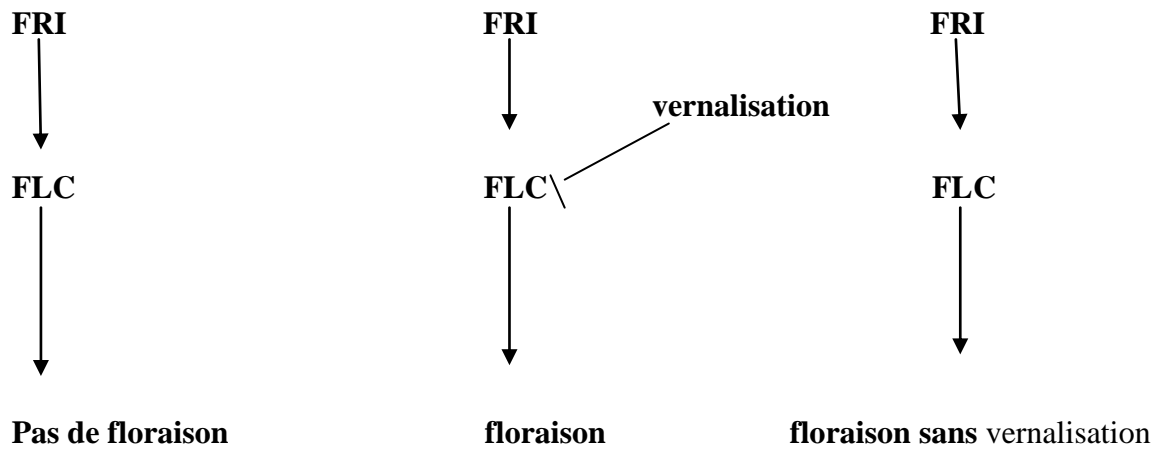


Figure. 8 Aspect moléculaire de la vernalisation et son importance dans la floraison

Lorsque la cellule se divise, de division en division le gène **FLC** reste inactif y compris dans les cellules du méristème née au printemps et qui n'ont jamais connu l'hiver lors de la division et la formation des cellules sexuelles les balises chimiques présentes sur la chromatine sont retirées par les enzymes de sorte que les plantes de la génération suivante ont à leur tour besoin d'une vernalisation.

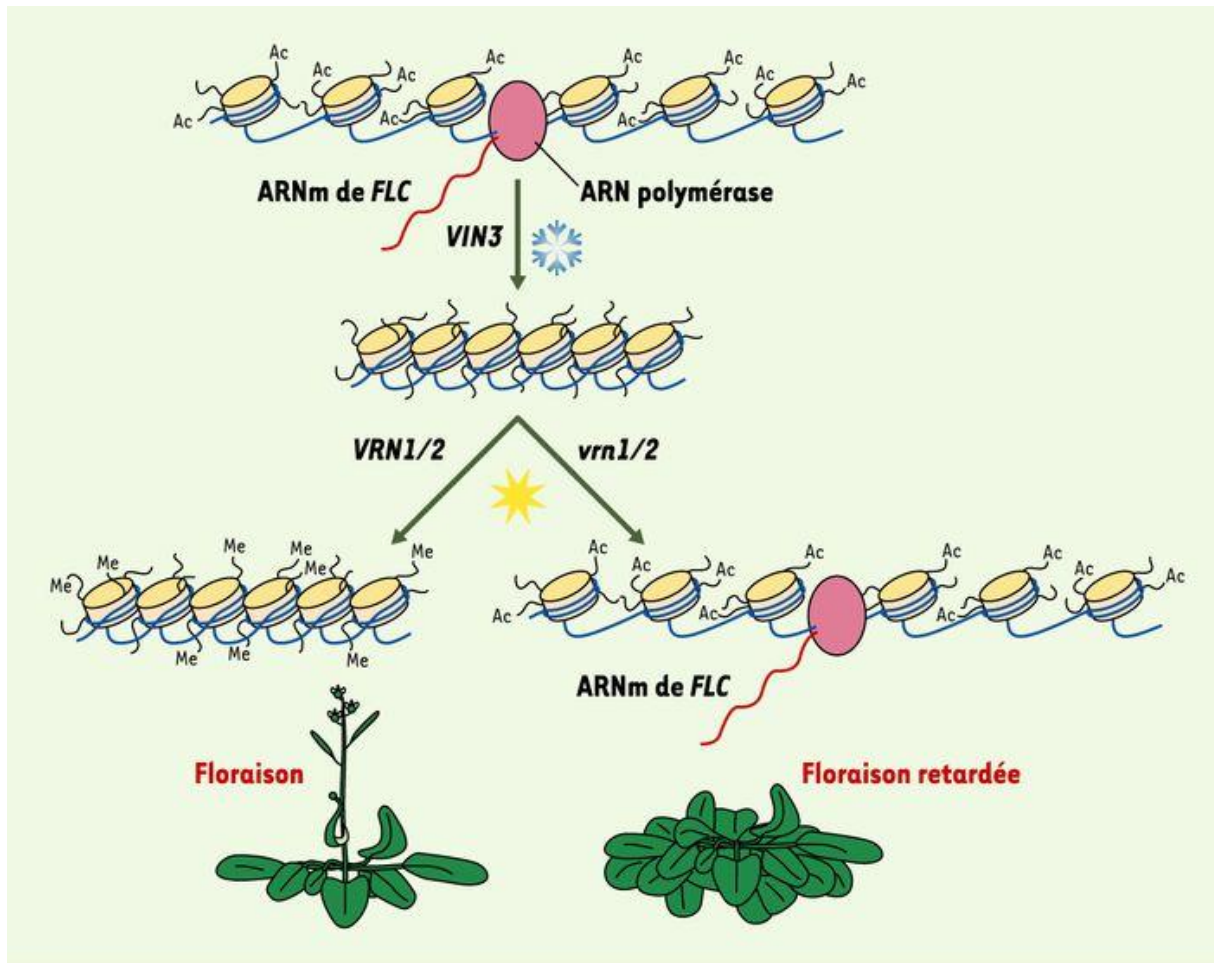


Figure. 9 Le rôle des VIN dans la floraison

III/3/Le photopériodisme et la floraison

Il est peu difficile de croire que les plantes puissent mesurer le temps ; mais de nombreux aspects du comportement des plantes ne peuvent être interprétés autrement un exemple nous ai donné par plusieurs espèces qui fleurissent régulièrement à des périodes particulières de l'année. Les roses fleurissent toujours en été, les plantes pérennes perçoivent le jour court de l'automne comme un signal d'induction de la dormance des bourgeons anticipant ainsi les conditions hivernales défavorables. C'est la durée du jour qui fournit l'indication la plus fiable sur l'état d'avancement de la saison et la capacité d'un organisme à mesurer cette durée connue par le photopériodisme.

Dans le mécanisme de la floraison il existe plusieurs voies à intégrer ; l'effet de la température ; les nutriments ou aussi la lumière (Figure. 10)

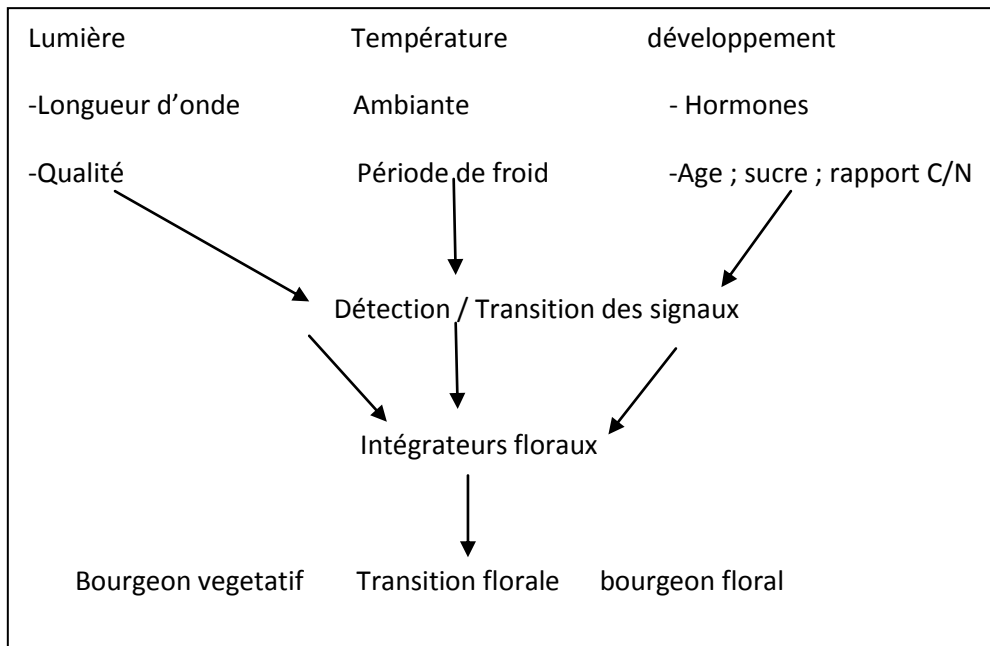


Figure .10 Les facteurs environnementales et leurs relationavec la floraison

L'étude du photoperiodisme s' est surtout focalisé sur le passage de l' état végétatif à l'état floral. Le photoperiodisme influence de nombreux autres aspects du dveloppement des plantes , comme celui des tubecules, la chute des feuilles; mais c' est la floraison quia sucité le plus d' interet. Le photoperiodisme se definie comme l'ensemble des reactions d' un organisme influencé par l' alternance des jours et des nuits avec les variations annuelles.

III/4/1/Les types de reponses photoperiodique

Les reponses photoperiodiques sont generalement reparties en trois cathégories, les plantes de jours court , les plantes de jours long et enfin celles qui sont indiffeentes à la longueur du jour. La floraison des plantes de jour court ne survient uniquement plus precosement que si la durée du jour est inferieur à une certaine valeur comprise dans un cycle de 24h. en consequence celle des plantes de jour long ne survient qu' en reponse à une durée de jour superieur à une certaine valeur, alors que les plantes indifferentes fleurissent independaent de à longueur du jour (Figure.11).

Photopériode

les plantes de jours courts ne fleurissent que si la durée du jour est inférieure à une valeur critique. Si la période d'obscurité est interrompue-> pas de floraison

Les plantes de jours longs ne fleurissent que si la durée du jour est supérieure à une valeur critique:

Si la plante est en jour court et que l'obscurité est interrompue-> floraison

=>les plantes détectent la durée de la nuit

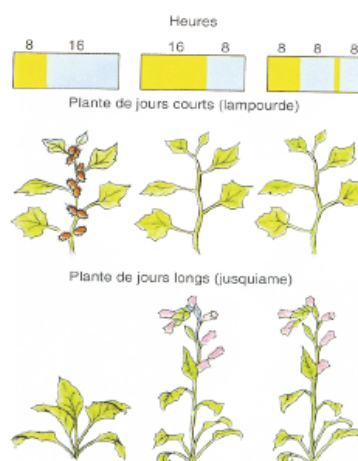


Figure. 11 Le photopériodisme chez les plantes

Chez les plantes de jours long et de jours court on note des exigences qualitatives (ou obligatoires) et quantitatives (facultative) les plantes qui exigent absolument une photopériode particulière pour pouvoir fleurir appartiennent à la catégorie des plantes à photopériode qualitative ex la Lampourde (*Xanthium strumarium*) est une plante de JC qualitative car elle ne fleurie pas tant qu'elle n'aura pas été soumise à une photopériode courte précise. Inversement, la plupart des céréales de printemps comme le blé (*Triticum aestivum*) et le seigle sont des plantes de jour long qualitatif, même placées continuellement en ours court, les céréales de printemps fleuriront, mais la floraison est considérablement accélérée en jour long, néanmoins la différence entre la réponse quantitative et qualitative n'est toujours pas tranchée pour une espèce ou un cultivar particulier. L'exigence photopériodique est souvent modifiée par certains facteurs de l'environnement, comme la température, une plante peut avoir une exigence qualitative à une température, mais répond quantitativement à une température différente. En plus des trois catégories de base, il existe une foule d'autres types de réponses qui exigent des séquences de jours courts et de jours longs, diverses espèces de Bryophyllum par exemple sont des plantes de jour long – jour court (JLC) ou (JL-JC) ; elles ne fleurissent que si certains nombre de jours court sont précédés par des jours longs. L'inverse est vrais pour les plantes de jour cour – jour long (JCL) comme le *Trifolium repens* ; certaines plantes comme les céréales d'hiver exigent un traitement par des températures basses avant de

pouvoir répondre à la photopériode, alors que d'autres ont un besoin photopériodique qualitative à une température mais une exigence quantitative à une autre température. Les plantes de jours intermédiaires ne fleurissent qu'en réponse à des jours de durée moyenne, elles restent à l'état végétatif si le jour est très court ou trop long.

III/4/2 La photopériode critique

La distinction entre plante de jour court et de jour long n'est pas fondée sur la valeur absolue de la durée du jour. Le fait qu'une plante soit classée parmi celle des jours courts ou jours longs dépend de son comportement vis-à-vis de la photopériode critique ; Les plantes qui fleurissent si la durée du jour est inférieure à une certaine valeur critique maximum sont classées parmi les plantes de JC ; celles qui fleurissent en réponse à une durée supérieure à une durée minimum critique sont classées parmi les plantes de JL; Ainsi , la photopériode de Xanthium , plante de jour court est de 15.5h ce qui signifie qu'elle fleurira dès que la durée du jour est inférieure à 15.5 h par jour .

III/4/3 L'approche moléculaire dans la perception du signal

Le passage réel d'une croissance végétative à une croissance reproductrice se déroule dans les zones des méristèmes .Elle débute au niveau de l'apex caulinaire pour se propager ensuite vers les bourgeons auxiliaires ; le signal photopériodique est perçue par la feuille.

Dans cet événement vient le rôle de la lumière, les gènes impliqués (des gènes intégrateurs, et des gènes récepteurs) les gènes récepteurs activent les gènes intégrateurs

Ceci concerne le méristème apical, la durée du jour influe sur la floraison dans ce cas plusieurs protéines sont impliquées (Protéine CO, FT, FD) (Figure .12)

L' induction correspond à la transcription du gène FT par la protéine CO (dans ce cas cet événement nécessite l' association de C avec un co facteur (NF-YB)et (NF-TC)

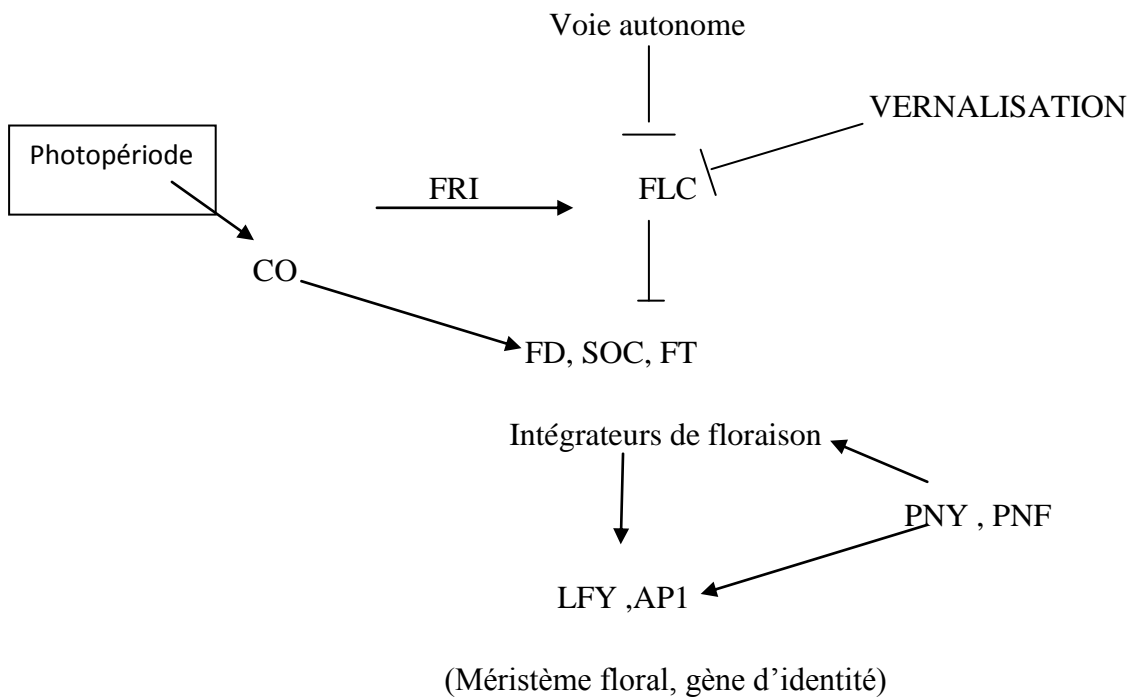


Figure. 12 Les intégrateurs de floraison

La quantité des ARNm de la protéine CO dans les cellules des feuilles évolue en fonction du rythme circadien. L'ARNm est synthétisé durant la nuit mais pas durant le jour, plus il y a d'ARNm plus la protéine CO est synthétisée. Toutefois cette protéine est stable le jour et se dégrade la nuit ; les protéines CO stables deviennent en fin d'après midi suffisantes pour activer le gène FT qui code pour la protéine FT (Figure.13)

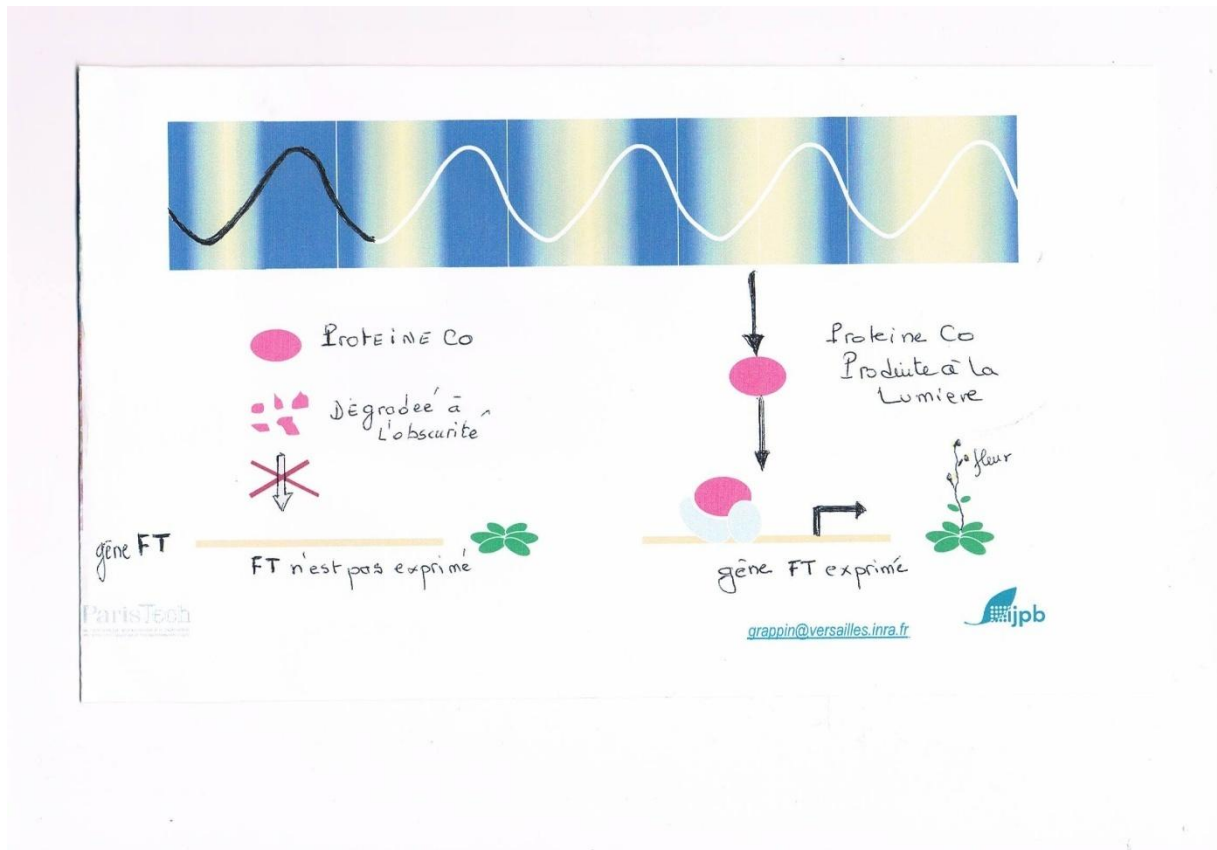


Figure.13 Modèle de régulation de la floraison par la protéine constant (CO)

La protéine passe alors dans les tubes criblés du phloème qui véhiculent la sève, la protéine FT est transportée dans la tige vers le méristème apical, elle se lie à une protéine FD. Ces deux protéines ensemble activent une série de gènes codant des protéines qui constituent le bouton floral d'où sortira la fleur (FT= Florigène) (Figure.14)

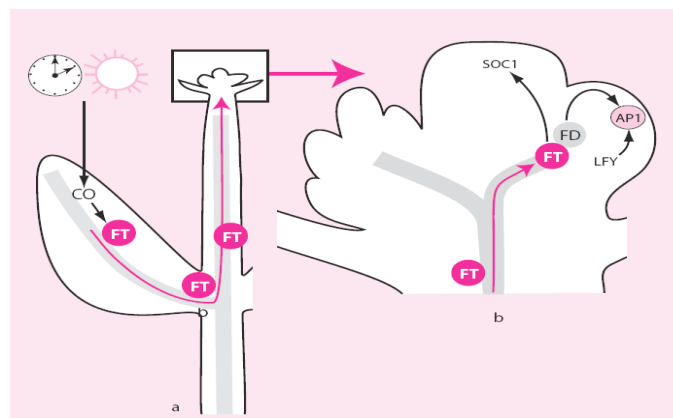


Figure. 14 La photopériode est perçue par les feuilles signal = florigène

Remarque : Un éclairage des feuilles par le bleu et le rouge lointain stabilise la protéine CO en empêchant sa dégradation, alors qu'une lumière rouge entraîne sa dégradation, à cette régulation qui pourrait suffire comme mécanisme de perception de la durée du jour.

III/5 Notion de photorécepteur

La détection de la lumière chez les végétaux est contrôlée par deux systèmes, un système sensible aux radiations rouges (phytochrome) et ceux sensibles aux radiations bleus (Cryptochrome et phototropines).

III/5/ 1/ les phytochromes

- **Découverte du phytochrome**

Au-delà d'observations initiales isolées sur l'impact de la lumière deux types de résultats ont permis de progresser :

- D'une part, le fait que de nombreuses photoréponses chez les plantes et les graines ont pratiquement le même spectre d'action (énergie nécessaire pour obtenir une réponse donnée en fonction des longueurs d'onde).

- D'autre part, la découverte du caractère réversible des photo réponses

Ainsi, BORTHWICK, en 1952, étudiant la germination des laitues sous l'action de bandes passantes de longueurs d'ondes de 10 à 20 nm obtint les spectres d'action représentés sur la figure.

On remarque un effet inducteur maximum au voisinage de 660 nm (lumière rouge = rouge clair = red). Si sur ces semences qui ont acquis la potentialité de germer on fait agir des longueurs d'onde dans l'extrême rouge on constate une inhibition de la germination avec un effet maximum à 730 nm (lumière rouge lointain = rouge sombre = far-red).

En soumettant les semences à une série d'expositions aux lumières rouge et rouge lointain on peut obtenir l'induction ou l'inhibition de la germination : le résultat dépendant de la nature du dernier éclairage. Si une période d'obscurité est intercalée entre les lumières rouge et rouge lointain le pourcentage de germination obtenu dépend de la durée de la phase obscure

.Au bout d'un certain temps, le phénomène étant déclenché, une nouvelle irradiation ne modifie plus son expression.

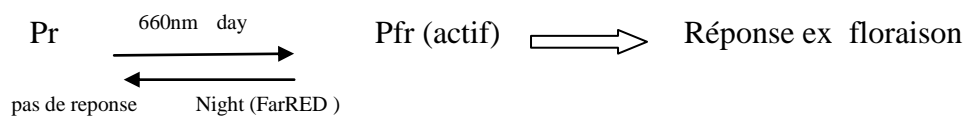
Le caractère réversible de l'action de la lumière s'est avéré être commun aux différentes photoréponses prouvant ainsi l'identité de l'acte photochimique initial dans le contrôle de réponses variées.

A la suite de ces expériences, BORTHWICK et HENDRICKS ont proposé l'existence de deux formes d'un même photorécepteur, l'action de la lumière correspondant à la conversion d'un système dans l'autre, d'une forme inactive en une forme active ou inversement, ce pigment fut appelé : phytochrome.

P660 absorbe dans le rouge avec un maximum d'absorption à 660 nm et se transforme en P730 forme physiologiquement active dont le maximum d'absorption est déplacé vers le rouge lointain.

Pr = P660 = forme inactive du phytochrome

Pfr = P730 = forme active du phytochrome



La germination est inhibée par Pfr est stimulée par Pr

III/5 /1/1 Généralisation des résultats : Universalité du Phytochrome – Diversité des effets

Depuis ces premiers résultats de très nombreuses observations ont montré la généralité de la présence de phytochrome chez les plantes vasculaires et ont également permis d'observer la diversité de réponses physiologiques contrôlées par la lumière (rouge) :

- Germination des semences
- Croissance des feuilles et des cotylédons (stimulée)
- Synthèse de pigments : flavonoïdes, chlorophylles

- Mouvements d'organes (photonasties chez le Mimosa pudica ou l'Albizia julibrissin)
- Mouvements d'organites (chloroplastes chez l'algue verte Mougeotia)
- Induction de la transcription de nombreux gènes et de la synthèse des protéines correspondantes.
- Croissance des tiges (inhibée)

III/5/1/ 2– Structure du phytochrome

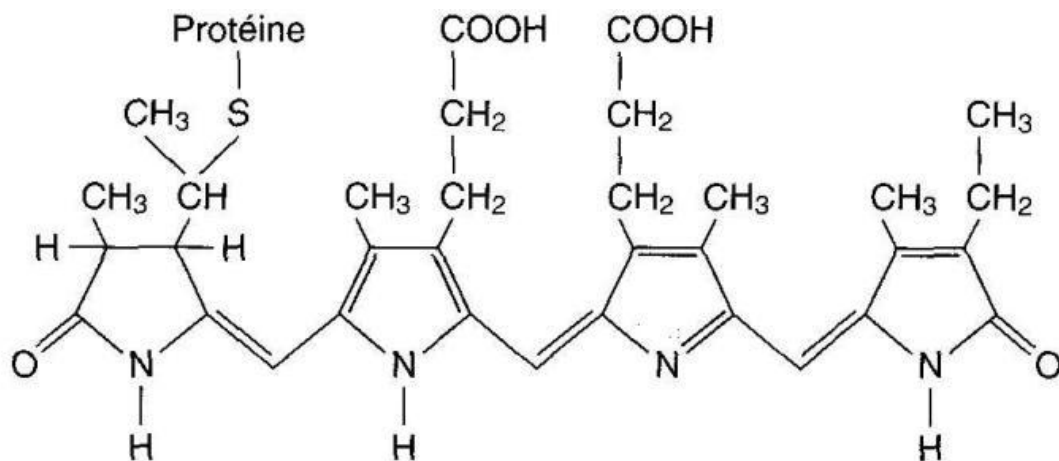
Il s'agit d'une chromoprotéine (association entre un groupement chromophore responsable de la coloration et une protéine) de couleur bleue (P660) ou bleu-vert (P730) selon la forme sous laquelle elle se trouve. Une telle modification de couleur peut être obtenue in vitro en irradiant une solution de phytochrome purifié.

Le phytochrome est un dimère résultant de l'association de 2 monomères d'environ 120 KDa portant chacun une molécule de chromophore. La caractérisation au plan structural du chromophore est difficile car il représente une faible proportion de la molécule de phytochrome et est fortement associé à la protéine par des liaisons covalentes.

Le chromophore présente des propriétés voisines de certaines biliprotéines et de la phycocyanine, pigment accessoire des algues bleues intervenant dans la photosynthèse. Il s'agit d'une structure tétrapyrrolique ouverte (fermée dans le cas de la chlorophylle). Différents modèles structuraux ont été proposés celui de Rüdiger et Corell (1969) est reporté et fait intervenir des interactions avec la protéine au niveau d'un groupement propionyl et du groupement hydroxy-éthyle. (Figure .15)

Quand P660 est converti en P730 on assisterait à une élimination d'un proton du cycle 1 qui deviendrait alors chargé négativement mais pourrait être stabilisé par interaction avec la

protéine.



Chromophore du phytochrome *Le chromophore, partie de la molécule du phytochrome qui absorbe la lumière, est représenté ici sous sa forme P_r, et sa fixation à la partie protéique de la molécule est indiquée.*

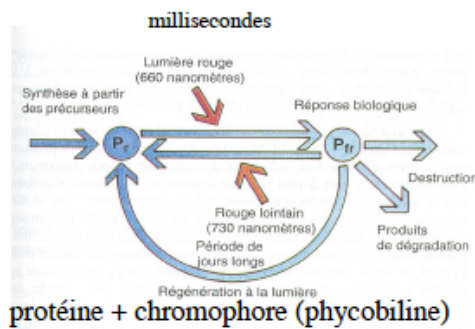
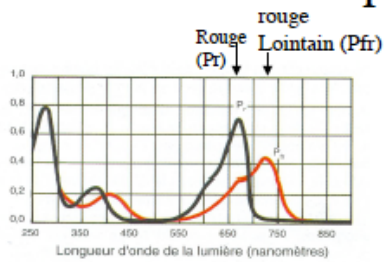
Figure .15 La structure du phytochrome

III/5/1/3/Conversion enzymatique P730 – P660 à l'obscurité

Dans les tissus étiolés ou dans les graines à l'obscurité on ne trouve généralement que du phytochrome P660. La forme P730 n'apparaît qu'après exposition à la lumière rouge clair.

Si l'on suit l'évolution de la teneur en P730 après avoir replacé le végétal à l'obscurité elle diminue progressivement et parallèlement la proportion de P660 augmente. Cette reconversion dépend de la température (rapide à 27 °C, nulle à 3°) elle est sensible à la présence d'inhibiteurs, on pense qu'il s'agirait d'une transformation enzymatique(Figure.16).

Phytochrome



a la lumière du jour: équilibre entre les formes

la nuit: Pfr décroît régulièrement

flash lumière rouge Pfr augmente rapidement->floraison des plantes de jours longs (nuits courtes)

inhibition de floraison des plantes de jours courts (nuits pas assez longues)



Germination a l'obscurité: étiolement

photomorphogénèse

Etiollement->Pfr est converti en Pr->allongement
Pfr inactive des répresseurs du développement normal pour promouvoir le développement « étiole »: allongement des tiges et entrenoeuds

Perception de l'ombre d'autres plantes
 Longueurs d'ondes >700 moins absorbées que <700

Figure.16 Le spectre d'action du P730 et P660 et conversion du phytochrome

III/ 5/1/4 Localisation cellulaire

Le phytochrome est présent dans tous les organes de la plante et particulièrement dans les organes jeunes. Sa localisation cellulaire étudiée par différentes techniques (fractionnement cellulaire, immunocytochimie...) a conduit à proposer une localisation multiple : membranes, cytoplasme, noyaux, mitochondries.... Une observation intéressante plusieurs fois rapportée concerne la conversion d'un Pr soluble dans le cytoplasme en un Pfr lié aux membranes. Chez le coléoptile d'avoine un traitement par la lumière rouge conduit à un accroissement considérable de la quantité de phytochrome sédimentable (insoluble) de 5 à 60 %.

La sédimentabilité du phytochrome induite par la lumière a été interprétée comme une interaction entre le phytochrome et un récepteur membranaire ce qui représenterait une étape initiale dans le mode d'action. Plus récemment on a montré que l'activation du phytochrome s'accompagnait d'une migration du photorécepteur du cytoplasme vers le noyau.

Deux théories sont en présence pour rendre compte de l'action du phytochrome en réponse à la lumière.

III/5/1/5 La croissance et le phytochrome

De nombreux processus de croissance sensible, positivement ou négativement, à la lumière, sont sous la dépendance du phytochrome par exemple :

* **inhibition par la lumière** (R avec réversion par le Pfr) de la croissance du mesocotyle des embryons des graminées , des hypocotyles et des entre nœuds des jeunes plantules

* **la stimulation de la croissance** des cotylédons et des jeunes feuilles des dicotylédones (au contraire inhibition des feuilles des monocotylédones)

On notera que ces deux effets s'opposent de l'étiollement (allongement des entre noeuds et réduction de la taille à l'obscurité)

Les mouvements de certains mouvements d'organes ou d'organites sous l'effet de la lumière sont régis par le photochrome. Il assure la photo morphogenèse (y compris l'élongation cellulaire), germination de certaines graines, Induction floral, sénescence des feuilles et leurs abscission photonastie , Biosynthèse (Protéine , anthocyanes ,Chlorophylle), photopériodisme.

III/5/1/6/ Les types de phytochrome

Le phytochrome A, sensible à la lumière rouge et stable à l'obscurité, se dégrade à la lumière. Il existe cinq gènes qui codent pour les phytochromes B, C, D, E stables à la lumière.

III/5/ 2/ Les cryptochromes

Le photorécepteur cryptochrome n'a été caractérisé que tardivement, d'où le nom de cryptochrome « caché ». On supposait initialement qu'il s'agissait d'un caroténoïde en raison de la nature du spectre action. L'isolement du photorécepteur CRY1 chez *Arabidopsis thaliana* a été réalisé par les techniques de la génétique moléculaire.

Le chromophore est une ptéridine (méthényl tétra hydrofolate) avec pour la chromoprotéine une absorption maximale à 450 nm. Le gène CRY1 est exprimé dans tous les tissus et la protéine, qui ne présente pas de domaines hydrophobes, n'a pas vraisemblablement de localisation

membranaire mais une localisation nucléaire démontrée grâce à une transformation génétique avec un gène codant pour une protéine de fusion. La surexpression de CRY1 chez des plantes transgéniques entraîne une hypersensibilité à la lumière bleue dans le cadre de réponses du type élongation de l'hypocotyle et production d'anthocyanines.

Les réponses à la lumière bleue sont nombreuses chez les plantes on peut citer par exemple les phénomènes suivants :

- Phototropisme, Inhibition de l'élongation de l'hypocotyle, ouverture des stomates, Production d'anthocyanes, expression de gènes spécifiquement régulés par la lumière bleue ;
- Certaines de ces réponses sont par ailleurs également induites par les phytochromes activés. L'inhibition de l'élongation des hypocotyles fait en effet intervenir 3 photorécepteurs :

- Phytochrome
- Cryptochrome
- photorécepteur sensible aux UVA

Chapitre IV Les mouvements chez les végétaux

On peut distinguer deux catégories de mouvement chez les plantes, les mouvements de croissance qui sont irréversibles et résultent de la croissance différentielle des organes ; les mouvements de turgescence sont réversibles et ils résultent des changements du volume de certaines cellules .

IV /1 Contrôles de la lumière dans l'ouverture et fermeture du Stomate

La perception de la lumière **bleue** par le cryptochrome induit la formation d'une protéine stable CO (Constant) qui change la perméabilité de la membrane des cellules vis-à-vis des ions (H^+ , Cl^- , K^+) on observe une sortie des ions H^+ et une entrée des ions chlore et potassium avec une augmentation dans la teneur du malate, cet effet induit une forte augmentation dans la pression osmotique d'où une turgescence obtenue par l'entrée d'eau il s'établit ainsi une **ouverture** des stomates. (Figure.17)

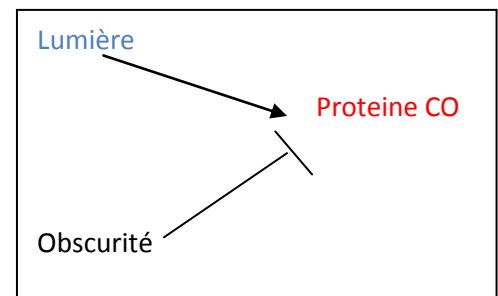
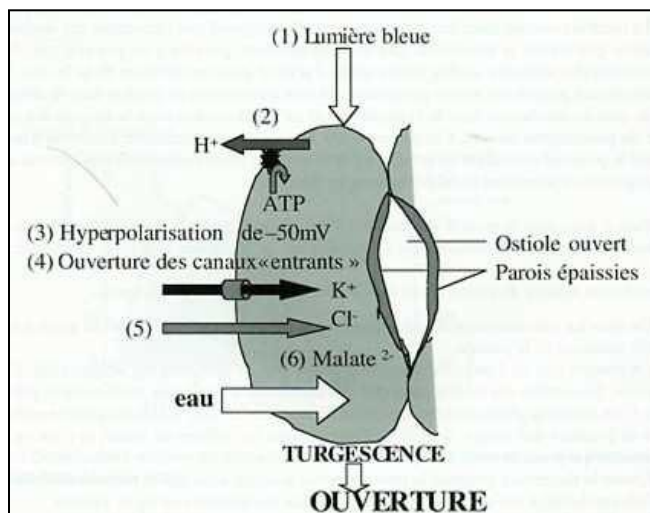


Figure.17 Contrôles de la lumière dans l'ouverture et fermeture du Stomate

Avec la lumière **rouge**, le phytochrome) induisant ainsi la formation de l'hormone ABA qui limite la perméabilité cellulaire et des potentiels de diffusion des ions entraînant la **fermeture** des stomates

Certaines types de lumières stabilisent la protéine CONSTANT CO, il s'agit de la lumière blanche les radiations bleues et rouge lointain, en effet ces radiations sont favorables pour l'activation de CO; contrairement à cela l'obscurité et les radiations rouges sont défavorables pour l'activation de CO (Figure.18)

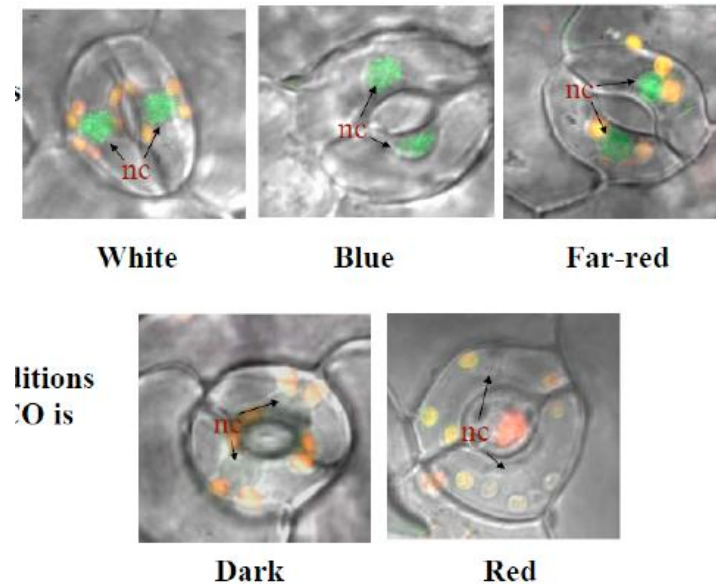


Figure. 18 Les types de lumières qui stabilisent la protéine CO

IV/2 / L'abscission foliaire

La diminution de la lumière implique un changement radical de photopériode détectée par les feuilles, les phytochromes déclenchent un processus de vieillissement rapide. Les cellules produisent l'éthylène qui s'attaque à la chlorophylle, d'autres pigments, les caroténoïdes ont la chance de se montrer dévoilant, une palette de pigments à base de carotène (orange) antocyanes (pourpres) xanthophylles (jaunes) c'est alors que les feuilles prennent leurs jolies couleurs. Les jeunes feuilles produisent de l'auxine qui les insensibilise à l'éthylène, la production de l'auxine diminue et s'arrête à l'automne ainsi les cellules du pétiole sont exposées à des fortes concentrations d'éthylène. Une multitude d'enzymes hydrolytiques tels que les pectinases, les cellulases lysent les parois des cellules et fragilisent la structure du végétal, une zone d'abscission se forme à la base des feuilles qui tombent sous l'effet du poids

IV/3 Les tropismes

Du grec tropos = orientation , sont des réponses directement liées à des stimulus , la réponse peut être orientée vers en direction du stimulus ou en sens opposé selon un angle déterminé par rapport à la direction du stimulus parmi les exemples on peut citer le phototropisme (réponse à la lumière) et le gravi tropisme (réponse à la pesanteur) et hydrotropisme (réponse à l' eau) et enfin thigmotropisme (réponse au toucher) . Dans le cas du phototropisme des coléoptiles ce n'est en général pas la zone d'élongation qui est sensible aux stimulus , mais l' apex comme le montre des expériences avec l' ablation de cet apex qui suppriment cette sensibilité le fait est en accord avec l' existence d' un certain délai (plusieurs mn ou dizaines de mn) entre l'application du stimulus et le début de la courbure. Ainsi le phototropisme comporte t –il l'enchaînement suivant pour tout les types de tropisme :

** la perception de l'information apportée par le stimulus

** la transduction de l'information, série d'événements induits par la modification du récepteur et qui conduisent à la réponse physiologique. Elle comporte pour le phototropisme trois étapes,

a - l'élaboration d'un vecteur chimique de l'information (auxine)

b – la transmission de l'information de l'apex vers les zones d'élongations, cette transmission demande un temps dis de latence ou temps de réaction

c – la capture de l'information par des cellules notamment les cellules de la zone d'élongation

** la réponse physiologique à l'information, ici la courbure phototropique

IV/3/1 Le gravitropisme

Le gravitropisme est une réponse à la croissance différentielle provoquée par une redistribution de l'auxine dans le courant du transport ; Le gravitropisme est le phénomène végétal qui est immanquablement le plus évident et le plus familier pour la plupart des gens, les parties aériennes poussent vers le haut et les racines vers le bas . Les branches latérales de la plupart des arbres ou des buissons ne se dirigent pas vers le haut , elles ont une croissance plus ou moins horizontale. Les stolons du fraisier ou du bouton d'or (*Renunculus*) présentent aussi une croissance horizontale à la surface du sol , en creusant

le sol on trouve des Rhizomes (tiges souterraines) ainsi que de nombreuses racines qui croissent horizontalement, de nombreuses inflorescences retombantes, n' ont pas de direction de croissance privilégié et si elle pendent c' est sous l' effet de leurs poids .

L'axe primaire de la plante constitué de la racine et de la tige feuillée est orientée parallèlement à la direction de l'attraction de la pesanteur cette disposition est dite orthogravitropisme. La racine primaire qui croit vers le centre de la terre , présente un gravitropisme positif , la pousse feuillée qui croit dans une direction opposée au centre de la terre présente un gravitropisme négatif , les organes comme les stolons et Rhizomes et certains rameaux latéraux dont la croissance se fait perpendiculairement à l' attraction de la pesanteur sont dits diagravitropiques , les organes qui présentent un angle intermédiaire entre 0 et 90° degré par rapport à la verticale sont dits plagiotropes , et les organes qui ne répondent pas sont dits agravitropiques . Le gravitropisme se définit comme un mouvement ou un développement végétal en orientation de la gravité (ex les racines se développent vers le bas). Chez une jeune plantule de Maïs placée horizontalement on observe une courbure vers le bas dans l'axe verticale en direction gravitaire, si on enlève la coiffe, ce mouvement disparaît ainsi, il apparaît que la coiffe est responsable de ce gravitropisme. La coiffe est composée de différentes zones : La zone centrale (columelle) entourée par des cellules périphériques. Les cellules de la columelle dites statocytes sont des cellules polarisées qui contiennent des amyloplastes volumineux qui se déplacent pour se déposer vers le côté le plus bas des cellules (Statocytes). Ces amyloplastes ou (statolythes) par leurs déplacement liés à la gravité représentent la première étape liée à la perception du signal cad la gravité. L'ablation des statocytes supprime le gravitropisme, aussi chez les mutants qui contiennent peu ou pas d'amyloplastes leurs gravitropisme disparaît.

Remarque / En abaissant par un prétraitement convenable (les gibbérellines ou le froid) la teneur des amyloplastes on voit aussi que le gravitropisme diminue.

IV/3/2 Le phototropisme

La plupart des gens sont habitués à voir les plantes d'intérieur se courber vers la lumière provenant d'une fenêtre ce phénomène nommé phototropisme, le phototropisme se manifeste aussi bien chez les plantes inférieures que chez les plantes supérieures la ou la présence des structures photosynthétiques est indispensable à leurs croissance; Les tropismes peuvent être - ou + si la réponse de la plante est dirigée vers le stimulus et négative si la réponse est dirigée en sens inverse , le type de la réponse dépend en grande part de la nature

et de l'âge de l'organe ; les tiges et les autres organes aériens par exemple manifestent pour la plupart un phototropisme positif tandis que les vrilles présentent un phototropisme négatif, les feuilles sont habituellement **diaplagiotrope**, les limbes foliaires ont la tendance à se placer perpendiculairement à la lumière, ou **plagiotropes** ce qui signifie que leurs orientations par rapport à la lumière se fait selon des angles obliques ;

- **Le coléoptile des graminées**

Pour une analyse précise du phototropisme les physiologistes ont disposé d'un matériel remarquable le coléoptile des graminées (Poacées) chez les graminées la plantule présente dans les premiers stades de son développement une petite gaine qui entoure les premières feuilles et que l'on nomme le coleoptile . CH Darwin , en 1880 fut frappé de ce que le coléoptile d'une graminée des canaries se courbait lorsqu' il était éclairé latéralement Darwin montra que le stimulus était reçu par l' apex alors que la région de la courbure était plus bas ce qui lui permis de suggérer l' existence de liens chimiques entre les deux zones .

Le phototropisme se définit comme une réaction du végétal en direction de la lumière. Les auxines induisent l'élongation des cellules des plantes sont produites dans la partie apicale des végétaux. Le transport verticale est modifié, un transport horizontal d'auxine a lieu dans la direction de la partie la moins éclairée, ceci induit une plus forte concentration d'auxine dans la partie non éclairée qui s'allonge d'avantage que la partie éclairée, il en résulte une incurvation.

Les **phototropines** (perçoivent la lumière bleue) sont des protéines membranaires qui réagissent à la lumière bleue et légèrement à l'Ultraviolet (400nm). La lumière est captée par l'apex ou l'AIA (une phytohormone qui contrôle la division des cellules et l'élongation et certaines étapes de la différenciation)est synthétisée, la courbure a lieu dans la partie basale la plante cad il y a transport de l'AIA du sommet vers la base, l'auxine fonctionne comme une protéine G qui stimule l'activation des pompes H^+ à l'extrémité des cellules entraînant une acidification qui permet d'activer les enzymes **expansines** qui coupent les liaisons hydrogènes de certaines composantes de la paroi cellulaire celle-ci devient extensible et peut s'étirer d'où il s'établit une élongation cellulaire ou auxèse.

➤ **Le mode d'action gravi sensibilité**

L'action mécanique des amyloplastes serait transmise au plasmalemme, ce qui provoquerait l'ouverture des canaux ioniques du calcium et l'activation des transporteurs transmembranaires de l'auxine conduisant ainsi à transmission du stimulus entre les cellules perceptrices statocytes de la coiffe et les cellules cibles qui réagissent à la courbure au dessus de l'apex dans la zone d'élongation. fig 1.6 / 1.2

Ca⁺ → Auxine → élongation → implique courbure

IV/4 les nasties

Les nasties sont des courbures ou flexions d'organes dont l'orientation est fixée par une disposition anatomique et non pas fonction comme pour les tropismes, ces mouvements portent le plus souvent sur les feuilles et les pièces florales. Ils n'ont pas de relation directe avec une quelconque orientation vectorielle du stimulus, la direction des nasties est inhérente au tissu et comprend, l'épinastie (courbure vers le bas) et hyponastie (courbure vers le haut), elle résultent d'une inégalité de croissance entre la face supérieure et la face inférieure; si la face supérieure croît plus vite, il y a épinastie, la seismonastie (réponse à un choc mécanique), thermonastie (réponse à la température)

L'épinastie et la thermo nastie sont des exemples de nasties dans lequel intervient une croissance différentielle. L'épinastie est la courbure vers le bas d'un organe. Habituellement les pétioles, les feuilles dont les extrémités sont inclinés vers le sol. le mouvement ne constitue pas une réponse à la pesanteur mais semble dépendre de flux inégaux d'auxine entre les faces inférieures et supérieures du pétiole. L'épinastie est également une réponse à l'éthylène ou à excès de contenu en auxine. La réponse inverse appelée hyponastie est moins fréquente mais peut être induite par des gibbérellines.

Un exemple typique de thermonastie est représenté par l'ouverture et la fermeture des pétales de certaines fleurs comme ceux de la tulipe en dépit de la nature répétitive. les thermonasties sont cependant permanentes et résultent de différence de croissance entre les deux faces du pétales

Les nasties les plus spectaculaires sont tous les mouvements liés à la turgescence que l'on peut diviser en trois catégories :

***Les mouvements rythmiques lents de la mise en sommeil des feuilles des plantes nyctinastiques

*** les mouvements très rapides d'un petit nombre d'espèces seismonastiques

*** les thigmonasties ou enroulement thigmotropiques des appendices filiformes des plantes grimpanes et des lianes.

Les nyctinasties et seismonasties dépendent des variations de turgescence dans les organes moteurs spécialisées nommés pulvinus (le pulvinus est une structure en forme de bulbe qui est le plus souvent rencontré dans les familles des plantes caractérisées par la possession des feuilles composées, comme les légumineuses, il est localisé à la place du pétiole (pulvinus I aire), de la penne (pulvinus II aire) ou de la pinnule (pulvinus III aire) : Le pulvinus contient un nombre important de grandes cellules motrices à parois minces qui en subissant des changements réversibles de turgescence provoquent la modification de la position de la feuille

IV/4/1 Les nyctinasties

Nuktos = nuit, nastos = fermeture. Sont particulièrement manifestés chez les feuilles qui passent d'une position de veille, le jour à une position de sommeil la nuit. Les feuilles ou folioles sont dans une position typiquement horizontale ou ouverte le jour et prennent une position plus verticale ou fermée la nuit, les feuilles primaires du haricot montrent des nyctinasties prononcées

IV/4/2 Les seismonasties

Un petit nombre de légumineuses qui possèdent des pulvinus et qui présentent des réponses au stimulus mécanique. Ce phénomène est connu sous le nom de seismonastie. comme les plantes seismonastiques répondent au toucher, elle sont parfois dites thigmonastiques néanmoins les plantes seismonastiques répondent à toute une série de stimulus comme les rafales de vent et les blessures par coupures, les gouttes de pluies ainsi que les fortes chaleurs ou le feu .

L'exemple le plus connu d'une plante seismonastique est un buisson d'origine tropicale *Mimosa pudica*. L'avantage adaptatif que procure ce type de réponse n'est pas évident. Certains suggèrent que ces plantes qui vivent en milieu arides et exposées sont exposées à des vents desséchants si bien que le repliement des feuilles seraient une façon de réduire les pertes d'eau. La réponse est très rapide lorsque le pulvinus est directement stimulé la courbure se produit en moins d'une seconde, la réponse finale qui est le mouvement des feuilles implique évidemment comme dans les nyctinasties un mouvement de cellules motrices du pulvinus, cependant trois caractéristiques des réponses seismonastiques ont focalisé l'attention sur les étapes initiales de la transduction du signal, la première est la rapidité de la réponse et seconde est que la seismonastie obéit à la loi du tout ou rien, il n'existe aucune relation évidente entre l'intensité du stimulus et l'ampleur de la réponse, la troisième est que l'excitation se propage à partir du lieu d'application du stimulus.

From et Eschrich pensent que lorsque le potentiel d'action atteint le pulvinus, il stimule le déchargement rapide de K^+ et des glucides dans l'apoplasme, l'eau ferait de même ce qui entraînerait le dégonflement des feuilles motrices.

D'autres chercheurs ont trouvé que des substances isolées de la sève phloémique de mimosa ou d'autres espèces stimulent la fermeture du pulvinus lorsqu'elles sont appliquées sur l'extrémité d'une tige coupée une substance active a été isolée, il s'agit d'une dérivé glycosylé de l'acide gallique appelée **turgorine** cette substance a été isolée chez 14 plantes qui présentent des mouvements de seismonastie.

References

Didier B, Guyot H (2012). Des plantes et leurs insectes Guide pratique édition Quae 266 pages

Caille, PH (2010). Phytochromes. *Biologie actuelle : CB*, 20 (12), R504.

Casal, JJ, Sánchez, RA (1998). Phytochromes et germination des graines. *Recherche scientifique sur les semences*, 8 (3), 317-329.

Gaillochet, J., Grossin, F., Mathon, C. C. (1961). Effets des lumières blanche et verte sur *Perilla ocimoides* L., forma viridis. *Bulletin de la Société Botanique de France*, 108(7-8), 268-271.

Lydie, S. (2014). Les végétaux : Evolution développement et reproduction édition Quae 64 pages

Oukarroum, A. (2007). *Vitalité des plantes d'orge (" Hordeum vulgare" L.) en conditions de stress hydrique et thermique analysée par la fluorescence chlorophyllienne* (Doctoral dissertation, University of Geneva).

Sellam, R., Mezergane, C. (2021). Caractérisation physiologique et biochimique de la résistance de *Quercus suber*L au stress thermique-Réponse de la plante in vitro.

Saadia, R., Huber, L., Lacroix, B. (1996). Modification du microclimat d'un couvert de maïs au moyen de l'irrigation par aspersion en vue de la gestion des stress thermiques des organes reproducteurs. *Agronomie*, 16(8), 465-477.