



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Biskra

Faculté des Sciences exactes et des sciences de la Nature et de la Vie

Département des sciences agronomiques

Cours de Physiologie Végétale

Destinés aux étudiants : 2^{ème} année SNV

Préparés par : Dr. Benaziza Abdelaziz

Année Universitaire 2019/2020



PHYSIOLOGIE VEGETALE

OBJECTIFS DU MODULE

Ce module a pour objectifs:

- 1- L'étude des fonctions vitales de la plante
- 2 - Description de la fonction.
- 3 - Méthodes de mesure de son intensité.
- 4- Description des mécanismes physiques et biochimiques.
- 5- L'étude de l'influence des facteurs de l'environnement sur l'intensité des différentes fonctions = Réponses de la plante aux facteurs du milieu externe.
- 6 - L'étude de l'influence des facteurs internes ou endogènes sur l'intensité des différentes fonctions: Etat hydrique et nutritionnel - Facteurs hormonaux - Contrôle génétique.

VOLUME HORAIRE TOTAL

60 heures de cours +
42 heures de travaux pratiques +
18 heures de travaux dirigés



PHYSIOLOGIE VEGETALE

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION A LA PHYSIOLOGIE VEGETALE

Première partie : NUTRITION ET METABOLISME DE LA PLANTE

CHAPITRE I : Nutrition hydrique

Introduction :

1-Importance et Rôle de l'eau dans la matière végétale

1-1-La teneur en eau des végétaux.

1-2- Les différents états de l'eau dans la matière végétale

2- Pénétration de l'eau dans la plante (Absorption)

2-1- L'eau du sol

2-2-L'absorption de l'eau par les racines

2-2-1- Les facteurs contrôlant l'absorption de la l'eau par les racines

2-2-2- Méthodes de mesure de l'absorption de l'eau par les racines

2-2-3- Mécanismes de l'absorption

3-Transit de l'eau dans la plante

3-1-Dans les racines

3-2-Dans la tige et la sève brute

4- Transpiration

CHAPITRE II : Nutrition minérale

Introduction

1-Détermination des besoins nutritifs

1-1-Les éléments minéraux et la fertilité du sol

1-2- L'origine des minéraux

2-Modalités et mécanismes d'absorption.

3-Rôle des éléments minéraux nécessaires.

3-1- Rôle physique

3-2-Rôle physiologique

3-3-Quelques particularités

CHAPITRE III : Métabolisme de la plante (nutrition carbonée)

A-Photosynthèse

1-Généralités

1-1-Définition

1-2-Formulation

1-3-Localisation

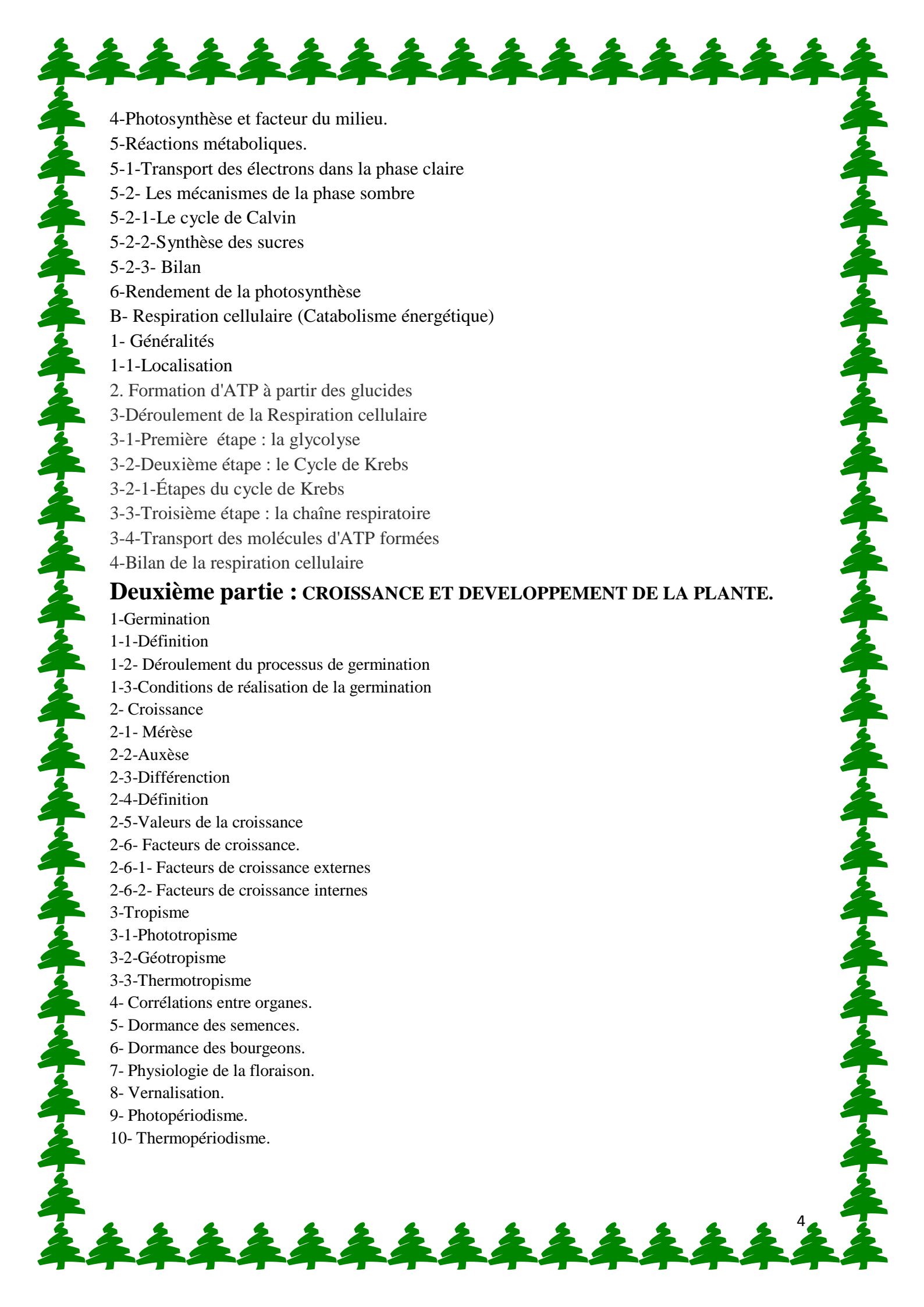
1-3-1-Le chloroplaste, siège de la photosynthèse

2-Mesure de l'activité photosynthétique.

2-1-Mesure des échanges gazeux

2-2-Emploi d'isotopes

3-Intensité de la photosynthèse

- 
- 4-Photosynthèse et facteur du milieu.
 - 5-Réactions métaboliques.
 - 5-1-Transport des électrons dans la phase claire
 - 5-2- Les mécanismes de la phase sombre
 - 5-2-1-Le cycle de Calvin
 - 5-2-2-Synthèse des sucres
 - 5-2-3- Bilan
 - 6-Rendement de la photosynthèse
 - B- Respiration cellulaire (Catabolisme énergétique)
 - 1- Généralités
 - 1-1-Localisation
 - 2. Formation d'ATP à partir des glucides
 - 3-Déroulement de la Respiration cellulaire
 - 3-1-Première étape : la glycolyse
 - 3-2-Deuxième étape : le Cycle de Krebs
 - 3-2-1-Étapes du cycle de Krebs
 - 3-3-Troisième étape : la chaîne respiratoire
 - 3-4-Transport des molécules d'ATP formées
 - 4-Bilan de la respiration cellulaire

Deuxième partie : CROISSANCE ET DEVELOPPEMENT DE LA PLANTE.

- 1-Germination
- 1-1-Définition
- 1-2- Déroulement du processus de germination
- 1-3-Conditions de réalisation de la germination
- 2- Croissance
- 2-1- Mèrese
- 2-2-Auxèse
- 2-3-Différencion
- 2-4-Définition
- 2-5-Valeurs de la croissance
- 2-6- Facteurs de croissance.
- 2-6-1- Facteurs de croissance externes
- 2-6-2- Facteurs de croissance internes
- 3-Tropisme
- 3-1-Phototropisme
- 3-2-Géotropisme
- 3-3-Thermotropisme
- 4- Corrélations entre organes.
- 5- Dormance des semences.
- 6- Dormance des bourgeons.
- 7- Physiologie de la floraison.
- 8- Vernalisation.
- 9- Photopériodisme.
- 10- Thermopériodisme.



Introduction à la physiologie végétale

La matière vivante des cellules végétales présente la même composition élémentaire et les mêmes catégories moléculaires que toute autre matière vivante ce qui traduit l'unité profonde de l'la biosphère qui est formée d'êtres vivants génétiquement apparentés dérivés les uns des autres au cours de l'évolution.

Cette unité se caractérise également par :

L'identité des structures générales de toutes les cellules

L'existence des mêmes mécanismes fondamentaux de transformation de l'énergie

Les mêmes voies principales du métabolisme intermédiaire chez tous les êtres vivants.

Cependant, les plantes se distinguent du reste des êtres vivants par deux caractéristiques :

La cellule végétale typique est entourée d'une paroi rigide qui forme un véritable squelette péri cellulaire et vue sa composition très riche en glucide, ceci accentue la distinction des plantes du reste des êtres vivants.

La cellule végétale typique est en plus douée d'un pouvoir de biosynthèse très développé, ce qui la dote d'une capacité de survie en autotrophie complète ; C'est-à-dire que dans un milieu purement minéral sans le moindre échange avec aucun autre être vivant ce qui signifie qu'une plante supérieure qui pousse dans l'air, sur un sol riche en nitrates, pourra utiliser les éléments suivants C, N, S, P, eau du milieu et pour les intégrer dans les molécules organiques les plus variées. L'énergie nécessaire à la réalisation de toutes ces biosynthèses sera tirée directement à partir du soleil : c'est un cas de *parfaite autotrophie totale*.

Ceci n'est pas réalisable dans le règne animal qui est en fait considéré comme parasite des végétaux.

Définition de la physiologie végétale

C'est l'étude des mécanismes qui régissent le fonctionnement et le développement des végétaux. Elle se divise en deux grandes parties :

Nutrition et métabolisme : qui se résument par

L'acquisition des éléments indispensables à la vie

La transformation de ces éléments et leur intégration dans la matière organique

(dans la biomasse)

Croissance et développement : Mécanismes pour le passage de la graine de l'état de vie ralentie à l'état reproducteur (cycle de développement).



**PREMIERE PARTIE : NUTRITION ET
METABOLISME DE LA PLANTE**



CHAPITRE I : NUTRITION HYDRIQUE DES VEGETAUX

Introduction :

L'eau est pondéralement le constituant le plus important des tissus physiologiquement très actifs et c'est pour cela que les possibilités d'alimentation en eau déterminent largement la répartition des végétaux à la surface du globe : la végétation est abondante sur les terres bien arrosées, mais pratiquement absente des terres peu ou pas du tout arrosée (déserts).

1-Importance de l'eau dans la matière végétale :

L'eau est un constituant très important à deux niveaux de la plante :

- a- au niveau cellulaire, c'est le milieu général d'imbibition de tous les colloïdes protoplasmiques, le liquide au sein duquel s'effectuent toutes les réactions du métabolisme, le milieu de diffusion de tous les ions ou métabolites.
- b- au niveau de l'organisme entier, l'eau est tout aussi importante ; c'est le fluide circulant dans les vaisseaux conducteurs, formant avec les matières en solution les sèves brute et élaborée. C'est par ailleurs le liquide responsable de la turgescence de toutes les cellules et donc du port dressé des végétaux non ligneux.

1-1-La teneur en eau des végétaux :

La quantité d'eau contenue par une plante est toujours le résultat d'un équilibre entre l'alimentation hydrique d'une part (le plus souvent au dépend de l'eau du sol) et la déperdition d'eau par transpiration, d'autre part. Cet équilibre entre la plante et le milieu est toujours précaire ; malgré certains mécanismes de régulation, la plante dépend étroitement de l'eau qui lui est fournie et le moindre déficit dans le bilan de l'eau entraîne la fanaison, le flétrissement et à plus long terme la mort de la plante.

Pour mesurer la teneur en eau des végétaux, on effectue généralement la dessiccation du matériel végétal. La quantité d'eau contenue est donnée par la différence de poids entre la matière fraîche et la matière sèche. La dessiccation peut être réalisée en étuve à température élevée (70-110°C) sous vide jusqu'à ce que le matériel garde un poids constant. On peut aussi entraîner l'eau de la matière végétale broyée par des bains successifs de xylène ou de toluène mais ces solvants ont l'inconvénient de dissoudre d'autres constituants que l'eau notamment des lipides. Une autre méthode, aujourd'hui très utilisée, est la cryo-dessiccation ou Lyophilisation

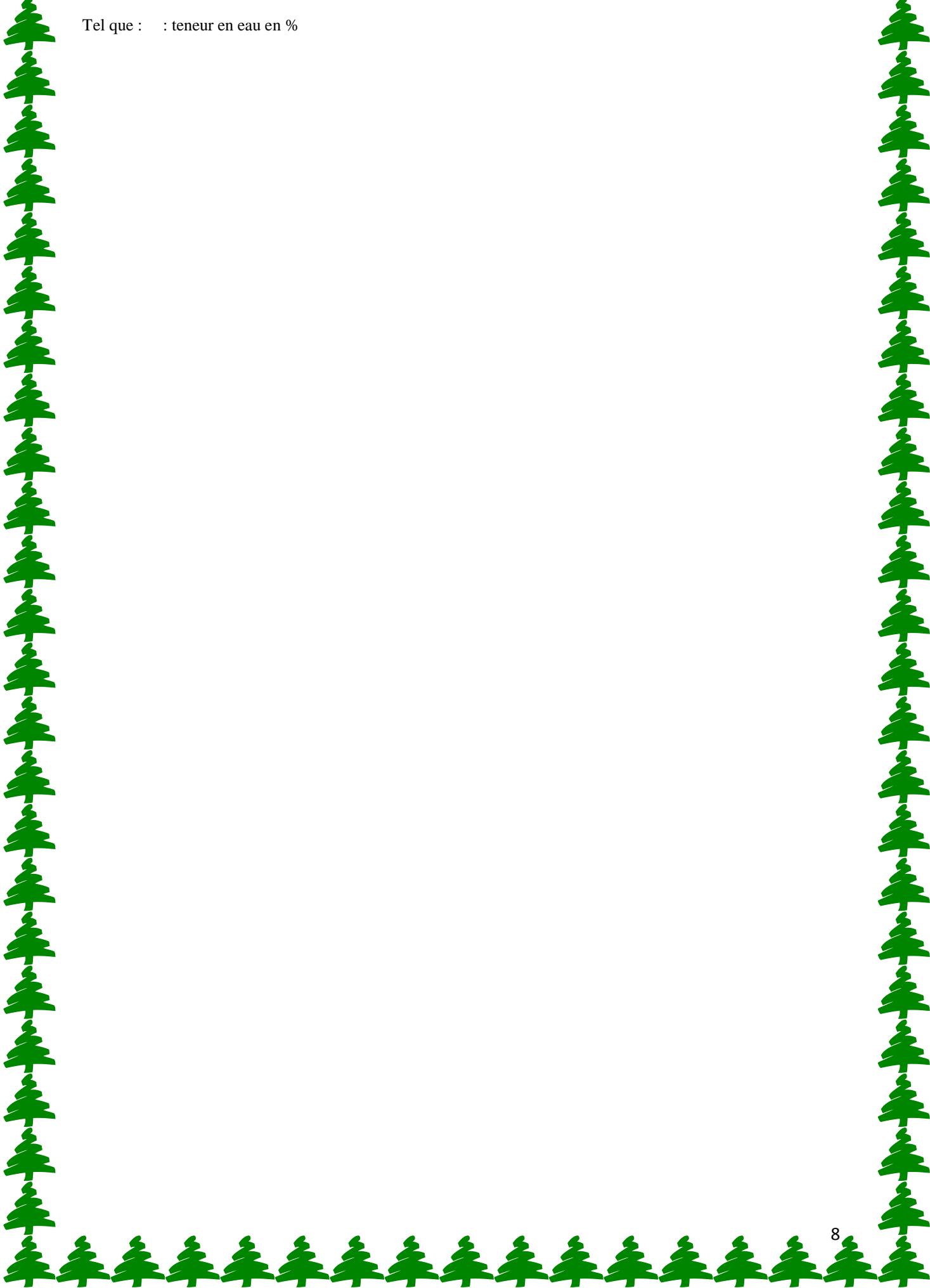
La grande vacuole des cellules végétales leur sert de réservoir d'eau qui circule dans la plante dans les vaisseaux conducteurs des sèves ; xylème (sève brute) et phloème (sève élaborée).

La mesure de la teneur en eau d'un végétal est donnée par la formule suivante :

$$= (MF - MS) / MF * 100$$



Tel que : : teneur en eau en %



MF et MS : Matière fraîche et Matière sèche

Le déficit en eau est donné par :

$$D = (m - m_r) / m$$

Tel que : m : teneur maximale
 : teneur réelle

1-2- Les différents états de l'eau dans la matière végétale :

Il n'est jamais facile de dessécher totalement une matière végétale, on distingue donc trois sortes d'eau

a- L'eau liée :

C'est l'eau immobilisée dans la cellule par des liaisons hydrogènes autour des groupements alcooliques, aminés ou carboxyliques ; la cellulose notamment fixe une quantité considérable de molécules d'eau le long des résidus glucidiques de ces chaînes moléculaires.

b- L'eau libre :

S'opposant à la précédente, c'est l'eau d'imbibition générale, facilement circulante ou stagnante dans les vacuoles.

c- L'eau de constitution :

C'est l'eau qui stabilise la structure tertiaire de certaines macromolécules protéiques et ne peut être enlevée de ces protéines sans en entraîner la dénaturation.

Eau liée et eau de constitution ne sont généralement pas entraînées hors de la matière végétale par les procédés de dessiccation. Ces deux catégories forment 3 à 5 % de l'eau totale d'un tissu.

4- Pénétration de l'eau dans la plante :

C'est avant tout dans le sol que les plantes puisent l'eau qui leur est nécessaire.

4-1- L'eau du sol :

Un sol peut contenir de l'eau libre circulante et de l'eau plus ou moins retenue soit par capillarité dans les petites canalisations entre les roches, soit par adsorption à la surface des minéraux (c'est l'eau d'hygroscopie). Les quantités d'eau ainsi immobilisées sont très variables d'un sol à l'autre

4-2- L'absorption de l'eau par les racines :

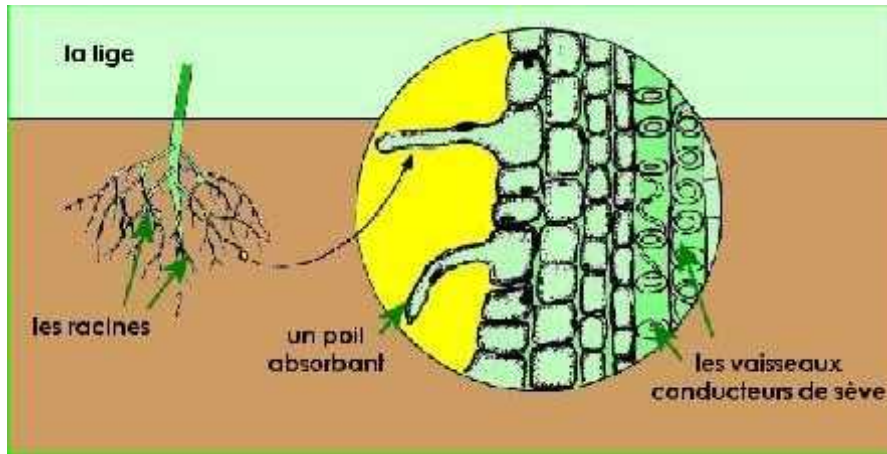


Figure n° 1: Point d'absorption des racines

L'entrée de l'eau dans la plante s'effectue par les poils absorbants des racines essentiellement (Fig.1) ; Les poils absorbants sont des cellules géantes de 0.7 à 1 mm sur 1.2 à 1.5 μm de dimensions qui forment un chevelu visible à l'œil nu un peu en arrière de l'apex ; très nombreux (200 à 500/ cm^2 jusqu'à 2000/ cm^2 chez les graminées, au total souvent plus d'un milliard par plante ; chez le seigle environ 14 milliards). Ils offrent une surface de contact considérable entre le sol et la plante, multipliant par un facteur allant de 2 à 10 la surface des racines, pouvant elle-même atteindre plusieurs dizaines ou même centaines de m^2 . Ils ont une existence transitoire (quelques jours à quelques semaines) et sont renouvelés au fur et à mesure de la croissance. Ils sont fragiles et disparaissent par l'acidité ou le manque d'oxygène.

L'absorption de l'eau par les poils absorbants n'est pas un mode exclusif malgré sa fréquence ; les poils absorbants ne possèdent pas de mécanismes spécifiques d'absorption mais seulement présentent des caractères morphologiques particulièrement favorables aux échanges d'eau :

- Paroi pecto cellulosique très mince
- Vacuoles volumineuse
- Surface de contact considérable.

L'absorption est bien moindre au niveau des zones subérisées des racines mais se produit néanmoins au niveau des fissures et des lenticelles, ce qui peut être important pour les grands arbres.

4-2-1- Les facteurs contrôlant l'absorption de la l'eau par la plante :

L'absorption est sous la dépendance étroite de l'activité physiologique de la plante : la transpiration crée un appel retransmis le long de la tige et de cellule à cellule grâce aux forces de cohésion de l'eau.cet appel a un double rôle ;

- il exerce directement sur l'eau des racines une tension vers le haut,

- il diminue le gonflement des poils absorbants et donc la contre-pression de turgescence. Cependant, l'activité de la racine intervient également contrôlée par plusieurs facteurs :

a- *Facteurs climatiques :*

- Température et humidité de l'air agissent indirectement sur l'absorption en modifiant les quantités d'eau perdues par transpiration
- Température du sol a une influence marquée sur l'absorption. En effet une diminution en dessous de 5 à 10 °C entraîne une baisse de l'absorption.

b- *Facteurs pédologiques :*

Sols trop lourds ou trop humides causent l'asphyxie des racines ce qui gêne l'absorption. La teneur en eau du sol est donc un facteur décisif, c'est l'eau libre pour la végétation qui doit être prise en compte.

En conclusion, *la quantité d'eau absorbée est d'autant plus grande que les forces de rétention de l'eau du sol sont faibles. Au dessous d'une certaine teneur en eau, différente pour chaque sol, on atteint le stade de flétrissement irréversible de la végétation.*

4-2-2- Méthodes de mesure de l'absorption de l'eau par les racines :

« A priori, on pose que la quantité d'eau absorbée est égale à la quantité d'eau perdue par transpiration ». Cette estimation néglige les quantités d'eau transformée ou produite par le métabolisme qui sont d'ailleurs tout à fait minimales par rapport aux masses énormes d'eau circulant à travers les organismes végétaux.

On peut mesurer la quantité d'eau puisée dans le sol par une plante de plusieurs façons :

-Par simple pesée

-A l'aide d'un potomètre (Fig.2) :

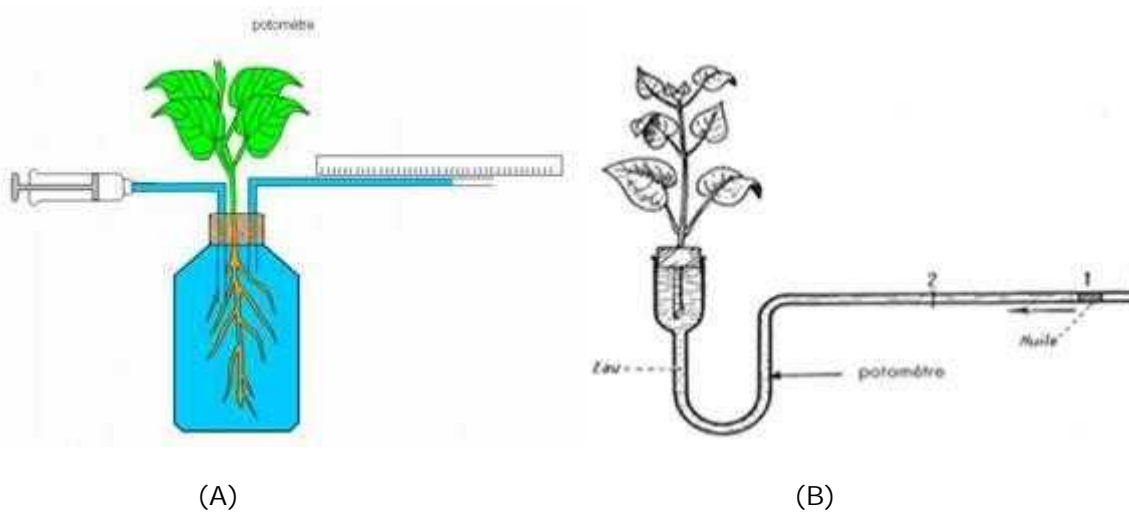


Figure n°2 : Potomètre de Vescque (deux modèles différents A et B)

- En mesurant la guttation de l'eau hors de la base d'une tige sectionnée (Fig.3)

Si on coupe un rameau de vigne au printemps, de la sève s'écoule au niveau de la section de la tige : on dit que la vigne « pleure ».



Figure n°3 : Guttation

Toutefois ces méthodes restent critiquables car, soit elles font intervenir les deux appareils aérien et racinaire en même temps la perte d'eau est alors la résultante de l'absorption et de la transpiration qui sont deux phénomènes physiologiques se contrôlant mutuellement, soit en supprimant totalement l'appareil végétatif aérien, ce qui entraîne la levée du contrôle de la transpiration sur l'absorption. Malgré leur imperfection, ces méthodes donnent une idée des quantités d'eau absorbées quotidiennement par les végétaux.

On peut dire qu'un végétal absorbe en moyenne et par jour son propre poids d'eau ;

Un arbre d'une forêt tempérée absorbe 500 l/j → 30 t d'eau / ha de forêt.

Un plant de vigne absorbe 1 l/j.

4-2-3- Mécanismes de l'absorption :

Le mécanisme primaire d'entrée de l'eau est le résultat de lois purement physico-chimiques. L'absorption de l'eau est un processus passif (au sens thermodynamique du terme) du à la différence négative entre le potentiel hydrique du poil absorbant et celui du sol. elle est toute fois sous la dépendance du métabolisme.

Notion de Pression osmotique : le liquide vacuolaire d'une cellule végétale présente une certaine pression osmotique.

$$P_{\text{osm}} = R.T [C] = 22.4 [C]$$

à 0°C

P_{osm} : pression osmotique atmosphérique

R. : constante des gaz parfaits

T. : température absolue

[C] : concentration molaire du liquide vacuolaire

Mécanismes cellulaires de l'absorption au niveau des racines

Quelle que soit la structure considérée, l'absorption d'eau se fait toujours à travers une paroi cellulaire. Pour expliquer ces mécanismes, il faut se rappeler que les échanges d'eau entre le milieu intracellulaire et le milieu extracellulaire se font à travers la membrane cytoplasmique conformément aux lois physiques de la diffusion : l'**osmose** qui s'effectue toujours du milieu hypotonique vers le milieu hypertonique. La pression osmotique qui détermine le flux d'eau est proportionnelle à la différence de concentration entre les deux milieux.

Ainsi une cellule placée dans une solution hypertonique par rapport au milieu intra-cellulaire perd de l'eau et devient plasmolysée. En revanche, si elle est placée dans un milieu extracellulaire hypotonique par rapport au milieu intra-cellulaire, de l'eau pénètre dans la cellule, la vacuole gonfle : la cellule est alors turgescente (Fig.4)

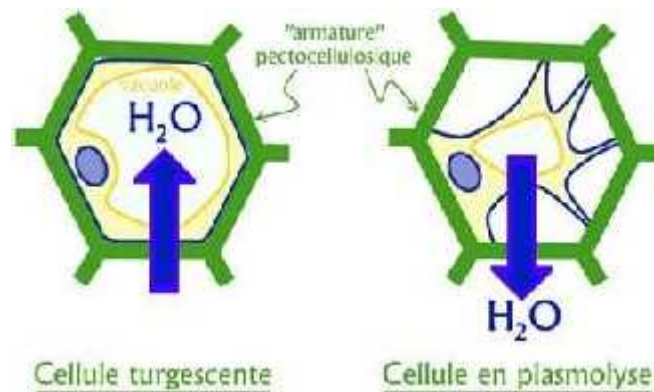


Figure n°4 : Etats hydriques de la cellule

Dans les conditions naturelles, la cellule du poil absorbant (ou celle du mycélium des mycorhizes) est toujours hypertonique par rapport à la solution du sol : elle absorbe donc l'eau passivement par osmose

Une plante, arrosée avec une solution trop concentrée en sels minéraux, se fane et meurt car, non seulement les cellules des racines n'absorbent plus d'eau, mais elles en perdent ce qui entraîne leur plasmolyse.

Hypotonie du milieu : Si la cellule est plongée dans un milieu hypotonique (de pression osmotique inférieure à celle de son liquide vacuolaire), un appel d'eau se produit du milieu le moins concentré vers le milieu le plus concentré. De l'eau entre dans la cellule et celle-ci se gonfle, devient turgescente. La paroi cellulaire se déforme, se distend sous l'effet de cette pression osmotique (**P_{osm}**) et oppose progressivement une pression membranaire (**P_{mbr}**) de résistance à la déformation lorsque ces deux pressions opposées s'équilibrent, la cellule atteint son volume maximum. C'est l'état de pleine turgescence, état naturel aux cellules des végétaux non ligneux à port dressé (Fig.4).

Isotonie : la pression osmotique du liquide vacuolaire est donc responsable de l'entrée de l'eau dans la cellule végétale mais à chaque instant cette pression osmotique doit être diminuée de la contre pression de résistance à la déformation exercée par le cadre pecto-cellulosique, c'est la force de "Succion S », elle est obtenue par la différence entre la pression osmotique et la pression membranaire ou contre pression de résistance à la déformation exercée par la paroi.

$$S = P_{osm} - P_{mbr}$$

La quantité d'eau entrant dans une cellule végétale est à chaque instant, proportionnelle aux forces de succion exercées par la cellule sur l'eau de son entourage. Cette pression de succion de l'eau est à son maximum quand le milieu est de même concentration ou de même pression osmotique que le liquide vacuolaire

Hypertonie du milieu extérieur : quand le milieu présente une force de succion de l'eau inférieure à celle de la cellule, l'eau sort de la cellule vers l'extérieur et ceci provoque une *plasmolyse* de la cellule ; c'est ce qui se produit notamment dans les sols desséchés au-delà du point de flétrissement des végétaux.

Autrement dit il doit y avoir une hypertonie de la vacuole suffisante du poil absorbant par rapport à la solution du sol, pour surmonter la résistance qu'oppose la turgescence à l'entrée de l'eau.

C'est en définitif l'hypertonie du poil absorbant qui est généralement le facteur déterminant de l'absorption et elle est largement sous le contrôle de l'activité physiologique.

4-3-Transit de l'eau dans la plante :

4-3-1-Dans les racines :

Une coupe transversale, effectuée au niveau de la région pilifère d'une jeune racine (Fig.5), montre l'existence de deux zones concentriques nettement distinctes : écorce ou cortex et cylindre central ou endoderme où se trouvent les vaisseaux du bois conducteurs de la sève brute.

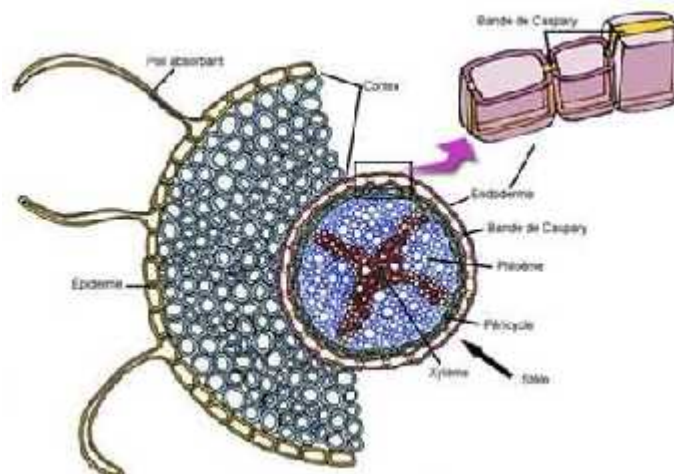


Figure n°5 : Coupe transversale de la zone pilifère de la racine

Des mesures de pression osmotique réalisée sur une racine indiquent l'existence d'une inversion du gradient de pression osmotique au niveau de l'endoderme. Des poils absorbants à l'endoderme, l'eau circule de **manière passive** selon les lois de l'osmose ; à partir de l'endoderme, la progression nécessite une dépense d'énergie : c'est un **transport actif** (Fig.6)

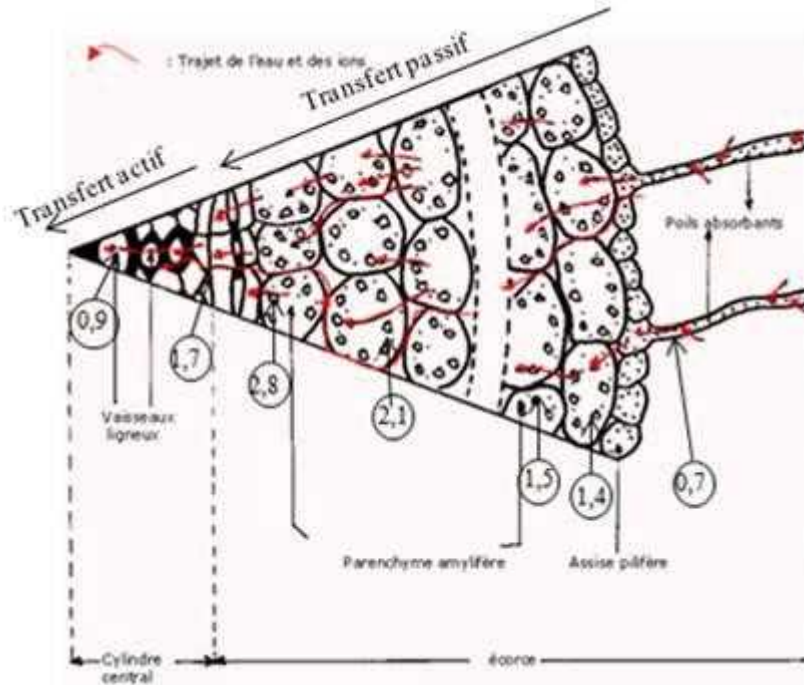


Figure n°6 : Trajet de l'eau du poil absorbant à l'endoderme de la racine

a-Trajets de l'eau : L'eau entrée par les poils absorbants gagne les vaisseaux conducteurs par le cortex (écorce) et la stèle (cylindre central). Elle suit trois voies ;

L'apoplasme : c'est l'ensemble des parois, des lacunes et des méats des cellules, très accessible à l'eau et aux ions minéraux.

Le symplasma c'est l'ensemble des cytoplasmes qui sont en continuité par les systèmes de jonction tels que les plasmodesmes.

De vacuole à vacuole : au travers des parois et des couches cytoplasmiques ; ce transport est dit transport transcellulaire par opposition au transport transmembranaire limité à une seule membrane.

Dans le cortex, l'apoplasme qui offre très peu de résistance à l'eau est la voie principale mais, le cadre subérimé des cellules endodermiques forme un barrage que l'eau doit contourner par le symplasma. Les trois voies sont d'ailleurs en constante communication.

b-Poussée radiculaire : A l'entrée des vaisseaux l'eau est émise sous pression ; c'est la poussée radiculaire ou racinaire qui dépasse souvent 1 bar (Fig.7). Ci-après quelques exemples :

-Erable à sucre : 1bar

-Vigne : 1.25 bars

-bouleau : 2 à 2.5 bars

-Marronnier : 9 bars

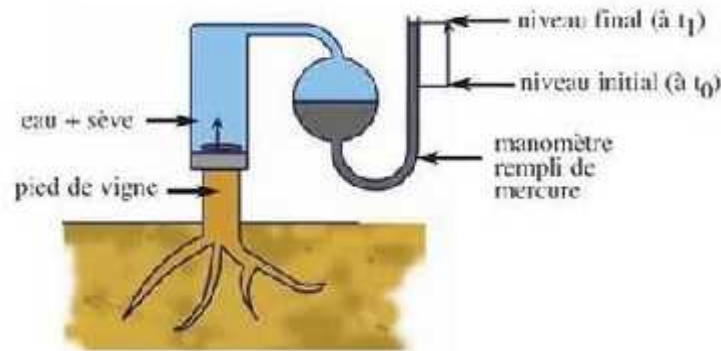


Figure n° 7: Poussée radiculaire

La poussée radiculaire n'existe que si la racine est vivante et aérée ; elle est inhibée par le cyanure et diminue quand la température s'abaisse et sur la racine excisée, elle disparaît si les racines sont inanitiées, ne reprenant qu'en présence de glucides. Elle présente une périodicité journalière avec maximum en fin de matinée. Elle joue certainement un rôle important dans la montée de la sève. Toute fois son existence n'est pas constante ; certaines espèces notamment les conifères ne la présentent pas. En outre, elle disparaît chez les plantes en transpiration active et, si on les décapite alors elle ne reprend que plusieurs heures après la décapitation.


Mécanismes : le mouvement de l'eau à travers la racine est dans les conditions normales, essentiellement dû à l'appel des parties aériennes (transpiration) ; mais le mécanisme de la poussée radiculaire est mal élucidé. Il s'agit indiscutablement d'un processus actif lié au métabolisme et plusieurs hypothèses tentent de l'expliquer :

- La tendance actuelle serait de considérer la poussée radiculaire pour une large part comme de nature osmotique.

- Il y aurait une sécrétion active d'ions dans les vaisseaux conducteurs par les cellules de la stèle, les ions sécrétés entraînent l'eau. Ce point de vue est en accord avec le fait que la concentration saline de la sève brute suit un rythme sensiblement analogue à celui de la poussée radiculaire.

4-3-2-Dans la tige et la sève brute :

- a- **Caractères** : la solution minérale venue du cortex et collectée dans les vaisseaux, constitue la sève brute qui est une solution très diluée de sels minéraux (0.1 à 2 g/l) avec une pression osmotique d'au moins 1 bar en plus d'acides aminés résultant de la réduction des nitrates dans les racines et enfin de parcours, elle s'appauvrit en sels minéraux mais elle s'enrichit en substances organiques (surtout au printemps par mobilisation des réserves).



La sève brute ne circule par les vaisseaux comme le montrent des expériences très simples :

- Tremper la base d'un rameau isolé dans de la paraffine fondue, en gratter la surface pour que seuls les vaisseaux restent obturés ; le rameau mis dans l'eau se fane.
- Plonger un rameau dans une solution de carmin et faire des coupes à différentes hauteurs.
- Pratiquer une décortication annulaire sur la tige (Fig. 8) si elle va jusqu'à la moelle en sectionnant les vaisseaux, la plante se fane mais si elle la respecte, la plante reste turgescence.

La sève ne circule pas dans les vaisseaux lésés (entailles) ou obturés par des thyllés*. Si la lésion n'est pas trop importante, elle peut être contournée par le parenchyme du xylème.

b- *Mécanismes* : Plusieurs mécanismes peuvent être considérés pour expliquer la montée de la sève dans la tige

-la capillarité : la sève monte dans les vaisseaux conducteurs comme l'encre monte dans la trame d'un buvard. L'inconvénient est que ce mécanisme ne pourrait expliquer que la montée de la sève dans les végétaux très bas (mousses) ou dans des fleurs coupées (Au-delà dessus du niveau d'équilibre, les forces de tension en cause tendent plutôt à s'opposer à une montée vers les niveaux supérieurs).

-la poussée radiculaire : quand elle existe, joue un rôle important lorsque la transpiration est faible en particulier la nuit ; cependant cela reste insuffisant.

La transpiration est le plus souvent, le principal moteur de la montée de la sève. Son appel se transmet le long de la tige grâce à la cohésion des filets d'eau comme dans le modèle de Dixon (Fig.9), Un entonnoir fermé d'une plaque de plâtre poreux est relié par un tube vertical à une cuve à mercure, l'évaporation provoque un appel d'eau qui entraîne une élévation de la colonne de mercure de plus d'un mètre qui correspond à 15 m d'eau.

Dans les troncs d'arbres, la continuité des filets d'eau se démontre à l'aide d'iode radioactive. elle résiste à des tensions de plus de 2MPa.

Lorsque la transpiration l'emporte on dit que l'eau est sous tension ; lorsque c'est la poussée radiculaire qui l'emporte, elle est sous pression. Ainsi selon l'heure de la journée, la sève est-elle sous pression ou sous tension. On peut le vérifier avec un manomètre fiché dans le tronc (ou avec un dendrographe). On enregistre ainsi les variations quotidiennes d'une fraction de mm ou de 1 mm pour les gros arbres avec maximum en fin de matinée (poussée radiculaire ayant agi toute la nuit) et minimum en fin d'après midi (transpiration atteint son maximum).

5- La transpiration :

Tout déficit de saturation en vapeur d'eau existant dans l'atmosphère entourant une plante, entraîne l'évaporation continue de l'eau imbibant les tissus de celle-ci : c'est le phénomène de la transpiration qui crée un appel continu d'eau dans le végétal et est le moteur principal de la montée de la sève de la plante.

La transpiration entraîne pour la plante des besoins en eau considérables surtout quand elle est trop intense ; elle ne peut être compensée par une alimentation en eau suffisante et entraîne le flétrissement de la plante et le ralentissement de son métabolisme général. Un flétrissement trop avancé devient irréversible si bien que la transpiration représente un danger potentiel pour la plante.

La transpiration est soumise à des contraintes physiques et physiologiques qu'elle surmonte grâce à des dispositifs anatomiques et à des systèmes de régulation dont le plus efficace est le degré d'ouverture des stomates notamment pour pouvoir s'adapter aux climats très secs.

5-1- Mise en évidence du phénomène de transpiration :

- a- Une plante en pot non arrosée se fane et son poids diminue en prenant toute précaution pour éviter que de l'eau ne s'évapore du pot, en l'enfermant par exemple dans un sac en plastique qui ne laisse traverser que la tige.
- b- La mise sous cloche (avec les mêmes précautions que précédemment), elle donne lieu à des dépôts de gouttelettes le long du verre.
- c- Une plante ou un rameau de plante enfermé dans un sac en plastique donne lieu à un dépôt de gouttelettes sur la surface interne du sac (Fig.8) ; cela ne se produit pas si la plante est effeuillée : la montée d'eau résulte d'une aspiration au niveau des feuilles, en conséquence, il existe une véritable transpiration foliaire



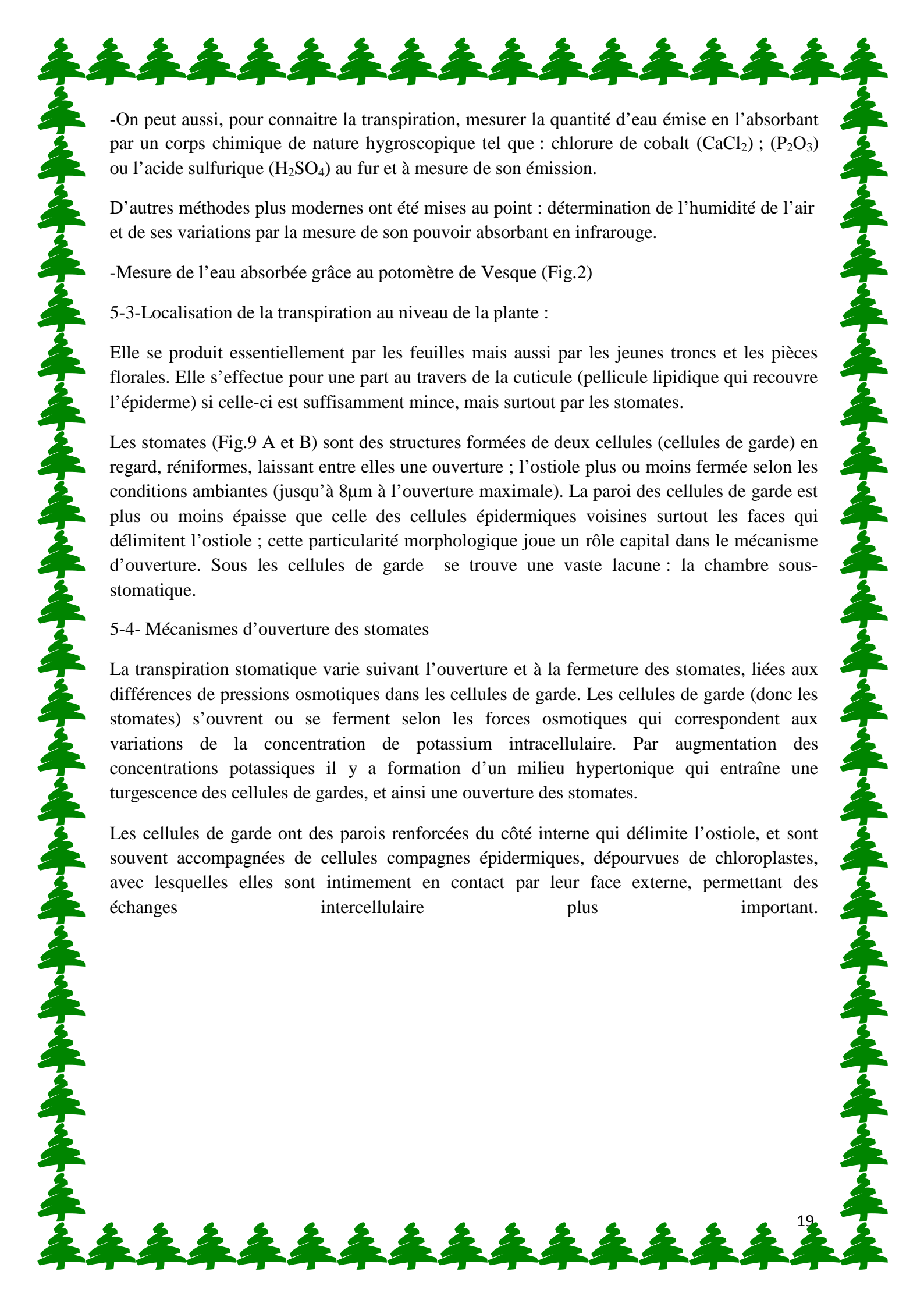
Figure n°8 : Transpiration, mise en évidence

- d- Par le potomètre de Vesque : Le déplacement du niveau du liquide dans le tube fin concrétise la transpiration de la plante (Fig.2).

5-2- Mesure de la transpiration :

C'est la quantité d'eau émise par unité de temps et par unité de masse (ou de surface) de matière respirante

- Cette quantité peut être mesurée simplement par le poids perdu par une plante en pot non arrosée ou par un organe détaché de la plante mère (fruit, feuille...) pendant un temps donné et limite. Il faut parfois tenir compte de la perte de CO_2 par respiration.



-On peut aussi, pour connaître la transpiration, mesurer la quantité d'eau émise en l'absorbant par un corps chimique de nature hygroscopique tel que : chlorure de cobalt (CaCl_2) ; (P_2O_3) ou l'acide sulfurique (H_2SO_4) au fur et à mesure de son émission.

D'autres méthodes plus modernes ont été mises au point : détermination de l'humidité de l'air et de ses variations par la mesure de son pouvoir absorbant en infrarouge.

-Mesure de l'eau absorbée grâce au potomètre de Vesque (Fig.2)

5-3-Localisation de la transpiration au niveau de la plante :

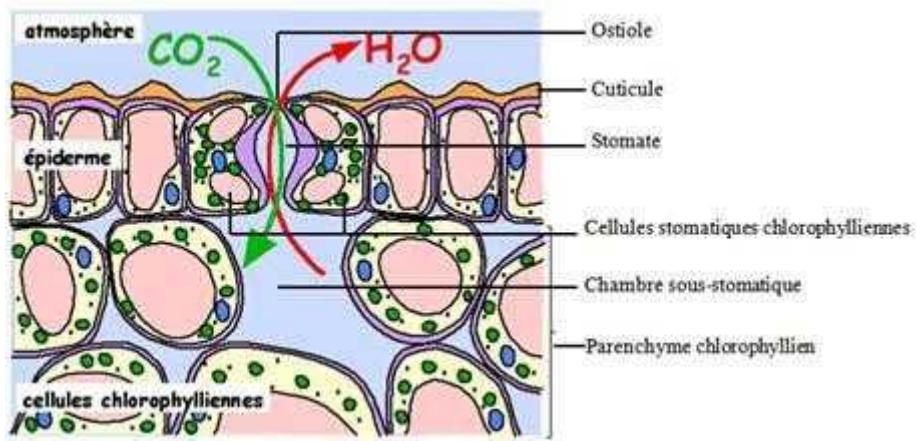
Elle se produit essentiellement par les feuilles mais aussi par les jeunes troncs et les pièces florales. Elle s'effectue pour une part au travers de la cuticule (pellicule lipidique qui recouvre l'épiderme) si celle-ci est suffisamment mince, mais surtout par les stomates.

Les stomates (Fig.9 A et B) sont des structures formées de deux cellules (cellules de garde) en regard, réniformes, laissant entre elles une ouverture ; l'ostiole plus ou moins fermée selon les conditions ambiantes (jusqu'à $8\mu\text{m}$ à l'ouverture maximale). La paroi des cellules de garde est plus ou moins épaisse que celle des cellules épidermiques voisines surtout les faces qui délimitent l'ostiole ; cette particularité morphologique joue un rôle capital dans le mécanisme d'ouverture. Sous les cellules de garde se trouve une vaste lacune : la chambre sous-stomatique.

5-4- Mécanismes d'ouverture des stomates

La transpiration stomatique varie suivant l'ouverture et à la fermeture des stomates, liées aux différences de pressions osmotiques dans les cellules de garde. Les cellules de garde (donc les stomates) s'ouvrent ou se ferment selon les forces osmotiques qui correspondent aux variations de la concentration de potassium intracellulaire. Par augmentation des concentrations potassiques il y a formation d'un milieu hypertonique qui entraîne une turgescence des cellules de gardes, et ainsi une ouverture des stomates.

Les cellules de garde ont des parois renforcées du côté interne qui délimite l'ostiole, et sont souvent accompagnées de cellules compagnes épidermiques, dépourvues de chloroplastes, avec lesquelles elles sont intimement en contact par leur face externe, permettant des échanges intercellulaire plus important.



(A)

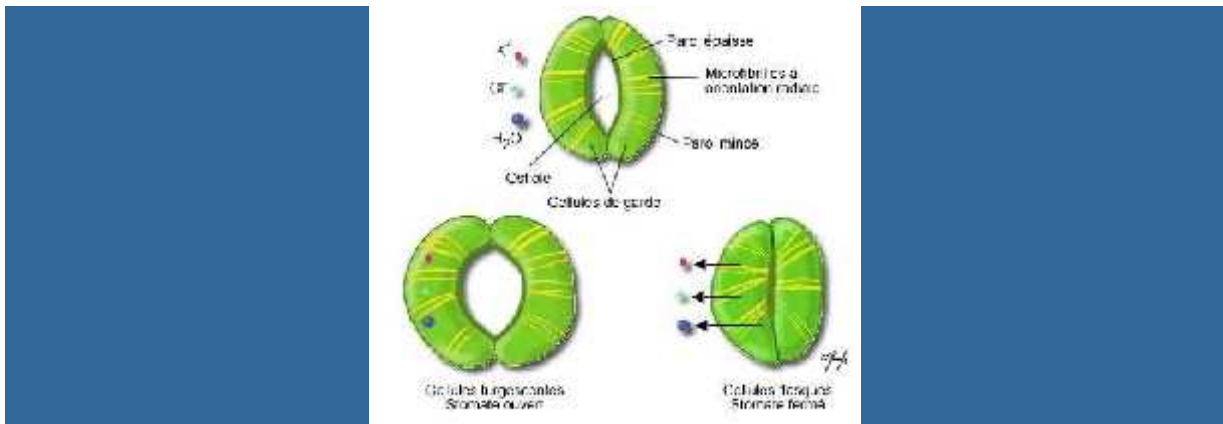


Figure n °9 : Schéma d'un stomate (A : Coupe longitudinale au niveau du parenchyme Chlorophyllien ; B : schéma général) montrant le stomate

CHAPITRE II : NUTRITION MINERALE.

Introduction :

La plante se nourrit de sels minéraux qui existent dans le sol sous forme d'ions et qui pénètrent dans les racines. De grandes surfaces racinaires et des systèmes actifs d'absorption expliquent que, malgré les faibles concentrations des ions dans la solution du sol, l'acquisition des nutriments minéraux par les plantes est un processus très efficace. Par ailleurs, des symbioses formées entre des bactéries ou des champignons (mycorhizes) et les racines, participent à l'acquisition de ces éléments minéraux. D'immenses progrès ont été réalisés récemment dans la compréhension des mécanismes moléculaires du transport ionique ainsi que des gènes impliqués dans la nutrition minérale.

Les végétaux chlorophylliens puisent des matières minérales indispensables à leur bon fonctionnement dans leurs milieux environnant (sol, eau et air). L'absence ou carence de ces matières perturbe leur développement.

1-Détermination des besoins nutritifs des végétaux chlorophylliens

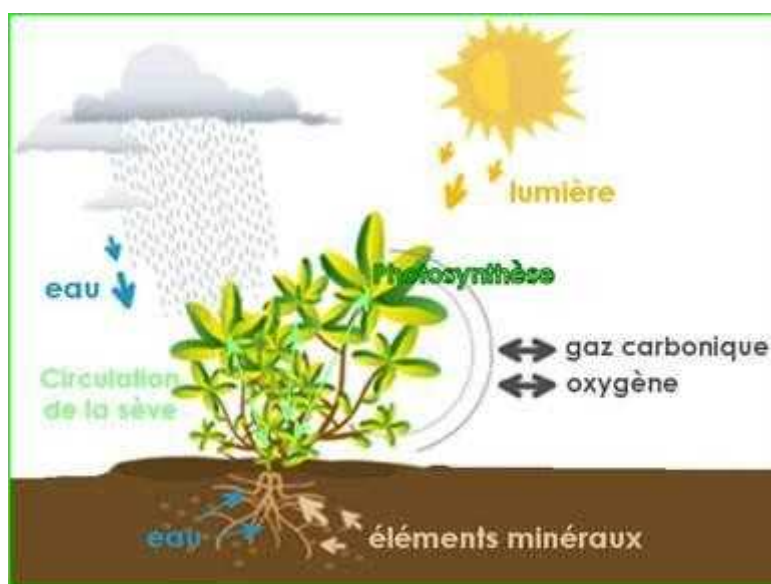
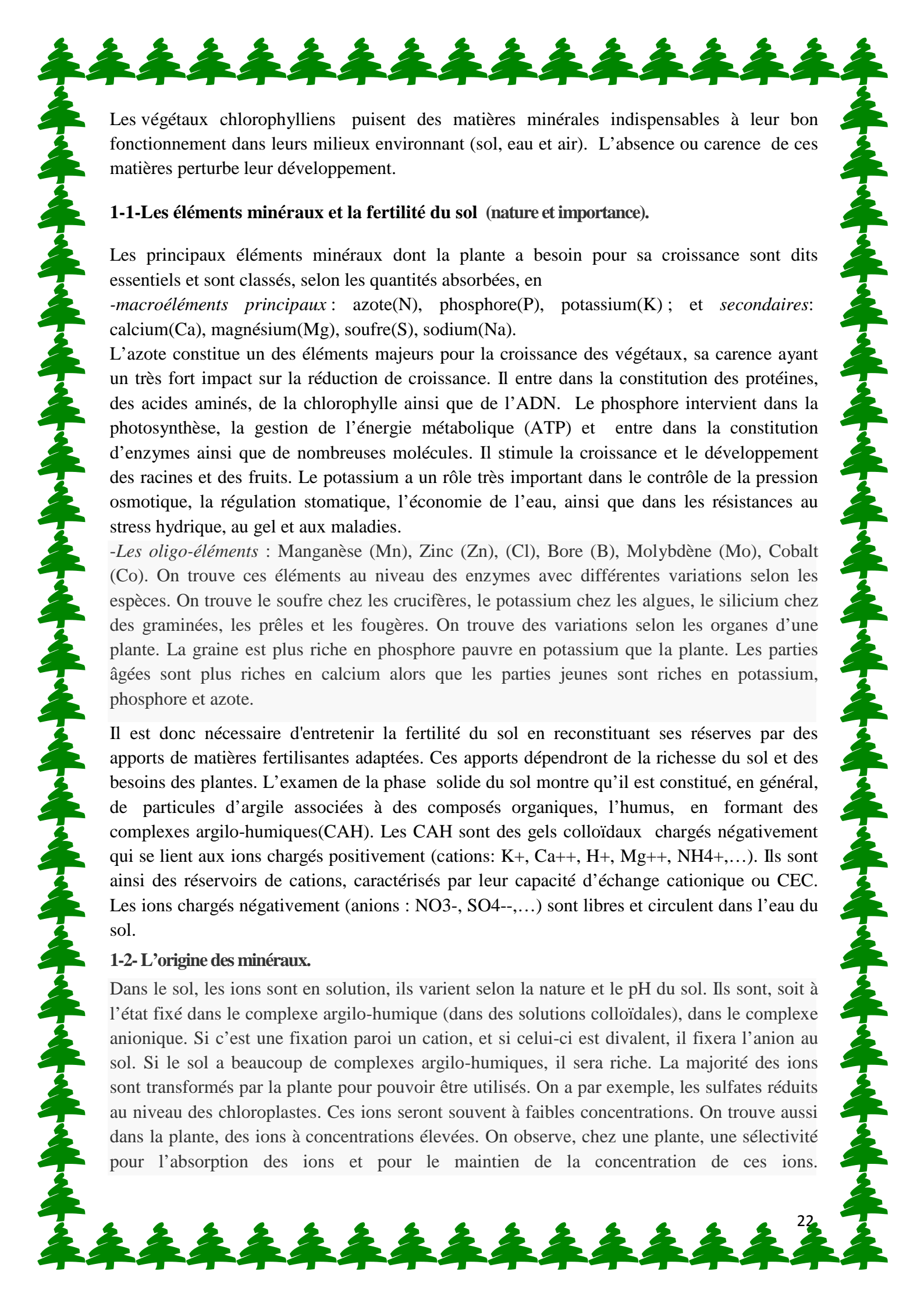


Figure n°10 : Besoins de la plante

La plante se nourrit de sels minéraux qui existent dans le sol sous forme d'ions et qui pénètrent dans les racines. De grandes surfaces racinaires et des systèmes actifs d'absorption expliquent que, malgré les faibles concentrations des ions dans la solution du sol, l'acquisition des nutriments minéraux par les plantes est un processus très efficace. Par ailleurs, des symbioses formées entre des bactéries ou des champignons (mycorhizes) et les racines, participent à l'acquisition de ces éléments minéraux (Fig.10). D'immenses progrès ont été réalisés récemment dans la compréhension des mécanismes moléculaires du transport ionique ainsi que des gènes impliqués dans la nutrition minérale.



Les végétaux chlorophylliens puisent des matières minérales indispensables à leur bon fonctionnement dans leurs milieux environnant (sol, eau et air). L'absence ou carence de ces matières perturbe leur développement.

1-1-Les éléments minéraux et la fertilité du sol (nature et importance).

Les principaux éléments minéraux dont la plante a besoin pour sa croissance sont dits essentiels et sont classés, selon les quantités absorbées, en

-macroéléments principaux : azote(N), phosphore(P), potassium(K) ; et *secondaires* : calcium(Ca), magnésium(Mg), soufre(S), sodium(Na).

L'azote constitue un des éléments majeurs pour la croissance des végétaux, sa carence ayant un très fort impact sur la réduction de croissance. Il entre dans la constitution des protéines, des acides aminés, de la chlorophylle ainsi que de l'ADN. Le phosphore intervient dans la photosynthèse, la gestion de l'énergie métabolique (ATP) et entre dans la constitution d'enzymes ainsi que de nombreuses molécules. Il stimule la croissance et le développement des racines et des fruits. Le potassium a un rôle très important dans le contrôle de la pression osmotique, la régulation stomatique, l'économie de l'eau, ainsi que dans les résistances au stress hydrique, au gel et aux maladies.

-Les oligo-éléments : Manganèse (Mn), Zinc (Zn), (Cl), Bore (B), Molybdène (Mo), Cobalt (Co). On trouve ces éléments au niveau des enzymes avec différentes variations selon les espèces. On trouve le soufre chez les crucifères, le potassium chez les algues, le silicium chez des graminées, les prêles et les fougères. On trouve des variations selon les organes d'une plante. La graine est plus riche en phosphore pauvre en potassium que la plante. Les parties âgées sont plus riches en calcium alors que les parties jeunes sont riches en potassium, phosphore et azote.

Il est donc nécessaire d'entretenir la fertilité du sol en reconstituant ses réserves par des apports de matières fertilisantes adaptées. Ces apports dépendront de la richesse du sol et des besoins des plantes. L'examen de la phase solide du sol montre qu'il est constitué, en général, de particules d'argile associées à des composés organiques, l'humus, en formant des complexes argilo-humiques(CAH). Les CAH sont des gels colloïdaux chargés négativement qui se lient aux ions chargés positivement (cations: K^+ , Ca^{++} , H^+ , Mg^{++} , NH_4^+ ,...). Ils sont ainsi des réservoirs de cations, caractérisés par leur capacité d'échange cationique ou CEC. Les ions chargés négativement (anions : NO_3^- , SO_4^{--} ,...) sont libres et circulent dans l'eau du sol.

1-2- L'origine des minéraux.

Dans le sol, les ions sont en solution, ils varient selon la nature et le pH du sol. Ils sont, soit à l'état fixé dans le complexe argilo-humique (dans des solutions colloïdales), dans le complexe anionique. Si c'est une fixation paroi un cation, et si celui-ci est divalent, il fixera l'anion au sol. Si le sol a beaucoup de complexes argilo-humiques, il sera riche. La majorité des ions sont transformés par la plante pour pouvoir être utilisés. On a par exemple, les sulfates réduits au niveau des chloroplastes. Ces ions seront souvent à faibles concentrations. On trouve aussi dans la plante, des ions à concentrations élevées. On observe, chez une plante, une sélectivité pour l'absorption des ions et pour le maintien de la concentration de ces ions.

Dans le complexe argilo-humique, Les ions sont fortement liés : il y a compétition entre la plante et le complexe ionique pour capter des ions, d'où une dépense d'énergie par le végétal.

2- Modalités et mécanismes de l'absorption.

Connaître les mécanismes de nutrition des végétaux permet de raisonner la fertilisation pour obtenir des plantes de qualité et résistantes aux maladies

2-1- Modalités.

Une fois l'absorption effectuée par les poils absorbants ou les mycorhizes, l'absorption est réalisée dans les cultures de manière spécifique. Par exemple, dans un verger, on fait absorber à une plante des oligo-éléments, l'absorption foliaire de fer par une plante chlorosée est le seul moyen de faire absorber ce fer sur les sols calcaires. Les ions circulent par voie symplastique (dans le cytoplasme) jusqu'au xylème puis ils passent dans la sève brute. Certains ions sont retenus au niveau des parois, comme le calcium, d'autres s'accumulent dans la vacuole sont excrétés. La vacuole est une poubelle ou une réserve.

2-2- Mécanismes de l'absorption.

L'absorption est sensible à la température et aux inhibiteurs métaboliques ; par exemple, une cellule morte n'absorbe pas. Ils existent plusieurs composantes dans le phénomène de transport des ions et des petites molécules. On trouve trois possibilités de pénétration : la diffusion, le transport passif (diffusion facilitée), le transport actif.

2-2-1- La simple diffusion.

La membrane cellulaire permet à l'eau et aux molécules non polaires de pénétrer par simple diffusion mais aussi a quelques petites molécules polaires comme l'urée, le glycérol, le CO₂, peuvent pénétrer. Ce phénomène de diffusion est exprimé par la loi de Fick.

$$(DQ/dT)=k.a. c$$

k : le coefficient de diffusion,
a : la surface de diffusion,
c : la variation de concentration.

La diffusion tend vers un état d'équilibre pour que le gradient de concentration soit nul. Le transport de petites molécules se fait grâce à des protéines membranaires de deux types. On trouve des protéines porteuses et des canaux protéiques (Fig.11).

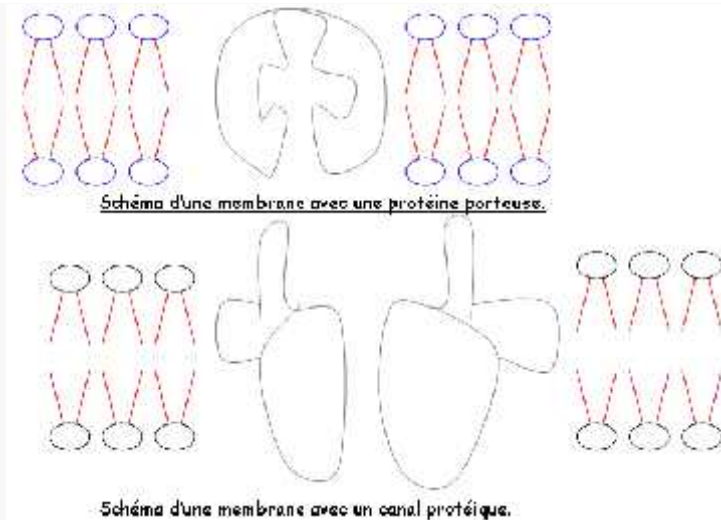


Figure n°11 : transport des minéraux

2-2-2-Le transport passif et la diffusion facilitée.

Le transport se fait par des canaux protéiques et par des protéines porteuses. Si la molécule est non chargée, le transport est déterminé par le gradient de concentration. Si cette molécule est chargée, le transport est déterminé par le gradient de concentration et par le gradient électrochimique. On a donc un transport dans le sens du gradient qui entraîne un potentiel de membrane.

Le potentiel électrochimique :

$$\mu = nF \cdot E(2-1) + RT \log(c_1/c_2) \quad (T) = nF \cdot E(2-1) + (RT/F) \log(c_1/c_2) \quad (V)$$

$$\mu = E-2,3(RT/F) \quad pH = E-0,06 \quad pH$$

Dans la diffusion facilitée le transport est réalisé dans le sens du gradient. Le transport des molécules est réalisé par des canaux protéiques, par des protéines porteuses et par perméabilité membranaire. On trouve deux types de protéines porteuses, des protéines qui permettent un transport passif et des protéines qui réalisent ce transport grâce à de l'énergie : c'est un transport actif.

2-2-3- Mécanisme actif.

Lapicque a mis en évidence le phénomène d'épictèse : c'est une absorption active des ions et des petites molécules.

Une cellule végétale dans une solution hypertonique, concentrée en saccharose est plasmolysée. Au bout d'un certain temps, la cellule redevient turgescente : la cellule rétablit son hypertonie en absorbant des ions (ou des petites molécules) contre le gradient du potentiel électro-chimique. Ce phénomène explique qu'une cellule est capable de concentrer des ions. Ces déplacements nécessitent de l'énergie d'origine chimique, par exemple l'ATP, d'origine physique : le gradient ionique, due aux déplacements d'électrons. Cette énergie permet le

fonctionnement des pompes ioniques donc le type le plus représenté est le type des pompes à protons. On trouve deux types de pompes (Fig.12) :

Des pompes rédox donc la circulation est réalisée grâce à des déplacements d'électrons. Ces pompes produisent de l'ATP.

Des pompes de type ATPase : elles expulsent les protons au niveau de la membrane du plasmalème ou du tonoplaste (transports actifs). Elles utilisent de l'énergie. Le transport des protons par ces ATPases est un transport actif primaire.

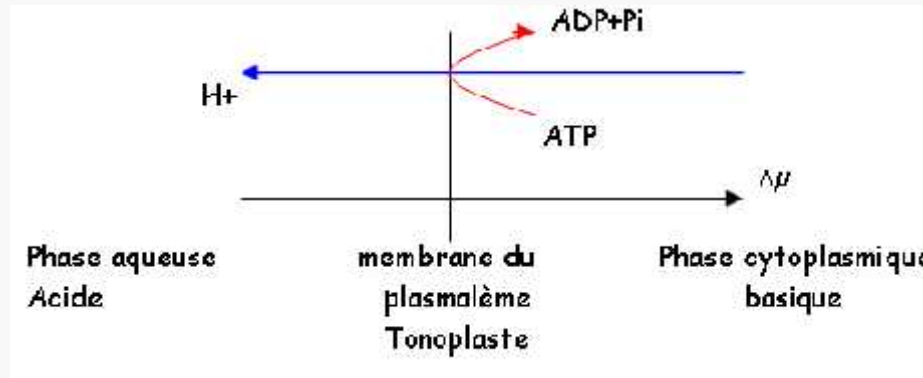


Figure n°12 : Pompe à protons

Cette émission de protons crée la «force motrice protonique », qui permet à son tour d'énergiser le déplacement d'autres espèces ioniques. On parle de transports actifs secondaires.

Ce transport actif secondaire se fait dans le sens opposé au gradient, en demandant donc de l'énergie. S'il y a transport d'un seul soluté, on parle de système uniport. Si deux solutés traversent dans le même sens, c'est un système symport. Si les 2 solutés traversent dans un sens différent, c'est un transport antiport.

3- Rôles des ions dans la plante.

3-1- Rôles physiques.

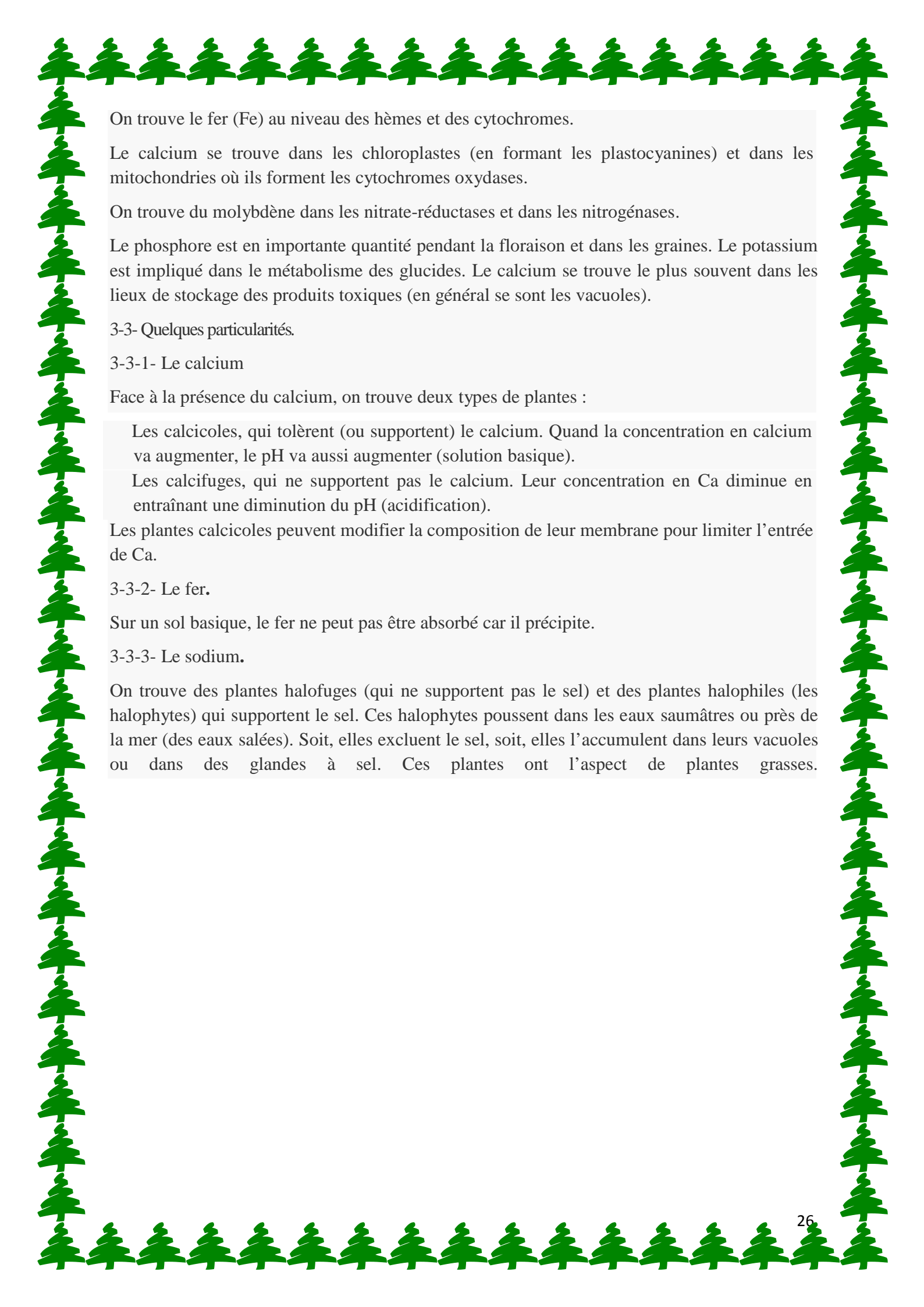
Les phosphates favorisent l'entrée du magnésium, alors que le calcium freine son entrée. Les ions permettent le maintien de la turgescence, du pH (système tampon), la création de potentiels membranaire qui agissent sur la perméabilité de la membrane.

3-2- Rôles physiologiques.

Les rôles constitutifs sont tenus par les éléments phosphorylés, comme les phospholipides, les composés phosphorylés, les nucléotides, et les acides nucléiques.

On trouve le soufre dans les acides aminés et dans les protéines.

On trouve le calcium dans les parois où ils forment avec les peptides, des pectates ; dans la vacuole il est sous forme de cristaux d'oxalate de calcium ; dans le cytoplasme il est associé à la calmoduline.



On trouve le fer (Fe) au niveau des hèmes et des cytochromes.

Le calcium se trouve dans les chloroplastes (en formant les plastocyanines) et dans les mitochondries où ils forment les cytochromes oxydases.

On trouve du molybdène dans les nitrate-réductases et dans les nitrogénases.

Le phosphore est en importante quantité pendant la floraison et dans les graines. Le potassium est impliqué dans le métabolisme des glucides. Le calcium se trouve le plus souvent dans les lieux de stockage des produits toxiques (en général se sont les vacuoles).

3-3- Quelques particularités.

3-3-1- Le calcium

Face à la présence du calcium, on trouve deux types de plantes :

Les calcicoles, qui tolèrent (ou supportent) le calcium. Quand la concentration en calcium va augmenter, le pH va aussi augmenter (solution basique).

Les calcifuges, qui ne supportent pas le calcium. Leur concentration en Ca diminue en entraînant une diminution du pH (acidification).

Les plantes calcicoles peuvent modifier la composition de leur membrane pour limiter l'entrée de Ca.

3-3-2- Le fer.

Sur un sol basique, le fer ne peut pas être absorbé car il précipite.

3-3-3- Le sodium.

On trouve des plantes halofuges (qui ne supportent pas le sel) et des plantes halophiles (les halophytes) qui supportent le sel. Ces halophytes poussent dans les eaux saumâtres ou près de la mer (des eaux salées). Soit, elles excluent le sel, soit, elles l'accumulent dans leurs vacuoles ou dans des glandes à sel. Ces plantes ont l'aspect de plantes grasses.

CHAPITRE III : METABOLISME DE LA PLANTE (NUTRITION CARBONNEE)

A- Photosynthèse

Introduction :

La Photosynthèse est une propriété fondamentale du règne végétal. Elle lui confère l'indépendance vis-à-vis des autres formes de vie. Son mécanisme consiste à utiliser l'énergie solaire pour briser la molécule d'eau en ses deux éléments constitutifs ; l'oxygène inutile est rejeté, l'hydrogène va constituer une « force motrice » destinée à transformer le gaz carbonique atmosphérique en sucres (Fig.13).

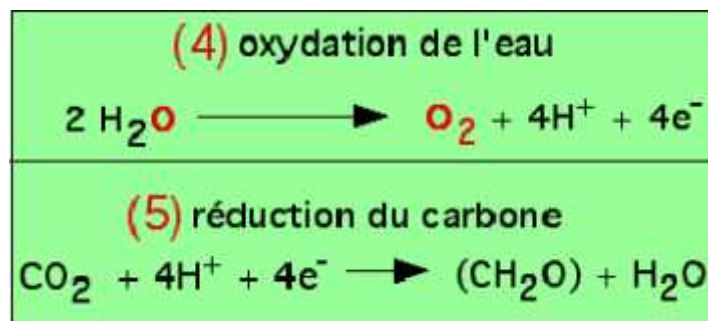


Fig. n°13 : décomposition de la réaction photosynthétique en deux groupes de réactions Redox

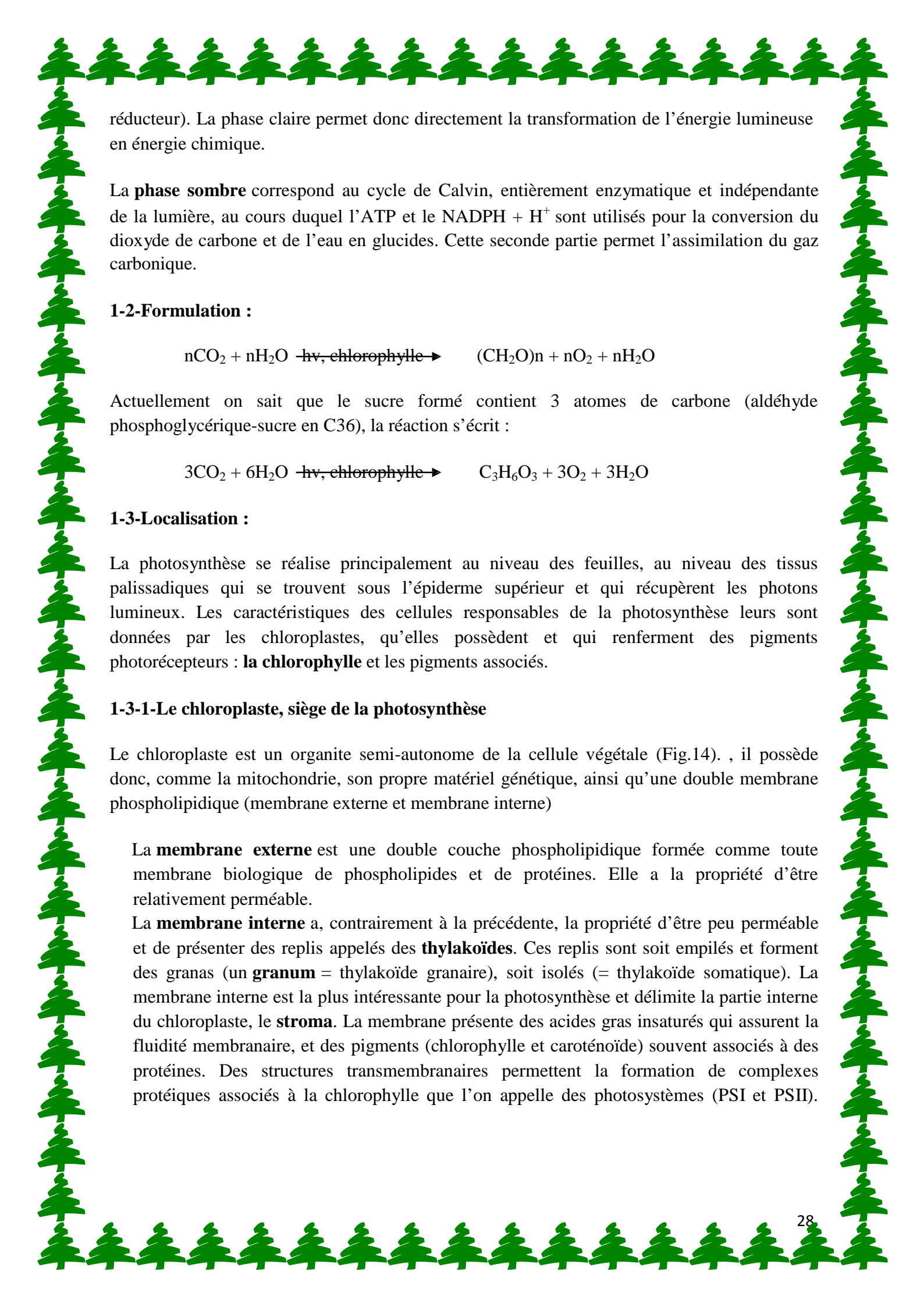
En restituant au cours des phénomènes respiratoires l'énergie emmagasinée, ces sucres (glucoses, amidon.....) amorcent le cycle du carbone ; ainsi la vie sur la terre peut se poursuivre.

1-Généralités

1-1-Définition :

La photosynthèse est le processus responsable de la transformation de l'énergie lumineuse en énergie chimique au niveau de la plante, autrement dit : processus permettant de synthétiser de la matière organique (sucres) à partir de la lumière du soleil. Elle se réalise au niveau des chloroplastes qui sont des organites cellulaires spécialisées, et permet une consommation de dioxyde de carbone et d'eau afin de produire du dioxygène et des molécules organiques telles que le glucose. Pour se faire la photosynthèse se réalise en deux grandes phases, la phase claire et la phase sombre.

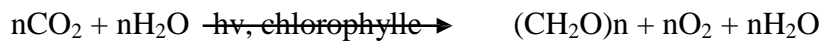
La **phase claire** est un ensemble de réactions photochimiques, qui dépendent de la lumière, et au cours desquels les électrons sont transportés à travers les deux photosystèmes (PSI et PSII) afin de produire de l'ATP (molécule riche en énergie) et du NADPH + H⁺ (potentiel



réducteur). La phase claire permet donc directement la transformation de l'énergie lumineuse en énergie chimique.

La **phase sombre** correspond au cycle de Calvin, entièrement enzymatique et indépendante de la lumière, au cours duquel l'ATP et le NADPH + H⁺ sont utilisés pour la conversion du dioxyde de carbone et de l'eau en glucides. Cette seconde partie permet l'assimilation du gaz carbonique.

1-2-Formulation :



Actuellement on sait que le sucre formé contient 3 atomes de carbone (aldéhyde phosphoglycérique-sucre en C36), la réaction s'écrit :



1-3-Localisation :

La photosynthèse se réalise principalement au niveau des feuilles, au niveau des tissus palissadiques qui se trouvent sous l'épiderme supérieur et qui récupèrent les photons lumineux. Les caractéristiques des cellules responsables de la photosynthèse leurs sont données par les chloroplastes, qu'elles possèdent et qui renferment des pigments photorécepteurs : **la chlorophylle** et les pigments associés.

1-3-1-Le chloroplaste, siège de la photosynthèse

Le chloroplaste est un organite semi-autonome de la cellule végétale (Fig.14). , il possède donc, comme la mitochondrie, son propre matériel génétique, ainsi qu'une double membrane phospholipidique (membrane externe et membrane interne)

La **membrane externe** est une double couche phospholipidique formée comme toute membrane biologique de phospholipides et de protéines. Elle a la propriété d'être relativement perméable.

La **membrane interne** a, contrairement à la précédente, la propriété d'être peu perméable et de présenter des replis appelés des **thylakoïdes**. Ces replis sont soit empilés et forment des granas (un **granum** = thylakoïde granaire), soit isolés (= thylakoïde somatique). La membrane interne est la plus intéressante pour la photosynthèse et délimite la partie interne du chloroplaste, le **stroma**. La membrane présente des acides gras insaturés qui assurent la fluidité membranaire, et des pigments (chlorophylle et caroténoïde) souvent associés à des protéines. Des structures transmembranaires permettent la formation de complexes protéiques associés à la chlorophylle que l'on appelle des photosystèmes (PSI et PSII).

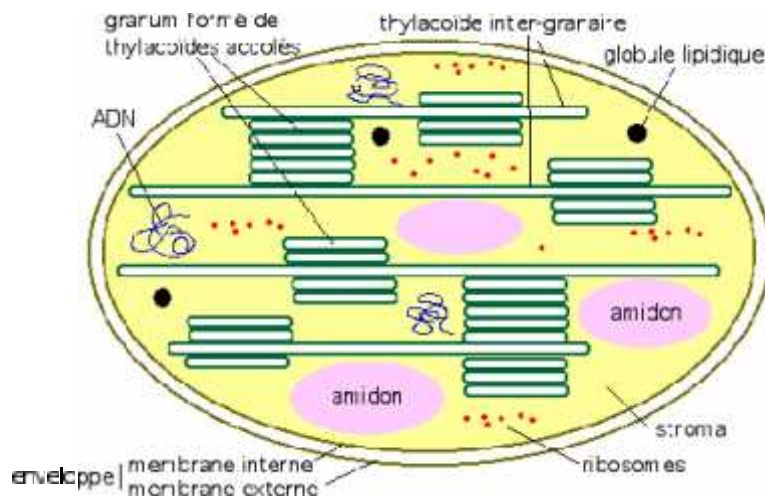


Figure n°14 : Schéma d'un chloroplaste

a- Structure des photosystèmes :

Les **photosystèmes** sont les centres photorécepteurs de la membrane des thylakoïdes contenus dans les chloroplastes. Ils sont constitués d'une **antenne collectrice** et d'un **centre réactionnel** situé au centre de l'antenne. L'antenne collectrice permet de capter l'énergie lumineuse grâce à des pigments de plusieurs types : chlorophylle a, b et caroténoïde. L'énergie captée est transmise au centre réactionnel qui est un emplacement spécialisé constitué d'amas de pigments contenant seulement une paire de chlorophylle « a » capable de céder ses électrons à l'**accepteur primaire**, premier accepteur de la chaîne d'accepteurs d'électrons. L'accepteur primaire du photosystème I (PSI) est la **chlorophylle A₀** (chlorophylle « a » modifiée) et du photosystème II (PSII) est la **phéophytine**. La chaîne d'accepteurs d'électrons permet le transport des électrons de molécule en molécule dans le sens de l'augmentation du potentiel.

La grande différence qui distingue le photosystème I du photosystème II est la longueur d'onde d'absorption, pourtant les centres réactionnels des deux photosystèmes présentent tous les deux une paire de chlorophylle « a ». Ceci est expliqué par le fait que les protéines associées à la chlorophylle jouent un grand rôle dans ses propriétés physiques. De cette manière le photosystème II (PSII) présente un complexe moléculaire appelé **P680** et le photosystème I (PSI) présente un complexe moléculaire appelé **P700**.

Au cours de la phase claire, les électrons sont tout d'abord fournis par l'eau au photosystème II (PSII), puis par la suite ils sont transmis au photosystème I (PSI). En effet c'est bien le photosystème II qui démarre la photosynthèse. Il sera ainsi présenté en premier dans le cours.

b-Mécanisme des photosystèmes

Le photosystème II (PSII)

L'énergie lumineuse est tout d'abord absorbée par l'antenne collectrice qui transmet ensuite son énergie au complexe P680. La chlorophylle « a » présente dans le complexe P680 libère alors les électrons qui seront captés par l'accepteur primaire (chlorophylle A0 = chlorophylle « a » modifiée) et transportés par la chaîne d'accepteurs d'électrons (Fig.15).

Ces électrons passent ensuite par le **complexe de cytochromes** où ils induisent le passage de protons du stroma vers l'espace intra-thylakoïdien. Les protons ainsi accumulés forment ce que l'on appelle le **gradient de protons**, qui permettra à l'**ATP synthétase** de produire de l'ATP.

En quittant le complexe de cytochromes, les électrons sont transmis au photosystème I (PSI).

La chlorophylle « a » du P680 a donc perdu des électrons qu'elle doit récupérer pour continuer à fonctionner ; ils lui sont fournis via la photolyse de l'eau.

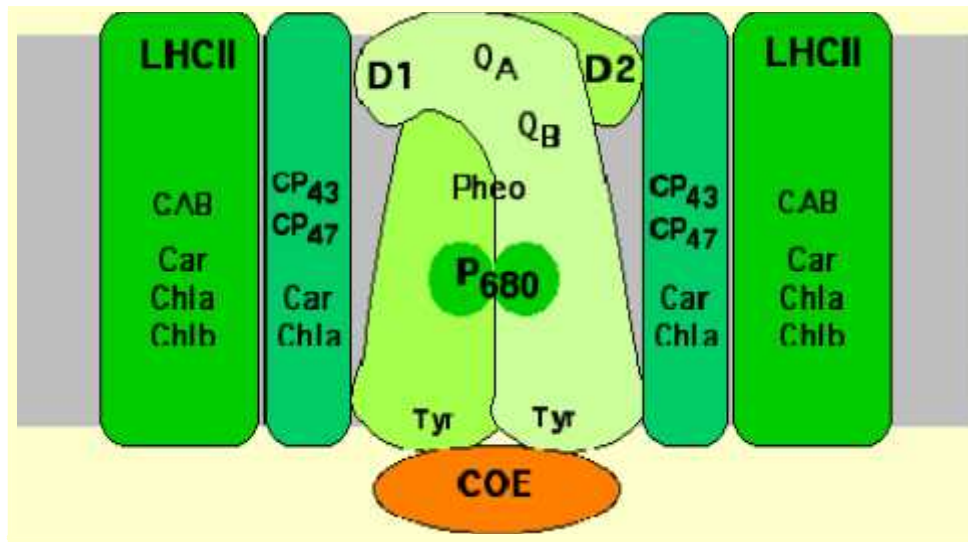


Figure n°15 : Représentation schématique du photosystème II dans la membrane du thylacoïde.

CAB: protéines de l'antenne périphérique (ou majeure), Car: carotène, Chla: chlorophylle a, Chlb: chlorophylle b, CP: protéines de l'antenne proximale, D1-D2: sous unités du centre réactionnel, LHCII: Light Harvesting Complex II (antenne majeure), OEC: Oxygen Evolving Complex, P₆₈₀: dimère de chlorophylle a (molécule piège du centre réactionnel), Pheo: phéophytine, QA-QB: Plastoquinones, Tyr: tyrosine.

Le photosystème I (PSI)

La poursuite de la photosynthèse nécessite encore de l'énergie lumineuse qui sera absorbée par l'antenne collectrice et qui sera transmise au complexe P700 (Fig.16). Le rôle du complexe P700 sera de charger en énergie les électrons transmis par le complexe des cytochromes. Ces électrons seront captés par l'accepteur primaire (**phéophytine**) et seront transportés par la chaîne d'accepteurs d'électrons jusqu'à la **ferrédoxine**. Elle-même les transportera jusqu'à la **NADP réductase** qui réduira le NADP⁺ en NADPH + H⁺. La chlorophylle « a » du P700 a donc perdu deux électrons qu'elle doit récupérer pour que le système fonctionne ; ces électrons lui sont fournis par le PSII.

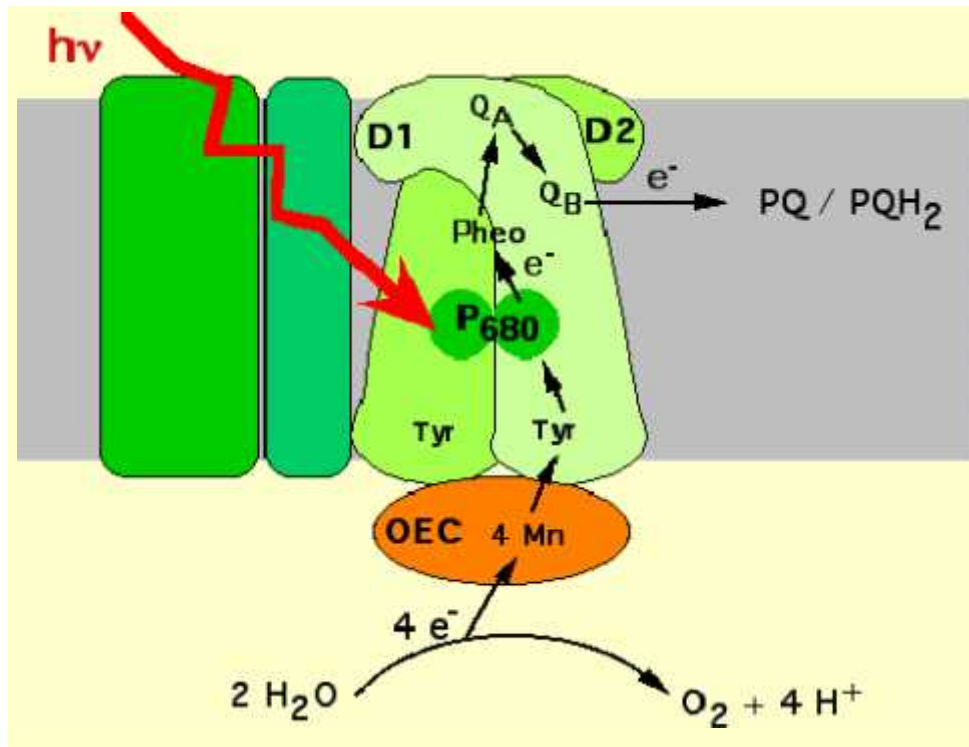


Figure n°16 : Fonctionnement du PSII en place dans la membrane du thylacoïde.

D1-D2: sous unités du centre réactionnel, OEC: Oxygen Evolving Complex, P680: dimère de chlorophylle a (molécule piège du centre réactionnel), Pheo: phéophytine, PQ/PQH2: Plastoquinones, QA-QB: Plastoquinones, Tyr: tyrosine.

2-Mesure de l'activité photosynthétique :

2-1-Mesure des échanges gazeux :

Numération des bulles dégagées par un fragment de plante verte aquatique pendant un temps donné. On considère que toutes les bulles ont les mêmes dimensions, la bulle est considérée comme l'unité de volume de gaz dégagée.

Analyse de l'air : (Fig.) : La composition de l'air circulant est analysée à l'entrée puis à la sortie de la chambre expérimentale ; la différence correspond à la quantité d'O₂ dégagé ou du CO₂ absorbé.

Les dosages de gaz peuvent se faire à l'aide de substances chimiques qui absorbent le CO₂ (potasse ou baryte) ou O₂ (pyrogallate de potasse ou phosphore) soit à l'aide de dispositifs magnétiques sensibles (analyseur à infrarouge pour CO₂, analyseur paramagnétique pour O₂).

Méthodes manométriques –appareil de warburg : un tampon CO₃K2 + CO₃HK, maintient constant le taux de CO₂. La dénivellation observée en un temps donné entre les deux branches du manomètre, correspond au volume d'O₂ dégagé.

2-2-Emploi d'isotopes : C¹⁴ et O¹⁶, O¹⁸

Quelle que soit la méthode employée, il est indispensable de faire une mesure de la respiration : dégagement de CO₂ et absorption de O₂, en plaçant la plante à l'obscurité- par exemple - ou en utilisant des inhibiteurs de la photosynthèse (éther ou chloroforme, hydroxylamine NH₂OH. Ceci permet de corriger les résultats dus à la photosynthèse.

3-Intensité de la photosynthèse :

L'intensité de la photosynthétique se mesure et se définit par la quantité d'oxygène dégagé (ou de gaz carbonique absorbé) par l'unité de poids sec végétal (g.) pendant l'unité de temps (h)

Elle est de 10 à 20 fois plus grande que l'intensité des échanges respiratoires qui se font en sens inverse.

L'air pur contient environ 0.03% de CO_2 en volume soit 0.16 mg de C par litre.

1 g. de matière sèche (soit 10 à 15 g. de tissu frais) contient 450 à 500 mg de C.

Donc pour synthétiser 1 g. de matière sèche, il faut 3000l.d'air.

Dans des conditions très favorables, l'intensité maximale peut atteindre 2g. (1000 ml) de CO_2 fixés par heure pour 100 g. de feuilles fraîches dans une atmosphère contenant 1% de CO_2 (valeur environ 10 fois moins élevée dans l'air ordinaire). En fait, les résultats très variables ; les variations peuvent être liées à des causes internes :

- Teneur en chlorophylle qui intervient seulement comme condition limitante
- Ouverture des stomates et épaisseur de la cuticule qui agissent sur les échanges gazeux
- Engorgement due à l'accumulation de produits synthétisés
- Etat physiologique des cellules et âge des feuilles
- Structure anatomique des feuilles
- Surtout à l'action des facteurs externes.

4-Photosynthèse et facteur du milieu :

5- Réactions métaboliques:

5-1-Transport des électrons dans la phase claire

a- La photolyse de l'eau et le transport non cyclique des électrons

Au niveau du PSII va s'opérer une étape majeure de la photosynthèse : la **photolyse de l'eau**. A chaque fois que PSII est photo-oxydé, l'eau lui fournit un électron pour compenser la perte qu'il vient de subir et permettre sa régénération. L'eau est donc le donneur d'électrons primaire de la photosynthèse (Fig.17).

La molécule d'eau doit ainsi subir une réaction d'oxydation sous l'action de la lumière. Cette réaction sera à l'origine de la libération d'électrons de protons et d'oxygène. Les électrons seront capturés par le PSII, les protons produits iront s'accumuler dans l'espace intra-thylakoïdien pour participer au gradient de proton, et l'oxygène sera libéré dans l'atmosphère. L'oxygène est donc un déchet de la photosynthèse.

L'électron au cours de ces différents transferts perd un peu d'énergie. Cette énergie est utilisée par certains transporteurs pour amener des protons H^+ du stroma (espace extra-thylakoïdien) vers l'espace intra-thylakoïdien.

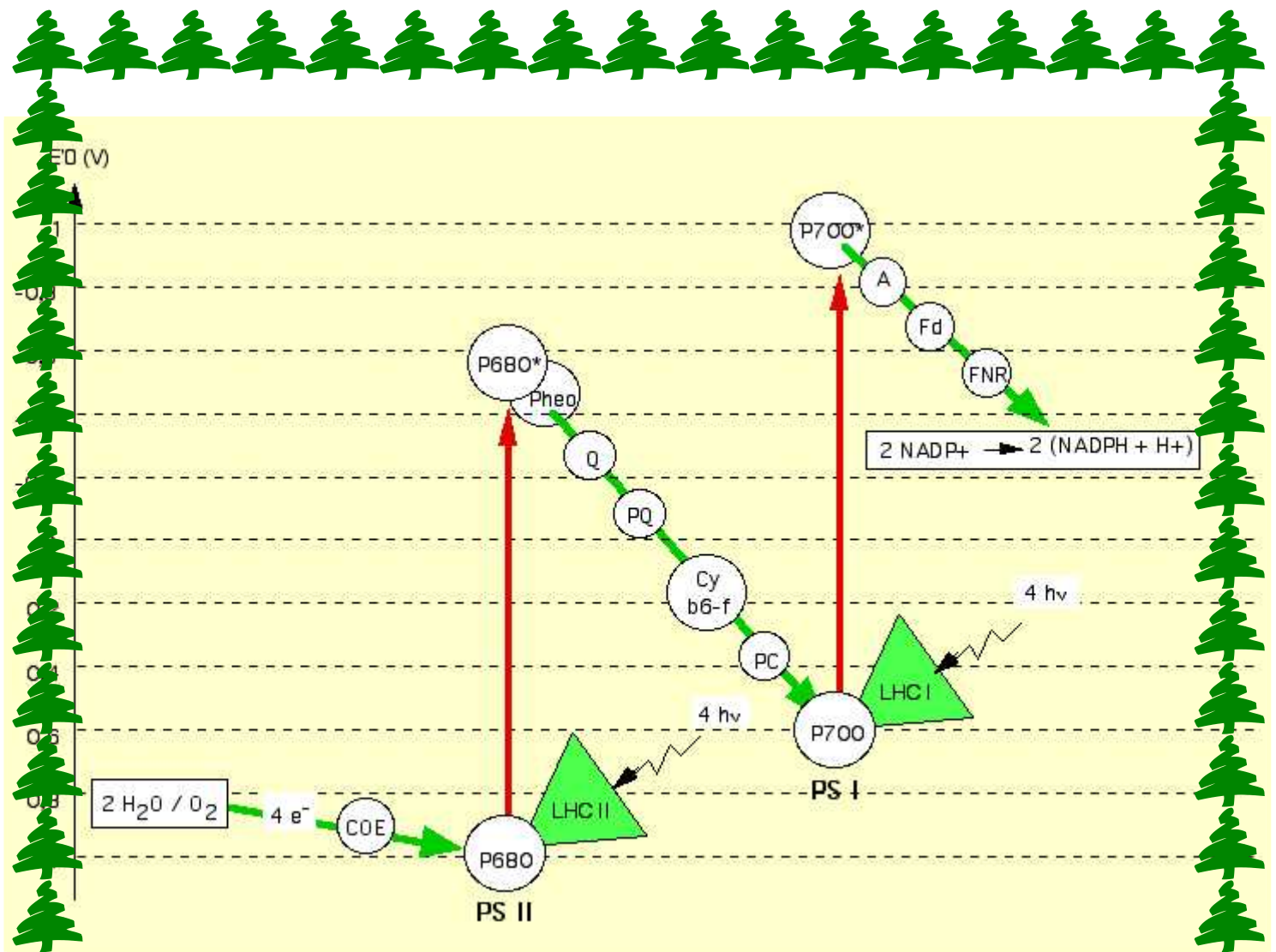


Figure n°17 : Schéma "en Z", transfert acyclique des électrons.

Par le jeu intégré des deux photosystèmes, le transfert des électrons se réalise de l'eau à l'accepteur final, le NADP+.

A: accepteur du PSI, Cy b6-f: complexe protéique cytochromes, FD: ferredoxine, FNR: Ferredoxine NADP Réductase, LHCI: Light Harvesting ComplexI (antenne du PSI), LHCII: Light Harvesting ComplexII (antenne majeure du PSII), OEC: Oxygen Evolving Complex, P₆₈₀: Molécule piège de chlorophylle du PSII, P₇₀₀: Molécule piège de chlorophylle du PSI, PC: plastocyanine, Pheo: pheophytine, PSI: Photosystème I, PSII: photosystème II, PQ: Plastoquinones, Q: Quinones.

b- Le transport cyclique des électrons

Les électrons peuvent suivre un trajet cyclique qui n'implique que le photosystème I. La ferredoxine, au lieu de fournir les électrons à la NADP réductase, va les transmettre à la plastoquinone (PQ) par l'intermédiaire d'un cytochrome. Les électrons suivent alors la première chaîne de transporteurs qui les fait revenir au photosystème I, où ils vont combler les vides qu'ils avaient laissés. Ce trajet cyclique (Fig.18) permet d'accumuler des protons supplémentaires dans l'espace intra-thylakoidien sans réduire de NADP⁺ mais en favorisant la production d'ATP (relargué au niveau du stroma) .

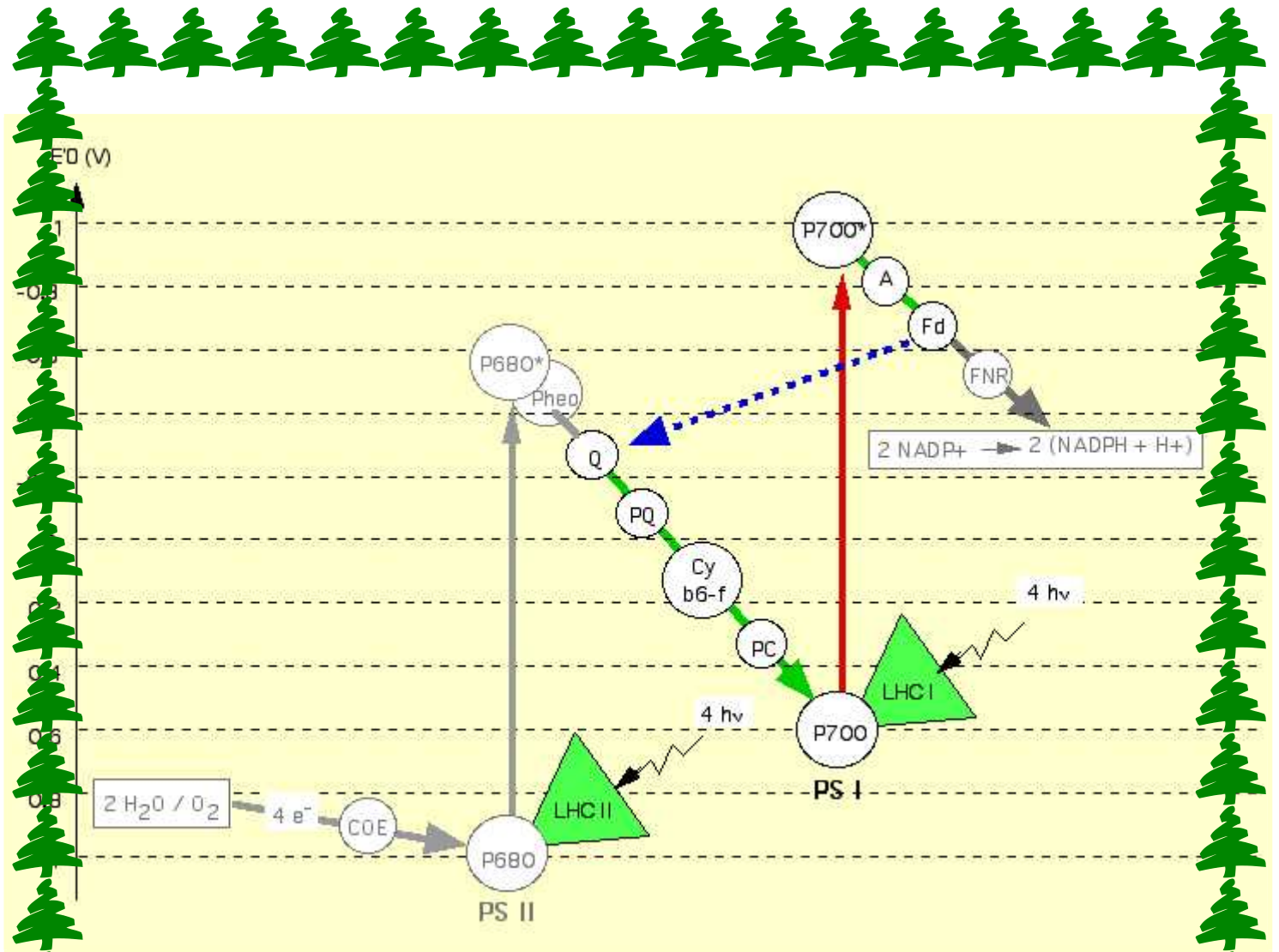


Figure n°18 : Transfert cyclique de électrons autour du PSI.

Le transfert des électrons ne fait pas intervenir le photosystème II. Il n'y a donc pas d'oxydation de l'eau ni de réduction du NADP^+ .

5-2- Les mécanismes de la phase sombre :

La phase sombre correspond à la phase d'assimilation du CO_2 qui utilise les molécules énergétiques produites lors de la phase claire et qui est réalisée de manière cyclique. Ce cycle est appelé **cycle de Calvin** et il se déroule dans le stroma du chloroplaste.

L'assimilation du CO_2 se fait en quatre étapes principales dont les trois premières se déroulent au sein du cycle de Calvin :

- Fixation du CO_2 (carboxylation).
- Réduction du carbone fixé.
- Régénération de l'accepteur de CO_2 .
- Synthèse des sucres.

5-2-1-Le cycle de Calvin.

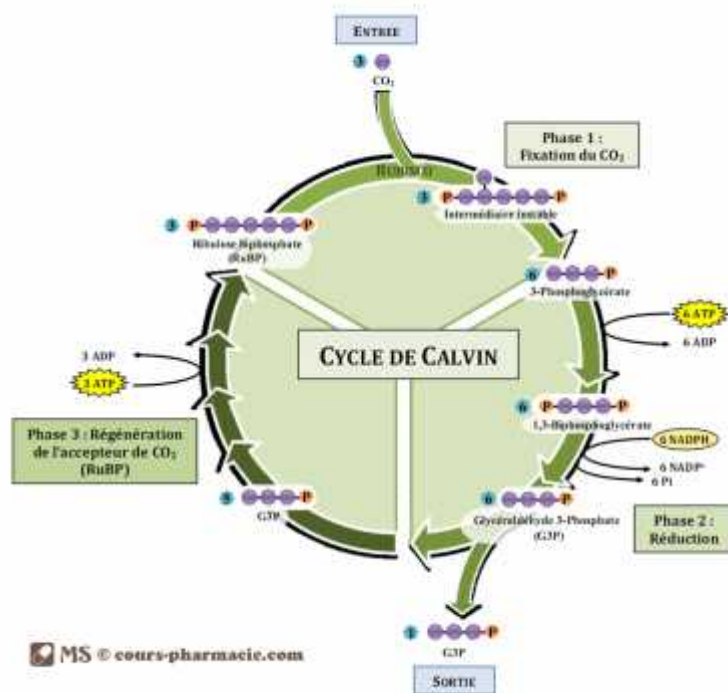


Figure n°19 : Cycle de Calvin

a- Fixation du CO₂

La première molécule du cycle de Calvin est le **ribulose-biphosphate (RuBP)** possédant 5 carbones. La fixation du CO₂ sur cette molécule nécessitera l'utilisation d'une enzyme appelée la **Rubisco** (pour *Ribulose Biphosphate Carboxylase Oxygénase*). Cette enzyme permettra la formation d'une molécule instable à 6 carbones qui donnera rapidement deux molécules de **3-phosphoglycérate** à 3 carbones.

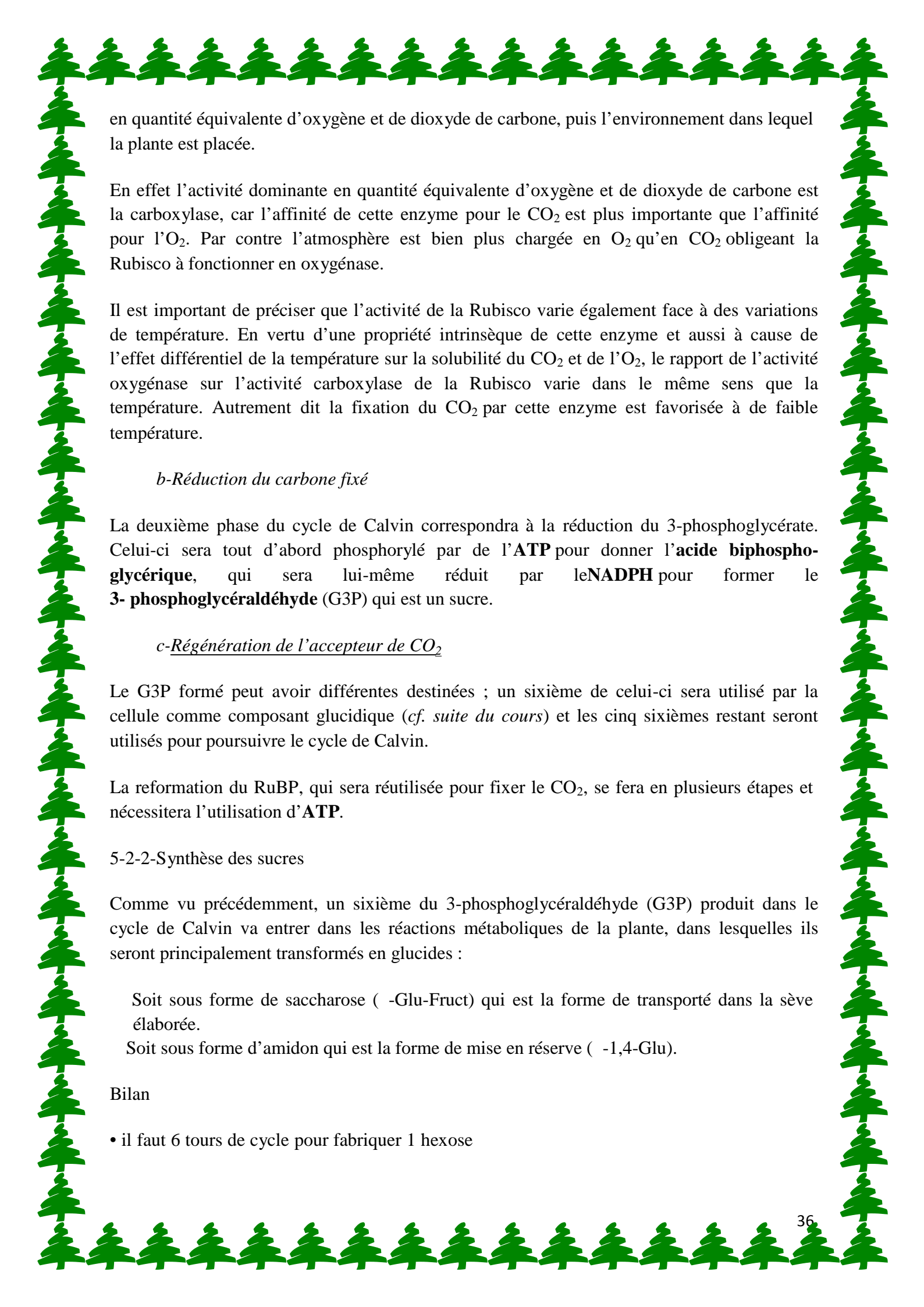
MODE D'ACTION DE LA RUBISCO :

Comme son nom l'indique, la Rubisco possède deux activités catalytiques :

La première correspond à son activité **carboxylase** qui permet, à partir du RuBP, la formation de deux molécules d'**acide phosphoglycérique**.

La deuxième correspond à son activité **oxygénase** qui permet, à partir du RuBP, la formation d'une molécule d'acide phospho-glycolique et d'une molécule d'**acide phosphoglycérique (PGA)**. Cette seconde activité freine donc la photosynthèse, ne permettant pas la poursuite du cycle de Calvin.

On se demande alors dans quelle condition chacune sera active. Pour répondre à cette question il est essentiel de prendre en compte deux facteurs : tout d'abord l'activité dominante



en quantité équivalente d'oxygène et de dioxyde de carbone, puis l'environnement dans lequel la plante est placée.

En effet l'activité dominante en quantité équivalente d'oxygène et de dioxyde de carbone est la carboxylase, car l'affinité de cette enzyme pour le CO_2 est plus importante que l'affinité pour l' O_2 . Par contre l'atmosphère est bien plus chargée en O_2 qu'en CO_2 obligeant la Rubisco à fonctionner en oxygénase.

Il est important de préciser que l'activité de la Rubisco varie également face à des variations de température. En vertu d'une propriété intrinsèque de cette enzyme et aussi à cause de l'effet différentiel de la température sur la solubilité du CO_2 et de l' O_2 , le rapport de l'activité oxygénase sur l'activité carboxylase de la Rubisco varie dans le même sens que la température. Autrement dit la fixation du CO_2 par cette enzyme est favorisée à de faible température.

b-Réduction du carbone fixé

La deuxième phase du cycle de Calvin correspondra à la réduction du 3-phosphoglycérate. Celui-ci sera tout d'abord phosphorylé par de l'**ATP** pour donner l'**acide biphosphoglycérique**, qui sera lui-même réduit par le **NADPH** pour former le **3-phosphoglyceraldéhyde (G3P)** qui est un sucre.

c-Régénération de l'accepteur de CO_2

Le G3P formé peut avoir différentes destinées ; un sixième de celui-ci sera utilisé par la cellule comme composant glucidique (*cf. suite du cours*) et les cinq sixièmes restant seront utilisés pour poursuivre le cycle de Calvin.

La reformation du RuBP, qui sera réutilisée pour fixer le CO_2 , se fera en plusieurs étapes et nécessitera l'utilisation d'**ATP**.

5-2-2-Synthèse des sucres


Comme vu précédemment, un sixième du 3-phosphoglyceraldéhyde (G3P) produit dans le cycle de Calvin va entrer dans les réactions métaboliques de la plante, dans lesquelles ils seront principalement transformés en glucides :

Soit sous forme de saccharose (-Glu-Fru) qui est la forme de transporté dans la sève élaborée.

Soit sous forme d'amidon qui est la forme de mise en réserve (-1,4-Glu).

Bilan

- il faut 6 tours de cycle pour fabriquer 1 hexose

- 
- il faut donner 12 ATP pour phosphoryler 12 molécules de 3-P glycérate en 1,3 bisphosphoglycérate
 - 12 NADPH utilisés pour réduire 12 molécules de 1,3 bisphosphoglycérate en glyceraldéhyde 3-P

5-2-3- Bilan

Par molécule de CO₂ incorporée on a donc consommation de 3 ATP et de 2 NADPH.

Or il se trouve que les glucides de base entrant dans les mécanismes énergétiques sont des hexoses. Pour la formation d'un de ces hexoses, il faut donc 6 molécules de CO₂ fixées, avec 6 tours de cycle et la consommation de 18 ATP et 12 NADPH. Le rendement est donc très faible.

6-Rendement de la photosynthèse

- 1) G°° pour réduire le CO₂ en hexose = + 114 kcal /mole
- 2) Par tour de cycle de Calvin il faut 3 ATP et 2 NADPH or réduction NADP⁺ en NADPH : 2 e⁻
2 NADP⁺ : 4 e⁻

Captage de 4 photons par PS II, puis 4 photons par PS I (soit 8 photons) 1 mole de photons (600 nm) a un contenu énergétique de 47,6 kcal

$$8 \times 47,6 = 381 \text{ kcal}$$

Efficacité de la photosynthèse : $114 \times 100 / 381 = 30 \%$

A-Respiration cellulaire

1-Généralités

La respiration cellulaire est une réaction chimique d'oxydo-réduction qui fournit l'énergie nécessaire à une cellule pour fonctionner.

Une espèce chimique (atome, molécule, ion) qui capte un ou plusieurs électrons est un oxydant.

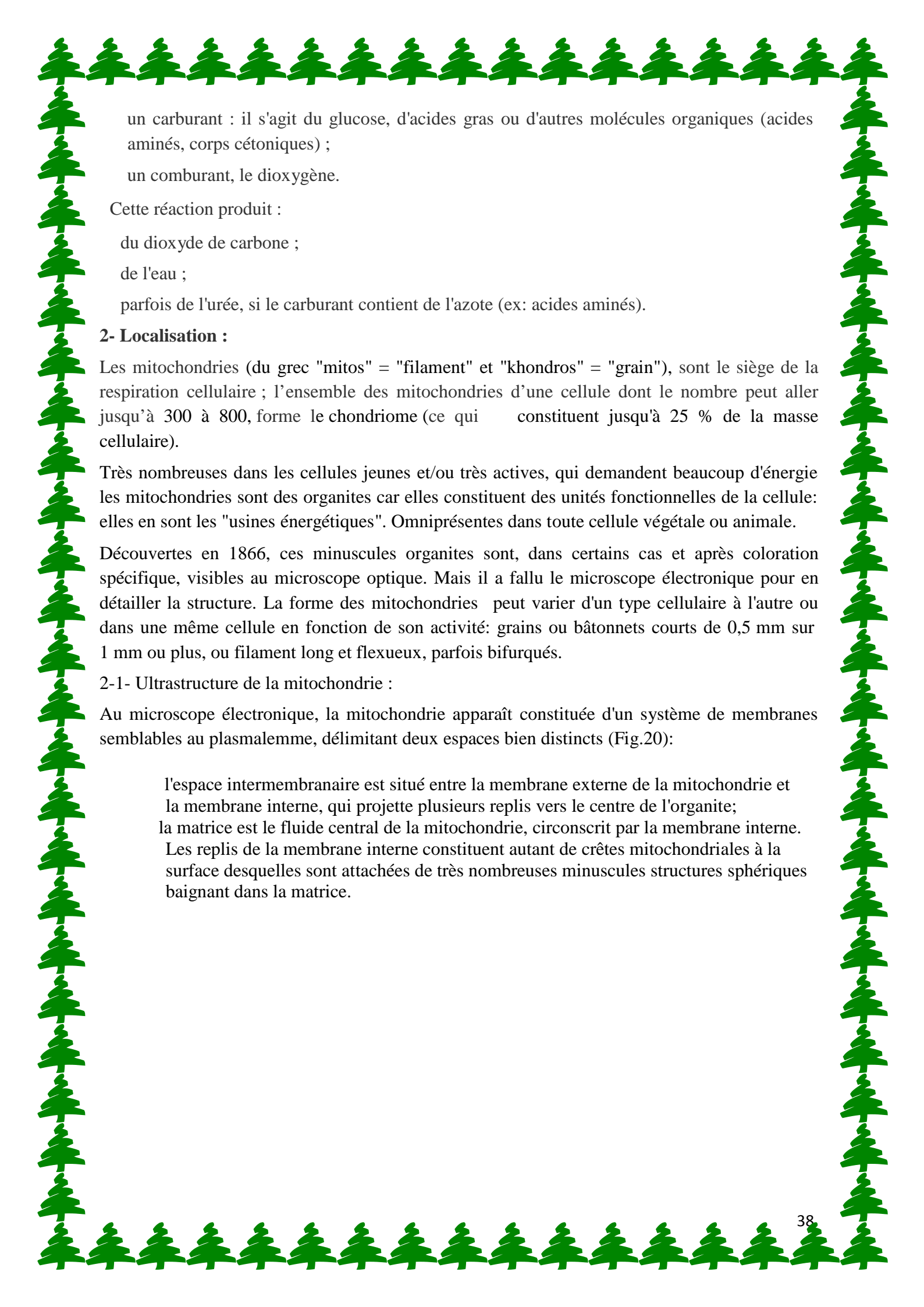
Une espèce chimique qui donne un ou plusieurs électrons est un réducteur.

Quand un réducteur perd des électrons, il s'oxyde. Quand un oxydant capte des électrons, il se réduit.

Ces réactions sont appelées des réactions d'oxydoréduction.

Puisqu'un donneur d'électrons nécessite un receveur d'électrons, l'oxydation et la réduction vont toujours ensembles.

La respiration cellulaire nécessite :



un carburant : il s'agit du glucose, d'acides gras ou d'autres molécules organiques (acides aminés, corps cétoniques) ;
un comburant, le dioxygène.

Cette réaction produit :

du dioxyde de carbone ;

de l'eau ;

parfois de l'urée, si le carburant contient de l'azote (ex: acides aminés).

2- Localisation :

Les mitochondries (du grec "mitos" = "filament" et "khondros" = "grain"), sont le siège de la respiration cellulaire ; l'ensemble des mitochondries d'une cellule dont le nombre peut aller jusqu'à 300 à 800, forme le chondriome (ce qui constitue jusqu'à 25 % de la masse cellulaire).

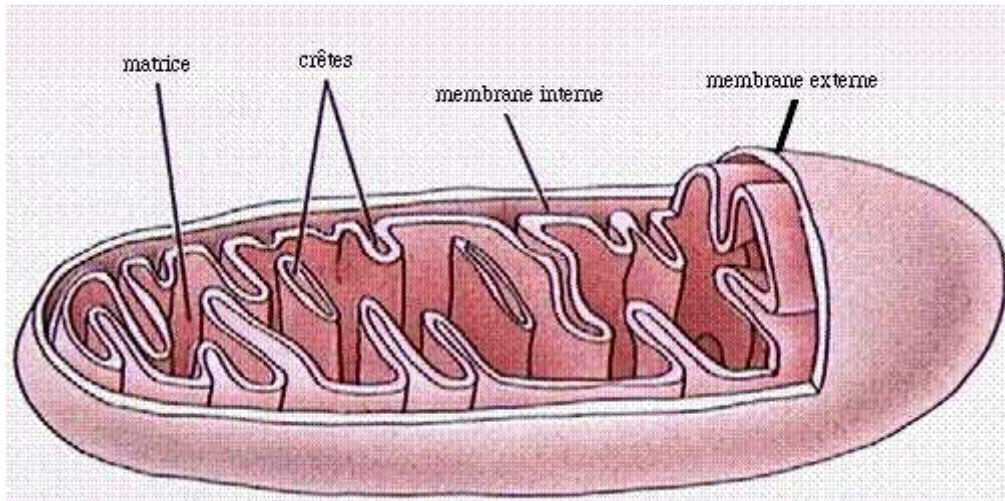
Très nombreuses dans les cellules jeunes et/ou très actives, qui demandent beaucoup d'énergie les mitochondries sont des organites car elles constituent des unités fonctionnelles de la cellule: elles en sont les "usines énergétiques". Omniprésentes dans toute cellule végétale ou animale.

Découvertes en 1866, ces minuscules organites sont, dans certains cas et après coloration spécifique, visibles au microscope optique. Mais il a fallu le microscope électronique pour en détailler la structure. La forme des mitochondries peut varier d'un type cellulaire à l'autre ou dans une même cellule en fonction de son activité: grains ou bâtonnets courts de 0,5 mm sur 1 mm ou plus, ou filament long et flexueux, parfois bifurqués.

2-1- Ultrastructure de la mitochondrie :

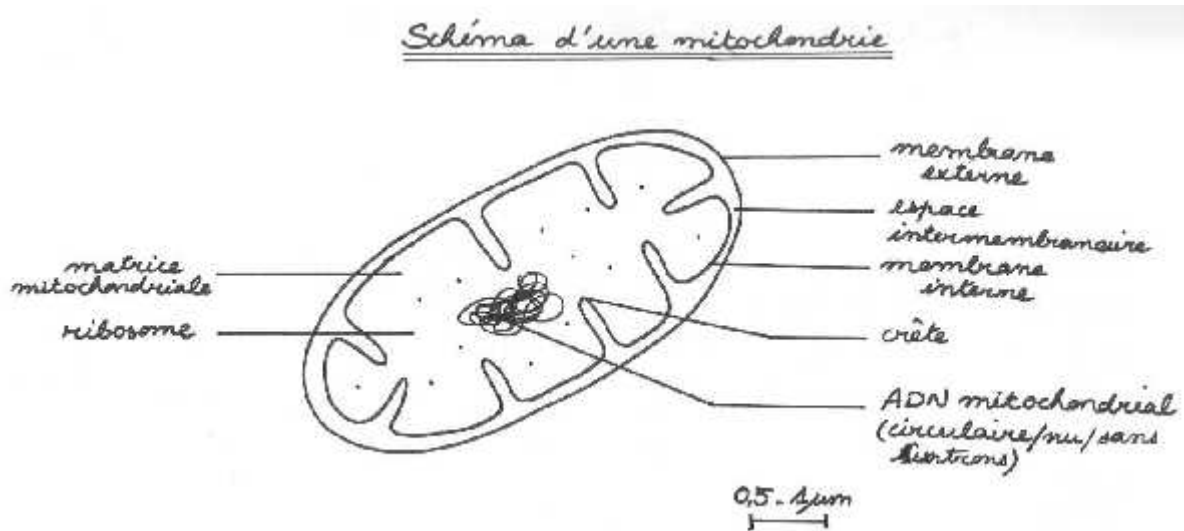
Au microscope électronique, la mitochondrie apparaît constituée d'un système de membranes semblables au plasmalemme, délimitant deux espaces bien distincts (Fig.20):

l'espace intermembranaire est situé entre la membrane externe de la mitochondrie et la membrane interne, qui projette plusieurs replis vers le centre de l'organite;
la matrice est le fluide central de la mitochondrie, circonscrit par la membrane interne. Les replis de la membrane interne constituent autant de crêtes mitochondriales à la surface desquelles sont attachées de très nombreuses minuscules structures sphériques baignant dans la matrice.



(A)

Schéma montrant la structure tridimensionnelle d'une mitochondrie



(B)

Figure n° 20: représentations schématiques d'une mitochondrie (A et B)

3- Formation d'ATP à partir des glucides

Les glucides ont pour rôle principal de fournir l'énergie pour produire de l'ATP.

Le catabolisme des glucides est une source importante d'énergie pour l'organisme.

Le glucose est le nutriment le plus important. En effet les autres glucides comme le fructose et le galactose seront convertis dans le foie avant de subir le même processus.

Le glucose, s'il n'est pas stocké sous forme de glycogène, sera dégradé afin de fournir de l'énergie directement utilisable par la cellule.

Il existe deux voies métaboliques principales pour cela :

la respiration cellulaire en milieu aérobie (milieu où il y a présence d'oxygène) ;

la fermentation : fermentation alcoolique, butyrique... en milieu anaérobie (milieu dépourvu d'oxygène).

Lors de la respiration cellulaire, la dégradation du glucose se fait grâce à des transferts d'électrons (ce qui libère l'énergie).

La réaction globale est (Fig.21)

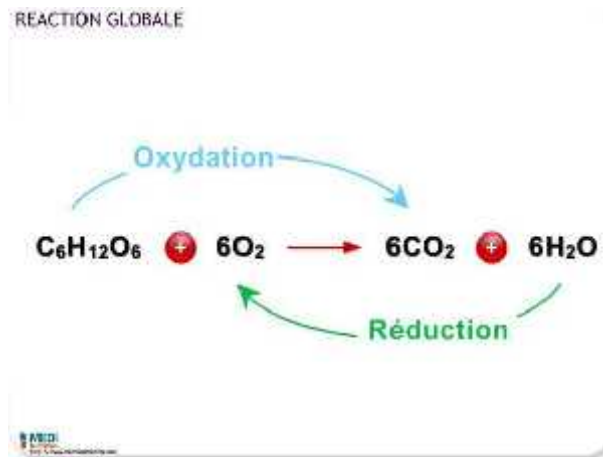


Figure n°21 : Réaction globale de la Respiration

Le glucose est donc oxydé et le dioxygène réduit. L'hydrogène (H) est transféré du glucose à l'oxygène. Mais, la respiration cellulaire n'oxyde pas le glucose en une seule réaction.

Le glucose subit sa dégradation dans une série de réactions, chacune catalysée par une enzyme. Des atomes d'hydrogène sont arrachés du glucose à certaines étapes, mais ils ne sont pas transférés immédiatement à l'oxygène. Ils vont premièrement passer par un composé intermédiaire organique nommé nicotinamide adénine dinucléotide ou NAD^+ qui joue le rôle de receveur d'électrons (Fig.22)..

Le NAD^+ est une forme oxydée, il a une charge + puisqu'il a un électron de moins.

Le NAD^+ capte les électrons et l'hydrogène du glucose grâce à des enzymes qui s'appellent des déshydrogénases. Mais plutôt que de devenir le NAD en captant un seul électron, ces enzymes vont retirer une paire d'atomes d'hydrogène (2H) du glucose. Or un atome d'hydrogène contient 1 électron et 1 proton. Donc, 2H équivaut à 2 électrons et 2 protons.

La déshydrogénase amène deux électrons et UN proton (H^+) au NAD^+ , l'autre proton est libéré dans le milieu. Le NAD^+ devient donc le NADH (forme réduite)

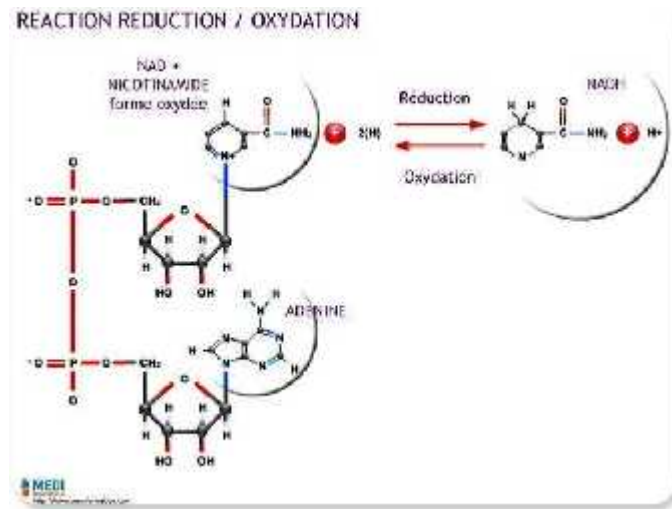


Figure n°22 : Réactions Réduction/Oxydation

Les électrons ont perdu très peu d'énergie lors de leur transfert au NAD^+ , ce qui veut dire que les molécules de NADH sont des molécules qui entreposent de l'énergie.



Chaque NADH formé pendant la respiration cellulaire représente une petite réserve d'énergie.

4-Déroulement de la Respiration cellulaire

En fait, le NADH est seulement riche en énergie mais il ne la stocke pas. Il "donnera", plus tard au cours de la respiration cellulaire, son énergie à l'ATP.

La respiration cellulaire se fait donc selon trois étapes :

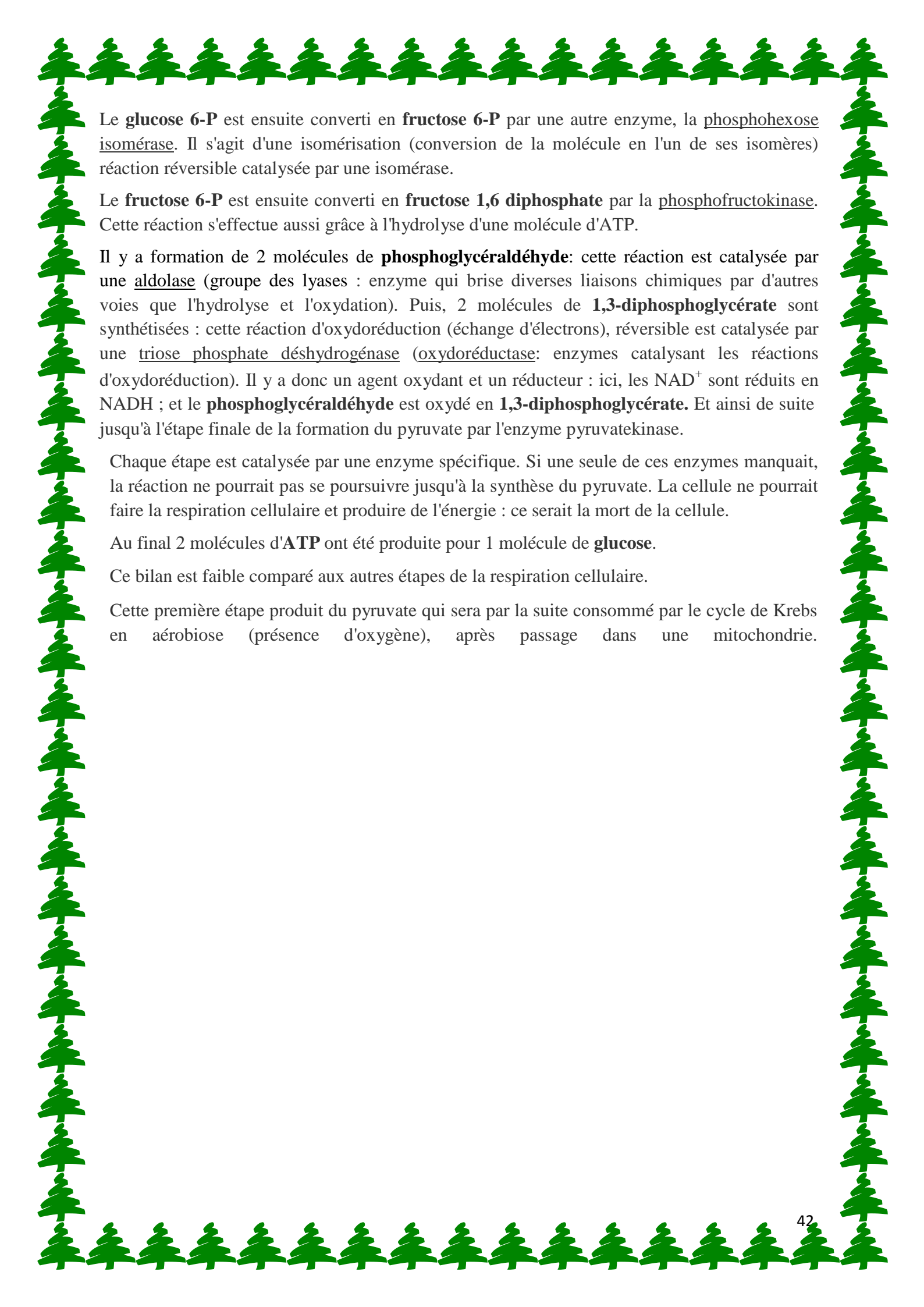
- la glycolyse, (c'est aussi la première étape de la fermentation) ;
- le cycle de Krebs ;
- la chaîne respiratoire.

4-1-Première étape : la glycolyse

Le glucose subit tout d'abord une glycolyse (réaction chimique) qui se déroule dans le cytoplasme de la cellule. L'oxygène du milieu n'intervient pas : cette réaction s'effectue en anaérobiose.

Cette voie métabolique est un ensemble de réactions d'oxydoréductions : le glucose est oxydé jusqu'à former du pyruvate (molécule à trois atomes de carbone).

Au cours de la glycolyse, le glucose est d'abord converti en **glucose 6-phosphate**. Grâce à l'hexokinase. C'est une kinase, enzyme catalysant les transferts d'un groupement phosphate d'une molécule à une autre. Cette réaction s'effectue par couplage de l'hydrolyse de l'ATP en $ADP + P_i$, car cette réaction demande de l'énergie : c'est une synthèse.



Le **glucose 6-P** est ensuite converti en **fructose 6-P** par une autre enzyme, la phosphohexose isomérase. Il s'agit d'une isomérisation (conversion de la molécule en l'un de ses isomères) réaction réversible catalysée par une isomérase.

Le **fructose 6-P** est ensuite converti en **fructose 1,6 diphosphate** par la phosphofructokinase. Cette réaction s'effectue aussi grâce à l'hydrolyse d'une molécule d'ATP.

Il y a formation de 2 molécules de **phosphoglyceraldéhyde**: cette réaction est catalysée par une aldolase (groupe des lyases : enzyme qui brise diverses liaisons chimiques par d'autres voies que l'hydrolyse et l'oxydation). Puis, 2 molécules de **1,3-diphosphoglycérate** sont synthétisées : cette réaction d'oxydoréduction (échange d'électrons), réversible est catalysée par une triose phosphate déshydrogénase (oxydoréductase: enzymes catalysant les réactions d'oxydoréduction). Il y a donc un agent oxydant et un réducteur : ici, les NAD^+ sont réduits en NADH ; et le **phosphoglyceraldéhyde** est oxydé en **1,3-diphosphoglycérate**. Et ainsi de suite jusqu'à l'étape finale de la formation du pyruvate par l'enzyme pyruvatekinase.

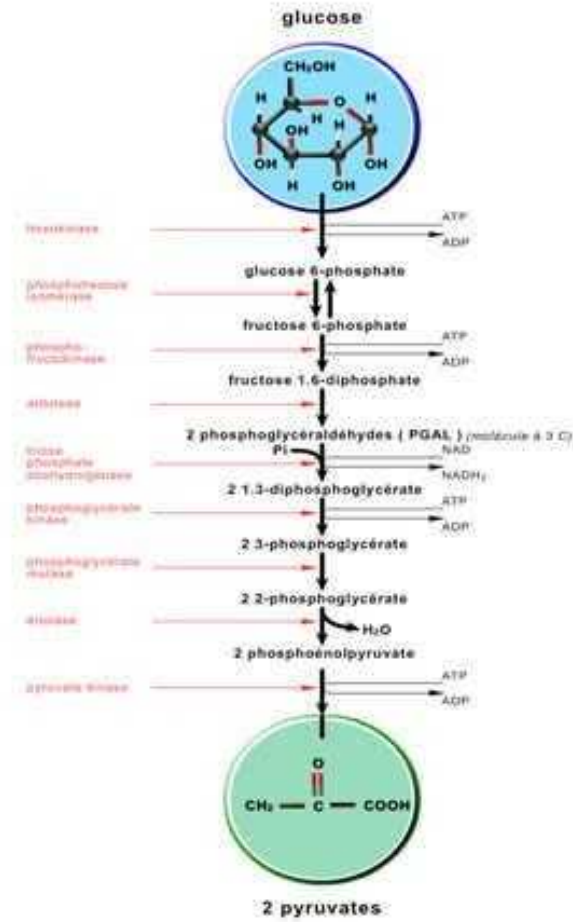
Chaque étape est catalysée par une enzyme spécifique. Si une seule de ces enzymes manquait, la réaction ne pourrait pas se poursuivre jusqu'à la synthèse du pyruvate. La cellule ne pourrait faire la respiration cellulaire et produire de l'énergie : ce serait la mort de la cellule.

Au final 2 molécules d'**ATP** ont été produite pour 1 molécule de **glucose**.

Ce bilan est faible comparé aux autres étapes de la respiration cellulaire.

Cette première étape produit du pyruvate qui sera par la suite consommé par le cycle de Krebs en aérobiose (présence d'oxygène), après passage dans une mitochondrie.

GLYCOLYSE 1



MEDI formation <http://www.mediformation.com>

GLYCOLYSE 2

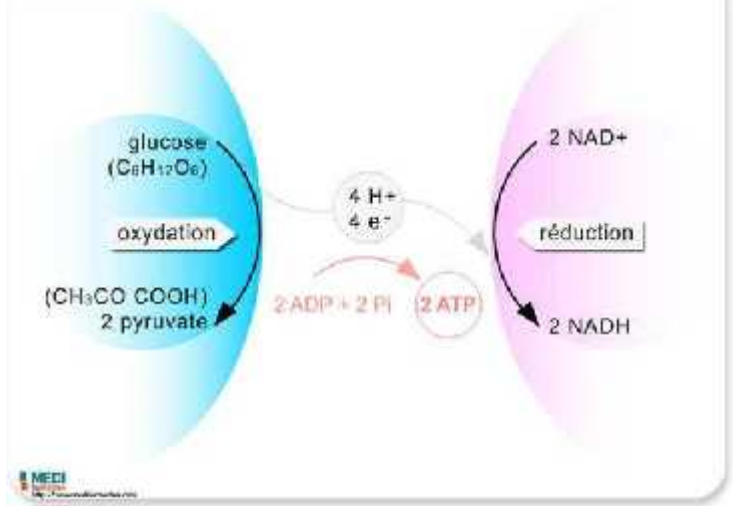


Figure n°23 : Schéma de la glycolyse 1 et 2

4-2-Deuxième étape : le Cycle de Krebs

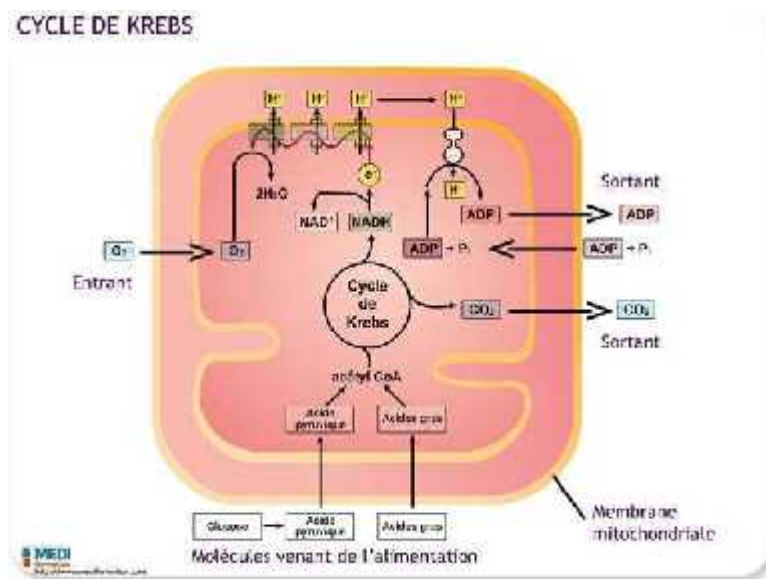


Figure n°24 : Résumé du Cycle de Krebs

Le cycle de Krebs ou cycle de l'acide citrique (citrate) est au centre du métabolisme cellulaire. Le cycle de Krebs se déroule donc dans la matrice de la mitochondrie en aérobiose. Il se produit une oxydation du pyruvate qui permet la formation de 10 composés réduits NADH. Le pyruvate subit aussi une décarboxylation (retrait des atomes de carbone) totale qui conduit à la libération de dioxyde de carbone, déchet de la respiration. Une fois dégradé par la glycolyse, le glucose en pyruvate est transformé en acétylcoenzyme A (acétylCoA) et oxaloacétate. Ces deux composés sont le point de départ du cycle de Krebs.

4-2-1-Étapes du cycle de Krebs :

a- Synthèse du citrate

Cette réaction est catalysée par la citrate synthétase permettant la synthèse du **citrate**.

b- Déshydratation du citrate

Cette réaction de déshydratation réversible est catalysée par une lyase (enzyme : cis-aconitase), produit du **cis-aconitate**.

c- Hydratation du cis-aconitate

Cette réaction est réversible et catalysée par la même enzyme qu'à l'étape précédente. L'addition d'eau sur la double liaison a lieu dans une position différente : il y a synthèse d'**iso-citrate**.

d- Oxydation de l'iso-citrate

Cette réaction réversible est catalysée par une oxydoréductase : l'isocitrate déshydrogénase. C'est donc une réaction d'oxydoréduction avec échange d'électrons : les NAD^+ sont réduits en NADH, H^+ (avec le proton libéré dans le milieu).

e- Décarboxylation de l'oxalosuccinate

Il y a libération du dioxyde de carbone (CO₂) lors de cette réaction irréversible.

f- Décarboxylation oxydative de l'α-cétoglutarate

Cette réaction d'oxydoréduction est la même que celle permettant le passage du pyruvate à l'acétylCoA. Le complexe enzymatique fait intervenir de nombreuses enzymes dans cette réaction. Il y a, de plus, libération de CO₂ et réduction des NAD⁺.

g- Formation du succinate

Cette réaction réversible est catalysée par une transférase, la succinate thiokinase. Cette réaction est couplée à la synthèse d'ATP.

h- Oxydation du succinate

Cette réaction est catalysée par une enzyme la succinate déshydrogénase.

i- Hydratation du fumarate

Cette réaction d'addition d'une molécule d'eau (H₂O) est catalysée par une lyase, la fumarase.

j-. Oxydation du malate

Il y a formation d'**oxaloacétate**, réaction d'oxydoréduction catalysée par le malate déshydrogénase (oxydoréductase). Les composés oxydés sont réduits en NADH.

Moyen Mnémotechnique à l'aide de cette phrase : si le citron isole l'acétone, le succinct succès fumera moins haut. (citrate, iso-citrate, alpha-cétoglutarate, succinyl CoA, succinate, fumarate, malate, oxaloacétate)

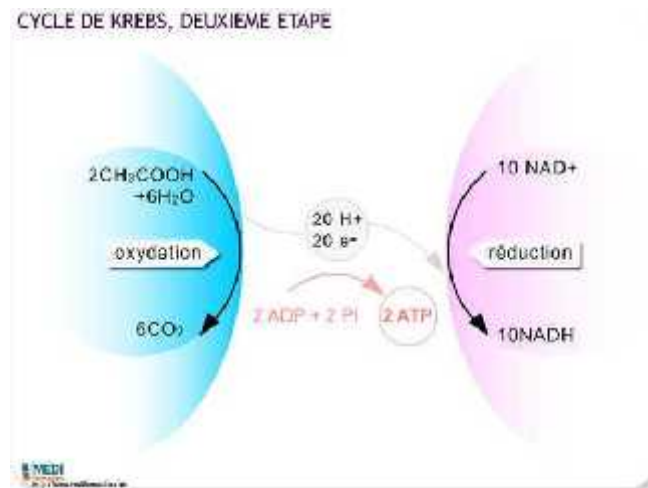
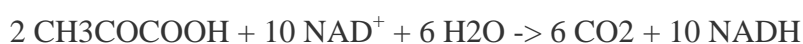


Figure n°25 : Cycle de Krebs

Dans la matrice mitochondriale, le pyruvate est ainsi entièrement dégradé selon la réaction suivante :



(pyruvate)

Couplage énergétique



Réoxydation des composés réduits : les NADH

A ce stade, la molécule de glucose est totalement dégradée : tous ses carbones sont éliminés sous forme de CO₂.

Pour le moment, il y a production seulement de 4 ATP car la majeure partie de l'énergie reste entreposée dans les NADH.

Le processus biochimique n'est donc pas terminé : il est nécessaire de régénérer les accepteurs NAD⁺ qui ont été réduits en composés NADH.

Cela signifie qu'il faut oxyder à nouveau les NADH.

Cette opération se réalise au niveau des crêtes des mitochondries (replis de la membrane interne) en aérobiose et permet une production remarquable d'ATP : c'est la chaîne respiratoire.

4-3-Troisième étape : la chaîne respiratoire

Pour réoxyder les NADH, il faut passer par une chaîne de transport d'électrons : c'est une série de protéines insérées dans la membrane interne de la mitochondrie (Fig26, 27).

Ces dernières sont alignées en ordre énergétique, la première molécule a plus d'énergie que la dernière.

La première de la chaîne capte une paire d'électrons (2e⁻) à chaque NADH (un proton H⁺ est aussi cédé dans le milieu afin que les NADH se régénèrent en NAD⁺) et les transfère à la molécule adjacente.

Il existe 5 ensembles de complexes impliqués dans la chaîne respiratoire. Les 4 premiers (I, II, III et IV) interviennent dans le transport des électrons et le cinquième (V) intervient dans la synthèse d'ATP.

Au fur et à mesure de ce transport, les électrons " perdent " de leur énergie.

Finalement, en bout de chaîne, ils sont acceptés par le dioxygène (O₂) qui se combine à des protons du milieu pour former de l'eau (2H⁺ + 2e⁻ + O₂ -> H₂O).

L'énergie " perdue " par les électrons et la présence des protons H⁺ permettent d'activer une enzyme, l'ATP synthase, localisée elle aussi dans la membrane interne. Cette enzyme catalyse la production d'ATP en grande quantité.

Il y a 12 NADH : 10 provenant du cycle de Krebs et 2 de la glycolyse.

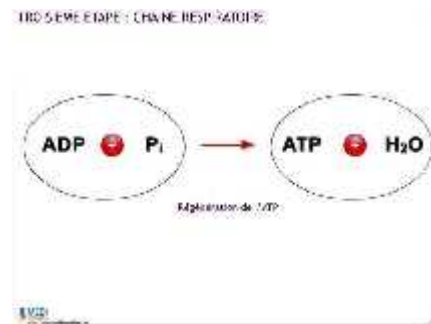


Figure n°26 : formation de l'ATP (Phosphorylation de l'ADP)

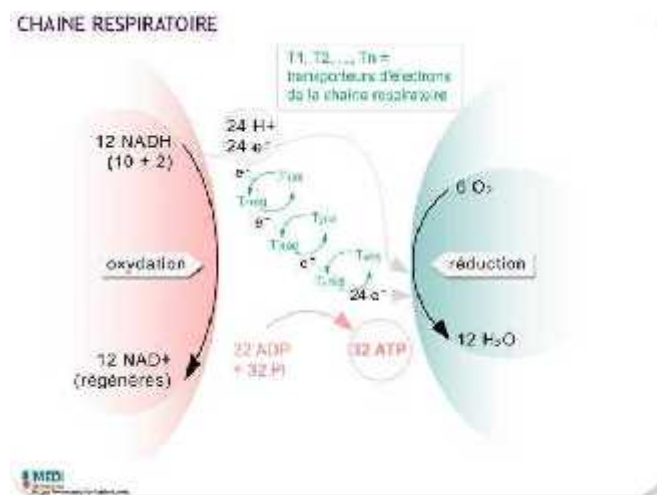


Figure n°27 : résumé de la chaîne respiratoire

4-4-Transport des molécules d'ATP formées

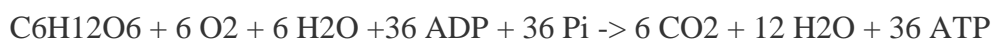
Les molécules d'ATP ainsi formées se retrouvent dans la matrice mitochondriale.

Pour passer dans le cytoplasme, elles empruntent un anti-port, une protéine permettant de faire passer de l'ATP dans le sens matrice mitochondriale puis dans l'espace intermembranaire puis dans le cytoplasme et de l'ADP dans le sens inverse.

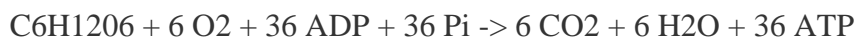
5-Bilan de la respiration cellulaire

A partir d'une molécule de glucose, la glycolyse a permis de synthétiser 4 ATP, le cycle de Krebs 2 et la chaîne respiratoire 32.

Nous avons donc un total de 38 ATP moins les 2 ATP utilisés par la glycolyse soit 36 ATP



ou (si nous enlevons l'eau dans les réactifs)



Les NAD^+ ou $NADH$ ne figurent pas dans l'équation car au final leur quantité produite s'annule.

En effet lors de la glycolyse 2 NAD^+ sont réduits en 2 $NADH$, durant le cycle de Krebs 10 NAD^+ sont réduits en 10 $NADH$ et enfin pendant la chaîne respiratoire 12 $NADH$ sont oxydés en 12 NAD^+ . Il ne reste donc plus rien !



**DEUXIEME PARTIE : CROISSANCE ET
DEVELOPPEMENT DE LA PLANTE.**



CHAPITRE I : PHENOMENE DE GERMINATION

1-Germination des semences :

1-1-Définition :

C'est l'ensemble des processus qui vont du début de la réhydratation de la semence à la sortie de la radicule.

En 1957, Evenari proposa une définition plus restrictive : « La germination est un processus dont les limites sont le début de l'hydratation et le tout début de la croissance de la radicule ». Tous les physiologistes adoptent actuellement cette définition. Tous s'accordent à considérer que la germination d'une semence est terminée quand la radicule perce les enveloppes. L'évolution ultérieure est un phénomène de croissance.

En réalité, le début de l'allongement de la radicule qui constitue le critère de fin de la germination fait déjà partie de ce phénomène de croissance

1-2-Déroulement du processus de germination :

Divers travaux démontrent que le processus de germination comprend en fait plusieurs phases physiologiques successives(Fig.)

1-2-1-La phase I ou phase d'imbibition : Elle correspond à une forte hydratation des tissus par absorption d'eau aboutissant au gonflement de la graine :

-Blé : 47 g d'eau pour 100 g de graines

-Haricot : 200 à 400 g d'eau pour 100 g de graines

La plus grande partie de cette eau, va à l'embryon ; l'appel d'eau se fait d'abord par le jeu des forces d'imbibition des colloïdes de la graine puis, lorsque les vacuoles sont édifiées, les forces osmotiques prennent le relais. Parallèlement, on assiste à une reprise de l'activité respiratoire intense. Cette phase est assez brève durant de 6 à 12 heures selon les semences.

1-2-2-Phase II ou phase de germination sensu-stricto : caractérisée par une stabilisation de l'hydratation et de l'activité respiratoire à un niveau élevé. Durant cette phase qui est relativement brève elle aussi (12 à 48), la graine peut être réversiblement déshydratée et réhydratée sans dommage apparent pour sa viabilité. Elle s'achève avec l'émergence de la radicule hors des téguments.

1-2-3-Phase III : caractérisée par une reprise de l'absorption de l'eau et une élévation de la consommation d'oxygène, elle correspond en fait à un processus de croissance affectant la radicule puis la tigelle (marquée par un changement profond d'état physiologique). A ce niveau, on doit distinguer entre l'activité métabolique de la jeune plantule qui se développe à partir de l'embryon, qui a tendance à s'exalter, et celle du tissu de réserve (albumen, cotylédons), qui a tendance à décroître (Fig. phase III bis) par suite de l'épuisement des réserves. A ce stade, la déshydratation des tissus cause la mort de la semence. Le passage de la germination sensu-stricto à la croissance constitue donc l'étape la plus importante, c'est pourquoi les chercheurs essaient de préciser ce qui différencie ces deux phénomènes ;

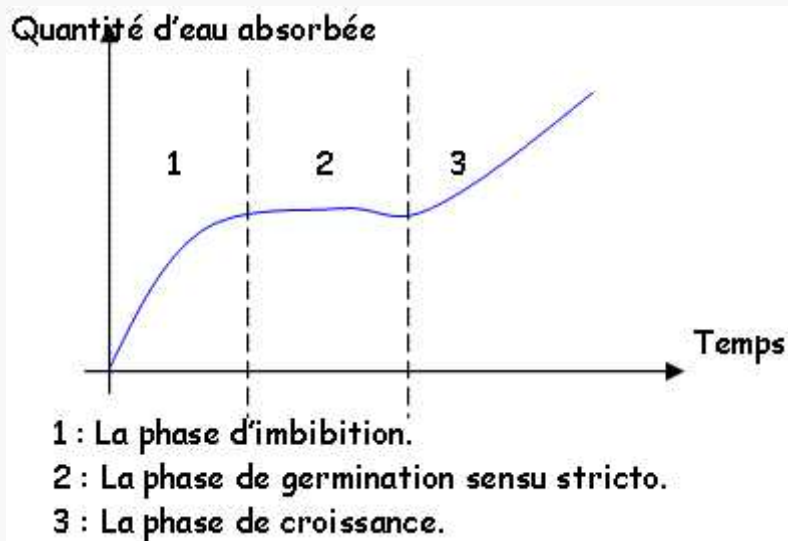


Figure n°28 : Courbe théorique d'imbibition des semences.

Dans la phase 1, l'eau va vers l'embryon : on assiste à la reprise des activités métaboliques (il faut de l'énergie). Dans ce cas, la respiration est très active. Chez certaines graines, l'énergie vient de la fermentation.

La seconde phase se termine par la sortie de la radicule. Cette sortie marque le passage d'un état physiologique réversible à un état irréversible.

La troisième phase : on assiste à la croissance et au développement des racines et de la tige.

Les réserves sont mobilisées dès la première phase (on a des synthèses d'hormones comme les gibberellines).

1-3-Différences entre germination sensu-stricto et croissance :

1-3-1-Sensibilité à l'oxygène :

En 1975, Rollin, en travaillant sur les akènes de *Bidens radiata*, obtint que les fortes pressions partielles d'O₂ inhibent la germination sensu-stricto, mais pas sur la croissance.

1-3-2-Sensibilité à la température :

Perino sur l'embryon de pommier a obtenu que la germination sensu-stricto et la croissance sont différemment sensibles à la température.-Les embryons (débarrassés de leurs téguments), germent bien entre 5°C et 20°C mais très difficilement entre 25°C et 30°C (Fig.28).

Pour déterminer si la température de 30°C empêche la germination S.stricto ou la croissance, Perino a placé des embryons à 15°C pendant des durées variables mais insuffisantes pour que la croissance démarre, puis il a transféré ces embryons à 30°C. Plus les embryons restent longtemps à 15°C, plus leur germination se poursuit facilement à 30°C (Fig.). C'est donc la germination S.stricto et non la croissance qui est inhibée à 30°C.

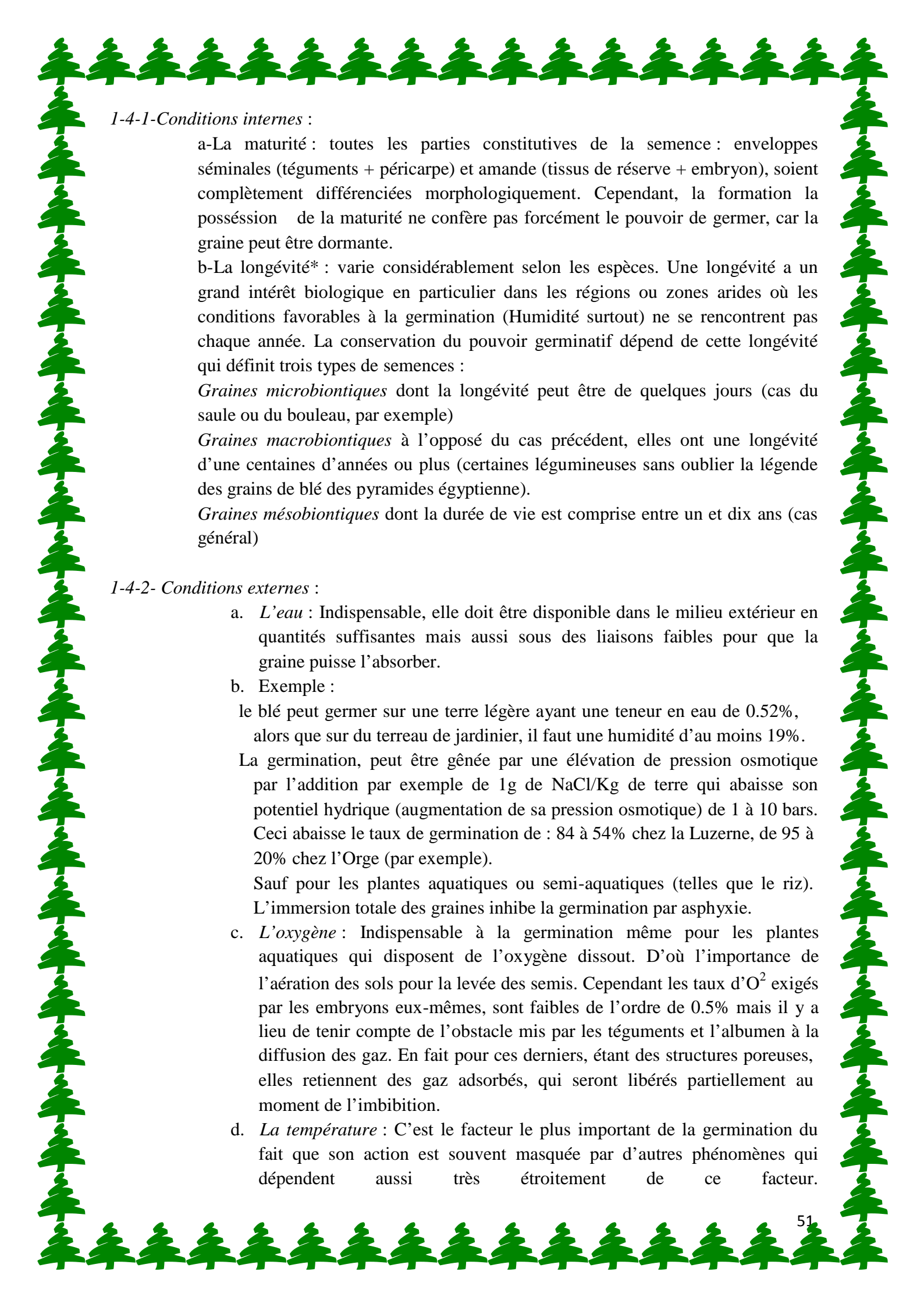
1-3-3-Sensibilité aux inhibiteurs de la respiration :

Pendant la phase de germination S.stricto, le cycle des pentose-phosphates prédomine sur le cycle de Krebs alors que c'est l'inverse qui se produit pendant la croissance.

Ainsi, les inhibiteurs de la glycolyse, du cycle de Krebs ou de la chaîne des oxydations respiratoires stimulent la germination S.stricto, mais ils inhibent la respiration. Or, ils favorisent le fonctionnement du cycle des pentose-phosphates.

1-4-Conditions de réalisation de la germination :

Il y a deux types de conditions à remplir pour qu'une semence germe



1-4-1-Conditions internes :

a-La maturité : toutes les parties constitutives de la semence : enveloppes séminales (téguments + péricarpe) et amande (tissus de réserve + embryon), soient complètement différenciées morphologiquement. Cependant, la formation la possession de la maturité ne confère pas forcément le pouvoir de germer, car la graine peut être dormante.

b-La longévité* : varie considérablement selon les espèces. Une longévité a un grand intérêt biologique en particulier dans les régions ou zones arides où les conditions favorables à la germination (Humidité surtout) ne se rencontrent pas chaque année. La conservation du pouvoir germinatif dépend de cette longévité qui définit trois types de semences :

Graines microbiontiques dont la longévité peut être de quelques jours (cas du saule ou du bouleau, par exemple)

Graines macrobiontiques à l'opposé du cas précédent, elles ont une longévité d'une centaines d'années ou plus (certaines légumineuses sans oublier la légende des grains de blé des pyramides égyptienne).

Graines mésobiontiques dont la durée de vie est comprise entre un et dix ans (cas général)

1-4-2- Conditions externes :

a. *L'eau* : Indispensable, elle doit être disponible dans le milieu extérieur en quantités suffisantes mais aussi sous des liaisons faibles pour que la graine puisse l'absorber.

b. Exemple :

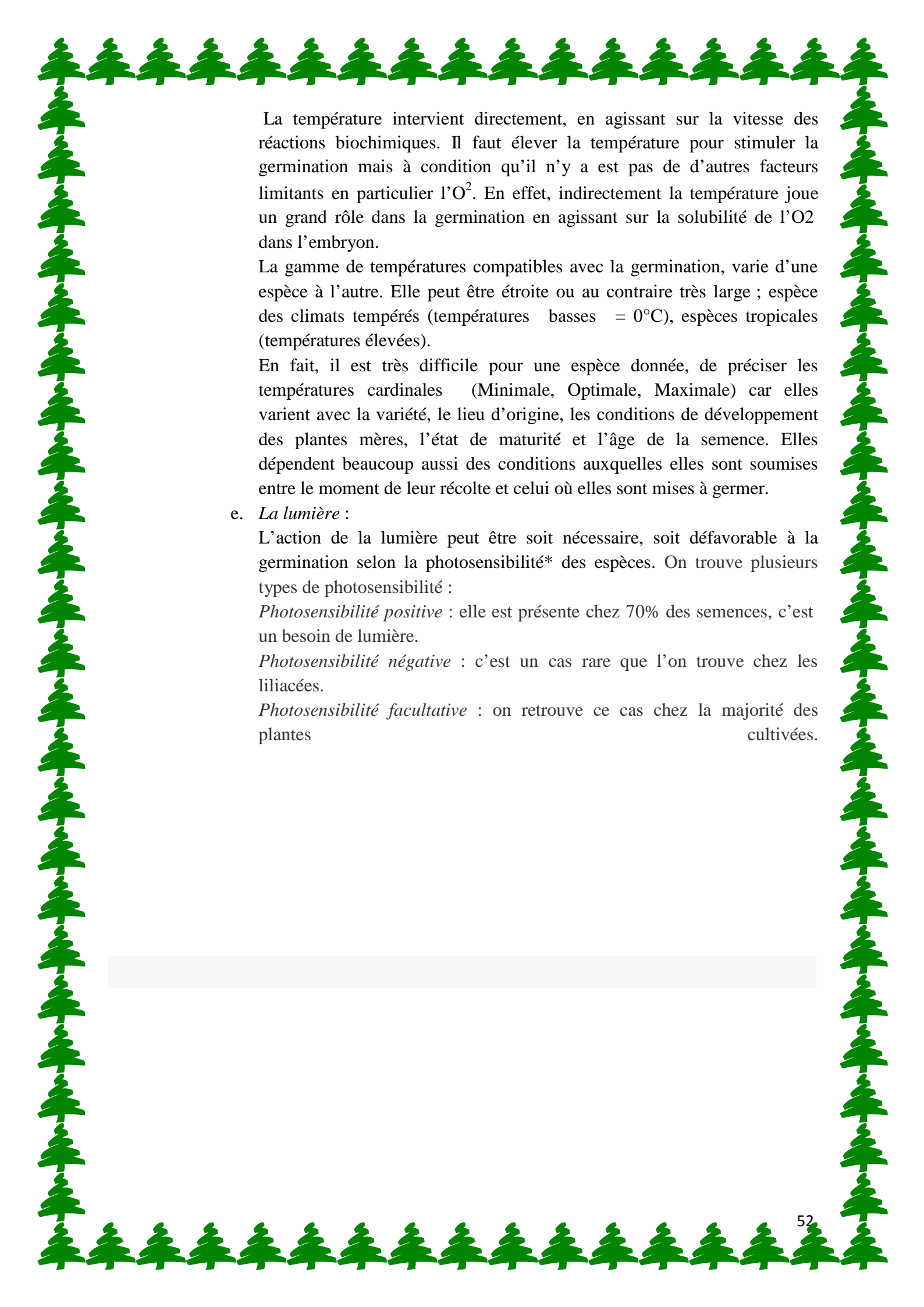
le blé peut germer sur une terre légère ayant une teneur en eau de 0.52%, alors que sur du terreau de jardinier, il faut une humidité d'au moins 19%.

La germination, peut être gênée par une élévation de pression osmotique par l'addition par exemple de 1g de NaCl/Kg de terre qui abaisse son potentiel hydrique (augmentation de sa pression osmotique) de 1 à 10 bars. Ceci abaisse le taux de germination de : 84 à 54% chez la Luzerne, de 95 à 20% chez l'Orge (par exemple).

Sauf pour les plantes aquatiques ou semi-aquatiques (telles que le riz). L'immersion totale des graines inhibe la germination par asphyxie.

c. *L'oxygène* : Indispensable à la germination même pour les plantes aquatiques qui disposent de l'oxygène dissout. D'où l'importance de l'aération des sols pour la levée des semis. Cependant les taux d'O² exigés par les embryons eux-mêmes, sont faibles de l'ordre de 0.5% mais il y a lieu de tenir compte de l'obstacle mis par les téguments et l'albumen à la diffusion des gaz. En fait pour ces derniers, étant des structures poreuses, elles retiennent des gaz adsorbés, qui seront libérés partiellement au moment de l'imbibition.

d. *La température* : C'est le facteur le plus important de la germination du fait que son action est souvent masquée par d'autres phénomènes qui dépendent aussi très étroitement de ce facteur.



La température intervient directement, en agissant sur la vitesse des réactions biochimiques. Il faut élever la température pour stimuler la germination mais à condition qu'il n'y a est pas de d'autres facteurs limitants en particulier l'O². En effet, indirectement la température joue un grand rôle dans la germination en agissant sur la solubilité de l'O₂ dans l'embryon.

La gamme de températures compatibles avec la germination, varie d'une espèce à l'autre. Elle peut être étroite ou au contraire très large ; espèce des climats tempérés (températures basses = 0°C), espèces tropicales (températures élevées).

En fait, il est très difficile pour une espèce donnée, de préciser les températures cardinales (Minimale, Optimale, Maximale) car elles varient avec la variété, le lieu d'origine, les conditions de développement des plantes mères, l'état de maturité et l'âge de la semence. Elles dépendent beaucoup aussi des conditions auxquelles elles sont soumises entre le moment de leur récolte et celui où elles sont mises à germer.

e. *La lumière :*

L'action de la lumière peut être soit nécessaire, soit défavorable à la germination selon la photosensibilité* des espèces. On trouve plusieurs types de photosensibilité :

Photosensibilité positive : elle est présente chez 70% des semences, c'est un besoin de lumière.

Photosensibilité négative : c'est un cas rare que l'on trouve chez les liliacées.

Photosensibilité facultative : on retrouve ce cas chez la majorité des plantes cultivées.



CHAPITRE II : CROISSANCE

INTRODUCTION :

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

Les modifications quantitatives représentent la croissance (les modifications irréversibles se produisant au cours du temps). On a, par exemple, l'augmentation de taille, de volume, de masse.

On parle de différenciation quand la part prise par les modifications qualitatives va prédominer : c'est l'acquisition de propriétés morphologiques et fonctionnelles.

Chez les organismes pluricellulaires, la croissance est obtenue non seulement par le grandissement des jeunes cellules, mais aussi par l'augmentation de leur nombre ; ce qui suppose que le développement de l'organisme ou d'un de ses organes, implique trois processus dans l'ordre de leur mise en œuvre : La mérése, l'auxèse et la différenciation.

2-1-La mérése :

C'est une prolifération cellulaire qui consiste en une succession de divisions cellulaires ou mitoses, qui s'opèrent dans des régions localisées : les méristèmes (à l'exception des feuilles où elles se répartissent sur toute la surface du limbe).

2-2-L'auxèse :

C'est une augmentation des dimensions des cellules. Elle peut être

Isodiamétrique : précise une croissance à diamètres égaux quelque soit la forme (circulaire, carrée ou rectangulaire), exemple du parenchyme de la feuille, de l'écorce ou des organes de réserve.

Longitudinale (élongation) : cas le plus général.

Radiale : croissance en épaisseur.

Ce phénomène présente chez les végétaux des caractères particuliers du fait de la présence de la paroi pectocellulosique.

2-3-La différenciation :

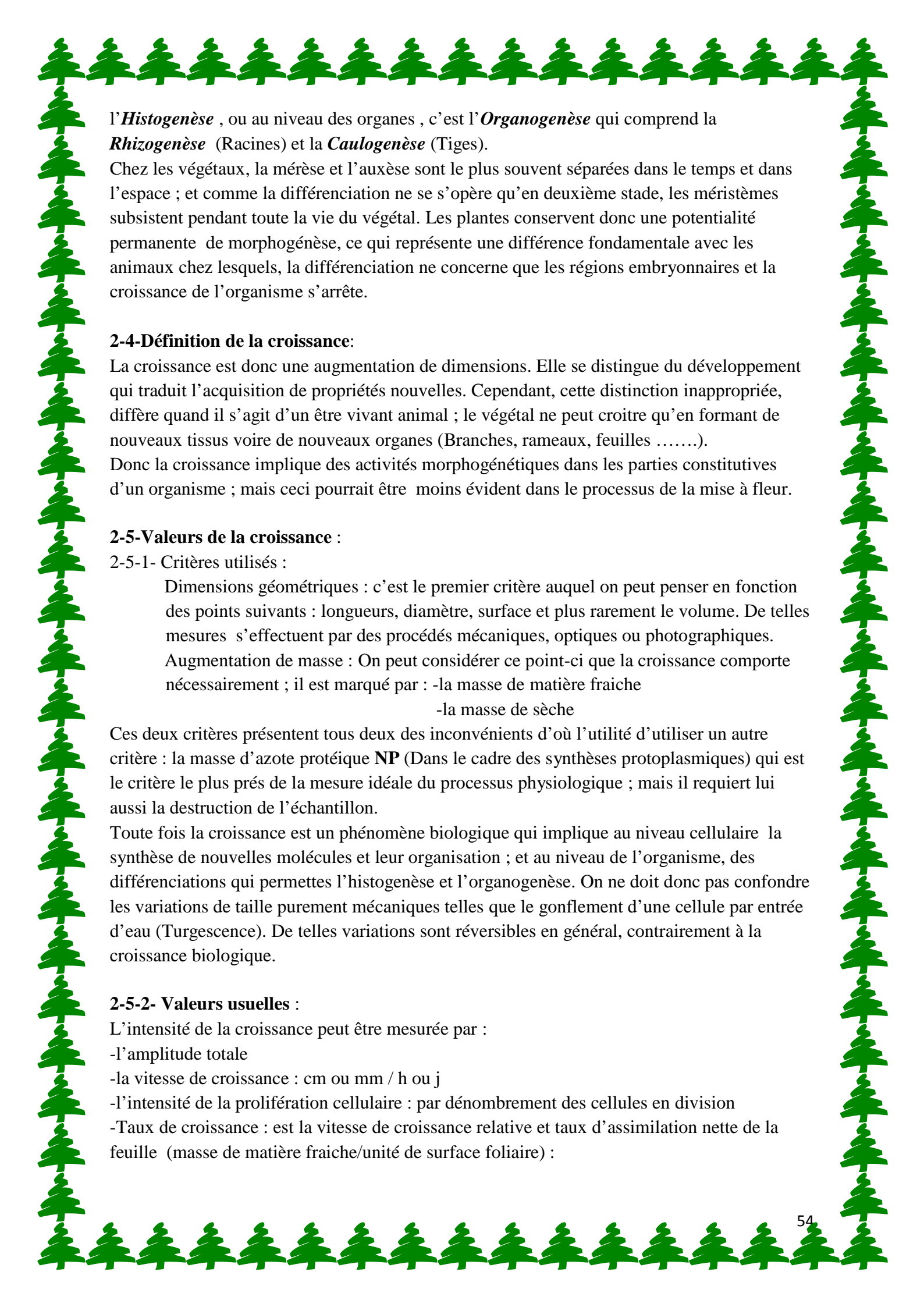
C'est le processus qui permet aux cellules d'acquérir des caractères morphologiques particuliers, différents suivant les tissus. Ce phénomène est moins marqué chez les végétaux que chez les animaux où il s'agit d'une spécialisation plus poussée. Elle porte sur :

La structure de la paroi (dépôt de cellulose, de lignine et de subérine)

Sur le pouvoir de synthèse (tissus assimilateurs, sécréteurs et de réserve).

Sur l'acquisition de potentialités physiologiques nouvelles telles que le virage floral (la mise à fleur).

On peut faire assimiler ce phénomène de différenciation à la morphogenèse qui est l'élaboration de nouvelles structures laquelle s'exprime au niveau des tissus, c'est



l'*Histogenèse* , ou au niveau des organes , c'est l'*Organogenèse* qui comprend la *Rhizogenèse* (Racines) et la *Caulogenèse* (Tiges).

Chez les végétaux, la mèresse et l'auxèse sont le plus souvent séparées dans le temps et dans l'espace ; et comme la différenciation ne se s'opère qu'en deuxième stade, les méristèmes subsistent pendant toute la vie du végétal. Les plantes conservent donc une potentialité permanente de morphogénèse, ce qui représente une différence fondamentale avec les animaux chez lesquels, la différenciation ne concerne que les régions embryonnaires et la croissance de l'organisme s'arrête.

2-4-Définition de la croissance:

La croissance est donc une augmentation de dimensions. Elle se distingue du développement qui traduit l'acquisition de propriétés nouvelles. Cependant, cette distinction inappropriée, diffère quand il s'agit d'un être vivant animal ; le végétal ne peut croître qu'en formant de nouveaux tissus voire de nouveaux organes (Branches, rameaux, feuilles).

Donc la croissance implique des activités morphogénétiques dans les parties constitutives d'un organisme ; mais ceci pourrait être moins évident dans le processus de la mise à fleur.

2-5-Valeurs de la croissance :

2-5-1- Critères utilisés :

Dimensions géométriques : c'est le premier critère auquel on peut penser en fonction des points suivants : longueurs, diamètre, surface et plus rarement le volume. De telles mesures s'effectuent par des procédés mécaniques, optiques ou photographiques.

Augmentation de masse : On peut considérer ce point-ci que la croissance comporte nécessairement ; il est marqué par : -la masse de matière fraîche

-la masse de sèche

Ces deux critères présentent tous deux des inconvénients d'où l'utilité d'utiliser un autre critère : la masse d'azote protéique **NP** (Dans le cadre des synthèses protoplasmiques) qui est le critère le plus près de la mesure idéale du processus physiologique ; mais il requiert lui aussi la destruction de l'échantillon.

Toute fois la croissance est un phénomène biologique qui implique au niveau cellulaire la synthèse de nouvelles molécules et leur organisation ; et au niveau de l'organisme, des différenciations qui permettent l'histogenèse et l'organogenèse. On ne doit donc pas confondre les variations de taille purement mécaniques telles que le gonflement d'une cellule par entrée d'eau (Turgescence). De telles variations sont réversibles en général, contrairement à la croissance biologique.

2-5-2- Valeurs usuelles :

L'intensité de la croissance peut être mesurée par :

-l'amplitude totale

-la vitesse de croissance : cm ou mm / h ou j

-l'intensité de la prolifération cellulaire : par dénombrement des cellules en division

-Taux de croissance : est la vitesse de croissance relative et taux d'assimilation nette de la feuille (masse de matière fraîche/unité de surface foliaire) :



Tr/Ta=Rendement foliaire,

Qui est plus important chez les plantes herbacées que chez les arbres, chez les plantes en C4 que chez les plantes en C3 et plus élevé chez les arbres à feuilles caduques que chez les arbres résineux.

A .Sites et formes de croissance.

1 .Au niveau de la plante et des organes.

Grâce aux méristèmes, la croissance d'une plante est en générale indéfinie (notion de taille adulte pour des organes). Une plante est soumise à deux types de croissance :

La croissance primaire : c'est l'élongation. Elle a lieu au niveau des méristèmes apicaux (organogènes). Ce type de développement est remarquable chez tous les végétaux : c'est le port herbacé des plantes.

La croissance secondaire : c'est l'augmentation en épaisseur. Elle a lieu au niveau des cambiums ou de zones génératrices (histogènes). Ce développement n'a lieu que chez les plantes ligneuses.

La croissance d'une plante présente des caractères commutatifs et itératifs (qui se répètent plusieurs fois).

Une plante a un développement indéfini, mais la capacité d'extension des organes est éphémère et leur grandissement se produit selon des gradients plus ou moins nets et diversement orientés suivant les organes et les espèces.

La racine : l'élongation est réalisée par les méristèmes primaires (zone de croissance) qui permettent l'avancée dans le sol. Cette croissance (primaire) est localisée et polarisée. L'élargissement (croissance secondaire) se produit très en arrière de la coiffe.

La tige : on ne trouve pas d'axe continu, mais des unités successives (les primarium + les ébauches foliaires). Ces unités permettent l'élongation simultanée sur plusieurs entre-nœuds successifs. Au niveau de la tige, on a un étagement du gradient de croissance qui est due à la persistance de cellules méristématiques résiduelles, juste au-dessus de chaque entre-nœuds.

Les feuilles : l'augmentation est bidirectionnelle. L'accroissement en épaisseur est très réduit par rapport à la surface foliaire.

Les fruits : c'est le résultat d'une hypertrophie due, dans le cas de la pomme de terre, à la croissance primaire, ou, à la croissance secondaire dans le cas du radis.

2 .Au niveau cellulaire.

L'extension symplastique est effectuée avec interposition constante de cellules isodiamétriques (isotropes) et cylindriques (anisotropes).

L'extension apicale est intrusive ou extrusive.

L'extension symplastique est constante : les cellules augmentent comme un ensemble solidaire, en maintenant leurs liaisons et leurs communications.

Le cas des extensions extrusives et intrusives : la cellule acquiert une autonomie plus ou moins importante par rapport aux cellules voisines.

Extension extrusive : les cellules épidermiques (ou du rhizoderme) vont donner des poils (ex : les fibres du coton).

Extension intrusive : elle se déroule vers l'intérieur des organes, au niveau de la lamelle moyenne (ex : les fibres de lin). L'augmentation du nombre d'individus (cellules) entraîne une augmentation des dimensions (surface, masse, ...) d'un composé particulier. Pour la majorité des végétaux, on observe une augmentation de quelques centimètres par jour, avec toutefois, quelques exceptions : les asperges, 30cm/j ; les bambous, 60cm/j ; les champignons, 5mm/min.

La vitesse de croissance est donnée par la formule : $v=(dl/dT)$ (l est un paramètre choisi).

Le taux de croissance est donné par la formule : $R=V/L_0$ (L_0 représente les dimensions initiales).

La courbe de croissance : son allure est sigmoïde. Cette courbe traduit une évolution de la plante. On peut observer quatre phases distinctes (Fig.29):

1. La phase de latence.
2. La phase accélérée (ou phase exponentielle) : $L=L_0 \cdot e^{RT}$. V est proportionnelle à L, $R=$ constante.
3. La phase linéaire : V est constante. Cette phase est parfois virtuelle, importante, ponctuelle.
4. La phase de ralentissement : c'est une phase de sénescence.

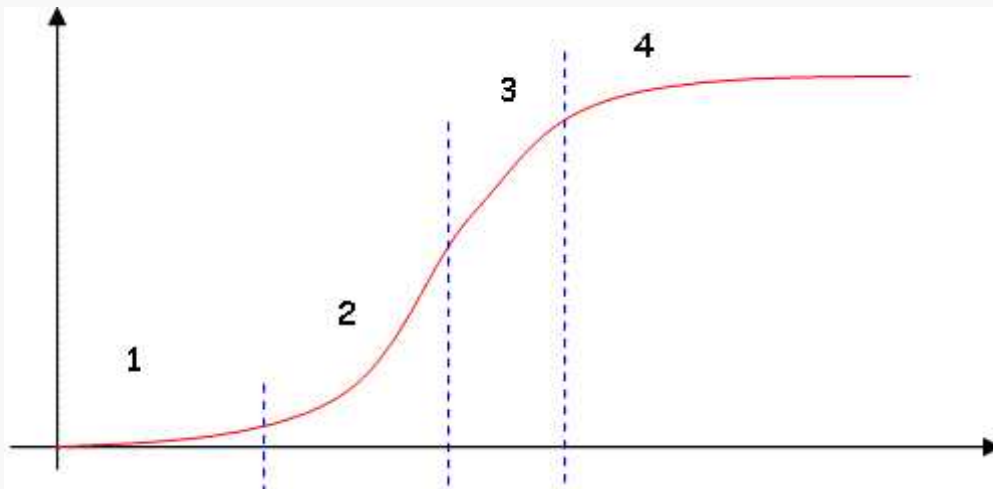


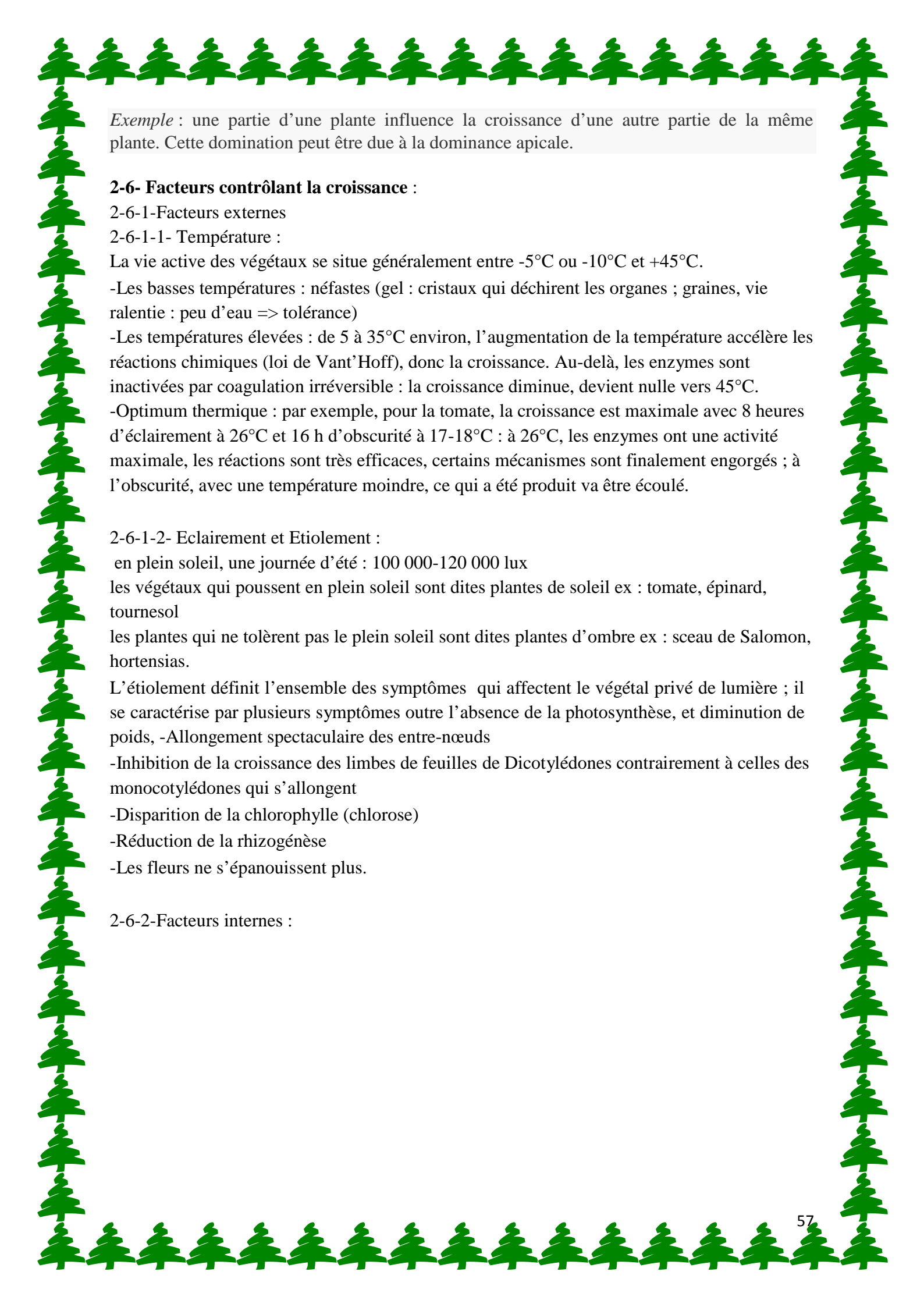
Figure n°29 : Courbe de croissance

B. Cinétique de croissance et variation dans le temps.

La cinétique de croissance de la plante varie dans le temps à cause de différents facteurs : température, éclairage, humidité... La périodicité de la cinétique est dépendante de facteurs externes.

Les facteurs endogènes : par exemple, on trouve les inhibiteurs de croissance qui sont responsables de l'état de dormance d'une plante (à l'état de semence).

La variation dans l'espace : elle est due à des facteurs endogènes liés à l'inhibition par corrélation.



Exemple : une partie d'une plante influence la croissance d'une autre partie de la même plante. Cette domination peut être due à la dominance apicale.

2-6- Facteurs contrôlant la croissance :

2-6-1-Facteurs externes

2-6-1-1- Température :

La vie active des végétaux se situe généralement entre -5°C ou -10°C et $+45^{\circ}\text{C}$.

-Les basses températures : néfastes (gel : cristaux qui déchirent les organes ; graines, vie ralentie : peu d'eau => tolérance)

-Les températures élevées : de 5 à 35°C environ, l'augmentation de la température accélère les réactions chimiques (loi de Vant'Hoff), donc la croissance. Au-delà, les enzymes sont inactivées par coagulation irréversible : la croissance diminue, devient nulle vers 45°C .

-Optimum thermique : par exemple, pour la tomate, la croissance est maximale avec 8 heures d'éclairement à 26°C et 16 h d'obscurité à $17-18^{\circ}\text{C}$: à 26°C , les enzymes ont une activité maximale, les réactions sont très efficaces, certains mécanismes sont finalement engorgés ; à l'obscurité, avec une température moindre, ce qui a été produit va être écoulé.

2-6-1-2- Eclairement et Etiolement :

en plein soleil, une journée d'été : 100 000-120 000 lux

les végétaux qui poussent en plein soleil sont dites plantes de soleil ex : tomate, épinard, tournesol

les plantes qui ne tolèrent pas le plein soleil sont dites plantes d'ombre ex : sceau de Salomon, hortensias.

L'étiollement définit l'ensemble des symptômes qui affectent le végétal privé de lumière ; il se caractérise par plusieurs symptômes outre l'absence de la photosynthèse, et diminution de poids, -Allongement spectaculaire des entre-nœuds

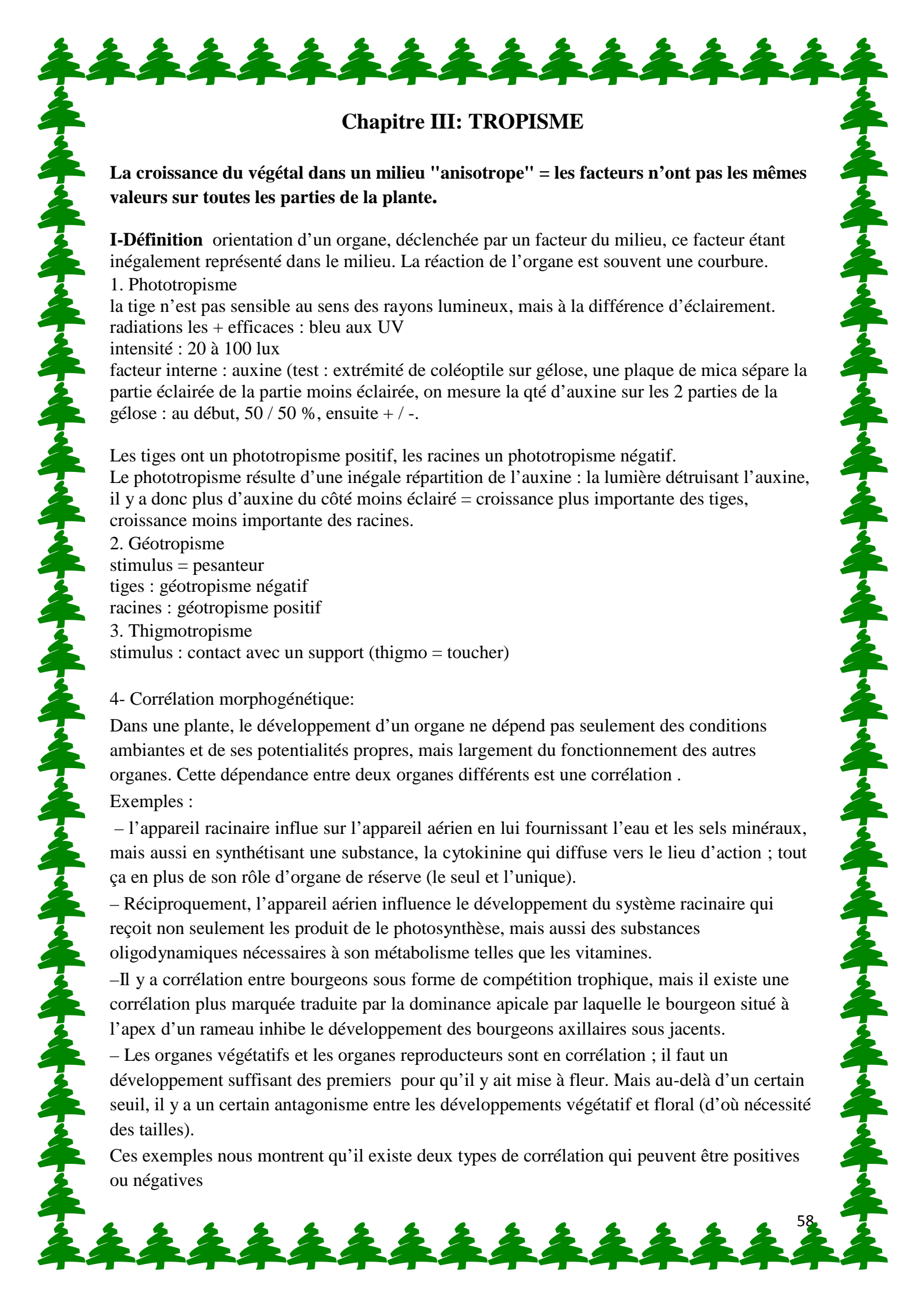
-Inhibition de la croissance des limbes de feuilles de Dicotylédones contrairement à celles des monocotylédones qui s'allongent

-Disparition de la chlorophylle (chlorose)

-Réduction de la rhizogénèse

-Les fleurs ne s'épanouissent plus.

2-6-2-Facteurs internes :



Chapitre III: TROPISME

La croissance du végétal dans un milieu "anisotrope" = les facteurs n'ont pas les mêmes valeurs sur toutes les parties de la plante.

I-Définition orientation d'un organe, déclenchée par un facteur du milieu, ce facteur étant inégalement représenté dans le milieu. La réaction de l'organe est souvent une courbure.

1. Phototropisme

la tige n'est pas sensible au sens des rayons lumineux, mais à la différence d'éclairement.

radiations les + efficaces : bleu aux UV

intensité : 20 à 100 lux

facteur interne : auxine (test : extrémité de coléoptile sur gélose, une plaque de mica sépare la partie éclairée de la partie moins éclairée, on mesure la qté d'auxine sur les 2 parties de la gélose : au début, 50 / 50 %, ensuite + / -).

Les tiges ont un phototropisme positif, les racines un phototropisme négatif.

Le phototropisme résulte d'une inégale répartition de l'auxine : la lumière détruisant l'auxine, il y a donc plus d'auxine du côté moins éclairé = croissance plus importante des tiges, croissance moins importante des racines.

2. Géotropisme

stimulus = pesanteur

tiges : géotropisme négatif

racines : géotropisme positif

3. Thigmotropisme

stimulus : contact avec un support (thigmo = toucher)

4- Corrélation morphogénétique:

Dans une plante, le développement d'un organe ne dépend pas seulement des conditions ambiantes et de ses potentialités propres, mais largement du fonctionnement des autres organes. Cette dépendance entre deux organes différents est une corrélation .

Exemples :

– l'appareil racinaire influe sur l'appareil aérien en lui fournissant l'eau et les sels minéraux, mais aussi en synthétisant une substance, la cytokinine qui diffuse vers le lieu d'action ; tout ça en plus de son rôle d'organe de réserve (le seul et l'unique).

– Réciproquement, l'appareil aérien influence le développement du système racinaire qui reçoit non seulement les produit de le photosynthèse, mais aussi des substances oligodynamiques nécessaires à son métabolisme telles que les vitamines.

–Il y a corrélation entre bourgeons sous forme de compétition trophique, mais il existe une corrélation plus marquée traduite par la dominance apicale par laquelle le bourgeon situé à l'apex d'un rameau inhibe le développement des bourgeons axillaires sous jacents.

– Les organes végétatifs et les organes reproducteurs sont en corrélation ; il faut un développement suffisant des premiers pour qu'il y ait mise à fleur. Mais au-delà d'un certain seuil, il y a un certain antagonisme entre les développements végétatif et floral (d'où nécessité des tailles).

Ces exemples nous montrent qu'il existe deux types de corrélation qui peuvent être positives ou négatives

