

Chapitre I. INTRODUCTION GENERALE

1.1. OBJECTIFS DU COURS

Le cours d'Agronomie Générale propose un enseignement de base qui traite des facteurs, des mécanismes et des lois qui sous-tendent et régissent le fonctionnement des champs cultivés. Le but est de faire connaître les principales composantes de la production végétale, les techniques de production et l'impact des activités agricoles sur l'environnement.

Les composantes de la production végétale concernées en milieu naturel sont : le climat, le sol et la plante. En effet, la plante vit dans un double milieu, le sol ou le substrat dans lequel elle plonge ses racines et l'atmosphère où se développent les organes aériens.

Le cours abordera particulièrement l'effet des différentes composantes du milieu écologique sur les plantes. Leur connaissance devrait permettre des interventions plus efficaces dans le sens de modifier en faveur du producteur, les relations entre la plante et le milieu. Ces interventions peuvent porter sur le climat, le sol, le matériel végétal, les systèmes de production, les systèmes de culture, etc. Une telle démarche suppose donc une étude des facteurs du milieu (climat et sol), de leur action sur la plante, ainsi qu'une connaissance approfondie des végétaux cultivés et des principales techniques culturales.

Les techniques culturales ont pour fonction d'agir sur les relations plantes-milieu :

- o en mettant en terre les semences ou plants, ou en prélevant les organes souhaités ;
- o en augmentant l'absorption du peuplement végétal par la fourniture au milieu, des quantités supplémentaires de certains éléments nutritifs (fertilisation) :
- o en mettant le peuplement végétal dans un état favorable au prélèvement de ces facteurs,
 - par le maintien de ses capteurs intègres et la conduite d'actions pour empêcher que les ressources du milieu soient prélevées par d'autres individus (lutte contre les adventices, les parasites, les ennemis des cultures),
 - en palliant les excès ou manque d'eau (drainage, irrigation).

Il est important d'avoir une vision globale de l'impact des activités agricoles sur l'environnement. Une agriculture productive et respectueuse de l'environnement pourrait assurer les fondements d'un développement durable.

1.2. OBJECTIFS D'APPRENTISSAGE

A l'issue du cours d'Agronomie Générale, l'étudiant devrait être capable de :

Cours d'agronomie générale Par Yves Romuald NGOBELA, Ingénieur Agronome

- o connaître les principaux mécanismes biophysiques à l'œuvre dans le système sol - plante – atmosphère qui sous – tendent la production végétale ;
- o maîtriser les outils, les techniques et les démarches permettant de conduire ou de proposer des actions pertinentes dans la production agricole ;
- o anticiper ou proposer des mesures permettant d'atténuer les impacts de l'activité agricole sur l'environnement.

1.2. PLAN DU COURS

Le cours comprend quinze chapitres regroupés en trois principales parties en dehors de l'introduction générale (Chapitre I) et de la Conclusion Générale (Chapitre XV).

Première partie : Composantes de la production

- o Chapitre II : Composante climatique
- o Chapitre III : Composante édaphique
- o Chapitre IV : Composante végétale.

Première partie : COMPOSANTES DE LA PRODUCTION AGRICOLE

Chapitre II : COMPOSANTE CLIMATIQUE

2.1. GENERALITES

2.1.1. Définitions

2.1.1.1. Notion de temps

Le temps est l'ensemble des valeurs qui, à un moment donné et en un lieu déterminé, caractérisent l'état atmosphérique. Le temps est donc une combinaison passagère et accidentelle.

2.1.1.2. Notions de climat et de climatologie

Le climat est un ensemble fluctuant d'éléments physiques, chimiques et biologiques caractérisant l'atmosphère d'un lieu et dont l'action complexe influence l'existence des êtres qui y sont soumis. Le climat résume les tendances stables qui résultent de conditions permanentes pendant une longue période (30 années au moins). Ainsi, le climat peut être considéré comme l'aspect du temps à longue échéance. On peut aussi le définir comme une série des états de l'atmosphère au-dessus d'un lieu dans leur succession habituelle.

La climatologie étudie les composantes et les variations des climats sur la surface de la terre.

2.1.1.3. Notion de météorologie

La météorologie est la discipline scientifique interdisciplinaire qui vise à comprendre les phénomènes atmosphériques. Elle comprend l'étude du temps et du climat. À l'aide de paramètres physiques, chimiques et mathématiques comme la mécanique des fluides ou la thermodynamique, elle tente par exemple de décrypter la formation des nuages, du vent ou des précipitations sur une échelle de temps et d'espace plus ou moins importante. Lorsqu'il est disponible, le bulletin météorologique journalier est une information capitale dans la mesure où, connaissant le temps qu'il fera, l'on peut à priori faire les ajustements nécessaires.

La météorologie tente d'anticiper le temps qu'il va faire dans un endroit donné et à un moment donné, avec un niveau de précision variable. Cette discipline connaît des applications concrètes et importantes dans de nombreux domaines comme l'agriculture.

La météorologie est aussi ancienne que l'agriculture. En effet, depuis que l'homme a commencé à cultiver, il a toujours observé le temps. L'introduction de nouvelles variétés de cultures ainsi que l'utilisation de périodes climatiques plus favorables pour augmenter les rendements étaient principalement basées sur les observations et l'enregistrement des données météorologiques.

2.1.1.4. Notion et d'agro - météorologie

La météorologie agricole ou agro météorologie est une spécialité à la rencontre de la météorologie et de l'agronomie, qui étudie l'action des facteurs climatologiques et hydrologiques en vue d'améliorer la gestion des exploitations agricoles et les conditions de développement du milieu rural. L'agro météorologie permet d'appréhender de façon objective et réaliste l'impact des différents éléments du temps sur l'agriculture. Les observations agro météorologiques sont de deux types : les observations liées au milieu physique et les observations de caractère biologique.

Les observations météorologiques portant sur les éléments physiques sont : la température de l'air, les températures extrêmes (mini, maxi), la température du sol à des profondeurs spécifiques, les précipitations (quantité, intensité et durée), l'évaporation bac, l'insolation et le rayonnement solaire global, la direction et la vitesse du vent, l'humidité du sol (contenu en eau volumétrique) à différentes profondeurs, l'humidité relative de l'air et les éléments du bilan hydrique : grêle, rosée, brouillard, évaporation sol nu, transpiration des plantes cultivées, interception des précipitations, ruissellement, drainage et niveau de la nappe phréatique.

Les observations de caractère biologique concernent : les observations phénologiques (identification des différents stades phénologiques de la plante comme la levée, le tallage, l'élongation des tiges, l'épiaison-floraison, la maturité), les observations de la croissance (pour l'établissement des relations bioclimatiques), les observations sur les rendements qualitatif et quantitatif, les observations relatives à l'apparition des parasites et des maladies ainsi que des dommages qu'ils causent, les observations des caractéristiques propres à la plante (longueur et diamètre des tiges, épis, fibres, composition chimique de la récolte, etc.), les observations des dommages causés par les vents et tornades.

2.1.1.5. Intérêt pour la climatologie et la météorologie

Le climat définit et explique les conditions de l'atmosphère au-dessus d'un lieu à moyen et long terme alors que la météorologie s'intéresse au court terme et notamment aux prévisions sur quelques jours. On comprend ainsi pourquoi la météo qui a un caractère plus immédiat, semble beaucoup plus intéresser les agriculteurs.

Les principaux phénomènes atmosphériques incluant les phénomènes énergétiques et leurs interactions avec la production végétale sont étudiés en détail dans le cours d'agro - climatologie.

2.1.2. Composantes du climat

2.1.2.1. Eléments climatiques

Les principales composantes du climat (*éléments climatiques*) qui caractérisent l'état de l'atmosphère sont : la température (chaleur), la lumière, l'humidité (eau) et le vent. Ils ont une influence déterminante sur la production agricole. En effet, par le jeu combiné de ses composantes, le climat interviendra comme facilitateur ou comme facteur limitant de la production agricole. La lumière et la température constituent les *facteurs énergétiques du climat*, les précipitations et l'humidité de l'air en sont les facteurs hydriques tandis que les vents représentent les *facteurs mécaniques*.

2.1.2.2. Facteurs climatiques

Les éléments climatiques (température, la lumière, l'humidité et le vent) varient sous l'action de *facteurs* ou *agents climatiques* parmi lesquels la latitude, l'éloignement de la mer, les courants atmosphériques, le relief, le couvert végétal, l'altitude, etc. C'est leur action qui explique la répartition géographique des espèces cultivées à travers le globe.

Pour déterminer le climat d'un lieu, il est nécessaire de disposer d'informations sur une période assez longue (25 à 30 ans). La durée souhaitable dépend de l'irrégularité de l'élément considéré. Par exemple, elle doit être plus longue pour les précipitations que pour la température.

2.1.3. Répartition des zones climatiques

2.1.3.1. Principales zones agro – écologiques du Gabon (TP)

2.1.3.2. Essai de systématique climatique

Au sein d'une étendue très limitée, climatiquement homogène en première analyse se trouve en fait imbriquée une multitude de *microclimats*. Ces petites zones bénéficient d'une exposition particulière au rayonnement ou au vent, ou d'un environnement pédologique et végétal particulier.

Des agents climatiques secondaires comme la présence d'une forêt ou d'une étendue d'eau peuvent modifier le climat local. Une parcelle cultivée jouit souvent d'un microclimat. Au sein d'un couvert végétal existe un microclimat particulier appelé *phytoclimat* ou microclimat cultural.

La systématique climatique est présentée dans le Figure 1. En agriculture il est recommandé de se référer au climat local dont les caractéristiques ont plus de signification pour la production végétale.

| | | | | | |
|---|--------------------------------------|---|--|---------------------------------|-----------------------------|
| | | | | | Niveau / Etendue |
| <i>Climat régional (Macro climat)</i> | | | | | Région |
| | | | <i>Climat local (méso climat)</i> | | Petite région |
| | | | | <i>Microclimat</i> | Bassin versant |
| | | | | <i>Microclimat cultural</i> | Couvert végétal |
| Agents climatiques | Latitude Relief Continentalité | Relief Couvert végétal Nature du sol | Exposition Pente Orientation Environnement végétal | Nature plant Port Hauteur | |

Figure 1 : Systématique climatique

Adapté de Vilain, M. 1997.

2.1.4. Climat et production végétale

2.1.4.1. Climat et choix des cultures

Chaque plante, chaque espèce et, à l'intérieur de l'espèce, chaque variété présente des exigences climatiques particulières. Ces exigences concernent notamment :

- la quantité de chaleur nécessaire pour accomplir le cycle ;
- les besoins vis à vis du thermopériodisme et du photopériodisme ;

- les températures critiques, minimales et optimales ;
- les besoins en eau et les périodes de sensibilité accrue aux déficits hydriques.

En confrontant les exigences de la plante et les possibilités offertes par le climat, il est possible de définir des aires de cultures pour les espèces et pour les variétés d'intérêt agricole. L'aire de culture d'une espèce ne doit cependant pas être considérée comme immuable car la création de variétés aux exigences climatiques différentes permet de les cultiver dans des zones nouvelles.

Par exemple, La création de variétés de maïs peu exigeantes en unités thermiques permet la culture de l'espèce à des latitudes élevées.

2.1.4.2. Influence du climat sur la croissance et le développement des plantes

Le comportement des cultures de plein champ est conditionné principalement par les facteurs édapho-climatiques. A sol identique et pour une espèce donnée, les facteurs du climat ont une influence prédominante sur la croissance et le développement des plantes.

2.1.4.3. Influence du climat sur la réalisation et l'efficacité des itinéraires techniques

Le climat est susceptible d'imposer des contraintes à la réalisation et à l'efficacité des itinéraires techniques. En milieu naturel, le climat est l'élément sur lequel il est le plus difficile d'agir afin d'obtenir des conditions particulières. On comprend donc pourquoi l'Homme a développé des systèmes de culture sous abri, afin de se libérer des contraintes climatiques.

2.2. TEMPERATURE

2.2.1. Caractérisation, modalités d'appréciation et d'action

2.2.1.1. Notions de température et de chaleur

La température permet de déterminer la quantité de chaleur qui règne dans un milieu donné. La chaleur règle le rythme de croissance et de développement des plantes et limite leur aire culturale.

La température agit par la quantité de chaleur reçue ou mieux, la quantité d'énergie rayonnée par le soleil et qui est interceptée puis partiellement utilisée pour les synthèses organiques végétales.

2.2.1.2. Détermination de la température

Dans les stations météorologiques, la température de l'air se mesure à 2 m (ou 1, 50 m) au dessus d'un sol gazonné et sous abri. La température ainsi prise sert à caractériser les climats. Elle ne correspond pas exactement à la température de la plante ou encore, à la température du sol. Toutefois, la température ainsi déterminée autorise des comparaisons dans la mesure où les relevés sont effectués en suivant le même protocole.

Une autre réserve quant à l'utilisation en agronomie des données thermométriques obtenues auprès des stations météorologiques est que très souvent, ce sont des moyennes qui sont utilisées pour caractériser les climats. Pourtant, ce sont surtout les températures extrêmes qui sont déterminantes pour l'agriculture. Dans une région donnée, un agriculteur doit surtout savoir si les spéculations (ou cultures) choisies peuvent supporter les températures extrêmes de cette région.

Par exemple, on ne peut pas produire des oranges au Canada où on enregistre des températures de -20°C puisque l'oranger meurt à -7°C.

2.2.2. Notions décrivant la réaction des plantes à la température

Tous les phénomènes biochimiques et physiologiques au sein des plantes sont influencés par la température. Toutefois, les plantes y réagissent différemment. Plusieurs notions permettent de décrire la réaction des plantes à la température. Ce sont :

- le zéro de végétation
- la température minimale
- la température optimale
- les températures critiques et
- les besoins totaux en chaleur.

2.2.2.1. Zéro de végétation

On appelle zéro de végétation ou température de base d'une plante, la température au dessous de laquelle la croissance de celle - ci cesse (ou devient négligeable).

*Exemples : 0 °C : Pois
8 °C : Sorgho*

9 °C : *Maïs et pomme de terre*

10 °C : *Soja*

14 °C : *Cotonnier.*

Le zéro de végétation est une donnée approximative. Pour une même espèce, cette donnée peut varier suivant la variété. En outre, pour une même plante, le zéro de végétation est différent selon les stades de développement. Le zéro de la végétation est toutefois une donnée utile. Entre autres, il permet d'expliquer la répartition géographique des plantes.

2.2.2.2. Température minimale

La température minimale est la température au dessous de laquelle certaines phases du développement d'une plante ne peuvent pas se déclencher. Les phénomènes de floraison sont les plus caractéristiques à ce point de vue, ainsi que la montaison et l'épiaison chez les céréales.

En régions tropicales, la notion du minimum de température n'a pas beaucoup d'applications pratiques dans la mesure où les températures sont suffisamment élevées pour la croissance végétale. En pays tempérés et froids par contre, l'existence d'une température minimale a pour conséquence pratique, la détermination des dates des semis. En effet, il est inutile de confier la semence au sol tant que sa température n'a pas atteint et même, lorsqu'elle n'a pas sensiblement dépassé la température minimale de l'espèce à la sortie de l'hiver (saison froide).

Exemples de températures minimales pour la floraison

5°C : *Chou, carotte, céleri, persil, pois ;*

10°C : *Maïs, tomate ;*

15°C : *Haricot, concombre, gombo, piment, pastèque.*

Exemples de températures minimales pour la croissance

5°C : *Betterave, Chou de Bruxelles, radis ;*

10°C : *Haricot, maïs, épinards ;*

15°C : *Melon, concombre ;*

18°C : *Aubergine, piment, tomate, pastèque, gombo, patate douce.*

2.2.2.3. Température optimale

La vitesse de croissance des végétaux est, toutes choses étant égales par ailleurs, fonction de la température. Pour une phase active du développement, la température optimale est celle qui assure la vitesse de croissance la plus élevée. Ainsi, une phase active du développement sera d'autant plus réduite que la température ambiante est proche de l'optimum. En général, l'optimum de température des plantes cultivées se situe entre 20°C et 25°C.

Exemples :

15 – 18°C *Carotte, céleri, chou, pomme de terre, persil*

15 – 21°C *Haricot*

15 – 24°C *Maïs, pois, épinards*

21 – 18°C *Poivron,*

21 – 30°C *Aubergine, piment, gombo, pastèque.*

La température optimale de croissance peut être différente entre les phases diurne et nocturne.

Par exemple, chez la tomate, les températures optimales pour la croissance sont de 21 à 29°C le jour et de 18 à 20°C la nuit.

Chez certaines espèces, cette alternance constitue une nécessité physiologique.

Chez la pomme de terre par exemple, l'alternance conditionne la transformation des sucres en amidon. Une température nocturne plus basse est favorable à l'accumulation de l'amidon.

2.2.2.4. Températures critiques

Les températures critiques sont les températures minima et maxima au dessous et au dessus desquelles le végétal cultivé est tué, respectivement. Elles sont variables selon le stade de végétation.

Par exemple, la graine supporte des températures très basses ou relativement très élevées mais la plante en plein développement présente des limites de résistance beaucoup plus étroites.

2.2.2.5. Besoins totaux en chaleur (Somme de températures)

On a pu établir une relation directe entre les quantités de chaleur cumulées des plantes et leur vitesse de croissance et de développement. Une plante a besoin d'une certaine quantité de chaleur pour accomplir une phase ou tout son cycle de développement.

Il n'est pas aisé de déterminer les besoins en chaleur d'une plante. On utilise souvent la somme des "températures efficaces". On entend par température efficace d'une journée, la différence entre la température moyenne de la journée et le zéro de végétation.

Les sommes de températures ne correspondent nullement à des quantités de chaleur. Ces dernières s'exprimeraient alors en calories. La notion de somme des températures reste cependant très imprécise. De nombreuses fluctuations sont observées et sont inévitables car les températures supérieures à l'optimum peuvent intervenir à n'importe quel moment.

Pour exprimer les besoins totaux en chaleur chez le maïs, on utilise les unités thermiques maïs ou "degré – jour". Les unités thermiques maïs (UTM) à un endroit donné sont calculées suivant une formule qui tient compte de la température maximale, la température minimum du jour et du zéro de végétation. A l'échelle géographique, les besoins totaux en chaleur permettent d'expliquer les limites d'adaptation des cultures.

Par exemple, à 30 ° de latitude Nord on ne peut pas cultiver économiquement le maïs là où il s'accumule moins de 2300 UTM.

2.2.3. Action des basses températures sur les plantes

2.2.3.1. Sensibilité contrastée des organes aux basses températures

La résistance aux basses températures (conditions assimilables à une sécheresse physiologique) est variable ; les organes ou organismes en vie ralentie (graines, spores, bourgeons, bulbes et tubercules au repos), qui ont en commun un état de déshydratation sont très résistants. A l'inverse, les organes riches en eau, en état de vie active, sont tués à quelques degrés en dessous de 0°C ou au dessus de 0°C pour les espèces tropicales et certains fruits charnus.

2.2.3.2. Action des températures basses sur le métabolisme

Le froid réduit la croissance et le métabolisme. En conséquence, la longueur du temps requis pour un cycle végétatif annuel complet est allongée ; il existe un seuil de température en dessous duquel la

plante ne peut se reproduire avec succès. Un refroidissement des plantes tropicales et subtropicales entre 0 et 10°C tend à réduire les processus métaboliques et en particulier la respiration ; il peut entraîner des dommages sévères ou la mort en quelques jours.

Le refroidissement entraîne une inactivation des enzymes membranaires et un mauvais fonctionnement du transport de l'eau et des ions dans la racine. Les plantes des régions tempérées montrent des symptômes de dommage après que la glace se soit formée dans leurs tissus. La photosynthèse n'est pas inhibée tant que la glace cellulaire ne s'est pas formée (-3 à -5°C) ; cet arrêt serait aussi bien la conséquence d'un arrêt de la diffusion du CO₂, dû à la formation de la glace, que d'une inactivation du système enzymatique. Les cristaux de glace sont grands et peu nombreux si le froid survient lentement, alors qu'ils sont plus petits et nombreux lorsque le refroidissement est brutal.

La glace se forme préférentiellement dans l'apoplasme des tissus, qui est beaucoup moins concentré que le cytoplasme. Si cette glace apoplastique persiste, le gradient de pression de vapeur d'eau entre l'apoplasme et la cellule entraîne une sortie d'eau cellulaire vers l'apoplasme où elle gèle, augmentant la quantité de glace dans les tissus. Ce processus entraîne une déshydratation et une contraction progressive du cytoplasme (similaire à un stress hydrique), le plissement des parois, la division des mitochondries et des vacuoles, et un bouleversement de la répartition de la chromatine dans le noyau. La biochimie du cytoplasme, coagulé, est donc fortement altérée : les protéines (dont les enzymes) sont dénaturées (mais certaines enzymes peuvent être portées à -19°C sans perdre leur activité), des composants divers sont précipités, les macromolécules se condensent par la déshydratation du cytoplasme.

Tous les phénomènes cités ci-dessus conduisent à la mort de la cellule végétale et de la plante. La mort du végétal est généralement causée par une accumulation de CO₂ et de déchets toxiques liés à la respiration dont l'évacuation à travers les cellules plus ou moins gelées s'opère très mal.

2.2.4. Action des hautes températures sur les plantes

2.2.3.1. Sensibilité contrastée des organes aux températures élevées

Une chaleur excessive provoque la déshydratation des plantes. Celle-ci résulte d'une transpiration accélérée. Si le sol ne peut pas assurer une alimentation suffisante en eau, il y a perte de turgescence et flétrissement.

Le phénomène de flétrissement peut être temporaire si l'alimentation en eau s'améliore. Par contre, si l'approvisionnement en eau du sol reste insuffisant, le flétrissement devient permanent avec coagulation du protoplasme suivi de la mort de la plante. La résistance aux hautes températures est étroitement liée à la disponibilité de l'eau dans le sol et à la capacité des plantes à extraire l'eau du sol. L'action des hautes températures est aussi accentuée par celle du vent.

Toutefois, comme pour les basses températures, la limite de survie aux hautes températures est très différente selon l'hydratation des organes : les graines et les spores résistant à des températures beaucoup plus élevées que les tissus riches en eau.

2.2.3.2. Action des températures basses sur le métabolisme

Les tissus végétaux dissipent la chaleur par 3 processus principaux :

- l'émission de radiations de grande longueur d'onde,
- la convection de la chaleur,
- la transpiration, processus le plus efficace.

Toutefois, de hautes températures (supérieures à 40°C) sont souvent associées avec l'arrêt de la transpiration, à la suite de la fermeture des stomates. Ainsi la végétation des habitats secs est soumise à une combinaison de stress hydrique et thermique. Le fait que les lipides chloroplastiques subissent une réduction de leur viscosité à des températures de 45-55°C suggère que les membranes sont le site primaire de cet effet néfaste de la chaleur.

Des adaptations morphologiques (feuilles petites, enrubannées) sont associées avec des adaptations biochimiques favorisant la photosynthèse nette aux hautes températures, en particulier les processus photosynthétiques C4 et CAM. On retrouve donc une analogie entre la tolérance aux hautes températures et la tolérance au déficit en eau.

En plus de la sélection pour les variétés résistantes ou tolérantes à la chaleur, plusieurs méthodes de protection contre les hautes températures sont envisageables. (*Cf. Deuxième partie du cours*).

2.2.5. Action de la température sur les fonctions physiologiques

La mise en évidence d'une température optimale de croissance n'est que la résultante des multiples effets qu'exercent les variations de température sur les fonctions de la plante et notamment sur la respiration, la transpiration et la photosynthèse.

Les effets de la température sur le fonctionnement de la plante sont présentés en détail dans le cours de physiologie végétale.

2.2.5.1. Effets de la température sur la respiration

Cf. Cours de physiologie végétale

2.2.5.2. Effets de la température sur la transpiration

Cf. Cours de physiologie végétale

2.2.5.3. Effets de la température sur la photosynthèse

Cf. Cours de physiologie végétale

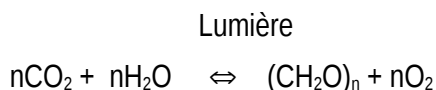
2.3. LUMIERE

2.3.1. Caractéristiques spectrales du rayonnement solaire

2.3.1.1. Importance de la lumière pour les plantes

La lumière (radiation ou rayonnement solaire) est la source d'énergie qui permet à la plante d'effectuer la photosynthèse. La photosynthèse est le processus métabolique à travers lequel la plante verte en présence de lumière, décompose le CO₂ atmosphérique et procède à l'assimilation du carbone sous forme de glucides.

La photosynthèse est souvent résumée par l'équation :



La lumière joue un rôle important dans la régulation de la croissance et le développement des plantes à travers les phénomènes de photopériodisme et de photo morphogénèse. Globalement, les effets de la lumière sont fonction des caractéristiques du rayonnement.

2.3.1.2. Composition spectrale du rayonnement solaire

La lumière solaire est constituée de rayonnements ayant des longueurs d'onde différentes. Ces rayonnements ont un impact différent sur les processus métaboliques des plantes. La composition spectrale du rayonnement solaire extra terrestre est la suivante :

- 9 % de l'éclairement a une longueur d'onde < 400 nm (ultraviolet) ;
- 41 % de l'éclairement est compris entre 400 et 700 nm ;
- 50 % est supérieur à 700 nm (infrarouge) avec 1 % supérieur à 4000 nm.

La traversée de l'atmosphère modifie la composition spectrale du rayonnement extraterrestre par des phénomènes d'absorption et de diffusion. Ces phénomènes sont proportionnels à la masse d'air traversée.

2.3.2. Mesure de la lumière

Les deux données les plus intéressantes sur le plan agronomique sont : l'intensité lumineuse et la durée d'éclairement.

2.3.2.1. Durée d'éclairement

La durée d'éclairement s'apprécie par la longueur du jour. Elle varie en fonction de la saison et de la latitude. En climat équatorial, la durée du jour est presque constante. Elle est voisine de 12 heures. Par contre, aux latitudes élevées, la durée du jour est plus longue en été alors qu'elle est plus courte en hiver.

En plein champ, il n'est pas possible de modifier la durée d'éclairement. L'agriculteur doit s'y conformer par le choix des espèces ou des variétés ; il peut aussi ajuster les dates de semis et de plantation aux périodes les plus favorables.

La durée relative du jour ou de la nuit est appelée photopériode. Plus particulièrement, la durée d'insolation est mesurée par des héliographes. Elle s'exprime en heures et en 1/10 d'heures. La durée d'insolation influence la répartition des cultures et les potentialités de la photosynthèse.

2.3.2.2. Intensité de l'éclairement

Sur le plan agronomique, la photosynthèse permet d'avoir une appréciation de l'intensité lumineuse. Il s'agit de l'accroissement de la matière sèche (glucides) pendant le temps de référence. On admet

généralement que les sources de synthèse des autres composantes du végétal n'interviennent pas comme facteur limitant.

L'intensité d'éclairement est fonction de l'insolation et de l'angle d'incidence des rayons solaires. Elle s'exprime en "lux" (lumière visible). Les fluctuations annuelles de l'intensité de la lumière constituent un facteur limitant pour les végétaux. A faible, comme à fort éclairement, la photosynthèse est inhibée.

2.3.3. Action de la lumière sur les végétaux

2.3.3.1. Action de l'intensité lumineuse

Selon l'adaptation aux intensités lumineuses, on distingue les plantes héliophiles (Héliophytes) et les plantes ombrophiles (Sciaphytes).

Les *héliophytes* ou plantes de lumière sont des végétaux dont la croissance est maximale sous des forts éclaircements et qui ne tolèrent pas l'ombre d'autres individus. Les plantes cultivées en général et les arbres des forêts claires sont des héliophytes.

Les *sciaphytes* ou plantes d'ombre sont des végétaux dont la croissance nécessite une ombre forte ou très dense. C'est le cas des végétaux du sous-bois (fougères, mousses) et les jeunes stades de la plupart des espèces d'arbres de forêts.

Le degré de sciaphilie ou d'héliophilie d'une espèce végétale peut varier au cours de son cycle vital. Pour des nombreuses espèces d'arbres, le stade jeune est sciaphile alors que le stade adulte est héliophile. En général, la plante a besoin de plus en plus de lumière au fur et à mesure qu'elle vieillit. Les éclaircements faibles sont favorables au développement végétatif alors que les éclaircements intenses favorisent les organes de réserve (racines, tubercules) et les fruits dont ils améliorent la qualité.

2.3.3.2. Action de la durée d'éclairement

La durée d'éclairement ou photopériode influence la croissance et le développement des plantes. Selon la réaction des plantes au photopériodisme on distingue :

- les plantes de jours longs (plantes héméropériodiques)
- les plantes de jours courts (plantes *nyctipériodiques*)

- les plantes indifférentes (plantes *photo apériodiques*).

Une plante est dite de jours longs pour un événement physiologique donné si son apparition n'intervient que lorsque la durée du jour devient supérieure à un seuil critique. En ce qui concerne la floraison, un éclaircissement inférieur au seuil critique inhibe ce phénomène et les plantes restent petites et ne fleurissent pas.

Exemples de plantes de jours longs pour la floraison : le pois, la carotte, le blé, la luzerne.

Une plante est dite de jours courts pour un événement physiologique donné si son apparition n'intervient que lorsque la durée du jour devient inférieure à un seuil critique. Dans le cas où la durée d'éclaircissement reste inférieure au seuil critique, les bourgeons floraux ne s'ouvrent pas. Ils restent en dormance jusqu'à ce que la photopériode devienne satisfaisante. C'est le cas de certaines variétés de soja et de la canne à sucre.

Une durée d'éclaircissement supérieure au seuil critique s'accompagne d'un gigantisme et de la suppression des fleurs. Les individus restent alors stériles et il devient impossible de les multiplier par leurs graines.

Exemples de plantes de jours courts pour la floraison le maïs, le chou pommé, le millet, le sorgho, le coton, le chanvre et le piment.

Les plantes indifférentes pour la photopériode sont celles pour lesquelles le développement est peu influencé par la durée du jour ou de la nuit.

Exemples de plantes indifférentes pour la floraison : variétés de maïs, variétés de riz, variétés de soja.

La réaction des plantes au photopériodisme a de nombreuses applications pratiques :

- elle permet de comprendre certains échecs après l'introduction de nouvelles cultures dans des régions éloignées de leur aire d'origine (cas du soja en France) ;
- elle permet de comprendre pourquoi certaines plantes ont des difficultés à fleurir dans des régions éloignées de leur aire d'origine, c'est le cas du céleri ou de la carotte sous les tropiques ;
- en horticulture maraîchère, en faisant varier la durée d'éclaircissement, la période de floraison de nombreuses plantes peut être accélérée ou retardée ;

- dans les travaux d'amélioration des plantes, il est parfois avantageux de raccourcir le cycle de développement de certaines plantes en agissant sur la durée d'éclairement, ce qui permet d'accélérer les travaux de sélection.

Les spécialistes de l'amélioration des plantes produisent de plus en plus des variétés insensibles à la photopériode.

2.3.3.3. Action de la lumière sur la croissance

Le rayonnement solaire favorise à travers la photosynthèse, l'accumulation de la matière sèche nécessaire à la croissance végétale. Toutefois, seule une partie du rayonnement solaire est utilisée pour la photosynthèse. Les rayons photo synthétiquement actifs sont ceux contenus dans la bande spectrale de 400 à 700 nm.

Des travaux ont démontré que la photosynthèse est mieux corrélée au nombre de photons incidents par unité de surface et par unité de temps qu'à l'énergie contenue dans le rayonnement.

Les mécanismes et réactions par lesquels la lumière participe à la photosynthèse sont abordés en détail dans le cours de physiologie végétale.

2.3.3.4. Action de la lumière sur le développement

Le rayonnement solaire intervient dans les phénomènes de régulation du développement dont les plus importants sont le photopériodisme et la photomorphogénèse.

- le photopériodisme peut provoquer le passage d'une plante de l'état végétatif à l'état reproducteur ;
- la photomorphogénèse est la modification des structures des plantes due aux variations de la composition spectrale de la lumière et en particulier, au déséquilibre rouge/infrarouge.

L'enrichissement en infrarouge correspond à une situation de zone ombragée dans une culture : globalement, il en résulte une étiolement de la plante (élongation des feuilles, des tiges, des pétioles, et une réduction du nombre de talles et de ramifications). On observe aussi une diminution de la chlorophylle foliaire.

2.3.3.5. Sources artificielles de lumière

Des sources artificielles de lumière peuvent être utilisées pour assurer la croissance et le développement des plantes, notamment sous abri. La composition spectrale des différentes sources varie. Les différences observées sont parfois importantes. Il est opportun d'en tenir compte en prenant en considération : le rendement énergétique (par rapport à la puissance consommée), l'efficacité photosynthétique (radiations photo synthétiquement actives) et les risques des modifications morphogénétiques.

2.4. EAU (PRECIPITATIONS) ET HUMIDITE DE L'AIR

2.4.1. Sources d'eau pour les plantes

Les principales sources d'eau pour les plantes cultivées sont l'eau atmosphérique et l'eau d'irrigation. L'irrigation englobe tous les procédés artificiels utilisés pour apporter l'eau aux plantes. L'atmosphère est la source naturelle d'eau à travers les précipitations. Il convient d'examiner la valeur agricole des différentes formes sous lesquelles l'eau atmosphérique parvient aux plantes à savoir : la vapeur (brouillard et brume), la rosée, la pluie, la grêle et la neige.

2.4.1.1. Eau de pluie

Les pluies ou précipitations proviennent des nuages qui sont constitués de gouttelettes de condensation de vapeur d'eau de moins de 50 microns, ce qui leur permet de rester indéfiniment en suspension dans l'atmosphère. Les gouttes de pluies sont beaucoup plus grosses, leur diamètre moyen étant compris entre 0,5 et 2 mm, et leur volume étant 100 000 à 1 000 000 de fois grand. Il n'y aura donc précipitation que lorsque les gouttelettes des nuages auront suffisamment grossi.

En milieu naturel, la pluie est la source d'eau la plus importante pour la plante. C'est l'un des facteurs les plus déterminants du climat et des rendements. Au point de vue agricole, il est important de considérer la pluie à divers points de vue : la quantité d'eau totale, la fréquence, la variation dans le temps et l'intensité.

Quantité d'eau totale

La quantité d'eau totale est la hauteur totale d'eau de pluie tombée dans l'année. Elle s'exprime par l'épaisseur (en millimètres) de la couche d'eau qui resterait sur une surface horizontale s'il n'y avait aucune perte par écoulement, évaporation ou infiltration. Un millimètre de pluie correspond à un apport d'un litre d'eau par m². La mesure est effectuée à l'aide d'un pluviomètre : l'eau recueillie dans un entonnoir de 400 cm² de surface est mesurée par une éprouvette graduée de section 20 fois plus petite (ce qui permet d'augmenter la précision de la mesure).

Le facteur quantité d'eau totale n'a qu'une valeur relative dans la détermination des possibilités agricoles d'une région. Les autres facteurs et notamment la fréquence et la répartition des précipitations auront au contraire une action plus déterminante.

Fréquence

La fréquence est mesurée par le nombre annuel de jours de pluie. On conçoit facilement que les régions à pluies fréquentes, toutes choses étant égales par ailleurs, sont plus favorables à la végétation et la production agricole que celles où les pluies sont rares, puisque l'approvisionnement régulier du sol en eau se trouve mieux assuré.

Répartition des pluies dans le temps

La répartition des pluies dans le temps est le facteur du climat dont les répercussions sur la production agricole sont les plus importantes. Lorsque les pluies sont bien réparties sur toute l'année, les spéculations agricoles peuvent être plus nombreuses. Toutefois les caractéristiques du sol modulent l'effet de la répartition des pluies dans le temps.

Intensité des pluies

L'intensité des pluies s'exprime par la quantité d'eau totale tombée par unité de temps (mm/h). On estime que l'optimum se situe aux environs de 1 mm/heure mais il dépend essentiellement de la perméabilité superficielle du sol. Les pluies violentes accroissent le tassement du sol et favorisent le ruissellement. L'eau des pluies trop fines est évaporée en grande partie sans pénétrer dans le sol.

2.4.1.2. Vapeur d'eau (brouillard et brume)

L'air ambiant renferme toujours une certaine quantité d'eau sous forme de vapeur. Les brouillards et les brumes se produisent quand une masse d'air chargée d'humidité se refroidit suffisamment pour atteindre le point de rosée. Des gouttelettes de 6 à 20 microns de diamètre se forment alors, suffisamment petites pour rester en suspension dans l'atmosphère. Lorsque les brouillards traversent une couverture végétale, une certaine quantité d'eau est interceptée par la végétation alors qu'elle serait perdue si le sol était nu.

La quantité de vapeur contenue dans l'air est définie par l'état ou le degré hygrométrique. Le degré hygrométrique s'exprime en % du maximum de la pression de vapeur d'eau de l'air. Il est mesuré par des hygromètres enregistreurs ou des psychromètres.

Des échanges s'établissent entre la vapeur d'eau du sol et la vapeur d'eau de l'air. Ces échanges visent à établir un équilibre. Ainsi par exemple, lorsque la pression de vapeur d'eau de l'air est plus élevée que

celle du sol, ce dernier récupère la vapeur d'eau atmosphérique. Le phénomène d'échange d'eau sous forme de vapeur entre le sol et l'atmosphère a une grande ampleur dans les régions désertiques. Les quantités d'eau ainsi absorbées par le sol peuvent varier de 40 à 200 mm par an, chiffre très important pour des régions où la pluviosité annuelle est quelquefois inférieure à 5 mm.

2.4.1.3. Rosée

La rosée résulte de la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique à la surface des plantes et/ou du sol. En effet, la rosée est due au refroidissement de la couche d'air humide en contact avec le sol pendant les nuits claires où la perte de chaleur par rayonnement est importante.

La mesure de la rosée est délicate et sa qualité dépend de la nature de la surface qui la reçoit. Ses effets sont surtout marqués dans les sols enherbés. A côté de l'avantage qu'elle présente comme source d'eau, la rosée crée à la base des plantes et sur les feuilles, un milieu humide favorable à la germination des spores de certains champignons parasites. C'est le cas des champignons des genres *Fusarium* et *Verticillium*. Si la rosée persiste longtemps, elle peut suffire à assurer la pénétration du parasite à l'intérieur de la plante hôte.

2.4.1.4. Grêle

La grêle est la précipitation de l'eau sous forme de cristaux de glace. Du point de vue agricole, la grêle est surtout considérée pour les dégâts d'ordre mécanique qu'elle occasionne aux cultures comme : la rupture des chaumes de céréales, les lésions foliaires, les meurtrissures des fruits, etc. Les processus de formation de la grêle ainsi les systèmes de détection des nuages potentiellement dangereux restent encore controversés.

2.4.1.5. Neige

La neige est la précipitation de cristaux microscopiques d'eau. On estime qu'une couche de neige non tassée de 10 cm correspond en moyenne à 10 mm de pluie. Du point de vue agricole, en plus de l'apport d'eau, la neige joue un rôle essentiel dans les régions froides par la protection qu'elle assure aux cultures contre un refroidissement plus intense. En effet, elle permet de maintenir au niveau du sol, une température relativement plus élevée. On estime qu'une couche de 10 à 12 cm de neige donne un gain de température au sol de 7°C à 8°C.

2.4.2. Absorption d'eau par la plante

2.4.2.1. Absorption par les feuilles

Les feuilles sont capables d'absorber l'eau de pluie ou de rosée à travers l'épiderme. Les quantités d'eau ainsi absorbées sont cependant réduites. L'absorption de l'eau par les feuilles est fonction de l'existence et de la nature de la cuticule. En effet, les plantes aquatiques absorbent l'eau par n'importe quelle partie de leur organisme car les épidermes ne sont pas recouverts de cuticule.

Les feuilles des végétaux peuvent absorber le brouillard et la rosée d'autant mieux que les plantes présentant un déficit hydrique. Ceci constitue un appoint pour les plantes en climat semi-aride. L'absorption nocturne de rosée ou brouillard, les précipitations occultes, peut représenter 0,2 à 0,5 mm par nuit soit 50 à 100 mm/an, ce qui est loin d'être négligeable n climat aride.

Les végétaux épiphytes comme les orchidées puisent l'eau dans l'atmosphère. Ces plantes possèdent des dispositifs spéciaux qui facilitent l'absorption de l'eau comme les velums. Il s'agit d'un voile de cellules mortes mais tenues béantes par des épaisissements lignifiés. Ce voile recouvre des racines aériennes ou d'autres organes. Il se gorge d'eau à la moindre pluie et constitue une réserve d'eau pour ces orchidées.

La fertilisation foliaire des cultures est une application de la capacité des feuilles à absorber des solutions.

2.4.2.2. Absorption par les racines

Le système racinaire assure l'essentiel de l'absorption de l'eau de la plante. Plus le système racinaire est ramifié et abondant, plus il explore un volume de sol important et plus il est susceptible d'absorber des quantités d'eau importantes. Les poils absorbants sont les principaux responsables de l'absorption de l'eau. Ils sont constitués d'une seule cellule.

Les poils sont des cellules très allongées de 0,7 à 1 mm ayant une existence transitoire (quelques jours à semaine). Ils sont renouvelés au fur et à mesure de la croissance de la plante. La surface d'absorbance de l'appareil racinaire est multipliée d'un très grand nombre de poils absorbants. Un pied de céréale de 4 mois possède environ 2500 poils absorbants/cm² ce qui représente une surface de 400 m².

Il y a aussi une faible absorption de l'eau au niveau des zones subérimées des racines mais elle a lieu au niveau des fissures (important pour les grands arbres).

Pour des raisons de simplification, on admet que la quantité d'eau absorbée dans le sol par des plantes est égale à la quantité d'eau perdue par la transpiration. On néglige les quantités d'eau transformées ou produites par le métabolisme qui sont relativement plus faibles.

En plus de la compréhension thermodynamique du phénomène, l'absorption de l'eau du sol et des ions qu'elle contient s'explique par trois principaux mécanismes :

- o Une force qui "pousse" l'eau du sol vers les racines : l'osmose ;
- o Une force qui tire l'eau des racines vers le haut : l'attraction ou l'appel foliaire ;
- o Une force biologique : le transport actif.

Le phénomène d'osmose résulte des différences de dilution entre la solution du sol et le suc cellulaire. Une pression osmotique se crée à travers une membrane séparant la solution la moins concentrée dite hypotonique vers la solution la plus concentrée ou hypertonique. La membrane cellulaire est alors assimilée à une membrane semi-perméable. Le courant d'eau par osmose dépend de la concentration de la solution du sol. Dans les sols salés, la solution du sol risque d'être plus concentrée que le suc cellulaire des poils absorbants. Il y a donc risque d'inversion du courant d'eau des poils absorbants vers la solution du sol, avec plasmolyse suivie de la mort des cellules.

Les plantes dites "halophytes" survivent sur les sols salins grâce à leur aptitude à élever leur pression osmotique de manière à ce qu'elle soit toujours supérieure à celle du sol. Ce mécanisme de régulation s'appelle "épictèse" ou sur-absorption d'ions. Tous les végétaux ont un pouvoir d'épictèse mais celui des halophytes est particulièrement élevé.

L'aspiration vers le haut est déterminante. En effet, le passage de l'eau de la solution du sol vers les vacuoles des poils absorbants cesserait si ces derniers étaient isolés, les deux solutions étant devenues isotoniques. Si l'absorption de l'eau continue, c'est en raison de la transpiration et de l'activité cellulaire qui demandent de l'eau. Cette force d'attraction de l'eau vers le haut explique la montée de l'eau dans les tiges coupées de leurs racines.

Au-delà des mécanismes d'osmose et d'attraction par les organes aériens, le transport actif est une force biologique qui permet de choisir et d'introduire des éléments minéraux à travers la membrane cellulaire.

Sur le plan thermodynamique, l'intensité du pouvoir de rétention de l'eau par un sol se mesure par l'énergie nécessaire pour extraire l'eau de ce sol. Tout fluide tend à se déplacer de telle sorte que son potentiel énergétique diminue. Il existe une force d'attraction entre l'eau et le sol, si l'on met de l'eau en présence d'un sol sec, elle a tendance à se lier ; ceci signifie que le potentiel thermodynamique du système est plus bas à l'état lié qu'à l'état libre. Plus l'humidité du sol est élevée, plus faible est la force d'attraction des particules terreuses pour l'eau.

Un système comme le sol possède un potentiel hydrique négatif, mis en contact avec l'eau il l'attire, on appelle succion l'attraction ainsi exercée. Considérée comme une pression, la succion ou déficit de pression de diffusion (DPD) ; c'est la pression qu'il faut appliquer au sol pour en extraire la solution : c'est la tension qu'exerce le sol sur l'eau.

L'eau du sol, comme descendant d'une pente, va s'écouler des zones les plus humides vers les zones de plus faible humidité et donc, là où la force d'attraction de l'eau est plus élevée. Ainsi, le déplacement de l'eau dans le sol ou dans la plante s'effectue des zones de concentration plus élevée vers les zones de concentration plus faibles puisque le cheminement des molécules suppose la perte d'une partie de l'énergie libre. L'eau circule du sol vers la plante tant qu'une différence de potentiel se manifeste.

2.4.3. Eau dans la plante

2.4.3.1. Teneur en eau dans les plantes

La teneur en eau dans les plantes varie selon les espèces, les organes et les stades végétatifs. On peut passer de moins de 10% d'eau dans les graines à plus de 80% dans les feuilles. La teneur en eau varie aussi en fonction des conditions du milieu. Par exemple, à 35% d'humidité relative de l'air, les graines de laitue ne dosent que 4 à 6% d'eau. Ce taux passe à 10% et même 20% si l'humidité de l'air atteint 75%.

2.4.3.2. Etats de l'eau dans la plante

Une fois absorbée, l'eau se trouve dans la plante essentiellement sous la forme liquide. C'est le cas dans les cellules (cytoplasme et vacuoles) et dans les vaisseaux. L'eau se trouve également sous forme de vapeur en équilibre avec la phase liquide ; c'est principalement le cas dans les chambres sous-stomatiques, les méats intercellulaires et les lacunes aérifères des végétaux aquatiques.

2.4.3.3. Transit de l'eau et ses mécanismes

Dans la racine, l'eau entrée par les poils absorbants gagne les vaisseaux à travers trois voies : par l'apoplasme (ensemble des parois, des lacunes et des méats), par le symplasme (ensemble des cytoplasmes qui communiquent les uns avec les autres par des plasmodesmes) ou de vacuole à vacuole (à travers leurs membranes et leur suc vacuolaire).

Dans la tige, la montée de l'eau (sève brute) s'explique par trois mécanismes : la moussée radiculaire (résultant de l'osmose et du transport actif au niveau des racines), la transpiration (résultant de l'appel foliaire) et le transport actif.

La sève brute (solution très diluée de 0,1 à 2g/l de sels minéraux et de quelques composés organiques) circule à raison de 1 à 6 m à l'heure dans les vaisseaux du xylème. Cette vitesse peut atteindre 100 m/heure quand la transpiration est maximale et devenir quasi nulle en atmosphère saturée d'eau ou à l'obscurité.

La sève élaborée est beaucoup plus concentrée que la sève brute du fait des glucides synthétisés dans les feuilles qu'elle renferme. En plus des glucides, la sève élaborée contient des amino acides, des amides et des hormones. Par contre, elle est moins riche en minéraux sauf le K. La sève élaborée circule dans les tubes criblés du phloème à la vitesse de 10 à 100 cm/h, donc beaucoup moins vite que la sève brute. Il s'agit d'un transport de type actif qui met en jeu les pompes membranaires des cellules criblées et de leurs cellules compagnes. L'une des théories explicatives de la circulation de la sève élaborée est la théorie "des sources" et des "puits". La source correspond aux feuilles dont la concentration en sucres photosynthétiques est élevée et les "puits" correspondent à toutes les demandes en sève élaborée : bourgeons, graines, racines, tubercules, tiges.

2.4.3.4. Méthodes de dosage de l'eau

Le dosage de l'eau peut être effectué par dessiccation du matériel végétal. Elle est réalisée à température élevée (70 à 100°C) sous vide jusqu'à ce que la matière végétale une masse constante. La quantité d'eau contenue dans la plante ou l'organe est obtenue en faisant la différence de masse entre la matière fraîche et la matière sèche.

L'une des méthodes de dosage direct est basée sur l'entraînement de l'eau par chauffage dans du xylène. Le mélange d'eau et de xylène s'évapore et est ensuite condensé dans une burette graduée. Comme à l'état liquide eau et xylène ne sont pas miscibles on lit directement la quantité d'eau sur la burette. On peut aussi utiliser le toluène mais ce dernier dilue les lipides, ce qui fausse les résultats.

Les méthodes directes de détermination de l'eau sont d'un usage plutôt rare. Cependant, elles peuvent être nécessaires si dans les échantillons, le taux des substances volatiles est trop important pour être négligé. Par extraction de l'eau à partir de la matière végétale broyée avec des bains de xylème.

Par cryodéssiccation ou lyophilisation, un fragment de plante est congelé en présence d'azote liquide ; si on fait le vide, on aspire toute l'eau.

Les méthodes pondérales de dosage de l'eau sont les plus courantes. Le principal défaut des méthodes pondérales est qu'elles ne tiennent pas compte des erreurs possibles dues au départ des substances volatiles et à des réactions d'oxydation qui peuvent altérer le résidu sec.

La teneur en eau d'un végétal peut varier selon l'âge, l'organe, selon le type de plante considéré. La teneur en eau la moins importante se trouve dans les feuilles et les tiges. Elle est beaucoup plus faible dans les racines. Les graines sont des organes déshydratés, riches en réserves qui permettent aux plantes de passer la mauvaise saison. Ainsi, la teneur en eau peut varier de plus de 90 % dans les organes jeunes jusqu'à moins de 10 % dans certaines semences.

La teneur en eau peut être exprimée soit par rapport à la matière fraîche (MF), soit par rapport à la matière sèche (MS). Le calcul par rapport à la MS est plus intéressant car il reflète bien ce qui se passe au niveau des mouvements d'eau, la MF est très fluctuante.

2.4.4. Fonctions de l'eau

L'eau est un facteur important de la production végétale. C'est un constituant de la matière vivante qui joue des rôles spécifiques aux niveaux cellulaire et de la plante. D'autre part, elle permet à la plante de véhiculer à partir du sol, les sels minéraux indispensables à sa croissance et à son développement.

2.4.4.1. Fonctions de l'eau au niveau cellulaire

Les principales fonctions de l'eau au niveau cellulaire sont les suivantes :

- l'eau constitue la phase dispersante du milieu cellulaire par la formation de solutions, d'émulsions ou de suspensions ; en d'autres termes, c'est le milieu de dissolution des ions et des solutés ;
- l'eau est le milieu des réactions chimiques de la cellule ; en son absence ou lorsqu'elle est en très faible teneur comme dans les graines, les substances susceptibles de réagir entre elles ne le font pas ;
- l'eau est un métabolite qui participe aux réactions biochimiques de la cellule, par exemple à travers les réactions d'hydrolyse ou lors de la photosynthèse ;

- l'eau participe au maintien de la structure des macromolécules (acides nucléiques, protéines structurales du cytoplasme et des membranes) ;
- l'eau participe à l'allongement cellulaire.

2.4.4.2. Fonctions de l'eau dans la plante

Les principales fonctions de l'eau au niveau de la plante sont les suivantes :

- l'eau est la base de l'alimentation de la plante ; elle véhicule les éléments minéraux puisés dans la solution du sol ainsi que les substances élaborées ;
- l'eau joue un rôle mécanique important en assurant le port érigé des plantes herbacées par la pression de turgescence, sans elle, les plantes flétrissent ;
- l'eau permet les mouvements d'organes des feuilles et étamines ou de cellules comme les stomates ;
- l'eau assure une certaine régulation thermique grâce à l'évaporation au niveau des feuilles. Les propriétés de l'eau que sont la chaleur de vaporisation (élevée) et la chaleur spécifique (également élevée) contribuent à éviter de grands changements de température.

- o La chaleur de vaporisation de l'eau est de 540 cal/g d'eau à 100°C. L'utilisation de calories ambiantes pour l'évaporation de l'eau contribue au refroidissement de la plante.
- o La chaleur spécifique de l'eau est aussi élevée. En effet, pour élever la température d'un gramme d'eau de 1°C, il faut une (1) calorie - gramme.

Ainsi, l'évaporation de l'eau à la surface des feuilles contribue à éviter des changements de température trop rapides.

2.4.5. Besoins en eau de la plante

2.4.5.1. Besoins globaux de la plante en eau

La plante a besoin de quantités d'eau importantes pour former ses tissus. En effet, l'eau et l'état d'hydratation des tissus végétaux interviennent pour commander la production de matière sèche. L'activité physiologique est maximale à l'état de saturation. Il n'y a donc jamais d'excès d'eau dans la plante mais l'eau extérieure est parfois nuisible pour des raisons indirectes (asphyxie et développement des maladies).

Au niveau des feuilles, l'état d'hydratation normal correspond à une teneur en eau de 70 à 90%. On constate qu'en dessous d'un certain taux d'hydratation toute activité de synthèse cesse alors qu'augmentent la respiration et les phénomènes de catabolisme. Ainsi, si le flétrissement de la plante

est léger, il est réversible par simple mise en atmosphère humide. Plus poussé il persiste même en atmosphère saturée d'eau, on le dit permanent. Plus poussé encore il devient irréversible même par irrigation. Ce déficit est atteint par le haricot lorsqu'il y a 30% de perte d'eau et le flétrissement est alors irréversible. La même situation est observée chez le maïs après 40% de perte d'eau.

Certains organes ou organismes peuvent vivre avec une teneur en eau très faible on parle d'anhydrobiose. Les tissus sont en vie latente (vie ralentie). Les échanges nutritifs sont nuls, la croissance et la synthèse sont arrêtés, la respiration est insignifiante, l'activité métabolique est réduite au minimum. Le retour à un métabolisme normal nécessite obligatoirement la ré imbibition des tissus.

Les végétaux reviviscents sont des végétaux qui peuvent résister à de très grandes sécheresses en passant à un état de vie latente. Ils semblent morts mais capables de se ré imbiber en milieu humide et de reprendre une vie active, il existe un minimum biologique en dessous duquel les structures cellulaires vont être détruites et l'arrêt deviendra irréversible.

Par ailleurs, la fermeture des stomates, commanditée indirectement par la perte de turgescence des tissus végétaux, règle les échanges gazeux avec l'extérieur. Lorsque les fentes stomatiques sont fermées, le gaz carbonique ne peut plus pénétrer et la photosynthèse est arrêtée. Il existe donc une relation étroite entre l'ouverture des stomates et la photosynthèse et d'une manière plus générale entre le déficit hydrique et la photosynthèse.

Le coefficient de transpiration ou coefficient transpiratoire (T/M.S. ou Poids d'eau transpirée/poids de Matière Sèche formée), indique la quantité d'eau nécessaire pour former une unité de matière sèche.

Par exemple, pour former 1 kg de matière sèche il faut :

- 275 à 589 litres d'eau pour le maïs ;
- 485 à 1118 litres d'eau pour le pois.

En général on estime que la quantité d'eau nécessaire à l'élaboration de l'unité de matière sèche (MS) est en moyenne de 300 g d'eau pour 1 g de M.S. En fait, cette énorme masse d'eau ne fait que circuler à l'intérieur de la plante d'où elle s'échappe par transpiration. On estime à 1,5 % en moyenne la proportion d'eau qui reste dans le végétal et entre dans la constitution des cellules nouvelles ou prend part aux synthèses biochimiques.

Le coefficient de transpiration marque l'efficience de la transpiration. Cette relation n'exprime pas une causalité directe, mais une simple correspondance. Le coefficient de transpiration varie à l'échelle

journalière et à l'échelle de l'ensemble de la période végétative. Les conditions climatiques et la latitude exercent une forte influence sur l'efficacité de la transpiration. Ce coefficient traduit en fait les conditions climatiques qui ont prévalu pendant le développement.

Si la plante se trouve en conditions relativement favorables et peut fonctionner pendant un nombre d'heures élevé avec ses stomates ouverts, la consommation d'eau sera relativement très petite en regard de la production de matière sèche. Si par contre les conditions climatiques se révèlent mal adaptées (température trop élevée, ensoleillement trop intense, etc.), le végétal se mettra en vie ralentie en fermant ses stomates ce qui va diminuer l'efficacité de la transpiration puisque la photosynthèse chute beaucoup plus que le débit de l'eau. On comprend dès lors que pour le même végétal, cultivé selon les mêmes techniques, le coefficient transpiratoire changera selon que l'année sera « sèche » ou « humide ».

L'élévation de température peut accroître ou diminuer l'efficacité de la transpiration selon qu'on s'adresse à des plantes de climat froid ou à des plantes types de climat chaud. Ainsi, le coefficient transpiratoire n'offre pas un moyen pour apprécier les besoins en eau de la plante cultivée mais aide plutôt à rechercher les conditions optimales de production, l'eau étant le facteur le plus souvent limitant.

2.4.5.2. Périodes critiques

Les cultures réagissent plus ou moins à un déficit hydrique suivant leur phase de croissance ou de développement. En général, pendant les périodes de faible croissance, les végétaux paraissent moins exigeants ; par contre, il existe des phases végétatives pendant lesquelles une insuffisance de l'alimentation en eau entraîne une baisse de rendement spectaculaire et irréversible. Ce sont les périodes critiques.

Pendant les périodes critiques, les besoins en eau ne sont pas nécessairement accrus, mais la sensibilité des plantes à la sécheresse (ou au déficit hydrique) est à son maximum.

- *La phase germination-levée peut être considérée comme critique pour toutes les plantes ;*
- *Pour le maïs on l'estime entre 10 jours avant la floraison mâle et 20 jours après la floraison femelle ;*
- *Pour la pomme de terre, la tubérisation est une période critique.*

Les baisses de rendement résultant de sécheresses pendant la phase de sensibilité sont en relation avec les possibilités d'accumulation de matière sèche dans l'organe considéré pendant cette période.

Ceci montre l'intérêt de l'irrigation pendant les périodes critiques lorsque les réserves d'eau du sol sont limitées.

2.4.6. Facteurs déterminant la quantité d'eau dans la plante

2.4.6.1. Facteurs externes

Rayonnement

Entre 40 et 45% de l'énergie reçue sous forme de rayonnement est utilisée principalement pour la transpiration (la photosynthèse n'en prélève qu'environ 1%). Le maximum de perte d'eau a lieu quand le rayonnement est à son maximum, lorsque le soleil est au zénith.

Déficit de saturation de l'air

Le déficit de saturation de l'air correspond à la différence entre la tension maximum de la vapeur d'eau de l'air et la tension réelle (tension maximum de la vapeur d'eau à la température du point de rosée). Cette dernière varie peu au cours de la journée. C'est essentiellement la tension maximum qui va changer en fonction de la température de l'air. Le déficit de saturation varie également selon le degré d'aridité de la région.

Température

La température joue un rôle essentiel dans le déficit de saturation de l'air. Plus la température est élevée, plus l'air peut absorber l'humidité.

Vitesse du vent

Le vent intervient à grande échelle comme facteur d'homogénéisation assurant le transfert de la chaleur et de la vapeur d'eau. Les variations de vitesse du vent, importantes dans le temps et dans l'espace ne dépendent pas pratiquement du rayonnement.

2.4.6.2. Facteurs internes

Déficit de pression de diffusion (DPD)

Le déficit de pression de diffusion exercé par les tissus végétaux influence la perte d'eau par transpiration puisque c'est la différence entre la pression partielle de l'eau dans l'air (suction de l'air) et la pression partielle de l'eau dans la feuille qui conditionne physiquement le départ de l'eau (transpiration). En fait, les DPD de la feuille sont modestes voire secondaires par rapport aux valeurs énormes de la suction exercée par l'air dès que celui-ci est un peu desséché. Par contre, le déficit hydrique de la feuille joue un rôle fondamental par l'intermédiaire de la régulation stomatique.

Régulation stomatique

Dès que la demande ponctuelle en eau devient trop importante, la plante limite sa transpiration en fermant ses stomates, ce qui finit par réduire la déperdition d'eau à la seule voie cuticulaire. L'ouverture des stomates est liée à des variations de turgescence des cellules stomatiques. Pour que les stomates s'ouvrent, il faut que la pression de turgescence des cellules stomatiques soit accrue. A l'inverse, la réduction de cette pression interne provoque la fermeture de l'ostiole. Les variations de turgescence sont commandées par deux facteurs : les mouvements de l'eau et la lumière.

En ce qui concerne les mouvements de l'eau, on observe que dans le cas d'une sécheresse légère, le départ de l'eau intéresse d'abord les cellules épidermiques dont la cuticule est plus mince. Les cellules stomatiques moins comprimées par leurs voisines peuvent s'incurver. La fente stomatique s'arrondit et découvre l'ostiole (mouvement hydro passif). Par contre une sécheresse plus accentuée atteint aussi les cellules stomatiques ; la baisse de turgescence qui en résulte entraîne la fermeture de l'ostiole. Du fait que les cellules stomatiques sont directement intéressées on dit que le mouvement est hydro actif.

Le mécanisme d'action de la lumière est décrit de la manière suivante :

- la lumière déclenche la photosynthèse et l'assimilation de l'O₂ ;
- Il en résulte une baisse de tension en CO₂ dans les chambres sous stomatiques qui communiquent mal avec l'extérieur et une hausse de pH des diverses cellules ;
- l'alcalinisation du milieu entraîne dans les cellules stomatiques, particulièrement riches en amidon et en phosphorylases, une décomposition de l'amidon. Il ne s'agit pas de l'hydrolyse habituelle mais d'une phosphorolyse favorisant les réactions du type :



Les cellules stomatiques deviennent, à la suite de ces décompositions, hypertoniques, attirent l'eau et se gonflent, découvrant l'ostiole.

Toutefois, ce processus n'explique pas toutes les particularités de régulation stomatique observées sur les diverses espèces. Plusieurs auteurs pensent que l'ouverture des stomates résulte d'un grand nombre de processus et l'intervention de mécanismes exigeant une dépense d'énergie.

2.5. VENT

Le vent constitue un facteur important du climat agricole en particulier dans les régions où règnent des vents réguliers et violents. *Par exemple, l'harmattan dans le grand - Nord.* La vitesse du vent est mesurée par des anémomètres et sa direction est donnée par une girouette. Les modalités d'action du vent peuvent être d'ordre physique, mécanique ou biologique.

2.5.1. Action physique du vent

2.5.1.1. Renouvellement des masses d'air

Le vent est l'agent essentiel du renouvellement des masses d'air qui entourent les plantes. Ce renouvellement est considéré comme l'un des facteurs les plus importants de l'environnement du couvert végétal, car il affecte directement la température, l'humidité et la concentration de CO₂ à l'intérieur de ce dernier.

2.5.1.2. Influence du vent sur l'évapotranspiration

La vitesse du vent a un effet marqué sur l'évapotranspiration. Quand la vitesse du vent s'accroît, il augmente l'intensité de l'évapotranspiration. Si l'approvisionnement en eau des plantes est insuffisant (cas d'une sécheresse) on peut assister à la dessiccation plus ou moins complète du feuillage.

2.5.2. Action mécanique

2.5.2.1. Rupture d'organes

Les vents violents ont une action de rupture. On peut citer : la verse des céréales, la chute ou la déchirure des feuilles, etc.

2.5.2.2. Transport des particules

Le transport des particules dû au vent résulte de leur arrachage sur les sites de prélèvement. Il s'en suit une accumulation sur les sites de dépôt.

2.5.2.3. Erosion éolienne

L'érosion éolienne est l'action de destruction des roches et des reliefs par le vent. L'action du vent est surtout sensible dans les régions où les sols et les roches ne sont pas protégés par un couvert végétal. Le vent a deux méthodes pour éroder : il transporte (c'est la déflation) les éléments fins provenant des roches après qu'elles aient été attaquées par la désagrégation mécanique. La déflation entraîne le départ en suspension des particules légères du sol (argiles, limons et matières organiques). Ces poussières sont aspirées par les tourbillons jusqu'à plusieurs milliers de mètres d'altitude pour être ensuite dispersées sous forme de brume sèche ou pour circuler sous forme de nuage sur une distance pouvant atteindre plusieurs milliers de kilomètres. La seconde action est celle de la corrasion, c'est-à-dire l'attaque des roches en raison de leur mitraillage par les éléments solides transportés par le vent (en particulier les sables formés de quartz dur). Lorsque la vitesse du vent ne permet plus le transport des éléments fins ceux-ci tombent au sol où ils s'accumulent.

Le facteur déterminant dans la manifestation de l'érosion éolienne est particulièrement l'intensité érosive de la force du vent. Dans le cas de l'érosion éolienne, le vent est une force qui agit sur la surface du sol. L'effet de ce vent sur la surface dépend des caractéristiques et de l'état du sol dans la couche superficielle. La vitesse éolienne requise pour engendrer le mouvement des particules les plus sensibles est fonction de la taille et de la densité des particules détachables. Des études ont démontré que la vitesse du vent devrait être de 15 km/h à la hauteur de 30 cm au-dessus du sol pour pouvoir déloger des particules du sol d'environ 0,1 mm de diamètre.

Sur une surface égale, les particules émergent à une hauteur suffisante pour absorber une force assez appréciable, mais leur légèreté permet au vent de les déplacer plus facilement. Par ailleurs, les particules les plus petites présentent une forte cohésion et n'émergent pratiquement pas dans la zone de turbulence. Dans les parcelles qui présentent un mélange de particules de diverses dimensions, la limite pratique se situe aux alentours de 20 km/h ou de 6 m/s à la même. C'est ce qu'on appelle couramment un vent efficace. Les particules de grandes dimensions (supérieures à 1 mm de diamètre) sont assez lourdes à déplacer par rapport à leur hauteur d'émergence. Leur déplacement ne peut s'effectuer qu'avec des vents très forts.

2.5.3. Action biologique

2.5.3.1. Transport des matériaux vivants défavorables

L'action biologique du vent est surtout la résultante des phénomènes de transport s'appliquant à des matériaux vivants : semences, pollen, insectes etc. Du point de vue agricole, les conséquences peuvent être favorables ou néfastes.

Quelques exemples d'actions défavorables du vent concernent :

- le transport des semences des plantes adventices ;
- l'accélération de l'aire d'extension de certains parasites ;
- le transport de pollen préjudiciable à la production semencière d'espèces à fécondation croisée.

2.5.3.2. Transport des matériaux vivants favorables

Quelques exemples d'actions favorables du vent concernent :

- le transport de pollen pour les plantes à fécondation croisée ;
- la limitation de la pollution des pucerons, vecteurs de certaines maladies à virus (vents de plus de 6 km/h).

2.6. ACTION CUMULATIVE DES FACTEURS DU CLIMAT

2.6.1. Climat agricole

Les différents éléments du climat (température, pluie, lumière et vent) agissent simultanément sur les végétaux. Leur action combinée définit le climat agricole. Une connaissance aussi complète que possible des données climatiques détermine, avec celles relatives au sol, la vocation agricole d'une région à savoir, son aptitude à recevoir certains types de plantes ou d'y pratiquer des systèmes de culture particuliers.

Le climat exerce de nombreuses actions qui intéressent directement l'agriculture en particulier dans les domaines du choix des cultures, de la fluctuation des rendements ou de l'exécution des travaux agricoles.

2.6.2. Climat et fluctuation des rendements

Le climat intervient directement sur la croissance et le développement de la plante. Pour une culture évoluant dans un milieu donné et recevant des techniques culturales appropriées, les rendements varient d'une année à l'autre. Ces fluctuations de rendements dépendent de plusieurs facteurs dont les conditions climatiques.

Les principales conditions climatiques responsables des fluctuations des rendements sont :

- la variation des précipitations et leur répartition ;
- les températures aux différents stades du cycle de développement des plantes ;
- les variations de l'ensoleillement, etc.

De bonnes techniques culturales (préparation du sol, fumure, semis, entretien) permettent d'atténuer les fluctuations de rendement mais, elles ne les suppriment pas totalement.

Pour une année donnée, le climat n'intervient pas dans le même sens pour toutes les cultures. L'année peut être favorable au maïs et défavorable au sorgho. Ceci est un bel argument contre la monoculture.

Le climat agit sur la quantité et la qualité.

Par exemple, le poids spécifique des céréales et la teneur en sucre du maïs doux dépendent en partie, des conditions de maturation.

2.6.3. Climat et exécution des travaux

Il existe une influence directe du climat sur l'exécution des travaux. En agriculture mécanisée, un sol argileux sec n'est pas prêt pour le labour ; par contre, une pluviométrie abondante empêche la réalisation du labour.

A partir de ces constatations on a développé la notion de jours disponibles pour les différents travaux. Le principe de leur détermination consiste à noter pour un travail donné :

- la date possible pour de début du travail (en liaison avec l'arrivée des pluies par exemple) ;
- la date au-delà de laquelle le travail n'est plus réalisable (en liaison avec les risques de sécheresse et les exigences climatiques de la plante)
- entre ces deux dates, le pourcentage de temps effectivement disponible pour le travail considéré.

Par exemple dans la région de Maroua, il n'est pas recommandé de mettre en place des pépinières d'oignon après le mois de novembre.

Les observations doivent être réalisées sur plusieurs années afin de pouvoir tirer des enseignements utilisables. Dans la connaissance du climat local, l'expérience de l'agriculteur qui, chaque jour, pendant de nombreuses années, observe les manifestations atmosphériques, peut jouer un grand rôle. Cependant, l'utilisation des moyens modernes d'enregistrement des données et leur analyse permettent d'obtenir des caractéristiques chiffrées qui définissent mieux le climat. L'agrométéorologie ou climatologie agricole réalise actuellement des progrès considérables.

L'agrométéorologie fait l'objet d'un cours particulier.

Chapitre III : COMPOSANTE EDAPHIQUE (SOL)

3.1. DEFINITIONS ET CARACTERISATION DE CONCEPTS

3.1.1. Sol

Selon la conception pédologique, le sol est la formation naturelle de surface à structure meuble et d'épaisseur variable, résultant de la transformation de la roche-mère sous-jacente sous l'influence de divers processus physiques, chimiques et biologiques. Le sol constitue l'interface entre la lithosphère et l'atmosphère. Il est le lien entre l'inorganique et le vivant.

Avec le climat, le sol constitue le milieu dans lequel la plante se développe. En milieu naturel, c'est la base de toute production agricole. Le sol constitue pour la plante un support, un réservoir d'eau et d'éléments nutritifs. De nombreux cours relatifs à l'étude des sols sont au programme. Dans le cours d'Agronomie Générale, il est surtout question d'introduire des notions et des processus qui seront approfondis subséquemment dans les cours spécialisés.

L'un des objectifs de l'agriculture est de maintenir ou d'accroître la fertilité naturelle du sol. Le producteur connaissant bien son sol pourra maintenir ses qualités et en atténuer les défauts.

3.1.2. Sol agricole

Le sol agricole est la partie de la couche superficielle de l'écorce terrestre qui, grâce à sa structure meuble et à sa composition physico-chimique et biologique est susceptible d'assurer un développement normal des végétaux cultivés.

3.1.3. Terre

La terre est le matériau qui constitue le sol. Elle se caractérise par sa composition granulométrique, sa nature et ses propriétés. Une terre est dite végétale lorsqu'elle est propice à la végétation.

Le concept de "terre" définit une surface spécifique de l'écorce terrestre. Ses caractéristiques incluent tous les attributs au-dessous et au-dessus de cette aire sur le plan vertical. Elles intègrent les éléments de l'atmosphère, du sol et de la géologie, la topographie, l'hydrologie, la population animale et végétale, ainsi que les activités passées et présentes de l'homme. Ces activités exercent une influence significative sur la terre.

L'expression "terre" englobe donc tous les aspects de l'environnement physique à savoir le climat, le relief, les sols, l'hydrologie et la végétation, dans la mesure où ils influent sur le potentiel d'utilisation de la terre. Les caractéristiques socio-économiques ne sont pas comprises dans le concept de terre, mais font partie du contexte dans lequel se réalise une évaluation.

3.1.4. Terrain

Un terrain est une portion de surface terrestre caractérisée par son relief, la nature des matériaux et ses propriétés. On dit par exemple d'un terrain qu'il est en pente, argileux, perméable, etc.

3.1.5. Fertilité naturelle du sol

La fertilité naturelle du sol est son aptitude à fournir des récoltes valables au point de vue quantitatif et qualitatif, sans qu'il y ait eu fertilisation ou amendement.

3.1.6. Pédologie

La pédologie est la science qui vise une connaissance approfondie des sols, leur formation, leur évolution et leur répartition géographique.

3.1.7. Agrologie

L'agrologie est la science appliquée qui vise une connaissance suffisante du sol et les bases de son utilisation en vue de la production végétale. L'agrologie vise donc à mieux connaître le sol pour mieux l'utiliser.

3.2. FORMATION DU SOL

3.2.1. Formation d'un sol (pédogenèse)

Le sol résulte de la transformation des roches mères sous-jacentes ou des matériaux de surface (dégâts marins, éoliens) par des agents physiques, géochimiques et biologiques. Les roches sont d'abord altérées physiquement pour former le matériel originel. Ce dernier se transforme et s'altère biochimiquement et géochimiquement, s'enrichit de matière organique et se différencie en couches ou en horizons.

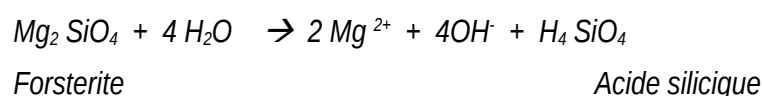
3.2.1.1. Décomposition de la roche mère

La décomposition de la roche mère aboutit à la formation de la partie minérale du sol. Elle comporte une désagrégation physique et une altération chimique. *La désagrégation physique* a lieu sous l'influence des variations de température et d'humidité, de l'érosion éolienne et hydrique, et du relief. La roche se fissure, se brise ou se fragmente pour former le matériel originel puis, en éléments de plus en plus fins : cailloux, graviers, sables, limons.

L'altération chimique est la résultante de nombreuses réactions chimiques (hydrolyses, oxydations, carbonatations, dissolutions, etc.). Elles provoquent l'altération des minéraux de la roche mère pour aboutir à l'apparition de composés divers essentiels : argile, silice, oxydes de fer et d'alumine qui participent à la formation du sol.

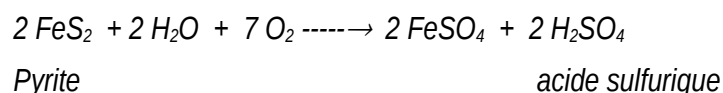
- *L'hydrolyse* comprend toutes les réactions qui se produisent en présence d'eau. Elle a pour rôle premier de libérer les éléments contenus des cristaux, dans la solution de sol.

Par exemple l'hydrolyse du silicate magnésien (forstérite) s'effectue selon la réaction :



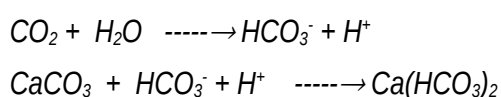
- *L'oxydation* est généralement le premier changement observable. Elle se manifeste surtout dans les roches qui contiennent du fer [minéraux ferromagnésiens (pyroxène, amphibole) et sulfure de fer (pyrite)]. Elle entraîne la dissociation des cristaux

Un exemple d'oxydation est donné par l'oxydation de la pyrite dans les sols sulfatés acides avec formation d'acide sulfurique.



- *La carbonatation* est la formation de carbonates. Très répandu dans l'atmosphère, le CO₂ se dissout facilement dans l'eau, la rendant plus acide et capable d'attaquer les roches solubles.

Par exemple, la dissolution du calcaire



Les *migrations ascendantes* ou *remontées "compensatrices"* correspondent à des remontées d'éléments de la profondeur vers la surface liées à une forte évaporation ou aux êtres vivants du sol. Une forte évaporation favorise la remontée de l'eau par capillarité. Les animaux telluriques comme les vers de terre puisent en profondeur certains éléments qu'ils restituent à la surface dans leurs excréments.

Les migrations de substances différencient des couches superposées de composition différente à l'intérieur du sol. Ces couches sont appelées horizons et elles définissent le profil pédologique.

3.2.2. Agents de formation du sol

La transformation des constituants du sol est conditionnée par de nombreux facteurs dont : le type de roche, le climat, le relief, la végétation, les agents biologiques, l'action anthropique et le temps. Du fait de nombreuses variations dans l'influence de ces facteurs, la formation des sols aboutit à une grande variété de sols.

3.2.2.1. Roche - mère

Les caractéristiques de la roche mère influencent l'évolution du sol surtout chez un sol jeune. Les roches présentent des caractéristiques variées selon leur nature (silicatées ou non) et leur origine (volcanique ou magmatique comme le basalte et le granite ; métamorphique comme schiste et gneiss ; sédimentaire comme calcaire et grès). Les différences portent sur:

- la composition chimique (exemple : roche calcaire vs roche siliceuse) ;
- la perméabilité (exemple, les sables alluviaux sont très perméables) ;
- la dureté (exemple : le granite est dur par rapport aux roches calcaires).

3.2.2.2. Climat

L'action du climat sur la formation des sols est prépondérante car la température et l'humidité sont les éléments essentiels de l'évolution des sols. La superposition de la carte climatique et de la carte pédologique d'une région permet de comprendre l'influence directe du climat sur les sols. La relation est particulièrement évidente pour le continent africain.

3.2.2.3. Végétation

La végétation intervient sur la formation du sol de différentes manières :

- par la production d'humus : selon le type de végétation, les caractéristiques de l'humus seront variables. *Par exemple, les conifères donnent un humus acide et les feuillus un humus doux ;*
- par l'enracinement plus ou moins profond qui facilitera les migrations d'éléments ;
- par la création d'un microclimat protégeant le sol des agents climatiques.

3.2.2.4. Autres agents biologiques

Les principaux agents biologiques qui ont une influence sur la formation des sols sont : les vers de terre, les insectes, les champignons et les bactéries.

L'action des principaux agents biologiques est présentée en détail dans le cours traitant de la biologie et la microbiologie des sols.

3.2.2.5. Relief

La pédogenèse présentera des aspects particuliers selon que le sol est convexe ou concave. En fait, le relief intervient surtout dans le phénomène d'érosion.

Par exemple, une pente favorise l'entraînement des éléments vers les parties basses; ceci aboutit à la formation d'une séquence ou d'une chaîne de sols ;

3.2.2.6. Action anthropique

Les interventions de l'homme sur le milieu influencent les processus de formation et de dégradation des sols. L'action de l'homme peut être :

- *indirecte* : c'est le cas lorsqu'il modifie la végétation naturelle (déforestation) ;
- *directe* : c'est le cas dans les sols cultivés.

3.2.2.7. Temps

Le facteur temps est important dans la pédogenèse. Le processus de formation des sols est continu et le temps nécessaire pour que les autres facteurs interviennent constitue en lui-même un facteur important.

En dehors des sols cultivés qui peuvent évoluer très rapidement sous l'influence des facteurs agronomiques, l'évolution d'un sol s'apprécie à l'échelle du siècle. En effet, sur le plan global, on a estimé qu'il faut en moyenne 178 ans pour former 1 cm de sol. Au USA (Wiscousin), il a fallu plus de 8 000 ans pour former un sol profond d'un mètre alors qu'en Afrique tropicale on estime à 75 000 ans le temps nécessaire pour former un sol profond d'un mètre. C'est vu sous cet angle que le sol est parfois considéré comme une ressource naturelle non renouvelable.

Cependant, l'âge d'un sol n'est pas généralement apprécié en nombre d'années mais plutôt par son niveau de développement (*sol jeune vs sol évolué*). On fait aussi référence aux facteurs susceptibles d'accélérer ou de retarder sa formation.

Les facteurs susceptibles d'accélérer le processus de formation des sols sont :

- un matériau parental perméable ;
- un climat chaud et humide ;
- la végétation forestière ;
- une position élevée ;
- un bon drainage.

Par contre, les éléments susceptibles de ralentir le processus de formation des sols sont :

- un matériau parental imperméable ;
- un climat froid ou sec ;
- un faible couvert végétal ;
- une pente raide.

3.2.3. Appréciation de l'évolution d'un sol

3.2.3.1. Profil pédologique

L'état d'évolution d'un sol peut s'apprécier par l'examen du profil pédologique. Le profil pédologique est la coupe verticale d'un sol de la surface à la roche mère. Elle met en évidence les différentes couches de sol ou *horizons* qui diffèrent par la couleur, la taille des constituants, leur disposition, etc.

3.2.3.2. Horizons des sols

Pour un sol évolué, on distingue trois principaux horizons dans les sols :

- *l'horizon A* : horizon de surface, organominéral, qui peut être appauvri suite au lessivage d'éléments ;
- *l'horizon B* : horizon d'accumulation où se déposent les éléments enlevés à l'horizon de surface A ;
- *l'horizon C* : roche mère.

Les sols jeunes sont de type AC. Il n'y a pas encore eu développement d'un horizon d'accumulation.

Chaque horizon peut être subdivisé lorsqu'il existe des nuances assez marquées. S'agissant de l'horizon A, on pourrait identifier des horizons A₀, A₁, ou A₂. A₀ indiquerait alors la présence d'une couche de litière végétale non décomposée.

3.2.4. Fonctions du sol

Le sol a de multiples fonctions. Il est recommandé de tenir compte de l'ensemble des fonctions des sols pour assurer la durabilité des sols concernés. Le blocage d'une des fonctions est souvent à l'origine de la dégradation des sols.

3.2.4.1. Fonction de support pour les êtres vivants

3.2.4.2. Lieu de développement des végétaux

3.2.4.3. Réserve organique et minérale

3.2.4.4. Régulateur des échanges dans l'écosystème

3.2.4.5. Élément du paysage

3.2.4.6. Lieu de développement des activités agro – sylvo - pastorales

3.2.5. Classification des sols

La classification des sols permet de reconnaître et de regrouper les grands types de sols. Plusieurs systèmes de classification des sols sont disponibles. La classification des sols, quelque soit le système, est basée sur le degré d'évolution et la différenciation du profil. Des nuances peuvent tenir compte de la

nature de l'altération, de la nature et l'action de la matière organique ou de la dominance de certains processus physico-chimiques comme l'hydromorphie, la salinité, etc. dans la classification française.

Un cours sur la classification des sols est disponible.

3.2.5.1. Classification des sols de la FAO

Voir Cours sur la classification des sols

3.2.5.2. Classification des sols américaine

Voir Cours sur la classification des sols

3.2.5.3. Classification des sols française

Voir Cours sur la classification des sols

3.2.5.4. Classification des sols belge

Voir Cours sur la classification des sols

3.4. PHYSIQUE DU SOL

La physique du sol fait l'objet d'un cours spécifique. Cette section présente les constituants du sol et fait une esquisse de leur relation avec la fertilité des sols agricoles.

3.3.1. Constituants du sol

Le sol est un milieu hétérogène qui comporte trois phases :

- une phase solide composée par un mélange de matières organiques et de matières minérales
- ;
- une phase liquide représentée par l'eau plus ou moins chargée de substances dissoutes;
- une phase gazeuse ou atmosphère du sol.

3.3.1.1. Matières minérales du sol - Notion de texture

La matière minérale résultant de la dégradation de la roche mère est constituée d'éléments que l'on peut distinguer principalement par leur nature minéralogique (calcaire, siliceuse) ou par leur taille. La

distinction des dimensions des constituants ou granulométrie est la plus importante ; c'est surtout la taille qui conditionne les propriétés des éléments minéraux du sol.

Les fractions granulométriques sont définies de façon suivante :

- les particules de taille supérieure à 2 mm déterminent les éléments grossiers ;
- les particules inférieures à 2 mm caractérisent la terre fine. La terre fine est celle qui passe au travers d'un tamis à trous ronds de 2 mm de diamètre.

La composition granulométrique de la fraction de terre fine qui indique les proportions relatives de sable, de limon et d'argile, caractérise la texture du sol concerné. La texture représente l'ensemble des propriétés qui résulte de la taille des constituants du sol. Les principaux constituants minéraux du sol sont :

- les particules de diamètre inférieur à 0,002 mm ($2\ \mu\text{m}$) ou argiles ;
- les particules de diamètre compris entre 0,002 mm et 0,02 mm ($2\ \mu\text{m}$ et $20\ \mu\text{m}$) ou limons fins;
- les particules de diamètre compris entre 0,02 mm et 0,05 mm ($20\ \mu\text{m}$ et $50\ \mu\text{m}$), ou limons grossiers ;
- les particules de diamètre compris entre 0,05 mm et 0,2 mm ($50\ \mu\text{m}$ et $200\ \mu\text{m}$) ou sables fins
- les particules de diamètre compris entre 0,2 mm et 20 mm ($200\ \mu\text{m}$ et $2\ 000\ \mu\text{m}$) ou sables grossiers.

Parmi les éléments grossiers, les graviers ont leur diamètre compris entre 2 mm et 2 cm alors que les cailloux ont un diamètre supérieur à 2 cm.

La texture permet d'apprécier les propriétés d'un sol à partir de la proportion des différentes fractions granulométriques. En effet, les proportions relatives de ces constituants sont très variables dans les sols, aussi confèrent-elles à chaque sol, des caractéristiques précises. Ces proportions permettent aussi de classer les sols dans l'une des catégories définies par le triangle des textures.

Exercice : Déterminer la classe texturale des sols renfermant :

- i) 30 % d'argile ; 20 % de limons et 50 % de sable ;*
- ii) 20 % d'argile, 45 % de limon et 35 % de sable ;*
- iii) 25 % d'argile, 35 % de limon et 40 % de sable ;*
- iv) 40% d'argile, 30% de limon et 30% de sable.*

Le triangle des textures ne prend en compte que les fractions granulométriques. Cependant, certains éléments comme le calcaire et la matière organique peuvent influencer fortement les propriétés du sol, lorsque leur taux devient élevé. Il est proposé des dénominations complémentaires suivant les teneurs en calcaire ou en matière organique.

Par exemple,

- avec 5 à 20 % de calcaire on ajoute le suffixe «calcaire» ;
- avec 20 à 50 % de calcaire on ajoute le préfixe «calcaire» ;
- avec 4 à 10 % de matière organique on ajoute suffixe «humifère» ;
- avec 10 à 20 % de matière organique on ajoute le préfixe «humo».

3.3.1.2. Matière organique du sol

Les constituants organiques d'un sol se distinguent en quatre fractions principales qui sont le résultat de l'évolution de la matière organique dans un sol :

- la matière organique fraîche formée de résidus végétaux retournés au sol, peu décomposés ;
- les composés organiques dits transitoires comprenant des produits simples comme les sucres, les acides organiques et la cellulose ;
- l'humus, ensemble de substances complexes beaucoup plus stables ;
- les éléments microbiens.

Du point de vue agricole, l'humus représente la matière organique la plus importante dans le sol car il est stable (sa minéralisation n'est de l'ordre que de 1 à 2 % par an) et c'est un colloïde électronégatif comme l'argile.

Les propriétés de l'humus dans le sol sont très nombreuses :

- l'humus possède un pouvoir de fixation d'ions plus élevé que l'argile ;
- l'humus est plus hygrophile que l'argile : il peut retenir 15 fois son poids en eau et rester malgré cela, perméable.

L'humus et l'argile interviennent ensemble dans toutes les propriétés du sol ; ceci est dû à leur association dans le sol sous forme d'un complexe : le complexe argilo - humique.

3.3.1.3. Influence des constituants minéraux et organiques du sol sur la fertilité

Les teneurs limites adoptées pour chacune des fractions (argile, limon et sable) dans le but de caractériser les sols n'ont pas été choisies arbitrairement. En effet, lorsqu'on compare la composition des sols et leur fertilité on constate que la fertilité est affectée lorsque la proportion de certains éléments dépasse certaines limites :

- **Les éléments grossiers** en grande quantité (plus de 20 %) du poids de terre gênent le travail du sol et le cheminement des racines.

- La fertilité est faible ou médiocre lorsque la **proportion de terre fine** est de moins de 80%.

- La fertilité du sol est réduite lorsque la **proportion de sable grossier** dépasse 50 à 60 %.

Cependant, les éléments grossiers peuvent être bénéfiques : par exemple, les éléments grossiers contribuent à limiter l'évapotranspiration à la surface du sol.

- Les sables et les limons constituent le squelette du sol : **les sables** par les espaces qu'ils créent, favorisent la perméabilité du sol (on dit que le sol est «filtrant») et l'aération du sol (par une meilleure circulation de l'air).

- Les **limons** par leur taille plus fine peuvent être néfastes lorsqu'ils dominent car le sol a alors tendance à se tasser sous l'effet des pluies et à diminuer la disponibilité de l'eau en surface. Les sols limoneux sont dits «battants» car ils forment une croûte en surface après les pluies, ce qui entraîne des risques d'asphyxie des racines des plantes.

- Les **argiles** possèdent de nombreuses propriétés dans le sol. Plus particulièrement,

Les argiles sont des colloïdes c.a.d. des substances qui peuvent se maintenir en suspension dans l'eau du fait du mouvement perpétuel d'agglomérats de molécules appelées micelles ; Ce mouvement s'explique par la présence de charges électriques de même signe sur les molécules qui ont alors tendance à se repousser.

Les argiles sont des colloïdes électronégatifs qui fixent des ions sur leur surface grâce à l'attraction électrique des ions positifs. Le pouvoir de fixation des ions des trois principaux types d'argile est très différent (montmorillonite > illite > kaolinite) ;

Les argiles sont à l'état dispersé dans l'eau. Cependant, en neutralisant les charges négatives des argiles dans la suspension (en ajoutant par exemple un sel de calcium), elles s'agglomèrent en un floculat au fond de l'eau (état floculé).

Les argiles sont très hydrophiles : l'absorption de l'eau peut être élevée et provoquer le gonflement de l'argile qui peut alors devenir imperméable. Lorsque la teneur d'argile dépasse 25 %, la terre devient lourde et difficile à travailler ; travailler un sol dans ces conditions résulte souvent en une diminution considérable de la fertilité.

- La vie microbienne est difficile lorsque la **teneur en matières organique** des sols est inférieure à 1,5 ou 2 % par suite du manque de carbone. Les réserves azotées sont aussi très faibles dans ces conditions et la productivité peu élevée.

3.3.1.4. Eau du sol

L'eau du sol ou humidité du sol provient de l'eau qui s'infiltré lors des précipitations/irrigations. Elle est présente dans les macropores (**eau de gravité**) ou dans les micropores (**eau de rétention**).

Le sol joue le rôle de réservoir d'eau pour la plante. Un réservoir qui se remplit en période pluvieuse ou d'irrigation et qui se vide progressivement entre ces dernières.

L'eau est retenue dans le sol grâce à des forces d'attraction que l'on regroupe sous le terme de "force de succion" du sol. La force de succion est d'autant plus forte que l'humidité du sol est faible. On trouve en effet, plusieurs états de l'eau de rétention dans le sol :

- *l'eau d'imbibition* qui imprègne les colloïdes (argile, humus), très fortement retenue ;
- *l'eau pelliculaire* : formant une mince couche à la surface des agrégats, fortement retenue ;
- *l'eau capillaire* qui occupe les micropores du sol ; elle est la plus importante en quantité et représente le réservoir d'eau pour la plante.

Ces différentes fractions de l'eau de rétention ne peuvent pas être isolées. Il existe des passages continus de l'une à l'autre. Leur caractérisation permet toutefois de mieux conceptualiser où se trouve l'eau du sol et quelle pourrait être sa disponibilité pour les plantes.

Toute l'eau de rétention ne peut pas être utilisée par la plante car le sol cède l'eau à la plante si cette dernière exerce elle-même une force de succion supérieure à celle opposée du sol. A un certain taux d'humidité, variable selon les sols, la plante ne peut plus prélever l'eau.

Les forces de succion du sol et de la plante sont appréciées à l'aide du "potentiel capillaire". Cette notion permet de mieux cerner l'utilisation de l'eau du sol par la plante. En effet, le taux d'humidité du sol n'est pas représentatif, les sols pouvant retenir plus ou moins énergiquement l'eau selon leur texture.

L'eau du sol peut être caractérisée par deux points essentiels :

- le **point de ressuyage** du sol qui représente l'état d'humidité du sol à la capacité de rétention maximale (on dit encore à la capacité au champ), lorsque l'eau de gravité s'est écoulée ;
- le **point de flétrissement** qui correspond à l'état d'humidité du sol à partir duquel la plante ne peut plus prélever l'eau du sol.

Ces deux états d'humidité sont très variables selon les sols, en particulier selon la teneur en argile. Ainsi, tous les sols ne retiennent pas la même quantité d'eau. Plus les éléments sont fins, plus ils retiennent l'eau. La capacité de rétention d'eau est la quantité d'eau retenue par un sol ressuyé. Elle s'exprime en grammes d'eau fixés pour 100 grammes de terre fine et sèche.

Exemples :

Sol sableux : 18 - 19 g H₂O pour 100 g de terre fine

Sol argileux : 56 - 80 g H₂O pour 100 g de terre fine

Sol humifère : plus de 100 g H₂O pour 100 g de terre fine

3.3.1.5. Atmosphère du sol

L'air du sol est logé dans les macropores. Il est indispensable à la respiration des racines et des autres êtres vivants du sol.

L'air du sol a une composition sensiblement différente de l'air extérieur. La différence est d'autant plus accentuée que l'on va en profondeur.

- la teneur en O₂ de l'air du sol varie entre 18 et 20,5 % alors que celle de l'air atmosphérique est d'environ 21 % ;
- la teneur en CO₂ de l'air du sol est de 0,2 à 3,5 % alors que celle de l'air atmosphérique est d'environ 0,03 %.

Les différences de composition entre l'air du sol et l'air atmosphérique sont dues à l'activité biologique (respiration des êtres vivants du sol) et au tassement du sol en profondeur.

L'air du sol est renouvelé grâce au phénomène de diffusion gazeuse (échanges gazeux entre l'atmosphère et le sol). Ce renouvellement est favorisé par le travail du sol et la succession des périodes humides et des périodes sèches.

3.3.2. Structure du sol

3.3.2.1. Notion de structure du sol

La structure du sol représente le mode d'assemblage des particules entre elles. Le sol en place apparaît comme un ensemble d'éléments assemblés entre lesquels circulent l'air et l'eau que l'on appelle, selon la taille, des agrégats ou des mottes.

L'agrégat est l'élément structural de base. Il est formé de particules minérales réunies entre elles par le complexe argilo humique. La liaison entre les particules peut aussi être assurée par des hydroxydes de fer, de manganèse ou d'aluminium ; des ciments de calcaire, etc.

3.3.2.2. Principaux types de structure

On distingue trois principales classes structurales :

- la structure continue : la terre forme une masse compacte sans fissurations nettes ;
- la structure particulaire : les éléments sont juxtaposés et peu reliés entre eux ;
- la structure fragmentaire : les éléments structuraux sont bien individualisés.

Les classes texturales comportent elles-mêmes des types différents selon la taille et la forme des agrégats. Ainsi,

- la structure continue peut être en ciment, grès ou poudingue ;
- la structure particulaire peut être cendreuse, sableuse ou graveleuse ;
- la structure fragmentaire peut être philliteuse, anguleuse ou arrondie
 - la structure philliteuse peut être squameuse, schisteuse ou laminaire ;
 - la structure anguleuse peut être prismatique, colonnaire, cubique, polyédrique ;
 - la structure arrondie peut être massive, nuciforme, grumeleuse.

La structure d'un sol peut révéler son potentiel de production. Une structure massive ou continue peut traduire des phénomènes de compaction ou de cimentation susceptibles de poser des problèmes de croissance aux plantes. Par contre, une structure grumeleuse est révélatrice d'un milieu favorable pour les plantes.

3.3.2.3. Stabilité structurale

L'agrégat, élément structural de base est relativement stable vis à vis d'actions physico - chimiques (action de l'eau de pluie) et mécaniques (travail du sol modéré). Les agrégats sont souvent regroupés en mottes de plus ou moins grande dimension beaucoup moins stables.

La dégradation des sols résulte de la dégradation de leur structure. Le maintien de la stabilité de la structure d'un sol est essentiel pour la conservation de son intégrité. En effet, la structure d'un sol est soumise aux facteurs de dégradation qui sont principalement :

- l'impact des gouttes d'eau sur le sol nu (les fortes pluies détruisent les agrégats de surface) ;
- l'éclatement des agrégats dû à une humectation trop rapide qui comprime l'air et fait éclater les agrégats ;
- la dispersion des colloïdes due à un lessivage des ions flocculants ;
- le tassement en période humide par les animaux ou le matériel agricole ;
- l'effet des outils agricoles.

La structure du sol conditionne des propriétés importantes. Par exemple,

- l'aération ;
- la rétention de l'eau ;
- la perméabilité ;
- le travail du sol ;
- l'activité biologique du sol.

Compte tenu de l'importance de la structure du sol, l'agriculteur devrait la maintenir ou l'améliorer. La structure d'un sol peut être maintenue ou améliorée par certaines actions :

- la protection contre les agents de dégradation :
(en supprimant les excès d'eau par drainage, en évitant de travailler le sol en période humide, en évitant de laisser le sol nu trop longtemps, etc) ;
- les amendements :
(par des apports de calcium ou de la matière organique,
- l'adoption de rotations culturales
(par insertion des plantes améliorantes)
- le travail du sol
(par un bon travail du sol on peut régénérer des structures dégradées)
- la régénération de structures dégradées

(par le travail du sol ou l'introduction de plantes améliorantes).

3.3.2.4. Porosité du sol

On appelle porosité du sol, le volume des intervalles du sol exprimé en % du volume de la terre en place.

$$\text{Porosité} = V_p/V_t = (V_t - V_s) / V_t = 1 - V_s/V_t$$

V_p : espace poral

V_t : volume total

V_s : volume de la matière solide.

La porosité du sol est une conséquence de la structuration du sol. En effet, selon la forme et la taille des agrégats et des mottes, les intervalles qu'ils laissent entre eux sont plus ou moins grands.

L'espace poral étant occupé par l'eau ou par l'air, on distingue :

- la macroporosité formée par les espaces lacunaires (supérieurs à 8 μm) remplis d'air dans un sol normalement ressuyé ;
- la microporosité qui comprend les espaces plus fins (inférieurs à 8 μm) qui sont occupés par l'eau dans un sol normalement ressuyé.

La macroporosité contrôle la perméabilité du sol. Elle est liée à l'agrégation. Plus l'agrégation du sol est développée, plus la macroporosité est élevée et plus la circulation de l'air et de l'eau est facile. La microporosité est souvent associée à la réserve en eau du sol. Il ya un lien étroit entre la structure du sol et sa capacité à retenir l'eau.

La porosité du sol se mesure aussi à partir des densités du sol. La porosité en % est déterminée ainsi qu'il suit :

$$P = (d_r - d_a) \times 100/d_r$$

- La densité réelle (d_r) représente la masse volumique des éléments solides du sol (de l'ordre de 2,6).
- La densité apparente (d_a) correspond à la masse volumique du sol en place. Elle est variable selon la nature et l'état structural du sol ; elle peut varier de 0,8 à 2 (mais la valeur moyenne est de 1,3).

La valeur moyenne de la porosité est de 50% soit 30% de macroporosité et 20% de microporosité. Dans un sol agricole, il doit exister un équilibre entre la macroporosité et la microporosité. On estime que la microporosité optimale est voisine de 60% de la porosité totale.

La porosité varie en fonction de plusieurs facteurs parmi lesquels la texture, la structure et la profondeur. Ainsi, la porosité est plus faible en profondeur.

La texture conditionne surtout la microporosité. Une texture fine favorise la microporosité. *Par exemple, un sol argileux a une microporosité plus élevée qu'un sol sableux.*

La structure conditionne surtout la macroporosité. *Par exemple, un sol à structure grumeleuse a une meilleure porosité qu'un sol à structure prismatique.*

3.3.2.5. Consistance du sol

La consistance est une propriété résultant des forces de liaison unissant les constituants et les agrégats du sol. Elle peut se définir comme la résistance du sol à la déformation et à la rupture.

La consistance est liée à deux notions : la cohésion et l'adhérence. Elles dépendent toutes de la teneur en argile et d'eau des sols.

- la **cohésion** résulte de l'attraction moléculaire due aux charges de surface des particules ;
- l'**adhérence** est liée aux tensions de surface entre éléments.

3.4. CHIMIE DU SOL

Un cours sur la chimie des sols est au programme.

Les propriétés physiques du sol permettent aux racines de se répartir dans le sol et d'avoir une certaine quantité d'air, d'eau et de chaleur à leur disposition. Le sol est aussi le milieu nutritif de la plante. L'étude de la chimie du sol révélera, entre autres, comment le sol retient les éléments minéraux et les met à la disposition de la plante.

3.4.1. Pouvoir absorbant du sol

Le sol est normalement imbibé d'eau renfermant en solution des éléments minéraux. Les plantes s'alimentent aux dépens de cette solution. L'étude du fonctionnement du complexe absorbant permet de comprendre l'origine des éléments minéraux contenus dans la solution de sol et la manière dont est assurée la stabilité relative de leur concentration.

3.4.1.1. Notion de pouvoir absorbant

Le pouvoir absorbant est la propriété que possède le sol (complexe argilo humique) de retenir énergiquement à sa surface (on parle aussi d'adsorption) certains ions provenant de la solution de sol, cette dernière correspondant à l'eau du sol dans laquelle sont dissous de nombreux éléments minéraux solubles.

3.4.1.2. Mécanisme du pouvoir absorbant

Le pouvoir absorbant est lié aux colloïdes du sol que sont l'argile et l'humus. Ces colloïdes électronégatifs attirent et fixent à leur surface des ions de la solution du sol. Les ions retenus seront des cations (+) ou ions positifs.

Figure 1 : Principe de fixation des cations

Fixation des cations et phénomène d'échange

Les cations se fixent à la surface des colloïdes. Il s'agit principalement de K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , NH_4^+ , Na^+ , H^+ , etc. Ces cations se retrouvent concentrés dans une mince couche d'eau autour des molécules d'argile ou d'humus. Le nombre de places (sites) est toutefois limité. Si un cation libre dans la solution du sol se fixe sur le complexe argilo - humique, un autre doit lui céder sa place. On assiste à donc des phénomènes d'échanges entre cations.

Figure 2 : Représentation schématique des phénomènes d'échange de cations

Dans les sols agricoles le calcium est le cation qui cède le plus sa place car il est présent en plus grande quantité.



Si la plante utilise par exemple le K du sol, les cations K^+ sortent du complexe argilo humique et sont remplacés par les ions Ca^{++} qui existent à l'état libre dans la solution du sol.

Quelques règles précisent le sens des phénomènes d'échange :

- Tous les cations ne sont pas fixés aussi énergiquement les uns que les autres. L'ordre de rétention est le suivant : $H^+ > Ca^{++} > NH_4^+ > K^+ > Na^+$. Le dernier ion ici est le plus faiblement retenu.
- les cations sont plus énergiquement fixés s'ils sont bivalents (Ca^{++} , Mg^{++}) et s'ils sont présents en faible quantité.
- Plus un cation est présent en grande quantité dans le sol, moins il est énergiquement retenu. C'est le cas du calcium dans les sols agricoles.
- Il existe un équilibre entre les ions fixés sur le complexe et ceux de la solution du sol.

Fixation des anions

La fixation des anions est très faible. Parmi les anions pouvant être présents dans la solution du sol (NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , HPO_4^{2-}), seul l'ion phosphorique HPO_4^{2-} est bien retenu par le complexe argilo humique grâce à la formation d'un pont calcique.

Figure 3 : Représentation schématique d'un pont calcique

3.4.1.3. Mesure du pouvoir absorbant

Le pouvoir absorbant d'un sol et particulièrement l'appréciation de sa réserve alimentaire se mesure à partir de deux notions : la capacité d'échange cationique et la somme des bases. Elles permettent de déterminer le taux de saturation.

- La **capacité d'échange cationique** (CEC ou T) représente la quantité maximale de cations que peuvent retenir 100 g de sol ;

- la **somme des bases/anions échangeables** (S) correspond aux cations métalliques fixés sur le complexe absorbant.
- le potentiel alimentaire du sol est déterminé par le **taux de saturation** (V).
($V = 100 \times S/T$).

3.4.2. Réaction du sol ou pH

3.4.2.1. Notion de pH

Le pH exprime la réaction acide, neutre ou basique d'un corps, selon qu'il renferme beaucoup ou peu d'ions H^+ libres en solution. Le pH varie de 0 à 14 (7 étant la neutralité). Dans les sols, le pH se situe généralement entre 4,5 pour les sols les plus acides et 8 pour les terres très basiques.

3.4.2.2. Importance du pH dans les sols

La réaction des sols a une influence directe ou indirecte sur de nombreuses propriétés du sol, sur les plantes et sur les micro-organismes telluriques.

Au niveau des propriétés du sol

- un pH acide ($pH < 7$) entraîne un mauvais fonctionnement du pouvoir absorbant dû en partie au manque de calcium. En l'absence de calcium, les phénomènes d'échange avec le complexe absorbant se font mal ; les pertes d'éléments utiles par lessivage sont plus importantes, l'alimentation minérale des plantes peut en être perturbée.
- un pH acide provoque une mauvaise floculation des colloïdes qui ont plutôt tendance à se disperser.

Au niveau de la végétation

- les différentes espèces végétales ont des préférences vis-à-vis du pH et il est possible de définir une zone de pH optimale pour chacune.

| <u>4.5 à 5</u> | <u>5.5 à 6.5</u> | <u>6.0 à 6.8</u> |
|----------------|------------------|------------------|
| Pomme de terre | Maïs | Chou |
| Patate douce | Carotte | Céleri |
| Pastèque | Concombre | Laitue |
| | Persil | Oignon |

Tomate Gombo
Piment

- le pH influence la croissance des plantes à tel point que le pH d'un sol peut être apprécié grâce à des plantes indicatrices. *Par exemple les fougères sont indicatrices d'un sol acide.*

Au niveau des microorganismes telluriques

Les micro-organismes du sol tels que ceux qui assurent la transformation de la matière organique dans le sol travaillent dans les meilleures conditions lorsque le sol est neutre ou légèrement basique. En milieu acide se sont, surtout les champignons qui assurent la transformation de la matière organique. Cependant, ils sont beaucoup moins actifs que les bactéries et la matière organique évolue moins vite.

3.4.2.3. Variations de pH d'un sol - Notion de **pouvoir tampon**

Le pH du sol varie en fonction de plusieurs facteurs :

- la nature de la roche mère qui libère peu ou beaucoup de bases (les roches calcaires libèrent relativement plus de Ca) ;
- la saison (en saison sèche, le pH est légèrement plus bas du fait d'une forte activité biologique produisant des acides organiques) ;
- l'intensification de la culture qui peut épuiser le sol en bases ;
- le type d'engrais (le sulfate d'ammonium est un engrais acidifiant), etc.

Selon les sols, la variation du pH suite à l'apport d'une même quantité d'éléments acides ou basiques n'est pas la même. Les différences proviennent du pouvoir tampon du sol

Le pouvoir tampon du sol est la propriété qu'il possède de résister aux variations de pH. Cette propriété est liée à l'existence du complexe argilo - humique qui, en fixant une partie des ions apportés, atténue les variations de pH.

Par exemple, un sol argileux a un pH qui varie moins que celui d'un sol sableux lors d'un apport d'ions calcium (amendement calcique).

3.4.3. Constituants chimiques du sol

Le sol renferme de nombreux éléments chimiques. Cependant tous ne sont pas utiles aux plantes. En effet, la plante a besoin pour sa croissance et son développement, d'un nombre restreint d'éléments chimiques qui sont souvent classés en trois catégories selon leur importance quantitative dans la plante : les éléments majeurs ou primaires, les éléments secondaires et les oligo-éléments.

Les éléments majeurs sont : l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K) et le calcium (Ca). La plante est très exigeante en ces éléments et souvent, elle en nécessite plus que le sol peut lui en fournir. L'agriculteur doit faire des apports réguliers en éléments majeurs. Ils constituent les fertilisants prioritaires.

Les éléments secondaires sont : le magnésium (Mg) et le soufre (S). Ils interviennent dans la plante en quantité moindre. Ils sont souvent présents en quantité suffisante dans les sols.

Les sept principaux oligo-éléments sont : le fer (Fe), le manganèse (Mn), le zinc (Zn), le cuivre (Cu), le bore (B), le chlore (Cl) et le molybdène (Mo). Ils représentent une fraction très faible de la matière sèche mais leur présence est indispensable au métabolisme de la plante.

Chacun des éléments se trouve dans le sol en plus ou en moins grande quantité et sous des formes plus ou moins utilisables par la plante. Ils peuvent être liés à la roche mère, liés à la matière organique, libres dans la solution de sol, etc. Pour l'agriculteur, la richesse du sol en éléments minéraux se limite à ceux qui sont utilisables par la plante. Chacun a une dynamique spécifique et la présence d'un élément ne traduit pas sa disponibilité pour les plantes.

3.4.3.1. Azote

L'azote existe dans le sol sous plusieurs formes :

- l'azote gazeux constitue en moyenne 80% de l'atmosphère du sol ;
- l'azote organique est la forme de réserve de l'azote dans le sol.
- l'azote minéral sous forme ammoniacale (NH_4^+) fixé par le complexe absorbant ou sous forme nitrique (NO_3^-) dans la solution du sol.

L'azote gazeux n'est pas utilisable par les plantes à l'exception des légumineuses. Ces plantes fixent l'azote de l'air grâce à des symbioses avec des bactéries des genres *Rhizobium* et *Bradyrhizobium*.

L'azote organique est la forme de réserve de l'azote du sol. Il n'est pas directement utilisable par les plantes. Il doit d'abord subir la minéralisation. La forme minérale, particulièrement la forme nitrique, est

la plus assimilable par la majorité des plantes. L'azote ammoniacal est souvent fixé sur le complexe adsorbant.

3.4.3.2. Phosphore

Le phosphore existe sous plusieurs formes dans le sol :

- le phosphore de la solution du sol (en très faible quantité 0,2 à 0,5 mg/L) ;
- le phosphore fixé sur le complexe (argilo - humique) grâce aux ponts calciques ;
- le phosphore fixé sur les hydroxydes de fer ou d'aluminium ;
- le phosphore insoluble de la roche ;
- le phosphore organique.

Les formes de phosphore assimilables par les plantes sont celles présentes dans la solution du sol et le complexe argilo humique sont assimilables par les plantes. Le phosphore insoluble et notamment l'acide phosphorique (H_3PO_4) donne trois types de sels selon que qu'une, deux ou trois fonctions acides sont neutralisées par des cations tels que le calcium. On a :

- le phosphate mono calcique $Ca(H_2PO_4)_2$
- le phosphate dicalcique $Ca_2(HPO_4)_2$
- le phosphate tricalcique $Ca_3(PO_4)_2$.

Le phosphore organique est comme l'azote organique, une forme de réserve qui devient utilisable après minéralisation. Somme toute, la plante s'alimente en phosphore dans la solution du sol. Elle même est alimentée par le phosphore fixé, et en partie par le phosphore organique qui se minéralise.

3.4.3.3. Potassium

Le potassium est présent :

- en très petites quantités dans la solution du sol (10 mg/L) ;
- sur le complexe argilo-humique à l'état échangeable ;
- adsorbé entre les feuillets d'argile ;
- à l'état insoluble dans les roches et l'argile.

La plante s'alimente en potassium dans la solution du sol. Elle-même est approvisionnée par les ions K^+ échangeables et parfois par les ions K^+ adsorbés.

3.4.3.4. Calcium

A l'exception des sols très acides, la terre contient toujours plus de calcium par rapport aux besoins des plantes. Le calcium existe sous plusieurs formes dans le sol :

- fixé sur le complexe absorbant où il sert de cation d'échange ;
- sous une forme de réserve : le calcaire qui est solubilisé dans l'eau chargée de CO₂ ou d'acides humiques ;
- dans la solution du sol.

3.4.3.5. Soufre

Le soufre organique, forme de réserve, se minéralise progressivement et la forme minérale (anions SO₃²⁻ et SO₄²⁻) n'est pas retenue par le complexe absorbant.

3.4.3.6. Oligo-éléments

Le plus souvent, les oligo-éléments existent en quantités très importantes dans le sol, comparativement aux besoins de la plante. Cependant, ils peuvent être inaccessibles aux plantes.

Ainsi par exemple, l'excès d'ions calcium ou de matières organiques acides peut gêner leurs utilisations. Cependant, un excès d'oligo-élément peut devenir rapidement toxique.

3.5. BIOLOGIE DU SOL

Le sol est un milieu vivant par sa faune et par sa flore. En fait, toutes les classes du règne animal et du règne végétal sont représentées dans le sol. Certains organismes telluriques se comportent comme des pestes ou des parasites (nématodes, larves du sol, etc), d'autres par contre ont une action bénéfique : entre autres, ils contribuent à l'évolution des matières organiques.

Les espèces appartenant à la microflore et à la microfaune sont particulièrement diversifiées. On estime que moins de 10% des espèces sont connues. L'agriculteur doit connaître les multiples rôles des organismes qui vivent dans le sol afin de pouvoir mieux les contrôler ou tirer un meilleur profit de leur activité.

3.5.1. Principaux organismes du sol

3.5.1.1. Faune du sol

La faune dans le sol forme une biomasse de 2 à 5 T/ha. Elle a pour rôle principal la fragmentation de la matière organique fraîche, ce qui facilite sa décomposition ultérieure.

La faune du sol est très variée. Le nombre des organismes diminue, en général avec l'augmentation de la taille. En fonction de la taille on distingue :

- la macrofaune (> 4 mm),
- la méso faune (entre 0,2 et 4 mm) et
- la microfaune (<0,2 mm).

Macrofaune

La macrofaune regroupe les Lombricidés, les larves de coléoptères et de diptères, les Chilopodes (1000 pattes), etc.

Les Lombricidés ou vers de terre participent directement à des transformations physiques et physico-chimiques dans les sols. En se nourrissant des débris végétaux qu'ils ingèrent mélangés à la terre, ils contribuent à la rapprocher les micro-organismes et les débris végétaux pré-digérés. D'autre part, ils entraînent les matières organiques de la surface du sol dans les galeries profondes, pour les rejeter ensuite sous forme de turricules (leurs excréments) à la surface. Ces rejets constituent des agrégats en matière organique humifiée et de ce fait, sont plus stables. C'est en formant les agrégats riches et stables et en construisant des galeries que les vers de terre contribuent à l'amélioration du drainage et de l'aération des sols.

Le groupe des arthropodes qui inclut les diplopodes et certains ordres d'insectes dont les diptères, les coléoptères et les hyménoptères (fourmis), sont en nombre plus restreint. Cependant, ils jouent un rôle non négligeable dans la décomposition mécanique des débris organiques. Ils produisent alors un substrat beaucoup plus facile à transformer par les micro-organismes du sol.

Les termites qui font partie des isoptères jouent un rôle actif dans la fertilité physique et chimique des sols surtout en régions tropicales. Ce rôle est rendu possible par : leur nombre (2 millions par termitière) et par l'étendue de leur activité. En effet, elles mélangent et transportent la matière organique dans les horizons du sol, étendent leur activité dans l'espace et contribuent à décomposer de large quantités de matières, notamment la cellulose.

Mésafaune

La mésafaune est surtout constituée d'arthropodes et des nématodes. Les arthropodes les plus répandus de ce groupe sont les acariens et les collemboles. Les acariens sont surtout présents sur les litières. Ils se présentent comme des prédateurs puis qu'ils se nourrissent de micro - champignons et de bactéries. De ce fait ils interviennent dans la chaîne de décomposition de la matière organique en agissant sur le nombre des agents principaux. Subsidiairement, ils jouent un rôle important dans la réduction mécanique des débris végétaux et dans leur transport.

Les collemboles constituent la seconde population en nombre parmi les arthropodes. Ce sont surtout des saprophytes. Ils contribuent de manière importante à la décomposition des résidus végétaux en les fractionnant finement.

Les nématodes constituent un groupe important. Certains sont phytophages et causent plutôt d'importants dégâts dans les parties souterraines des plantes. Dans la majorité cependant, les nématodes sont des mycophages ou des bactériophages ; ils contribuent alors à la régulation des populations microbiennes des sols

Microfaune

La microfaune est représentée par certains protozoaires et notamment : les flagellés, les amibes et les ciliés. Ces protozoaires sont classés dans la faune du fait de leur mobilité et de leur incapacité à la photosynthèse (sauf quelques exceptions).

3.5.1.2. Flore du sol

Mises à part les racines des végétaux supérieurs, le règne végétal est surtout représenté par les bactéries et les champignons microscopiques. La microflore du sol peut atteindre plusieurs tonnes par ha.

Bactéries

Les bactéries constituent le groupe de micro- organismes le plus important en nombre. Elles jouent un rôle primordial dans les transformations multiples et complexe des constituants organiques et minéraux du sol. Les bactéries ont été classées en fonction des critères morphologiques ou nutritionnels, de la source principale d'énergie utilisée, de critères physiologiques ou écologiques, etc.

Les populations bactériennes sont présentes dans le sol en fonction de la distribution de la matière organique. L'importance des populations bactériennes peut être estimée à partir des méthodes classiques de numérotation utilisées en microbiologie (i.e. numérotation des bactéries par microscopie directe, comptage de colonies formées sur un milieu solide après inoculation, etc). Des méthodes biocidales permettent d'évaluer l'importance des populations microbiennes à partir de leur biomasse.

Les critères physiologiques ou écologiques de classification des bactéries semblent plus illustratifs des transformations qui s'opèrent dans le sol. *On trouve par exemple dans le sol :*

- *des bactéries ammonifiantes qui représentent un groupe capable de transformer les composés organiques azotés jusqu'au stade de l'ammonium ;*
- *des bactéries fixatrices libres d'azote ;*
- *des bactéries sulfo oxydantes capables d'oxyder le soufre et les sulfures, etc.*

Actinomycètes

Les actinomycètes sont nombreux. Les genres les plus connus et les plus représentés sont *Streptomyces* (70 à 90% de l'ensemble) suivi de *Nocardia*. Les actinomycètes jouent un rôle particulièrement important dans la transformation des composés organiques difficilement dégradables par les autres micro-organismes.

L'intérêt des chercheurs s'est aussi porté sur la capacité des actinomycètes à produire des antibiotiques et des vitamines. Quelques 500 antibiotiques ont été isolés à partir des actinomycètes dont les plus connus sont la streptomycine A, l'auroémocine, la terramycine et la néomycine.

Champignons microscopiques

Les microchampignons du sol constituent une population égale sinon supérieure en biomasse, à celle des bactéries. La distribution des champignons suit celle des substances organiques du sol.

Algues

Les algues sont des micro-organismes aquatiques et photosynthétiques que l'on rencontre dans les sols inondés ou les sols suffisamment humides. On les trouve dans les horizons de surface, là où la captation des rayons lumineux est possible.

Protozoaires

Les protozoaires comportent plusieurs groupes. Du point de vue nutritionnel, on distingue les protozoaires saprophytes qui se nourrissent de substances organiques solubles des protozoaires holozoïques qui ingèrent les produits solides notamment les bactéries, les levures ou même d'autres protozoaires.

Dans le sol, les protozoaires se distribuent suivant la répartition des autres micro-organismes et notamment, celle des bactéries qui constituent un substrat pour plusieurs espèces.

3.5.2. Rôle des êtres vivants

3.5.2.1. Cycles bio-géochimiques de transformation

Dans le sol, le rôle le plus important joué par les micro-organismes est d'assurer la transformation de divers constituants organiques et chimiques en produisant des composés assimilables par les plantes ou à l'inverse, d'incorporer certains éléments minéraux dans les constituants cellulaires et dans des substances organiques nouvelles.

Au cours de ces transformations, un nombre non négligeable de changements a lieu suite à l'intervention de plusieurs groupes de micro-organismes. Les divers changements ou les séquences de transformation peuvent être présentés comme des processus cycliques qui débutent par une série de réactions métaboliques assurées par un ou des groupes de micro-organismes qui amènent un élément de l'état organique à l'état minéral.

Ensuite, les substances organiques nouvellement formées sont bio dégradées à leur tour par un autre groupe de micro-organismes conduisant à la production de composés minéraux. Le processus peut alors recommencer à nouveau.

Ces transformations sont définies comme des cycles bio géochimiques de transformation : *bio* parce que ce sont les organismes vivants qui sont les agents principaux ; *géo* car elles ont lieu dans le sol. Ainsi, les transformations de l'azote sont décrites dans le cycle de l'azote, les transformations du carbone dans le cycle du carbone, etc.

Cas de l'azote

L'azote est un élément majeur dans la nutrition des plantes. En partant de l'azote atmosphérique N_2 , les différentes étapes de transformations sont les suivantes :

Fixation de l'azote gazeux. Cette fixation est le fait de bactéries symbiotiques ou de bactéries fixatrices libres d'azote. Le résultat principal de ces fixations est l'incorporation de l'azote élémentaire dans les cellules des végétaux ou des micro-organismes ;

Formation des tissus végétaux et animaux. Suite à la fixation d'azote symbiotique notamment, une formation de tissus a lieu. Les tissus ainsi formés seront consommés par les animaux herbivores qui vont ainsi utiliser l'azote fixé pour la production de tissus animaux. Ces herbivores seront à leur tour consommés par les carnivores qui produisent d'autres tissus.

Production des déchets organiques. Les plantes par les racines, tiges et feuilles et dans une moindre mesure les animaux par les déjections et ou les carcasses, seront les principaux producteurs de déchets.

Dégradation des déchets organiques. Sous l'action des organismes de la microfaune et de la microflore, les déchets organiques sont dégradés en composés organiques n'ayant plus de formes particulières. Le résultat principal est la formation de la matière organique du sol.

Evolution des matières organiques. Sous l'action d'organismes et de micro-organismes telluriques divers, la matière organique passe par une série de stades intermédiaires avant de donner l'humus stable. C'est le processus d'**humification**. L'humus est le produit stable de la décomposition de la matière organique. Il est caractérisé par sa couleur noirâtre et par la possibilité de prendre l'état colloïdal.

Minéralisation de l'azote organique. L'humus stable poursuit une évolution très lente. Durant cette évolution, l'azote organique est transformé en azote minéral. Cette transformation se réalise en deux phases :

- l'ammonisation : transformation azote organique en N ammoniacal
- la nitrification : transformation de l'azote ammoniacal en N nitrique.

La minéralisation s'effectue grâce à l'intervention de plusieurs espèces de bactéries. La minéralisation libère ainsi l'azote minéral utilisable par les plantes.

Dénitrification et réorganisation de l'azote minéral. La dénitrification est le passage de l'azote nitrique à l'azote gazeux. Cette réaction se fait essentiellement en milieu anaérobie. Elle est relativement peu importante dans les sols cultivés.

La réorganisation est le retour de la forme nitrique à la forme organique. Il s'agit d'un véritable stockage de l'azote par les corps microbiens qui, après leur mort seront minéralisés à leur tour pour redonner l'azote assimilable.

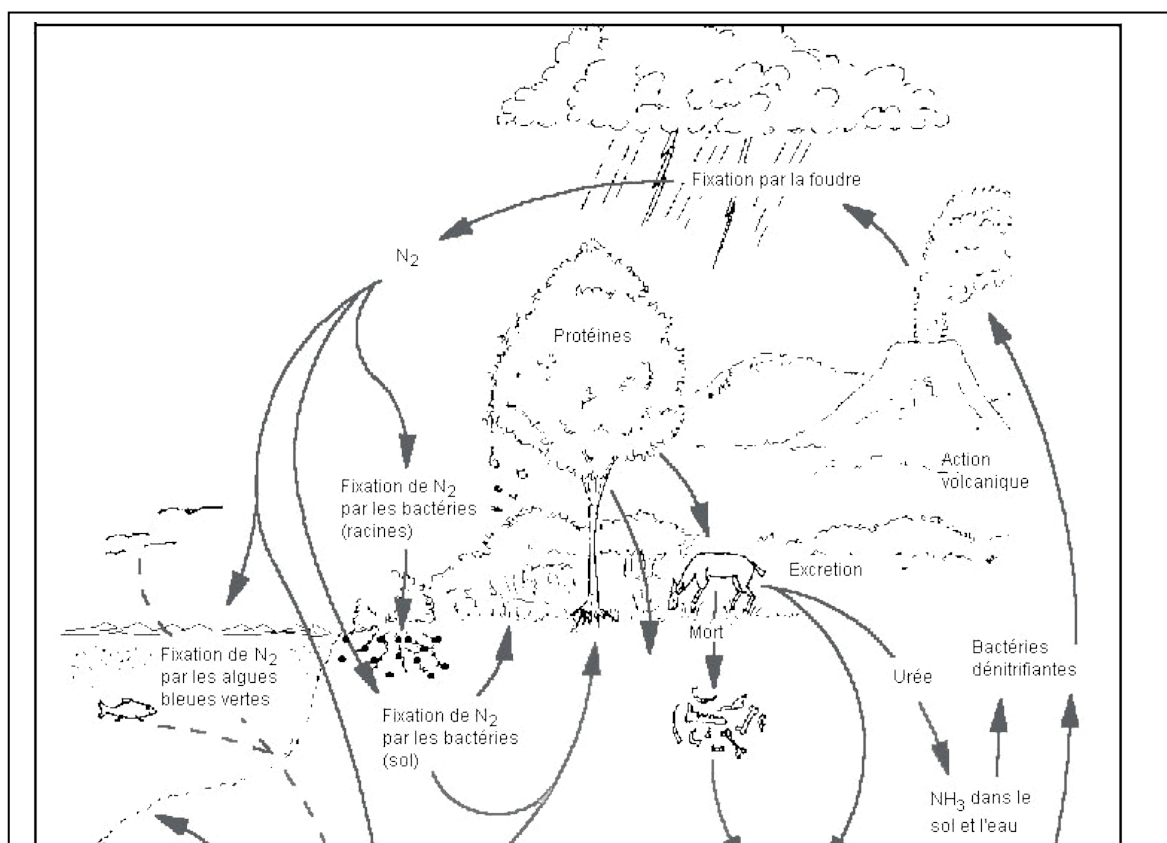
Toutes ces transformations réalisées grâce à l'activité microbienne du sol font que l'azote passe du monde minéral au monde vivant (végétal puis animal) et que les déchets reviennent à l'état minéral. Il y a donc un véritable cycle de l'azote dont plusieurs représentations sont disponibles dans la littérature.

Au cours de la réalisation du cycle de l'azote, il y a cependant de nombreuses pertes et notamment par :

- lessivage
- dénitrification
- volatilisation d'ammoniac
- exportations par les produits agricoles, etc.

Les gains d'azote (fixation d'azote gazeux) ne compensent qu'une partie de ces pertes. Le bilan de l'azote est donc déficitaire et l'agriculteur doit avoir recours à la fumure azotée pour l'équilibrer.

Figure : Représentation du cycle de l'azote



3.5.2.2. Rôle du facteur biologique dans l'altération des roches

L'activité biologique contribue non seulement à la dégradation de la matière organique et à la formation de composés organiques spécifiques du sol (les acides humiques) mais aussi de manière prépondérante, à l'altération des roches et des minéraux.

Les micro-organismes et plus spécialement les bactéries sont responsables de nombreuses réactions biochimiques et notamment des réactions d'oxydoréduction qui leur apportent souvent l'énergie qui leur est nécessaire. La conséquence directe des réactions d'oxydoréduction avec production d'acide est une augmentation importante de la dissolution des minéraux.

Les champignons sont les végétaux pionniers les plus représentés dans la colonisation des roches. Les champignons et les lichens, du fait des sécrétions acides et complexantes qu'ils produisent, sont particulièrement actifs dans les phénomènes de dissolution des minéraux.

Les racines exercent un effet spécifique sur l'altération des roches. Des réactions d'échanges d'ions conjuguées à des réactions d'acidification conduisent à la dissolution des micas et des phosphates. Les racines peuvent dissoudre les carbonates et recristalliser le calcite à l'intérieur des cellules corticales. Ces phénomènes de dissolution et de recristallisation conduisent à la formation de véritables structures rhizomorphes calcitisées pouvant représenter 30% des carbonates présents dans certains sols carbonatés.

3.5.2.3. Rôle des êtres vivants dans l'agrégation

Le facteur biologique contribue à l'élaboration de nouvelles structures pédologiques très différentes de celles héritées des roches mères. Ces structures sont caractérisées par la présence d'agrégats de taille et de nature différente qui laissent entre eux, une porosité importante. Cette dernière est déterminante pour les propriétés physiques spécifiques du sol.

En effet, tous les êtres vivants (racines, bactéries, algues, champignons etc.) tendent à produire des polysaccharides qui ont la propriété de former des gels pouvant retenir plus de 100 fois leur propre poids d'eau et qui sont les principaux agents d'agrégation des minéraux.

Les êtres vivants associent matière organique évoluée et matière minérale fine (argile). C'est le cas pour les fourmis, les vers de terre et les termites.

Chapitre IV : COMPOSANTE VEGETALE (PLANTE)

La plante forme un ensemble organisé où les tissus sont regroupés en organes morphologiquement distincts : les racines, les tiges, les rameaux, les feuilles qui accomplissent certaines fonctions.

- les organes nourriciers : racines, feuilles et tiges forment l'appareil végétatif ;
- les fleurs et les fruits forment l'appareil reproducteur.

L'installation des organes est progressive et une interdépendance existe entre eux. La plante se développe, croit et fabrique la matière vivante qu'exploitent les producteurs agricoles.

L'agriculteur cherche à améliorer la production végétale sur les plans qualitatif et quantitatif, et d'une façon régulière dans le temps. Il peut y parvenir :

- en améliorant le milieu dans lequel la plante vit ;
- en choisissant la plante la mieux adaptée au contexte ;
- en utilisant la plante de la manière la plus efficace ;
- en améliorant la plante.

Les aspects mentionnés ci-dessus sont étroitement liés. En effet, l'amélioration du milieu permet de valoriser les plantes les plus exigeantes et inversement, l'apparition de nouvelles variétés permet d'ajuster l'apport des intrants aux conditions de cultures.

L'anatomie des plantes qui étudie les différentes parties de la plante fait l'objet du cours de botanique ; la physiologie végétale quant à elle étudie le fonctionnement de la plante (nutrition minérale, photosynthèse, reproduction, etc). Ce cours porte surtout sur la connaissance générale des plantes et les choix qui concernent directement l'agriculture.

4.1. ORIGINE DES PLANTES CULTIVEES

4.1.1. Domestication des plantes

Les plantes rencontrées partout dans le monde ont souvent une origine précise à partir de laquelle elles ont été domestiquées. Les régions du monde où les principales plantes d'intérêt agronomique ont été domestiquées sont :

- l'Afrique : sorgho, mil, ignames, niébé, pastèque, café
- l'Amérique centrale : maïs, tomate, avocat, papaye, cacao, manioc
- l'Amérique du sud : pomme de terre, arachide, manioc, igname, patate douce
- l'Europe : betterave, chou, olive
- le Moyen orient : blé, oignon, pois, date, figue
- l'Inde : aubergine, concombre
- l'Afrique du sud- Est : banane, citron, igname, mangue, taro, thé
- la Chine : soja, chou, oignon, canne à sucre, cocotier, arbre à pain.

4.1.2. Identification des plantes

La famille est le taxon le plus élevé qu'on inclut dans l'identification courante des plantes. Cette dernière doit renfermer :

- la famille
- le genre
- l'espèce
- la variété
- le nom commun.

Le nom scientifique qui inclut le genre et l'espèce est indiqué en latin, le latin ayant été la première langue utilisée par les naturalistes. Le nom scientifique latin a l'avantage d'être internationalement reconnu.

Parfois, le nom du genre est connu mais celui de l'espèce inconnu ou commun à plusieurs espèces. Dans ce cas, le nom du genre est donné suivi de *sp* (singulier) ou de *spp* (au pluriel).

| Nom commun | Famille | Genre | Espèce |
|------------|----------------|---------------------|------------------------------|
| Céleri | Umbelliferae | <i>Apium</i> | <i>graveolens var. dulce</i> |
| Oignon | Amaryllidaceae | <i>Allium</i> | <i>Cepa</i> |
| Chou | Brassicaceae | <i>Brassica</i> | <i>Oleracea</i> |
| Pois | Fabaceae | <i>Pisum</i> | <i>sativum</i> |
| Arachide | Fabaceae | <i>Arachis</i> | <i>hypogaeae</i> |
| Tomate | Solanaceae | <i>lycopersicon</i> | <i>esculentum</i> |
| Poivron | Solanaceae | <i>Capsicum</i> | <i>annuum</i> |
| Piment | Solanaceae | <i>Capsicum</i> | <i>annuum var. annum</i> |

| | | | |
|----------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Melon | Cucurbitaceae | <i>Cucumis</i> | <i>melo</i> |
| Pastèque | Cucurbitaceae | <i>Citrullus</i> | <i>lanatus</i> |
| Patate douce | Convolvulaceae | <i>Ipomoea</i> | <i>batatas</i> |
| Laitue | Asteracées (Composées) | <i>Lactuca sativa</i> | |
| Maïs | Poaceae (Graminées) | <i>Zea</i> | <i>mays</i> |
| Maïs sucré | Poaceae | <i>Zea</i> | <i>mays var. rugosa</i> |
| Maïs à éclater | Poaceae | <i>Zea</i> | <i>mays var. praecox</i> |

4.2. COISSANCE DE LA PLANTE

4.2.1. Définition et appréciation

La croissance d'une cellule, d'un organe, d'une plante se traduit par une augmentation de dimensions (croissance dimensionnelle) ou de poids (croissance pondérale). Elle correspond à la fois à un grandissement cellulaire et une multiplication des cellules.

On peut suivre la croissance d'une plante ou d'un organe en fonction du temps en mesurant la taille, la surface ou le poids. Le poids de matière sèche produite est un critère commode très souvent utilisé dans la pratique pour sa relative simplicité d'exécution. La mesure de l'azote protéique serait plus représentative du résultat des biosynthèses.

Afin d'éviter le caractère destructif, on recourt parfois à la méthode allométrique. Son principe consiste à utiliser une relation statistique entre une ou des mesures non destructives, faciles à opérer, et un paramètre caractéristique de la croissance. On a par exemple établi que la surface d'une feuille de tournesol était liée aux deux plus grandes dimensions par la relation $S = 0,74 L \times l$. La détermination de la croissance des parties souterraines des plantes pose des problèmes souvent difficiles à résoudre.

4.2.2. Allure générale de la croissance

La croissance est un phénomène dynamique. Si «y» est un paramètre caractéristique (longueur, masse, etc.), l'allure de la courbe de croissance y, en fonction du temps, est la même quelque soit l'organe ou le groupe d'organes considérés. Elle se présente sous la forme d'un S aplati, on dit qu'elle est de type sigmoïdal. Si l'on porte les accroissements y en fonction du temps, on obtient la courbe de croissance instantanée. Si les intervalles de temps sont égaux, la courbe est aussi celle de la vitesse de croissance.

La courbe de croissance typique d'un organe ou d'une plante entière présente quatre phases distinctes successives :

- Une phase initiale où la croissance est faible et sa vitesse lente ;
- Une phase de nature exponentielle
- Une phase linéaire de croissance active ;
- Une phase plateau caractérisée par la cessation de la croissance.

On observe le même phénomène dans le cas de la croissance d'un peuplement végétal

Figure : Représentation d'une courbe de croissance

4.2.3. Influence de la température

La croissance est influencée à la fois par des facteurs internes et des facteurs externes (facteurs nutritifs, facteurs climatique, etc.). La température est le facteur climatique qui influence le plus la croissance avec la lumière qui conditionne la photosynthèse.

a- Température et vitesse de croissance

Toutes les réactions biochimiques impliquées dans la croissance sont sensibles à la température. La température conditionne donc la vitesse de croissance mais n'a pas d'action sur la taille finale des organes.

Aux basses températures, la vitesse de croissance est très faible ; elle varie ensuite de manière exponentielle, atteint une valeur maximale puis régresse. Pour chaque espèce, il existe une température optimale de croissance voisine en général de 25 à 30 °C. La diminution de vitesse aux températures élevées s'explique par la dénaturation des enzymes. La plupart de celles intervenant dans la photosynthèse sont thermosensibles.

b- Le thermopériodisme

La périodicité journalière de la température influe sur la croissance. Le thermopériodisme désigne la sensibilité manifestée par les plantes à ce phénomène et les effets qui en résultent.

Le maintien d'une température égale durant le jour et la nuit est moins favorable à la croissance que l'existence d'une différence. La croissance est supérieure lorsque la température moyenne de la période éclairée est supérieure. L'écart doit être de 7 à 8 degrés entre les températures diurne et nocturne. Par contre, l'inverse est défavorable.

Les effets de la thermo périodicité n'apparaissent donc que lorsqu'elle est associée à la photo périodicité. Par exemple, la germination de nombreuses espèces est plus rapide lorsque la température oscille autour d'une valeur favorable que lorsqu'elle est stable. L'alternance des températures est également favorable à la levée de dormance des embryons et des bourgeons.

Les effets du thermopériodisme se traduisent par un accroissement du système racinaire et une production d'hormones plus importante. Pour les expliquer, plusieurs hypothèses sont évoquées :

- une réduction de la respiration consécutive à l'abaissement de température ;
- un ralentissement des activités métaboliques propice au «désengorgement» cellulaire des assimilats de la photosynthèse ;
- un effet sur la synthèse hormonale intéressant différentes parties de la plante.

c- Action des températures extrêmes

Lorsque les végétaux ne sont pas en vie latente, les températures extrêmes sont peu favorables, voire très défavorables à la croissance. Le froid occasionne des dégradations aux structures vivantes qui peuvent être fatales aux plantes les températures élevées perturbent aussi les manifestations biologiques.

d- Action des températures élevées

Les températures élevées ont aussi une action sur les plantes. Accompagnées d'un faible état hygrométrique, elles provoquent par exemple l'échaudage chez les céréales. La migration des réserves vers le grain est perturbée, le pois spécifique baisse. Le grain est surtout sensible du stade laiteux au stade pâteux, phase habituellement marquée par une élimination d'eau et une accumulation importante d'amidon.

Les températures supérieures à 25-30 °C ralentissent le grossissement des tubercules de pomme de terre. De telles températures contrarient aussi la fécondation. Chez le maïs, la fertilité du pollen diminue. Chez le pois, les graines avortent dans les gousses ; la période sensible se situe 5 à 10 jours après la floraison.

4.2.4. Vie latente et dormance

Durant des périodes, la croissance de certains organes peut être arrêtée : la plante est en vie ralentie. Les échanges avec l'extérieur sont réduits au strict minimum compatible avec le maintien des structures vivantes. La respiration est limitée, il ne se produit aucune synthèse ni constitution de réserves.

Cette possibilité permet aux graines, aux bourgeons et aux tubercules de résister plus facilement à des conditions d'environnement peu favorables. L'entrée en vie ralentie se produit sous l'action de facteurs externes (lumière, conditions nutritives, etc.) ou d'un déterminisme interne. Elle s'accompagne souvent de modifications morphologiques et physiologiques.

Le retour à des conditions plus favorable de croissance n'entraîne pas immédiatement la reprise des manifestations vitales. L'organisme présente une inaptitude interne au retour à la vie active : il est en état de dormance.

La levée de dormance nécessite des transformations physiologiques qui produisent des facteurs physiques comme le froid, la longueur du jour, etc. On peut aussi lever artificiellement la dormance à l'aide de substances chimiques. Une application de rindite lève la dormance des tubercules de pomme de terre. On peut aussi prolonger la dormance en maintenant les tubercules à faible température (température de conservation pour les pommes de terre) ou en appliquant des substances chimiques comme l'hydrazide maléique.

4.2.5. Rythmes de croissance et de différenciation

La croissance est en fait un phénomène continu qui se réalise à vitesse variable. Elle présente des rythmes de périodicités journalière et annuelle en relation avec les variations des conditions externes et le fonctionnement propre du végétal.

Le rythme journalier est lié à l'éclairement et à la température (thermopériodisme). A ces causes externes s'ajoutent des causes internes encore assez mal connues.

Les rythmes annuels, résultant de l'alternance des saisons, jouent un rôle considérable dans l'évolution des plantes. La croissance des plantes annuelles est maximale en saison des pluies, lorsque les conditions externes sont les plus favorables (humidité, température, lumière).

Il existe également des rythmes morphogénétiques. L'apparition des organes se reproduit avec une certaine régularité. Chez le maïs, par exemple, l'émergence de deux feuilles successives ou phyllochrone correspond à une somme de température assez fixe pour chaque génotype.

4.3. DEVELOPPEMENT DE LA PLANTE

4.3.1. Notion de développement

Le développement représente l'ensemble des transformations qualitatives de la plante liées à l'initiation et à l'apparition de nouveaux organes. Contrairement à la croissance, le développement est un phénomène repérable dans le temps. Il s'agit d'événements discrets qu'on peut observer à un instant donné : germination des graines suite à leur imbibition, émergence des plantules, initiation florale, maturité des graines, mort du végétal.

Comme pour la croissance, on distingue la phase de développement végétatif et la phase de développement reproducteur. Durant la première phase et après la germination, la plante passe de l'état juvénile à un état où elle se ramifie et multiplie ses organes végétatifs (feuilles, tiges, racines). La phase de développement reproducteur est marquée par la fabrication d'organes d'accumulation de la matière sèche.

4.3.2. Cycle de végétation et cycle de culture

4.3.2.1. Cycle de végétation

Le cycle de végétation comprend deux états successifs : l'état végétatif et l'état reproducteur. Chaque état comporte plusieurs étapes ou phases séparée par des stades : germination, levée, apparition d'organe végétatif, floraison, fécondation, fructification et maturation, des graines.

Etat végétatif

L'état végétatif débute avec la germination qui correspond à la croissance de l'embryon. Cette phase d'installation, très importante pour la production, conditionne toutes les autres. Au stade « levée » la plantule apparaît et acquiert progressivement une vie autonome. Par la suite, le nombre, la taille et le poids des organes (tiges, feuilles, racines) augmentent. Les principales étapes du cycle de végétation sont présentées ci-après.

a. Germination

Sur le plan physiologique, la germination consiste en la sortie de l'embryon hors de l'enveloppe de la graine. Il s'agit de la première phase du cycle de végétation. La graine qui peut se conserver pendant longtemps, passe d'un état de vie ralentie (dormance) à un état de vie active. Durant la germination, l'embryon reprend sa croissance momentanément interrompue. Sur le plan pratique, la germination correspond à une phase de croissance souterraine.

Pour germer, les graines exigent certaines conditions de milieu : température, eau, oxygène et propriétés mécaniques. Certaines sont en outre sensibles à la lumière. Comme les réserves sont limitées et le jeune organisme vulnérable durant la germination (champignons), la réalisation du lit de semences assurant la satisfaction des exigences permet de réduire la durée de germination.

Les principales étapes de la germination sont :

- o l'imbibition ;
- o le gonflement de la semence ;
- o l'accroissement des activités métaboliques ;
- o la croissance de l'embryon ;
- o l'émergence des plantules.

Une graine qui germe consomme plusieurs mm^3 d'oxygène par heure. La demande est facilement satisfaite en conditions normales. La germination est ralentie si la teneur en oxygène du sol baisse. De très faibles teneurs l'inhibent totalement.

b. Levée

La germination se termine avec l'apparition de la tigelle à la surface du sol. L'apparition a eu lieu au dépend des réserves jusqu'à ce que les besoins carbonés et énergétiques du jeune organisme soient assurés différemment. Le jeune organisme passe progressivement d'un mode de vie hétérotrophe à un

mode autotrophe. La phase germination-élevée est une étape essentielle de l'implantation d'une culture et par voie de conséquence de l'élaboration du rendement.

Pour la plupart des espèces cultivées qui se propagent par des graines, 7 à 30 jours après la germination, l'**embryon** puis la **plantule** sont entièrement dépendants, sauf pour l'eau, de la **réserve** d'éléments nutritifs stockés dans la semence (amidon, lipides, protéines et acides aminés, minéraux essentiels, etc.). Bien que toutes les semences contiennent des réserves, il existe une grande diversité d'organes de stockage : cotylédons dans le cas des légumineuses, endosperme dans le cas des céréales.

La période de croissance représente l'essentiel de la phase végétative où seuls les organes végétatifs se développent (racines, tiges et feuilles).

Etat reproducteur

Après un temps variable selon les espèces, un « virage floral » s'amorce. Le passage à l'état reproducteur se prépare, conditionné par des facteurs internes et externes (température, lumière etc...). Au cours d'une phase d'induction florale, diverses transformations biochimiques totalement invisibles de produisent. Suit alors une phase d'initiation où les pièces florales apparaissent à l'état d'ébauches.

La mise à fleur ou floraison peut suivre immédiatement ou être différée selon la plante. En général, le développement végétatif s'arrête lors de l'entrée à l'état reproducteur. Pour la plupart des espèces, il existe un antagonisme entre le développement de l'appareil végétatif et celui des organes reproducteurs.

Chez les plantes à graines, l'état reproducteur comporte trois stades : la floraison, la fécondation et la fructification. Les phases correspondantes sont très importantes pour la production et la multiplication ; les graines sont aussi des grains.

a. Floraison

La floraison est le début de la phase reproductrice. Elle correspond à l'épanouissement des fleurs, aboutissement des transformations commencées durant l'état végétatif. Le stade « floraison » est facile à repérer ; sa date caractérise la précocité des espèces. Les plantes se classent en trois grandes catégories selon la précocité du virage floral :

- les plantes annuelles, sont celles qui effectuent leur cycle en une année, c'est à dire que la graine semée donnera une plante fournissant des graines la même année (niébé) ;
- les plantes bisannuelles, celles dont le cycle de végétation s'échelonne sur deux années : la première année la graine donne une plante qui accumule des réserves dans un organe (racine, tige, feuille) et la deuxième année, les réserves accumulées vont permettre, après le froid hivernal, d'obtenir les graines servant à multiplier la plante (exemple : carotte, navet, chou, laitue), et
- les plantes pérennes, celles dont une partie du cycle de végétation se renouvelle tous les ans durant plusieurs années ; à partir de la graine il se forme une plante qui, arrivée à un certain stade de croissance, va produire des graines tous les ans (exemple : tomate, gombo, cacaoyer, caféier).

b. Fécondation

La fécondation suit la floraison. C'est la rencontre des organes mâles et femelles de la plante.

c. Fructification

La fructification correspond à la formation du fruit qui va porter les graines. Les modalités de fructification sont très variables, ce qui entraîne une immense variété dans la forme et la constitution des fruits.

d. Maturation de la graine

La maturation de la graine est une étape importante. La graine est issue du développement de l'ovule fécondé par l'organe mâle contenu dans le grain de pollen. Dans le fruit, elle prend sa forme et sa taille définitive. En revanche, sa maturité n'est pas toujours atteinte, aussi distingue-t-on la maturité de récolte et la maturité physiologique.

- La maturité de récolte représente le stade de maturation qui permettra une bonne conservation de la graine après la récolte ; en général, elle est atteinte lorsque le taux d'humidité est inférieur à un certain seuil (maïs : 14 à 16%) ;
- La maturité physiologique est obtenue après la maturité de récolte. Elle correspond à la maturation de la graine permettant sa germination si elle est mise en conditions favorables. Elle est atteinte après un certain temps de dormance plus ou moins important selon l'espèce.

4.3.2.2. Cycle de culture

Le cycle de culture est la partie du cycle de végétation qui correspond à la durée de la culture. En effet, de nombreuses productions végétales ne nécessitent pas l'accomplissement complet du cycle de végétation. Le cycle de culture peut être interrompu à différents stades du cycle de végétation.

Par exemple :

- stade levée : maïs et mil pour brasseries, luzerne ;
- au stade floraison : productions florales ;
- au stade fructification : tomate, concombre ;
- au stade maturation de la graine : céréales.

Chez les cultures pérennes, on distingue :

- *le cycle complet de culture* : durée entre la mise en place de la culture et sa destruction (longévité)
- *le cycle annuel de culture* : durée entre le démarrage de la végétation chez les plantes herbacées ou le débourrement des bourgeons chez les arbres et la récolte.

Le producteur ne s'intéresse qu'au cycle de culture de la plante. Son objectif est d'obtenir la meilleure production qualitative et quantitative. Il doit donc veiller à ce que toutes les phases du cycle de culture se passent dans les meilleures conditions possibles.

4.4. REGULATION INTERNE DE LA CROISSANCE ET DE LA DIFFERENCIATION.

Outre les facteurs du milieu, la croissance et la différenciation des plantes sont aussi sous la dépendance de facteurs internes : les substances de croissance. Produites par les plantes elles-mêmes, ces substances agissent à doses infimes et sont capables de modifier quantitativement et qualitativement les processus physiologiques. Elles rassemblent deux types de composés oligodynamiques :

- des hormones végétales ou phytohormones ayant des effets stimulants ou inhibiteurs selon la dose. Elles portant un « message » d'un organe à un autre ;
- des substances agissant sur le métabolisme fondamental tels les acides aminés, des vitamines, etc.

4.4.1 Hormones végétales naturelles

Dans les plantes, on trouve plusieurs types d'hormones : les auxines, les gibbérellines, les cytokinines, l'éthylène et les oligosaccharines.

Auxines

Les auxines agissent sur la prolifération cellulaire en stimulant la mitose au sein des méristèmes secondaires. A doses moyennes, elles favorisent la formation de tissus conducteurs, de jeunes pousses en vie active et de nouveaux bourgeons.

Leur action sur le développement racinaire est plus complexe. La fourniture d'auxines aux racines par les feuilles est progressive. Le taux s'élevant, l'élongation racinaire est d'abord favorisée, puis un ralentissement est observé et finalement l'accumulation entraîne l'apparition de nombreuses radicules.

Gibbérellines

Les gibbérellines sont synthétisées dans tous les tissus végétaux où des divisions actives se produisent : les apex des jeunes pousses et des racines, les feuilles. Mais, contrairement aux auxines, leur circulation n'est pas polarisée.

Les gibbérellines provoquent différents effets :

- l'élongation et la prolifération des cellules de la tige entraînant l'allongement des entre-nœuds et favorisant la mise à fleur. chez certaines plantes, où la mise à fleur est conditionnée par le blocage des entre-nœuds, une application de gibbérellines peut remplacer la vernalisation ;
- l'augmentation de la surface foliaire sans modification sensible de la quantité de chlorophylle ;
- la levée de la dormance embryonnaire.

Dans la plupart des cas, les gibbérellines complètent l'action de l'auxine. Elle lui est rarement opposée (les gibbérellines n'ont guère d'effet rhizogène). Gibbérellines et auxines interagissent souvent, leur présence simultanée est nécessaire lors de l'allongement des entre-nœuds.

Cytokinines

Les cytokinines, découvertes plus récemment que les autres hormones, sont essentiellement synthétisées par les racines. De structure proche des acides nucléiques, elles agissent principalement sur la division cellulaire et la morphogénèse.

Les cytokinines semblent en effet indispensables à la croissance cellulaire, agissant à la fois sur la mitose (duplication des chromosomes) et la division cellulaire proprement dite. Elles provoquent également l'augmentation de la taille des cellules et stimulent la synthèse des protéines. Elles ont un effet inhibiteur sur s'élongation longitudinale des tiges et des racines mais en favorisent le grossissement.

L'organogenèse est réglée par un équilibre entre la concentration en auxines et en cytokinines ; les premières sont déterminantes dans la rhizogenèse, les secondes dans la formation des rameaux.

Ethylène

Les tissus végétaux produisent de l'éthylène ; la production est stimulée par l'auxine. L'éthylène est elle-même une véritable action hormonale qui accélère la maturation des fruits et inhibe l'élongation racinaire.

Oligosaccharines

Les Oligosaccharines, dont la découverte est récente (1983), sont présentes dans les parois cellulaires de diverses espèces (soja, maïs, etc). Elles sont constituées de polyosides formés de 2 à 15 oses. Chaque oligosaccharine semble commander une fonction particulière : défense contre les maladies, croissance et différenciation, etc.

4.4.2 Substances hormonales de synthèse

Des substances de structure chimique voisine des hormones naturelles ont été synthétisées. Elles agissent souvent comme des inhibiteurs de croissance. Elles sont utilisées dans différents domaines : contrôle de la verse, désherbage, séchage, etc. Parmi elles on trouve :

- Des substances proches des auxines présentant des effets comparables. Plus résistantes à la dégradation par les enzymes cellulaires, leur accumulation dans certains tissus entraîne la mort des plantes. Les plus courantes sont des dérivés des acides di et trichlorophénoxypropionique (2,4 D et 2,4,5 T) utilisées comme herbicides sélectifs des graminées avant leur interdiction, les dicotylédones étant en effet beaucoup plus sensibles ;
- Le chorméquat chlorure ou chlorure de chlorocholine (CCC) qui bloque la synthèse des gibbellines et agit comme un réducteur de croissance. Il est utilisé dans la lutte anti-verse sur céréales. L'addition de

chlorure de choline augmente son efficacité et accroît la production. Le chlorure de choline est naturellement présent chez les plantes où il stimule la synthèse des lipides ;

- D'autres produits comme l'éthephon (acide chloro 2 éthyl phosphorique) sont capables de libérer de l'éthylène. Associé avec le mépiquat chlorure (chlorure de diméthyl 1,1 pipéridène) qui freine l'élongation cellulaire et épaissit les tissus, on l'utilise pour son action anti-verse.

Tous ces produits doivent être utilisés à une dose et un stade physiologique précis, variables selon les espèces cultivées.

4.4.3 Autres substances de croissance

D'autres substances agissent sur la croissance sans porter des messages comme les hormones ; elles interviennent dans les processus fondamentaux du métabolisme. Il s'agit d'acides aminés, de vitamines, etc.

Certains tissus, incapables de les synthétiser, doivent les recevoir d'autres parties des plantes. En cultures tissulaires, on les apporte. Des acides aminés comme la lysine ou l'arginine sont nécessaires à la constitution de certaines enzymes. Il en est de même pour des vitamines hydrosolubles comme les vitamines B1, B2, ou C. En cultures tissulaires, on constate par exemple que certaines souches cellulaires ou des racines isolées sont capables de les synthétiser en quantité suffisante.

4.5. MULTIPLICATION DES PLANTES

La multiplication des plantes a souvent été assurée par deux méthodes : la multiplication asexuée ou végétative et la multiplication sexuée ou générative. Ces modes de reproduction (sexuée et asexuée) peuvent co-exister (simultanément), chez la même espèce végétale. Les biotechnologies permettent une multiplication plus rapide des plantes cultivées.

4.5.1. Multiplication sexuée

La multiplication normale des végétaux se fait par la graine. La graine issue de la fécondation de l'ovule est la voie de la multiplication sexuée et cette multiplication est réalisée par le semis. *Exemple : maïs, papayer, le rônier, arachide.*

4.5.2. Multiplication végétative

La multiplication asexuée est la reproduction de la plante à partir de tout ou partie de ses organes prélevés sur une plante appelée plante mère et se développant dans le milieu sans avoir subi la reproduction sexuée. Toutes les plantes issues de la multiplication végétative sont génétiquement identiques. La multiplication conserve les caractères des parents.

Les principaux procédés de multiplication végétative sont :

- le *bouturage* (on sépare un fragment de végétal (rameau, feuille, méristème, etc) que l'on maintient en vie afin qu'il reforme les organes qui lui manquent). Le bouturage est la méthode de multiplication de prédilection du manioc et de la patate douce.
- le *marcottage* (on provoque l'apparition de racines sur un rameau non séparé du pied mère qui reproduira une nouvelle plante). On peut réaliser un marcottage aérien ou un marcottage souterrain. Cette technique est utilisée sur les arbres fruitiers comme le safoutier.
- la division de touffes (consiste à diviser la souche de la plante en plusieurs parties qui produisent à nouveau autant de plantes, cas du drageonnage). Certaines ignames sont multipliées avec cette technique.
- le *greffage* : le principe est d'unir deux végétaux, le porte greffe et le greffon par soudure des tissus qui sont mis en contact. Cette méthode est abondamment utilisée sur les arbres fruitiers dont les agrumes, les manguiers, cacaoyer, etc.
- la technique consistant à produire des plants à partir des fragments de tige (PIF). Utilisée abondamment sur le bananier, elle consiste à "traumatiser" les bourgeons apicaux, ce qui permet la prolifération de bourgeons secondaires qui peuvent être sevrés et engendrer de nouveaux plants.

PIF (Plants issus des fragments des tiges)

La technique consistant à produire des plants à partir des fragments de tige (PIF) est utilisée abondamment sur le bananier. Elle consiste à "traumatiser" les bourgeons apicaux, ce qui permet la prolifération de bourgeons secondaires qui peuvent être sevrés et engendrer de nouveaux plants.

Apomixie

L'apomixie est le phénomène biologique de l'asexualité. Dans le cas de l'apomixie, le grain de pollen de l'espèce est stérile et c'est l'ovule seul qui fait le travail reproductif. La semence née de ce processus est un clone, c'est à dire ici, une copie exacte de la plante mère. Au lieu d'avoir une combinaison de gènes variant au gré de la reproduction sexuée, on se trouve en présence d'une combinaison stable, théoriquement invariable dans le temps.

L'apomixie reste un grand mystère de la botanique sur lequel les spécialistes se penchent avec beaucoup de passion. Des chercheurs sont engagés dans une course effrénée pour découvrir le gène ou la combinaison de gènes qui commande la reproduction asexuée.

4.5.3. Multiplication *in vitro*

On réalise le micro- bouturage en laboratoire à partir d'organes ou de tissus extrêmement petits. La technique est utilisée en amélioration des plantes et en multiplication des végétaux.

Le fondement de cette technique est la **totipotence** qui stipule que toute cellule végétale est, selon sa spécialisation, du moment qu'elle est vivante et possède un noyau, capable de reproduire la plante entière d'où elle provient.

Le principal matériel végétal utilisé pour la multiplication est constitué du méristème, (zone sou-jacente au bourgeon terminal) et des fragments d'organes divers appelés explants qui peuvent être des fragments de bourgeon, de tige, de pétiole, de feuille ou de racine. L'une des limites actuelles de du développement de cette technique réside dans la mise au point de milieux de culture appropriés.

On réalise le micro- bouturage en laboratoire à partir d'organes ou de tissus extrêmement petits. La technique est utilisée en amélioration des plantes et en multiplication *in vitro* des végétaux. Le fondement de cette technique est la **totipotence** qui stipule que toute cellule végétale est, selon sa spécialisation, du moment qu'elle est vivante et possède un noyau, capable de reproduire la plante entière d'où elle provient.

Le principal matériel végétal utilisé pour la multiplication est constitué du méristème, (zone sous-jacente au bourgeon terminal) et des fragments d'organes divers appelés explants qui peuvent être des fragments de bourgeon, de tige, de pétiole, de feuille ou de racine. La limite actuelle de du développement de cette technique réside dans la mise au point de milieux de culture appropriés.

4.6. CHOIX DE L'ESPECE ET DE LA VARIETE

4.6.1. Choix de l'espèce

Dans une région, le sol et le climat sont définis par un certain nombre de caractéristiques. Les plantes de leur côté ont des exigences plus ou moins marquées vis à vis :

- du climat ex : hauteur d'eau, températures (optimale, minimale, maximale), thermoperiodisme, photoperiodisme, etc.
- du sol ex : structure, pH, richesse en éléments minéraux, etc.

En comparant les besoins aux possibilités offertes par le milieu, on peut dresser une liste des cultures possibles. Pour les espèces retenues, le climat est susceptible de provoquer des fluctuations de rendement plus ou moins importantes. Pour chacune d'elles, il est important de déterminer les itinéraires techniques qui permettent l'obtention d'un rendement moyen élevé pour une période assez longue.

Toutefois, la création de variétés nouvelles ayant des exigences différentes permet de modifier l'aire de culture d'une plante.

Par exemple la création de variétés précoces de maïs a permis de produire cette culture dans des zones de latitude élevée à climat relativement plus froid que dans sa zone de domestication.

4.6.2. Choix de la variété

A l'intérieur de chaque espèce, chacune des variétés a des caractéristiques propres. La meilleure variété pour un producteur est celle qui donne le meilleur rendement optimal en produits de qualité. Les principaux critères qui devraient guider le choix de l'agriculteur sont : la productivité, la régularité du rendement et la qualité du produit récolté.

Productivité

La productivité est l'aptitude d'une variété à fournir un rendement élevé, lorsque placée dans le milieu qui lui convient le mieux ou lorsqu'on lui applique les meilleures techniques culturales connues. On peut

définir la productivité peut s'exprimer en pourcentage de celle de la variété la plus connue dans l'espèce considérée.

Par exemple, une variété ayant un indice de productivité de 107% est plus productive que celle ayant un indice de 100%.

La productivité peut être définie pour l'élément utile de la plante.

Par exemple :

- la graine chez le maïs,
- le sucre chez la canne à sucre industrielle,
- la teneur en huile pour les oléagineux,
- la matière sèche pour les plantes fourragères.

Régularité du rendement

La régularité du rendement est déterminée par l'adaptation de la variété et notamment l'adaptation au milieu physique, au milieu biologique et aux techniques culturales.

L'adaptation au milieu (climat et sol) est fonction de la **précocité** et de la **rusticité**.

- La précocité est un facteur important. Chez le maïs par exemple, les variétés tardives sont les plus productives mais, dans un milieu donné, il est fondamental de choisir une variété qui peut arriver à maturité. A l'Extrême-Nord du Cameroun, les variétés tardives sont peu appropriées à cause de leur cycle plus long.
- Une variété rustique est une variété peu exigeante, c'est à dire, qui ne souffre pas trop dans un milieu pauvre et qui présente des caractères de résistance marqués. Par exemple la résistance à la sécheresse, la résistance à l'excès d'humidité, etc. La rusticité est souvent incompatible avec un niveau de production élevé.

L'adaptation au milieu biologique concerne le comportement vis à vis des ennemis et des maladies. En effet, chaque espèce est attaquée par de nombreux ennemis mais certaines variétés sont plus résistantes que d'autres.

L'adaptation aux techniques culturales est relative à la réponse aux itinéraires et aux outils de production. En effet, l'évolution des techniques culturales peut augmenter l'intérêt pour certaines variétés par rapport à d'autres.

Par exemple, la mise au point et l'utilisation d'une machine pour la récolte de la tomate a accru l'adoption de variétés de tomate à croissance déterminée (olivettes).

Qualité du produit récolté

Le facteur qualité est de plus en plus important pour des marchés de plus en plus compétitifs. A prix égal, le client avisé choisira de préférence le produit de meilleure qualité.

En milieu traditionnel, le choix des variétés s'effectue souvent auprès d'autres agriculteurs. Des compagnies semencières proposent aujourd'hui des catalogues renfermant chaque année, de nouvelles variétés. Les variétés sont présentées par des fiches descriptives qui en vantent les caractéristiques. Toutefois, il est important de procéder à une expérimentation préalable pour comparer les nouvelles variétés à celles existantes. L'agriculteur devrait avoir accès aux résultats de ces types d'essais afin de bénéficier des progrès variétaux.

Ainsi, avant une nouvelle adoption, il est important de vérifier que la variété est originale et fixe. La connaissance de sa valeur culturale est aussi essentielle :

- la variété présentée comme nouvelle doit être distincte de celles qui existent déjà.
- la nouvelle variété doit être fixe, c'est à dire qu'on devrait la retrouver identique à ce qu'elle était l'année précédente.
- la valeur culturale se rapporte aux critères de choix énoncés plus haut. Ils devraient être comparés aux témoins.

Il est important de suivre les progrès des espèces végétales pour bénéficier des améliorations variétales.

4.7. SEMENCES VEGETALES

4.7.1. Typologie des semences

Une fois les variétés choisies, l'agriculteur doit se procurer des semences de bonne qualité pour réaliser les semis. Si la semence est inapte à germer, si elle porte des germes de maladies, si son potentiel génétique est insuffisant, tous les autres facteurs de production seront inefficaces et la plante ne pourra pas exploiter favorablement les possibilités offertes par le milieu.

On distingue globalement deux types de semences : les semences sèches et les semences aqueuses. Les semences sèches sont des organes issus de la reproduction sexuée. Elles renferment 7 à 16% d'eau selon les espèces (les oléagineux ont une teneur en eau plus faible). Les semences aqueuses sont des parties végétatives des plantes et elles contiennent 70 à 85% d'eau (ex : les bulbes d'oignon).

4.7.2. Qualités d'une bonne semence

Une bonne semence doit être capable de germer en donnant des plantes viables, appartenir à l'espèce et à la variété désirée et elle doit avoir un bon état sanitaire.

Bonne faculté germinative et plants viables

La faculté germinative s'exprime par le pourcentage de semences germées au bout d'un temps donné caractéristique pour chaque espèce.

L'énergie germinative est mesurée par le pourcentage de semences germées dans le premier tiers de la durée totale de germination des graines de l'espèce considérée (4 à 7 pour la plupart des espèces).

Une germination rapide donnera des plantules plus vigoureuses qui se défendraient mieux contre les aléas du climat et les ennemis des cultures.

Appartenance à l'espèce et à la variété désirée

La conformité avec les noms d'espèces et de variétés indiquées est fondamentale. La couleur, la taille, etc. des semences permettent de reconnaître l'espèce à laquelle elles appartiennent.

La pureté est la proportion des semences conformes aux indications d'espèces et de variété données. La pureté d'espèce s'exprime par le pourcentage en poids des semences conforme à l'espèce considéré. Parmi les corps étrangers ou les éléments indésirables on retrouve souvent des matières inertes (terre, pierres, etc.) des semences cassées, des semences étrangères à l'espèce considérée.

Bon état sanitaire

Les semences peuvent être porteuses de germes de diverses maladies susceptibles de se transmettre à la plante au moment de la germination. Par exemple des champignons, des bactéries ou des virus.

Exercice

Quel lot de semences A, B, C ou D choisiriez vous sur la base du nombre de graines de maïs ayant germé après 8 jours et pourquoi ?

| LOTS | Nombre de jours après semis | | | | | | | | TOTAL |
|------|-----------------------------|----|----|----|----|----|---|---|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| A | 0 | 4 | 14 | 36 | 20 | 16 | 8 | 2 | 100 |
| B | 0 | 6 | 20 | 34 | 27 | 8 | 0 | 0 | 95 |
| C | 0 | 0 | 0 | 30 | 50 | 8 | 0 | 0 | 88 |
| D | 0 | 10 | 35 | 25 | 5 | 0 | 0 | 0 | 75 |

La qualité de la semence est l'un des premiers critères de la réussite d'une culture.

4.7.3. Provenance des semences

Les semences utilisées par un agriculteur peuvent avoir deux principales provenances : les semences produites dans l'exploitation ou l'achat dans le commerce. Le renouvellement de la souche des semences s'impose pour les variétés hybrides (maïs) et pour les clones à cause des maladies de dégénérescence (pomme de terre). Pour les lignées pures, le renouvellement n'est pas indispensable, mais souhaitable.

Les semences produites sur l'exploitation doivent être prélevées sur une parcelle qui a reçu les soins culturaux appropriés. L'évaluation de la faculté germinative du lot de semence à utiliser est toujours souhaitable avant le semis.

La semence est le point de départ de la production. La dépense en semence ne représente qu'une petite partie des charges (comparé à la fertilisation par exemple) et envisager une économie inappropriée sur ce poste peut être lourde de conséquences pour l'ensemble de la production.

4.7.4. Préparation des semences

Une fois les semences choisies, il peut être nécessaire de les traiter pour favoriser la germination ou le développement de la plantule. La préparation peut être de nature physique, chimique ou biologique.

- la préparation physique consiste souvent au séchage, triage, calibrage, chauffage, etc

- la préparation chimique est destinée à détruire les germes de champignons, et à protéger la graine en germination ou la jeune plantule. On pourrait alors traiter les semences aux fongicides ou aux insecticides.
- la préparation biologique consiste souvent en l'inoculation de semences avec des micro-organismes bénéfiques. C'est le cas de l'inoculation de légumineuses par les *Rhizohium*.

Ces traitements peuvent être appliqués par enrobage des semences.

4.7.5. Tests de viabilité et de germination

Il est important de procéder au préalable à un test de viabilité et de germination sur un lot de semences avant son utilisation. Les tests souvent recommandés sont :

- Le test d'ablation des semences. Les semences d'un échantillon sont sectionnées et on observe si l'embryon est présent. Toutefois la présence d'un embryon ne signifie pas que ce dernier est vivant.
- Le Test de flottation. Très souvent, les semences qui flottent ne sont pas de bonne qualité. Elles peuvent alors être facilement éliminées au dessus du plan d'eau. Toutefois les semences riches en huile ont tendance à flotter.
- La photographie aux rayons X. Elle est comparable au test d'ablation car elle permet de déterminer si l'embryon est présent ou non.
- Le Test de germination : ce test est utile pour les semences non dormantes **Q**. Elles sont mises à germer et le pourcentage des semences qui germent par rapport au nombre de semences utilisées est déterminé. La valeur obtenue permet d'apprécier le lot de semences ; plus la valeur est élevée, plus le lot de semences est intéressant.
- Le Test au tétrazolium. Le tétrazolium dissous dans l'eau est incolore mais prend une coloration rouge au contact de tissus vivants. En effet, les enzymes changent le sel de tétrazolium en formazan. Dans les tissus morts les enzymes n'étant pas actifs, on n'obtient pas de coloration. Les semences sont trempées dans l'eau qu'elles imbibent puis sectionnées afin d'exposer l'embryon. Elles sont ensuite placées dans une solution de tétrazolium à 0,1 ou 0,5% à température ambiante. Les portions vivantes de la semence après un temps (plusieurs heures) prennent une coloration rouge.
- Le Test de séparation de l'embryon. Ce test est utilisé pour les semences d'espèces arbustives à dormance profonde, et qui ne répondent pas aux tests de germination. Parfois l'embryon excisé viable peut démontrer une certaine activité. Par exemple, il peut prendre une coloration verte, comparativement aux embryons non viables qui restent blancs.

4.8. PEUPEMENT VEGETAL CULTIVE

4.8.1. Concept de peuplement cultivé

4.8.1.1. Notion de peuplement cultivé

En agriculture, les plantes sont cultivées en population, groupées sur un terrain d'une certaine superficie : la parcelle. De même que le développement et le fonctionnement d'une plante ne se réduisent pas à la simple addition de ceux de ses organes, ceux d'un ensemble de plantes ne se ramènent pas davantage à la somme des plantes qui le composent. L'ensemble qu'elles constituent peut être désigné comme le "peuplement végétal cultivé".

Un peuplement végétal cultivé est un ensemble de plantes d'une seule espèce ou de plusieurs espèces cultivées pour récolter un ou plusieurs produits spécifiques désirés par le producteur. C'est le résultat des interactions multiples ayant lieu au cours du développement de la culture entre les caractéristiques intrinsèques de celle-ci, les facteurs et conditions de son environnement, et les modifications imposées par les pratiques culturales sur ces caractéristiques et sur l'environnement des plantes cultivées.

4.8.1.2. Caractérisation d'un peuplement végétal cultivé

On peut distinguer deux types principaux de peuplement :

- des peuplements mono spécifiques, les plantes ont sensiblement le même âge et sont génétiquement assez semblables ;
- des peuplements plurispécifiques comme les cultures associées. Les avantages qui leurs sont reconnus sont : une meilleure utilisation de ressources limitées (terre, eau, fertilisation) et une répartition des risques face aux aléas (climat, parasitisme).

Malgré l'apparence, un peuplement cultivé présente toujours une certaine hétérogénéité. Les caractéristiques propres des plantes (probablement liées), la qualité de l'implantation (profondeur, régularité du semis), l'hétérogénéité du milieu (sol et climat) en sont les causes essentielles.

Dans ces conditions, la notion de stade cultural se substitue à celle de stade végétatif considéré pour une plante. Un stade cultural sera atteint lorsqu'une proportion donnée de plantes dépasse le stade végétatif correspondant ; la proportion retenue est, selon le cas, de 50 à 90%. La date d'apparition se détermine en suivant, en fonction du temps, l'évolution du pourcentage de plantes l'ayant dépassé.

Le peuplement végétal cultivé échange avec le milieu environnant, le sol et l'atmosphère, les éléments indispensables à son fonctionnement. Les principaux sont l'énergie, le gaz carbonique, l'eau et les éléments nutritifs. Une compétition existe tant entre éléments de peuplement cultivé qu'entre les nombreuses populations végétales et animales qui coexistent pour l'occupation, l'appropriation et l'utilisation de l'espace aérien et souterrain.

Au sein du peuplement s'exerce des phénomènes de concurrence surtout à l'égard de la lumière et des ressources nutritives. La concurrence est plus intense lorsque plusieurs espèces végétales sont présentes. La vitesse de développement plus rapide de l'une d'elle entraîne alors un effet de dominance très marqué. C'est le cas, par exemple, lorsqu'une légumineuse et une céréale sont semées ensemble. Le développement de la légumineuse ne se produit d'après la récolte de la céréale.

Pour réduire la concurrence, l'agriculteur limite l'expansion des adventives et parasites. Il favorise ainsi l'installation, le développement et le fonctionnement du peuplement végétal cultivé.

Un microclimat existe au sein du couvert végétal. Il est déterminé par le climat local et la présence du peuplement lui-même. La tension de vapeur d'eau y est en général plus élevée et la température légèrement différente de celle mesurée à l'air libre. Les plantes se trouvent donc dans des conditions climatiques très légèrement différentes de l'environnement local.

Plusieurs critères peuvent être utilisés pour caractériser un peuplement végétal. Il s'agit :

- o Du port du végétal (dressé, à croissance verticale cas des graminées, étalé ou prostré, à croissance horizontale cas de certaines légumineuses, etc.) ;
- o De l'architecture du couvert (Densité de peuplement, Structure de peuplement, Inclinaison des feuilles, Indice foliaire du couvert, etc.) ;
- o Du système racinaire (Système racinaire fasciculé comme pour le blé Système racinaire pivotant comme pour la luzerne, Système rhyzomateux comme pour le gazon, etc.).

4.8.2. Fonctionnement photosynthétique du peuplement cultivé

4.8.2.1. Absorption du rayonnement incident

Le sommet du couvert végétal réfléchit environ un quart du rayonnement reçu (16 à 26%). Le rayonnement résiduel ou rayonnement net se propage dans la masse végétale où il est en partie utilisé. Sa trajectoire présente de multiples réflexions. L'énergie est absorbée partiellement par des feuilles à chaque strate. L'atténuation du rayonnement dépend de l'indice foliaire "I.F." et du coefficient d'extinction "K".

Le rayonnement pénétrant comporte des radiations utilisables pour la photosynthèse (400 à 700 nm) et des radiations infrarouges ou thermiques ; la répartition entre les fractions absorbée, transmise et

réfléchi, diffère selon la nature des radiations. Lorsqu'une fraction importante d'énergie parvient au sol, le couvert est dit "ouvert" ; à l'inverse lorsqu'il est "fermé" le sol ne reçoit que très peu d'énergie. Globalement, l'interception de la lumière donc l'assimilation d'un peuplement dépend du port des végétaux et de l'indice foliaire.

En culture ouverte, l'assimilation dépend surtout de la valeur de l'indice foliaire. Mais l'efficacité de la lumière est faible car les éclaircissements élevés sont mal utilisés. Au contraire à l'intérieur d'un couvert fermé et plus spécialement lorsque le port des plantes est dressé, le rayonnement est réfléchi de multiples fois et bien que progressivement atténué, il demeure suffisant pour assurer une assimilation élevée.

4.8.2.2. Efficacité photosynthétique

L'efficacité photosynthétique mesure la quantité de matière photosynthétisée par rapport à la quantité d'énergie disponible. Celle d'un couvert végétal est assez élevée, et comparativement plus élevée que pour une plante isolée. En l'absence de facteurs limitant (eau, température, facteurs nutritifs), la production journalière maximale d'un peuplement végétal cultivé peut atteindre 200 kg de matière sèche par hectare. Mais, comme la plupart des cultures n'occupent le terrain qu'une fraction de l'année, le taux moyen annuel de conversion de l'énergie solaire est faible. Il est de l'ordre de 0,5 à 1% et n'atteint 2 à 3% que pour les cultures toujours en place comme les prairies naturelles.

En résumé, la production brute d'un couvert végétal est commandée par deux facteurs principaux : la quantité de lumière disponible et son taux d'utilisation. Au cours d'un cycle cultural, la photosynthèse est d'abord limitée par l'assimilation nette et l'indice foliaire, ensuite elle dépend plus que de l'assimilation nette.

Pour un éclaircissement donné, la photosynthèse brute d'un couvert végétal varie avec la surface foliaire ou l'indice foliaire I.F. Aux valeurs faibles et moyennes, l'éclaircissement est bien utilisé et la photosynthèse brute lui est sensiblement proportionnelle. Pour des valeurs élevées, certaines feuilles du couvert végétal ne reçoivent plus qu'un éclaircissement insuffisant et assimilent peu. La production brute (P.B.) augmente alors moins que l'indice foliaire. Par contre les pertes dues à la respiration croissent sensiblement avec l'indice foliaire quelle que soit sa valeur. La production nette P.N. = P.B. - R considérée en fonction de l'indice foliaire est maximale pour une valeur particulière.

Pour chaque type de culture, on recherche expérimentalement la valeur de l'optimum de peuplement. Si les plantes ne tallent pas, la dose de semis s'en déduit en tenant compte des pertes éventuelles.

L'expérience révèle l'existence d'une gamme de densités optimale dont l'étendue dépend des conditions culturales. Dans les peuplements à très forte densité, la croissance de nouvelles feuilles réduit l'éclairement des feuilles existantes qui meurent à cause de l'insuffisance d'éclairement. L'indice foliaire s'autostabilise.

4.8.3. Fonctionnement hydrique du peuplement cultivé

4.8.3.1. Notions décrivant le fonctionnement hydrique des plantes

Soumis à une certaine demande atmosphérique, un couvert végétal perd de l'eau sous forme de vapeur. Pour une période donnée, la quantité d'eau perdue correspond à l'évapotranspiration réelle : E.T.R. Son importance dépend des facteurs suivants :

- la demande atmosphérique en eau ;
- le stade de développement cultural déterminant la surface foliaire évaporante, la hauteur du couvert ;
- l'alimentation hydrique dont il bénéficie.

Lorsque l'alimentation hydrique est assurée sans restriction, tous les autres facteurs restant identiques, l'E.T.R. atteint une valeur particulière : l'évapotranspiration réelle et maximale : E.T.R.M. plus simplement dénommée l'E.T.M.. L'E.T.M. ne désigne donc pas l'évapotranspiration la plus élevée au cours du cycle cultural, mais celle qui durant chacune des périodes considérées, correspond à la satisfaction complète des besoins en eau du couvert.

Au sein d'un peuplement évapotranspirant au maximum, toutes les plantes qui le composent n'ont pas la totalité de leurs stomates ouverts. Cependant, c'est à la valeur maximale de l'évapotranspiration de l'ensemble que sont réunies les conditions pour une photosynthèse potentielle maximale. L'E.T.M. est donc une valeur remarquable de la consommation d'eau et par conséquent une mesure du besoin optimum.

Somme toute, les notions concernant l'évapotranspiration, toutes relatives à un intervalle de temps, se répartissent en trois groupes distincts :

- E.P. ; E.T.P. ou E.T.P.C ;
- E.T.R. ; E.T.M. ;
- E.T.P_c.

L'évaporation potentielle E.P. est la quantité totale d'eau perdue sous forme de vapeur par une surface inerte maintenue constamment humide, lorsque seule l'énergie est limitante. L'évapotranspiration

potentielle E.T.P. est homologue de la précédente lorsque l'on considère une surface portant une culture à son plein développement. Comme l'évapotranspiration dépend de la structure du couvert végétal, on peut le rappeler en désignant celle-ci comme une évapotranspiration potentielle et culturale (E.T.P.C.). L'E.P. ; E.T.P. ou E.T.P.C présentent un certain caractère théorique. Elles constituent des limites supérieures dans chaque cas de l'évaporation ou de l'évapotranspiration possible. Elles sont utilisées comme des références.

L'évapotranspiration réelle E.T.R. correspond à des quantités d'eau réellement évapotranspirées pendant un intervalle de temps donné selon les conditions : la demande atmosphérique, les caractéristiques du couvert végétal et l'alimentation hydrique disponible. Lorsque cette dernière n'est pas restrictive, l'évapotranspiration réelle E.T.R atteint une valeur maximale : l'E.T. M.

L'E.T.P_c est le résultat de tout calcul d'évapotranspiration au moyen de formules. Les évapotranspirations calculées sont des estimations de la demande climatique.

4.8.3.2. Fonctionnement des plantes en conditions d'excès d'eau

Les espèces cultivées réagissent différemment à la présence temporaire d'un excès d'eau. Leurs réactions dépendent essentiellement des facteurs suivants :

- de la durée de la présence de l'eau ;
- du stade physiologique des plantes au moment où l'excès d'eau se manifeste ;
- des conditions de milieu : les effets sont d'autant plus marqués que l'activité physiologique générale et la transpiration sont élevées.

En conditions d'excès d'eau, on assiste généralement à une baisse de rendement. La chute du rendement occasionnée par un excès d'eau est fonction de la durée de l'engorgement.

4.8.3.3. Fonctionnement des plantes en conditions de déficit hydrique

En conditions hydriques légèrement restrictives, une culture réagit d'abord en ralentissant sa croissance ; elle réduit la formation de nouvelles feuilles afin de limiter l'évapotranspiration. Une réduction plus importante contraint la plante à fermer une certaine proportion de stomate. Il s'ensuit une diminution sensible de la photosynthèse et une moindre formation de matière végétale.

Le déficit hydrique chez les plantes est causé soit par la perte excessive d'eau, soit par une absorption inadéquate, ou par une combinaison des deux. Si l'absorption n'arrive pas à suivre la transpiration, il y

aura un stress hydrique dans la plante. Le retard de l'absorption sur la transpiration qui est la cause du déficit hydrique, observé chez nombre de végétaux, à midi, est le résultat d'une résistance importante à l'écoulement de l'eau dans la plante, et aussi du fait que la transpiration et l'absorption d'eau sont contrôlées par des ensembles différents de facteurs.

Le taux de transpiration est en effet contrôlé par l'indice foliaire et la structure du feuillage, par le degré d'ouverture des stomates et par tous les facteurs qui déterminent l'importance du gradient de vapeur d'eau entre la plante et l'atmosphère. L'absorption de l'eau, quant à elle, est influencée par le taux de transpiration, par l'importance de la zone racinaire et l'efficacité du système racinaire, et par le potentiel hydrique et la conductivité hydraulique du sol. Le déficit (stress) hydrique fait partie des contraintes de l'environnement qui peuvent empêcher ou diminuer la croissance des végétaux. Il résulte, d'un changement dans les conditions d'alimentation en eau des plantes. L'adaptation est le moyen grâce auquel les plantes survivent à des périodes de déficit hydrique. Fondamentalement, les plantes sont résistantes à la sécheresse soit par ce que leur protoplasme est capable d'endurer une déshydratation sans dommage permanent, soit parce qu'elles possèdent des caractéristiques structurales ou physiologiques qui leur permettent de ne pas subir un niveau létal de flétrissement. En matière d'adaptation des plantes au déficit hydrique on peut distinguer : la résistance (ou tolérance), l'esquive et l'évasion.

Une plante est tolérante ou résistante au déficit hydrique quand elle est capable de maintenir son activité métabolique sous de faibles potentiels d'eau, jusqu'à un point donné. La tolérance au déficit hydrique est liée à des adaptations de nature physiologique. Son degré varie selon les espèces et selon le stade de croissance. On distingue également une variation au sein d'une même espèce (comportement variétal). On distingue trois mécanismes explicatifs de la tolérance des plantes au déficit hydrique. Ces mécanismes sont : l'ajustement osmotique, la tolérance à la dessiccation et le maintien de la translocation.

Dans le cas de l'évasion, la plante effectue son cycle végétatif en dehors des périodes de sécheresse qui pourraient interférer de façon significative avec leur rendement. C'est le cas des cultivars (variétés) à cycle court dont la période de végétation se situe à l'intérieur de la saison favorable. C'est également le cas de plusieurs plantes des régions désertiques qui germent, se développent et fleurissent en quelques semaines après que la pluie ait mouillé le sol. De telles plantes complètent leur cycle de croissance avant qu'un stress hydrique sévère ne s'établisse. Certaines espèces végétales utilisent le phénomène de dormance durant la saison sèche et chaude comme moyen d'évasion envers la sécheresse.

Dans le cas de l'esquive, la plante fait appel à des mécanismes pour maintenir des potentiels hydriques relativement élevés. Un des moyens les plus efficaces d'"assurance" contre les dommages causés par la sécheresse est un système racinaire dense, profond et à rapport pondéral racines/tiges élevé. Les plantes à enracinement superficiel et peu dense comme par exemple la pomme de terre, l'oignon, la laitue vont souffrir plus tôt d'un déficit hydrique que les plantes à enracinement profond comme le maïs, le sorgho et la tomate. Une autre manière de surseoir au déficit hydrique est le contrôle de la transpiration. Les moyens utilisés par les plantes pour cela sont la fermeture stomatique, la résistance cuticulaire, l'enroulement foliaire, la diminution de surface transpirante et la chute foliaire.

4.8.4. Fonctionnement nutritif du peuplement

4.8.4.1. Besoins en éléments nutritifs

Dans des conditions climatiques données, convenablement alimentée en eau, une espèce cultivée a des possibilités de synthèse génétiquement prédéterminées. Ses besoins carbonés et énergétiques étant satisfaits, elle présente des besoins déterminés en éléments minéraux.

Pour un élément minéral donné, les besoins d'un peuplement végétal cultivé dépendent de la vitesse de croissance, du stade de développement ainsi que de la disponibilité des autres éléments qui conditionnent les possibilités de métabolisation. Chaque stade du développement végétal est marqué par l'élaboration d'organes nouveaux de composition minérale définie. Les besoins nutritifs évoluent donc au cœur du cycle cultural.

4.8.4.2. Réponse d'un peuplement cultivé aux facteurs nutritifs

La courbe de production en fonction des doses ou fonction de production montre l'existence d'un rendement maximum auquel correspond une dose technique "optimale" qui délimite la zone rationnelle d'enrichissement. Selon l'élément minéral considéré et le critère de rendement retenu, les courbes de production se présentent différemment.

Pour les oligo-éléments, le rendement maximum correspond à de très faibles doses et la régression de rendement se manifeste pour un apport à peine plus élevé que l'optimum ; au contraire, pour les éléments majeurs, d'une part les doses sont d'un ordre de grandeur très différent, d'autre part l'effet dépressif est beaucoup plus progressif. La courbe de production diffère également selon le critère de rendement retenu. L'optimum de fumure azote est différent selon que l'on considère le rendement total, le rendement en racines ou le tonnage de sucre produit.

Généralement, on applique plusieurs éléments minéraux simultanément et l'expérience montre que l'action de chacun varie suivant le niveau d'application des autres. Un "effet d'interaction" apparaît souvent. Il y a interaction lorsque deux ou plusieurs causes agissant simultanément produisent un effet différent de la somme des effets qu'elles produiraient séparément. Dans le cas présent, les causes sont les doses d'éléments. La différence entre le rendement constaté lors de l'application simultanée de deux ou plusieurs éléments nutritifs et celui produit par l'apport séparé des mêmes éléments aux mêmes doses mesure l' "effet d'interaction". Selon que cette différence est positive, négative ou nulle, il y a interaction positive, négative ou il n'y a pas d'interaction.

Les essais factoriels, où toutes les combinaisons de doses d'éléments sont présentes, permettent de mesurer l'effet d'interaction. Prenons un exemple simple où deux facteurs N et K sont expérimentés chacun à deux doses. Les rendements mesurés sont les suivants :

Une interaction a souvent pour origine l'existence d'une synergie entre les facteurs nutritifs. L'interaction d'origine physiologique, telle celle qui existe entre N et K, est donc prévisible ; dans d'autres cas, l'interaction est simplement révélée par l'expérience.

4.8.4.3. Prélèvements, exportations, restitutions

Lorsque les conditions générales de production assurent la satisfaction du besoin interne des plantes, il n'y a pas d'accumulation inutile d'éléments minéraux. Les quantités d'éléments prélevées mesurent les besoins des cultures. Dans ce domaine différents termes sont utilisés, il est nécessaire d'en préciser la signification :

- Le "prélèvement" désigne la quantité présente à un stade donné, par exemple au moment de la récolte ;
- Le "prélèvement total" désigne la quantité contenue au moment où la culture en renferme le plus. Pour des cultures le blé qui présente une forte exsorption pour certains éléments comme le potassium en fin de cycle de végétation, le prélèvement total est très largement supérieur au prélèvement à la récolte.

A chacune des notions précédentes correspond un homologue en termes de besoin : le besoin et le besoin total.

Le prélèvement à la récolte se décompose en deux parties : l'exportation et la restitution :

- l'exportation : c'est la quantité d'un élément sortie du champ et soustraite temporairement au cycle des éléments. C'est par exemple la quantité contenue dans les grains pour une culture de céréales ;
- la restitution : c'est la part du prélèvement qui fait retour au sol immédiatement, pour la majeure partie sous forme de composés organique.

Il est utile d'opérer cette distinction car la connaissance des exportations sert de base en fertilisation raisonnée pour l'évaluation des fumures d'entretien.

Les prélèvements, exportations et restitutions sont conventionnellement exprimés en N, P₂O₅ et K₂O etc.... Ces expressions ne correspondent nullement aux formes sous lesquelles les éléments minéraux sont absorbés.

4.8.4.4. Evolution de l'absorption minérale

Au cours du cycle cultural, le rythme d'absorption nette (absorption-exsorption) des éléments minéraux n'est pas régulier. Les besoins nécessaires à l'élaboration de nouveaux organes varient. On utilise deux types de courbes pour traduire l'évolution de l'absorption minérale aux différents stades du développement. On représente soit les masses d'éléments prélevés, soit le taux d'absorption des éléments (prélèvement par rapport au prélèvement total) et le taux d'accroissement de matière (exprimé en matière sèche). La pente des courbes obtenues indique le rythme d'absorption des éléments. Une forte pente traduit un besoin immédiat important.

Les prélèvements aux différents stades culturaux se calculent à partir de la composition minérale moyenne et de la masse de matière élaborée. La composition minérale et pondérale des différents organes varient selon les conditions culturales et les conditions d'absorption. Il est nécessaire d'opérer plusieurs déterminations afin d'obtenir des données moyennes. On distingue en général dans le calcul les exportations et les restitutions. On apporte les prélèvements, les exportations et les restitutions à l'unité de production utile : la tonne de grain, la tonne de matière sèche, la tonne de racine, etc....

Pour chaque composition minérale retenue, il est intéressant d'avoir les teneurs moyennes et extrêmes. Les premières sont nécessaires pour les calculs et les secondes montrent l'amplitude des variations de composition.

4.8.5. Rendement du peuplement végétal

4.8.5.1. Rendement utile vs rendement biologique

Le rendement est un concept relatif et il faut distinguer le "rendement biologique" du "rendement utile".

Le rendement biologique est l'accumulation de matière sèche totale au sein d'un peuplement végétal, système aérien et système racinaire compris, depuis l'établissement du couvert (émergence) jusqu'à la récolte. La matière sèche accumulée est le résultat d'un bilan entre le gain de carbone à partir du CO₂ de l'air grâce à la photosynthèse, et la perte de carbone par respiration, autres catabolismes et sénescence. La respiration permet de satisfaire les besoins énergétiques du métabolisme, conduisant à la fabrication de glucides complexes, de lipides, de corps aromatiques, de protides et d'autres substances nécessaires à la croissance et au développement des plantes.

La sénescence qui correspond à la chute des feuilles et au dépérissement progressif des organes contribue aussi à la détérioration du bilan carboné de la plante.

Le rendement utile ou rendement économique traduit le fait que toute la matière sèche accumulée dans les parties aérienne et racinaire n'est pas récoltable et on distingue plusieurs groupes de peuplements.

- Groupe de plantes dont le rendement économique provient de la croissance végétative :

- Plantes à racines (ex. : betterave à sucre)
- Plantes récoltées pour leurs tiges (ex. : canne à sucre)
- Plantes récoltées pour leurs feuilles (ex. : tabac)
- Plantes récoltées pour leurs tubercules (ex. : manioc, pomme de terre).
- Plantes récoltées pour leurs parties aériennes (ex. : cultures fourragères).

- Groupe de plantes dont le rendement économique provient de la croissance reproductrice. La formation du rendement économique commence par l'induction florale et se termine par l'arrêt complet de la croissance (dessiccation). La plupart du rendement utile provient de l'assimilation photosynthétique réelle, c'est-à-dire parallèlement au développement des organes d'accumulation de matière sèche (tiges, inflorescences, grains). Dans ce groupe on distingue deux classes phénologiques :

- les plantes à croissance indéterminée (oléagineux, coton), pour lesquelles les fruits et grains sont portés par des inflorescences latérales, le méristème apical ne devenant pas reproducteur. Il existe aussi des plantes à croissance déterminée, ayant un

nombre réduit de branches ou de tiges et donnant pendant une courte période des fruits ; le méristème apical reste végétatif ou meurt.

- les plantes dont le rendement économique provient de la dernière partie du cycle biologique ; on y classe toutes les céréales (blé, orge, sorgho, millet, maïs) où l'inflorescence terminale est la principale source du rendement économique. Dans tous les cas, le rendement utile est une fraction du rendement biologique. Le rapport rendement utile/rendement biologique est appelé indice de récolte.

4.8.5.2. Composantes du rendement

Les conditions et les facteurs de production à réunir pour atteindre la production maximale d'un peuplement ne correspondent donc pas à la somme de ceux des plantes prises isolément. Le peuplement forme un ensemble et la pratique agricole consiste justement à optimiser chaque facteur et chaque condition de manière raisonnable sans créer de concurrence excessive.

En effet, entre les constituants d'un peuplement cultivé, une concurrence s'exerce vis-à-vis des différents facteurs de croissance, notamment à l'égard de la lumière, de l'eau, de l'énergie et des éléments nutritifs. Le niveau optimum des facteurs de croissance n'est pas le même selon que l'on considère l'ensemble du peuplement cultivé ou chacune des plantes qui le compose. Une plante prise isolément pourrait par exemple recevoir un apport d'azote plus élevé que celui qui lui revient au sein du peuplement ; appliqué sans discernement, il en résulterait une compétition plus vive vis-à-vis de la lumière à certains stades. La consommation en eau d'un peuplement cultivé en fournit un autre exemple. L'E.T.M. correspond à la consommation maximale possible en eau et à la production potentielle maximale. Pourtant chaque plante n'est pas à la complète satisfaction de ses besoins puisqu'à ce niveau de transpiration certains des stomates sont fermés.

Pour raisonner les interventions, on décompose le rendement en composantes principales. Pour le maïs, par exemple, on adopte la décomposition suivante :

$$\text{Rendement t/ha} = \text{Nbre de plants/ha} \times \text{nbre moyen d'épis/plant} \times \text{nbre moyen de grains/épi} \times \text{poids moyen d'un grain.}$$

Toutes les composantes du rendement agissent en interaction. La recherche de la valeur optimale de l'une d'entre elle ne peut être considérée isolément. L'analyse des facteurs et des conditions qui les déterminent permet de mettre en évidence des interactions possibles, d'en examiner les conséquences et de hiérarchiser les actions les plus déterminantes.

4.8.5.3. Rôle de l'installation des cultures sur le rendement

L'installation d'une culture est la première étape de la mise en place du potentiel de production. Plusieurs facteurs conditionnent sa réussite :

- la préparation du lit de semence
- le choix et la qualité des semences
- la réalisation du semis : essentiellement le choix de la variété et l'implantation des cultures.

Les meilleures conditions édaphiques étant réunies, l'implantation du futur peuplement végétal pose des problèmes spécifiquement liés aux végétaux : la date de semis, la densité, la disposition des plantes etc.

Dans le cas des peuplements mono spécifiques les principaux problèmes rencontrés concernent:

- l'époque et la date de semis ;
- la constitution du peuplement : densité, disposition ;
- la profondeur de semis ;
- les techniques d'implantation.

Pour certaines cultures il existe une densité optimale de peuplement. Elle est assez nettement définie pour des cultures comme le maïs. Pour la pomme de terre, où le nombre de tiges varie selon la taille du tubercule, la densité optimale de plantation dépend du calibre. Chez les céréales qui tallent une compensation est possible ; il existe une gamme optimale de densités.

La meilleure disposition des plantes correspondrait à une disposition en quinconce. Pour des raisons pratiques, une disposition en lignes est adoptée. L'utilisation optimale de la lumière doit être recherchée. La profondeur de mise en terre souhaitable dépend du type de semences, de l'humidité du sol et des conditions climatiques probables dans les jours suivants le semis. En semis profond, les exigences germinatives sont difficiles à satisfaire. L'allongement de la phase germination-levée accroît les risques d'attaques parasitaires et compromet la vigueur ultérieure des plantules.

Pour le cas spécifique des peuplements plurispécifiques, une compétition interspécifique s'exerce entre les espèces à l'égard de la lumière. Le maintien de la production et l'équilibre d'une association sont influencés par les facteurs techniques suivants :

- la nature des espèces et des variétés associées ;
- les doses de semis ;

- le mode de semis ;
- le mode d'exploitation : pâturage ou fauche. La date de la première exploitation a une grande importance ;
- la fertilisation azotée.

Tous ces facteurs agissent en interaction, le choix des espèces et des variétés est délicat. Les rythmes de végétation des espèces doivent être synchrones et leurs aptitudes à la compétition assez proches. Engrais, de réaliser les épandages aux époques les plus favorables et d'une manière générale, de rechercher le coût minimum de fertilisation.

Principales contraintes

Plusieurs de types de contraintes limitent le choix des engrais :

- des contraintes techniques ;
- des contraintes de travail ;
- des contraintes d'approvisionnement ;
- des contraintes de coût.

Contraintes techniques

L'engrais doit être adapté à la nature des sols et des cultures. En sols calcaires, par exemple, on utilisera des engrais phosphatés solubles. En général, la nature des engrais phosphatés à utiliser dépend de la réaction du sol.

Contraintes de travail

Le calendrier de travaux et la disponibilité en main-d'œuvre de l'exploitation peuvent conditionner le choix entre apports en couverture et des apports de fonds. Ce choix peut conditionner à son tour celui des types d'engrais : engrais simple ou engrais composés. Pour ces derniers, le nombre d'épandage est réduit.

Contraintes d'approvisionnement

La facilité et la sécurité des approvisionnements sont recherchées. Les fournisseurs, coopératives ou négociants, n'offrent la plupart du temps que quelques types ou formules d'engrais. Pour des raisons de coût, ils ont réduit la gamme de formules proposées.

Contraintes du coût

Le prix des engrais est le facteur déterminant. Le critère à retenir est le prix à l'unité fertilisante. La présence d'éléments fertilisants secondaires, d'oligo-éléments par exemple, n'est à considérer qu'en second lieu. La comparaison des prix est facile entre engrais simple et azotés ou potassiques. Elle est plus difficile pour les engrais phosphatés qui, à égalité d'unités fertilisantes, présentent des différences d'efficacité.

Pour comparer différents engrais composés, on retient en première approximation l'équivalence suivante : si l'unité d'azote (N) vaut 1, celle d'anhydride phosphorique (P_2O_5) soluble vaut environ 0,8 et celle d'oxyde de potassium 0,4. Plus rigoureusement, le second coefficient correspond au rapport des prix d'une unité d'un superphosphate et d'une unité d'azote d'un ammonitrate ; le troisième au rapport de ceux d'une unité, d'un chlorure et d'une unité azote, d'un ammoniac.

Par exemple, pour comparer le prix d'un 17-17-17 et d'un 15-11-22, on considère que le premier $17 + (0,8 \times 17) + (0,4 \times 17) = 37,4$ unités « valeur azote » et le second 35,2. Le premier est donc le plus avantageux. Pour obtenir le coût de l'unité fertilisante « rendue racine », il faut ajouter au coût de l'unité, les frais de stockage, de manutention et d'épandage.

Hiérarchie des contraintes

Les différentes contraintes peuvent conduire à des choix différents. Les exigences agronomiques sont en principe considérées en priorité mais il n'est pas rare, dans la pratique, que des contraintes d'autres natures l'emportent : la moindre efficacité d'une forme d'engrais qui peut souvent être compensée par une augmentation de la dose, une formule appropriée pour une culture peut ne pas convenir pour l'ensemble des autres.

L'optimisation d'un plan de fumure n'est pas simple. Son élaboration conduit à une série de compromis. Il y a souvent d'assez grandes différences entre les pré considérations techniques telles qu'elles figurent à la suite d'un commentaire d'analyse et les quantités finalement retenues par l'agriculteur. Après avoir élaboré plusieurs propositions, le choix définitif est arrêté selon le coût.

6.5.5. Quelques modalités pratiques d'application de la fumure

Différentes questions pratiques se posent au niveau parcellaire et notamment :

- Quel niveau de fertilisation utiliser ?
- Quelle est la répartition des apports dans le temps ?
- Quels types d'engrais utiliser ?

- Quels sont les modes d'application, etc.

6.5.5.1. Apports de fumures aux cultures

Niveau de fertilisation

Pour les systèmes culturaux sans apports organiques, une excellente corrélation a été observée entre les quantités de matière sèche exportée et d'azote apporté ($r=0,999$) ou d'azote consommé ($r=0,999$). En outre, il existe une liaison entre les prélèvements, les exportations et les restitutions d'azote et de potassium ; elle est moins stricte pour le phosphore. Il est donc normal, pour les cultures en rotation, d'adapter les apports phospho-potassiques à ceux d'azote qui tiennent compte du potentiel de production.

Répartition des apports

Les cultures en rotation ont des besoins souvent assez différents. L'essentiel est que le bilan cultural pour la rotation soit sensiblement équilibré. Un apport unique, en tête de rotation ou sur la culture la plus exigeante est exclu. Pour la répartition des apports sur les cultures en rotation on peut s'inspirer des principes ci-après :

- accorder une préférence aux cultures réagissant bien à certains éléments, par exemple la pomme de terre au potassium, le maïs à l'azote ;
- prendre en compte l'importance et le rythme de libération des éléments du précédent cultural ;
- pratiquer les apports à une date la plus proche des besoins culturaux, dans les sols à pouvoir fixateur élevé.

Une telle manière de fixer les fumures des cultures accorde une grande importance à son appartenance à un système de culture. Elle s'oppose radicalement à la recommandation d'une fumure spécifique pour chaque culture.

Apports bloqués

Pour réduire le nombre d'épandages, on préconise parfois d'appliquer la fumure phospho-potassique en une seule fois, en tête de rotation ou la culture répondant le mieux aux engrais. Techniquement, ceci n'est envisageable que si le pouvoir fixateur ou le pouvoir tampon est modérément élevé, la rotation courte et sans une proportion élevée de cultures susceptibles d'une consommation de luxe.

6.5.5.2. Formes et types d'engrais à utiliser

Formes utilisables

Le problème de la forme d'engrais souhaitable se présente sous deux aspects :

- quelle forme physique de l'engrais ?
- quelle constitution ?

Pour un engrais peu soluble, la forme pulvérulente permet d'accroître la surface de dissolution. Inversement, la forme granulée (superphosphate, ammonitrate) peut être bénéfique en ralentissant la vitesse de diffusion des éléments fertilisants. Les engrais liquides sont parfois présentés comme plus immédiatement disponibles. Cette différence de disponibilité par rapport aux engrais solides solubles ne justifie pas, à elle seule, de les retenir.

La constitution chimique d'un engrais détermine sa solubilité et, par conséquent, sa capacité de transformation et d'évolution du sol. Le problème est différent selon qu'il s'agit d'engrais azotés, phosphatés ou potassiques.

- Pour l'azote, les formes nitrique et ammoniacale sont toutes les deux assimilables. L'ammonium est absorbable et de plus se transforme en général assez rapidement en nitrate. Les engrais ammoniacaux renforcent l'acidité des sols ; les pertes par volatilisation sont plus élevées en sols alcalins. L'azote nitrique a le coefficient d'utilisation plus élevé. L'azote uréique n'est utilisable qu'après transformation.

On parvient à ralentir la perte des engrais azotés de différentes manières :

- ° en fractionnant les apports ;
- ° en utilisant les additifs comme les inhibiteurs de nitrification avec l'ammoniac anhydre ;
- ° en association les formes nitriques et ammoniacales comme dans les ammonitrates ou en utilisant, en cultures spéciales, les engrais « retard ».

- Le choix d'un engrais phosphaté se raisonne en fonction du type de sol et spécialement le pH.

- ° En sols non acides, le superphosphate se montre supérieur pratiquement dans toutes les situations.
- ° En sols calcaires, le superphosphate et le phosphate bicalcique ont la même efficacité. En moyenne, les résultats avec le phosphal et les scories sont très proches, plus irréguliers avec le phosphal et parfois un peu inférieurs. Les phosphates naturels, même tendres et moulus, sont totalement inefficaces dès pH 6,1

- Pour les engrais potassiques, le choix ne se pose qu'entre le chlorure ou sulfate. Le sulfate est recommandé pour les cultures qui craignent le chlore (tabac, lin) ou pour des apports élevés ou une forte élévation de la pression osmotique de la solution du sol est à craindre avec le chlore. Le sulfate permet un apport de soufre.

6.5.5.3. Types d'engrais utilisables

Les apports phospho-potassiques sont réalisables avec des engrais simples ou composés. Les avantages et les inconvénients doivent être appréciés dans le cadre de chaque exploitation. Trois critères sont à considérer : le prix, la simplification du travail et l'efficacité.

Les engrais composés permettent une réduction du nombre d'épandages ; une économie de main d'œuvre et de traction ; du fait d'un apport simultané des deux éléments, un effet d'interaction est possible. Il est important de connaître la composition des engrais composés ; elle conditionne l'efficacité. Les engrais composés sont plus chers à l'achat et les économies de l'épandage ne sont pas systématiquement suffisantes pour combler la différence de prix avec les engrais simples.

6.5.5.4. Modes d'application des engrais

Le mode de d'épandage doit prendre en compte la mobilité de l'élément nutritif, la disposition du système racinaire et la forme physique de l'engrais utilisé. Plusieurs modalités d'apport sont possibles :

- une distribution en couverture totale avec disposition superficielle ou enfouissement
- une localisation superficielle ou en profondeur ;
- une application foliaire, assez exceptionnelle en grande culture.

6.5.5.5. Fertilisation oligo-minérale

La fertilisation oligo-minérale n'est raisonnable que lorsqu'une insuffisance a été décelée ou lorsque les conditions d'une forte présomption de carence existent. Les apports sont possibles sous plusieurs formes : sels solubles, complexes, minéraux peu solubles.

6.5.5.5. Rentabilité de la fumure

La rentabilité de la fumure peut être examinée soit à court terme, soit à long terme. L'examen l'année de la culture est relativement facile pour un ou plusieurs éléments. A long terme, il est nécessaire de

prendre en compte l'évolution du potentiel nutritif, le calcul rigoureux est difficile. Si la fertilisation est raisonnée, on admet qu'elle est rentable.

6.5.6. Matières fertilisantes

La rationalisation et l'optimisation de la fertilisation minérale nécessitent de connaître les principales caractéristiques des produits fertilisants commercialisés : composition chimique, formes et solubilité des éléments, caractéristiques physiques.

6.5.6.1. Rappel de quelques notions

Matières fertilisantes

Les matières fertilisantes sont des produits destinés à assurer ou à améliorer la nutrition des végétaux ainsi que les propriétés chimiques et biologiques des sols. Elles comprennent les engrais, les amendements, les supports de culture et d'une manière générale tous les produits tels que les conditionneurs des sols, les préparations microbiennes, etc.

Engrais

Un engrais est une matière fertilisante susceptible d'apporter aux plantes des éléments fertilisants directement utiles à leur nutrition (ce qui n'exclut pas l'intervention du sol) ; il renferme des éléments fertilisants majeurs (N, P, K), des éléments secondaires (Ca, Mg, Na, S) et des oligo-éléments.

On distingue trois catégories d'engrais d'après leur origine : *les engrais minéraux ; les engrais organiques ; les engrais organo-minéraux*. Les engrais minéraux sont simples ou composés. Les engrais simples ne contiennent qu'un seul élément fertilisant majeur (N, P, K) ; les engrais composés deux ou trois : ce sont des binaires ou des ternaires.

Les engrais composés sont soit des engrais de mélange, soit des engrais de combinaison ou engrais complexes. Les premiers, tels que les engrais phosphopotassiques, les scories potassiques sont des mélanges d'engrais simples. Si le mélange est réalisé en vrac à la demande, l'engrais est dit « *bulk blending* ». Dans un mélange, la densité et la grosseur des granules mélangés doivent être proches afin d'éviter la ségrégation des constituants lors du transport et de l'épandage.

Les engrais complexes sont obtenus en faisant réagir des matières premières entre elles. Les phosphates d'ammonium, le nitrate de potassium qui ne renferment qu'un seul composé chimique sont des engrais complexes.

Les engrais organiques d'origine animale ou végétale sont fabriqués à partir de matières premières comme des sous-produits de la pêche, etc. ils doivent renfermer au moins 1% d'azote organique ; la teneur des autres éléments n'est indiquée que si elle atteint 2%.

Les engrais composés organo-minéraux sont des mélanges de matières organiques végétales et de produits minéraux. Ils doivent doser au moins 7% dont 3% au moins pour l'un des éléments fertilisants. Ils sont utilisés quasi exclusivement sur les cultures maraîchères.

Amendement

Un amendement calcique et/ou magnésien est une matière fertilisante contenant du calcium et/ou du magnésium, généralement combiné sous formes d'hydroxyde de carbonates, destinée principalement à maintenir ou à élever le pH du sol et à en améliorer les propriétés. Un amendement organique est composé principalement de combinaisons carbonées d'origine végétale destinée à l'entretien ou la reconstitution du stock de matières organiques du sol.

6.5.6.2. Présentation générale des engrais

Selon leur forme physique, les engrais se classent en deux catégories : les engrais solides et les engrais fluides.

Engrais solides

Les engrais solides sont granulés, cristallisés, en perles ou en poudre.

Engrais liquides

Ce sont de vraies solutions où les éléments fertilisants sont entièrement dissous. L'utilisation des engrais liquides ou en suspension requiert un matériel d'épandage bien adapté et conçu spécialement car les solutions sont souvent assez corrosives.

Engrais gazeux

L'ammoniac anhydre est le seul engrais appliqué à l'état gazeux. Il est vendu sous forme d'un gaz liquéfié maintenu sous pression élevée (20 à 30 kg/cm²). Son utilisation demande un matériel particulier pour le transport, le stockage et l'épandage.

6.5.7. Amélioration et l'entretien des capacités nutritives du sol

L'introduction des engrais a permis de modifier les capacités nutritives des sols. Les réserves "naturelles" d'un sol ne permettent que la pratique d'une agriculture extensive, il est nécessaire d'entretenir et de fertiliser le sol.

Les plantes doivent disposer à tout moment lors de leur cycle de végétation des nutriments assimilables en quantité et en proportions adaptées à leurs besoins. C'est le sol qui, par l'entremise de processus physico-chimiques et biologiques, en assure la fourniture. La fertilisation, ensemble de techniques culturales consistant à apporter des éléments minéraux, a pour objet d'en permettre la fourniture par le sol et non de s'y substituer. Les apports doivent tendre à créer des conditions de nutrition telles que la fourniture adaptée à l'importance et à la chronologie des besoins.

Voir cours sur la fertilité et la fertilisation pour les principaux engrais.

Chapitre VII. AMELIORATION DES PLANTES

Remarque : Génétique et amélioration des plantes font l'objet de cours approfondis.

L'amélioration des plantes a été définie comme « la recherche des meilleures voies permettant de réaliser, à partir d'une constitution imparfaite, une structure génétique adaptée aux critères et aux besoins des hommes ». En d'autres termes, l'amélioration des plantes vise à augmenter les qualités productives des plantes cultivées par la voie du progrès génétique.

7.1. NOTIONS DE GENETIQUE

La génétique est la science de l'hérédité ; elle étudie la transmission des caractères des parents à la descendance.

7.1.1. Quelques éléments de la constitution de la plante

La plante est composée d'organes : racines, tiges, feuilles. Chaque organe est lui-même composé de tissus de structure différente, selon leur fonction :

- tissu de protection (épiderme) :
- tissu de soutien,
- tissu conducteur, etc.

De même, les tissus sont constitués d'un ensemble de cellules juxtaposées dont la structure peut être schématisée.

Figure : Schéma d'une cellule végétale

C'est au sein du noyau de la cellule que se situe le matériel génétique : les chromosomes. Les chromosomes sont de fins ligaments, associés par paires, et constitués de molécules d'ADN (acides désoxyribonucléique), substance essentielle à la transmission des caractères héréditaires.

Les molécules d'ADN forment des chaînes protéiques le long des filaments chromosomiques ; sur ces chaînes sont situés, de loin en loin, les gènes, portion de chromosome qui sont chacune responsables de la transmission d'un ou de plusieurs caractères.

Remarque : Chez les animaux, la constitution est la quasi - même.

7.1.2. Génotype ou patrimoine génétique d'un individu

Le **génotype** représente l'ensemble des gènes contenu dans les chromosomes ; on l'appelle également patrimoine génétique ou patrimoine héréditaire car l'ensemble des gènes correspond à l'ensemble des caractères susceptibles d'être transmis lors de la reproduction. Ainsi, deux individus possédant le même génotype ont le même potentiel à exprimer des caractères identiques.

Toutefois, les potentialités génétiques ne sont pas toujours exprimées uniformément, deux plantes de même génotype, se trouvant dans un milieu de culture différent, vont exprimer le même caractère de façon différente.

L'ensemble des caractères exprimés réellement dans le milieu constitue le **phénotype**. De manière générale, on définit la relation :

Phénotype = génotype + milieu + interaction (génotype x milieu)

7.1.3. Transmission du patrimoine chez les végétaux

Le patrimoine génétique d'une plante se transmet lors de la multiplication de la plante :

- Par la multiplication végétative, le génotype reste identique au parent puisqu'un organe multiplié contient dans ses cellules tous les chromosomes parentaux et donc tous les gènes ;
- Par la multiplication sexuée, la transmission de l'hérédité est plus complexe. Le génotype d'une plante issue de la reproduction sexuée possède la moitié des gènes provenant de l'ovule et la moitié des gènes provenant du gain de pollen.

7.2. ESPECE, UNITE BIOLOGIQUE

7.2.1. Notion d'espèce

L'espèce peut se définir comme un ensemble d'individus ayant des ressemblances morphologiques, physiologiques et étant capables de se reproduire entre eux. Ainsi, trois types de critères caractérisent l'espèce : morphologiques et physiologiques, écologiques et de fécondité.

7.2.1.1. Critères morphologiques et physiologiques

Les individus d'une même espèce ont :

- des ressemblances morphologiques,
- des analogies dans leur fonctionnement
- un nombre chromosomique identique.

(Toutefois, un même nombre de chromosome ne signifie pas deux espèces identiques, par exemple on a pour le lys (plante) et le criquet (insecte) $2n = 24$ chromosomes).

7.2.1.2. Critères écologiques et de distribution

La géographie et les biotopes caractéristiques ont isolé les espèces au cours des temps. En effet, les conditions d'existence d'une espèce modifient la morphologie, la physiologie et la fécondité des individus.

7.2.1.3. Critères de fécondité

C'est souvent le critère le plus important pour définir l'espèce ; deux individus d'une même espèce sont capables de se reproduire entre eux dans les conditions naturelles.

La notion d'espèce, même si elle semble précise au regard de ces critères, reste parfois difficile à cerner, le polymorphisme étant fréquent chez bon nombre d'entre elles. C'est pour cela qu'il existe au sein de l'espèce des sous-unités : les races (règne animal) ou les variétés (règne végétal). La race ou la variété s'attache plus aux critères morphologiques et physiologiques de l'espèce. En amélioration des plantes, l'unité de référence est l'espèce.

7.2.2. Variabilité génétique de l'espèce

La variabilité génétique de l'espèce représente l'ensemble des variétés génotypiques de cette espèce. La variabilité génétique est un élément essentiel dans l'amélioration d'une espèce car plus elle possède

de géotypes différents, plus les possibilités de croisement sont grandes et plus l'amélioration semble possible.

La variabilité génétique est très différente selon le régime de reproduction de l'espèce. Il faut distinguer les espèces autogames des espèces allogames.

- Chez les espèces autogames, le pollen et l'ovule proviennent de la même plante ; il y a autofécondation de la plante, ce qui aboutit progressivement à un géotype homozygote (arachide, soja, etc) ;
- Chez les espèces allogames, la fécondation est croisée, c'est à dire que le pollen et l'ovule proviennent de plantes différentes, les géotypes des descendants sont hétérozygotes pour la plupart des caractères. Toutefois, beaucoup d'espèces sont dites allogames avec un certain taux d'autogamie (il est souvent difficile d'apprécier le taux d'autogamie de l'espèce) ; cette particularité est intéressante car si elle existe, elle peut être accentuée artificiellement par le sélectionneur afin d'obtenir des géotypes homozygotes.
- Chez les espèces reproduites asexuellement (de façon végétative) on peut aussi observer une variabilité génétique.

7.3. AMELIORATION DES PLANTES

7.3.1. Voies de l'amélioration des plantes

L'amélioration des plantes est une activité de l'homme relativement récente qui a fait suite aux découvertes scientifiques dans les domaines de la biologie et de la génétique. Si l'amélioration des plantes se limitait auparavant à la sélection des meilleurs individus de l'espèce que l'on multipliait en vue de créer de nouvelles variétés, elle est maintenant devenue un domaine très vaste et elle concerne l'amélioration des plantes existantes et la création de nouveaux individus et de nouvelles espèces:

Amélioration des plantes existantes

Les principaux caractères améliorés sont :

- le rendement,
- la résistance aux maladies,
- l'adaptation au milieu de culture,
- la qualité des produits récoltés, etc.

Création de nouveaux individus et de nouvelles espèces

La création de nouveaux individus ou de nouvelles espèces s'effectue grâce aux hybridations entre génotypes différents et plus récemment, à partir de manipulations génétiques.

Les voies de l'amélioration des plantes dépendent du régime de reproduction de l'espèce.

7.3.2. Amélioration des plantes autogames

L'autogamie permet l'obtention, après quelques générations, d'individus homozygotes capables de se reproduire identiques à eux-mêmes ; ils constituent une **lignée pure**.

Une lignée pure se définit comme un ensemble de plantes issues, par sélection individuelle, d'une plante auto fécondée aussi homozygote que possible et multipliée par autofécondation.

L'intérêt de la lignée pure réside dans la présence d'une grande homogénéité et d'une stabilité ; la majorité des variétés des plantes autogames est ainsi commercialisée sous forme de lignées pures.

L'amélioration des plantes autogames peut se faire :

- par exploitation de la variabilité existante en choisissant les meilleurs génotypes ;
- par création de nouveaux génotypes (augmentation de la variabilité génétique).

La **sélection des génotypes** existants peut être réalisée par sélection massale ou par sélection généalogique.

La *sélection massale* ou sélection phénotypique consiste à choisir les meilleurs individus dans une population qui, seuls, serviront à réaliser la génération suivante. La commercialisation de la variété se fait après n générations de multiplication. Cette méthode est simple mais n'apporte une grande amélioration qu'en début de sélection de l'espèce.

La *sélection généalogique* consiste à suivre la descendance de chacune des plantes choisies au départ. Cette méthode est très utilisée ; actuellement, cette sélection est pratiquée le plus souvent après avoir réalisé une hybridation forcée entre deux lignes pures.

La **création de nouveaux génotypes** peut se faire par mutagenèse artificielle, doublement chromosomique ou par hybridation.

La *mutagenèse artificielle* consiste à provoquer des mutations sur les plantes par des agents mutagènes (ex : rayons X, substances chimiques). Cette méthode est délicate car les effets sont difficilement contrôlables.

Le *doublément chromosomique* se réalise par traitement à la colchicine et permet d'obtenir des individus à $3n$ ou $4n$ chromosomes dits polyploïdes ; s'ils sont viables, ils peuvent présenter une meilleure vigueur que les individus normaux.

L'*hybridation* a pour but de mélanger deux génotypes ; les individus issus de la fécondation croisée sont ensuite rendus homozygotes par autofécondations successives. L'hybridation la plus intéressante est l'hybridation interspécifique (entre deux espèces) mais elle est également la plus difficile à réaliser à cause de phénomènes d'incompatibilité.

Les hybrides F1 ou hybrides de 1ère génération sont des individus descendant de la fécondation croisée de deux parents homozygotes ; leur génotype est hétérozygote pour tous les caractères mais tous les individus ont le même génotype d'où la grande homogénéité des variétés hybrides F1. Le grand intérêt de l'hybride est de bénéficier d'un phénomène appelé *effet d'hétérosis* qui se traduit par une augmentation de vigueur d'autant plus élevée que le taux d'hétérozygotie est important.

Chez les plantes autogames l'hybridation est très difficile car la castration de la lignée femelle n'est pas aisée. La production de semences commerciales hybrides F1 n'est envisageable que chez certaines espèces, en particulier chez les plantes à forte productivité (espèces légumières et florales). En revanche, cette voie d'amélioration pourrait se développer s'il était possible d'obtenir des lignées à stérilité mâle (fleurs dont l'organe mâle est absent ou stérile). Cela existe déjà chez quelques espèces (tomate).

7.3.3. Amélioration des plantes allogames

Les plantes allogames sont difficiles à définir au niveau génétique car le taux d'hétérozygotie étant très variable, les génotypes sont nombreux. Dans la nature, les espèces allogames se trouvent sous forme de populations.

Une population est un ensemble d'individus à fortes ressemblances phénotypiques mais dont l'hétérozygotie peut-être élevée. Un certain nombre d'espèces cultivées allogames sont encore représentées par des variétés populations.

L'amélioration des espèces allogames ne peut être envisagée de la même manière que celle des espèces autogames ; en effet la variabilité génétique est grande et le problème majeur de leur amélioration est le contrôle de la pollinisation.

Production d'hybrides F1

Les plantes allogames réagissent également de façon très favorable à l'hybridation par un fort effet d'hétérosis. Les hybrides F1 ont pris un développement très important dans la culture des plantes allogames ; l'exemple le plus typique est la culture du maïs où les variétés hybrides sont de plus en plus rencontrées en culture commerciale.

La production d'hybrides F1 se réalise en trois phases :

- la préparation de lignées parentales ;
- la recherche de meilleurs croisements ;
- la production de semences hybrides.

La *préparation des lignées parentales* nécessite une série d'autofécondations afin d'obtenir des lignées pures ; il n'est quelquefois pas possible d'atteindre l'homozygotie car certaines espèces allogames ont une vigueur trop faible, lorsque le taux d'homozygotie devient trop élevé (on parle d'effet d'*inbreeding*).

Pour atteindre une certaine homozygotie, 6 ou 7 autofécondations sont nécessaires. Celle-ci sont réalisées en isolant les fleurs de telle sorte que le pollen étranger ne puisse réaliser la fécondation (ex. : ensachage de la fleur). Puis, les lignées obtenues sont croisées entre elles afin de déterminer les combinaisons qui donnent les meilleurs résultats. Il en ressort une sélection de lignées que l'on peut alors hybrider à grande échelle pour la production de semences commerciales.

La *production de semences commercialisables* n'est envisageable que dans des cas particuliers :

- la castration de la lignée mâle est très facile ; c'est le cas du maïs dont l'inflorescence mâle est à l'extrémité de la plante ;
- la production, de graines est très abondante par la plante (graminées)
- la culture a une productivité très élevée (espèces légumières et florales) ;

Actuellement, les variétés hybrides F1 représentent dans le marché des semences, une part de plus en plus élevée. Les établissements grainiers sont intéressés par le marché des variétés hybrides F1 car :

- la graine a un coût élevé (à cause des difficultés de production) ;

- la variété est très protégée puisque le sélectionneur est seul à connaître les lignées parentales et l'agriculteur est obligé d'acheter chaque année les semences dont il a besoin.

Variétés synthétiques

Chez de nombreuses espèces allogames, l'hybridation F1 est impossible à réaliser pour des raisons biologiques (anatomie florale) ou économiques (faible production de semence par la plante hybridée). Cependant, le sélectionneur peut être appelé à offrir des variétés présentant les qualités suivantes :

- l'expression d'une vigueur hybride ;
- un certain niveau d'homogénéité de la culture ;
- la fixation de caractères spécifiques (agronomiques, technologiques) ;
- la stabilité de la variété.

Une variété synthétique résulte de la multiplication libre entre un certain nombre d'individus qui ont été choisis au sein d'une population. En choisissant des parents homogènes, on bénéficie de la vigueur hybride par leur croisement tout en maintenant une certaine homogénéité dans la descendance. Les variétés synthétiques sont nombreuses chez les espèces fourragères et d'autres espèces comme la betterave.

Variétés polyploïdes

Comme pour les plantes autogames, la polyploïdie est un moyen d'amélioration des espèces allogames. Elle est réalisée par traitement à la colchicine chez certaines espèces.

7.3.4. Plantes à multiplication végétative

La multiplication végétative se réalise sur la base d'une sélection des meilleurs individus. Elle représente le meilleur moyen pour reproduire fidèlement le génotype du parent mais ne peut l'améliorer.

La notion de base dans l'amélioration des plantes à multiplication végétative est le clonage. Les **clones** sont des individus reproduits (obtenus) à partir d'un seul génotype par reproduction asexuée. L'amélioration de ces plantes peut être envisagée :

- uniquement par sélection végétative ;
- en associant la multiplication végétative et la reproduction sexuée.

Sélection végétative

Elle peut se réaliser par :

- le mélange de clones : son seul intérêt est de limiter les risques d'une mauvaise production dans des conditions de culture défavorables et en particulier lorsqu'un parasite est endémique à la zone de culture ;
- la sélection sanitaire : elle permet de régénérer des variétés qui sont infectées par une bactérie ou un virus. Elle consiste à reproduire de façon végétative une plante saine de la variété d'origine qui va constituer un nouveau clone (et donc une nouvelle variété) ;
- la sélection intraclonale : elle se fait à la suite de mutations naturelles (rares) ou provoquées. L'individu dont les caractères différent sert alors à la réalisation d'un nouveau clone.

Reproduction sexuée associée à la multiplication végétative

Lorsque l'espèce à multiplication végétative produit des graines, son amélioration devient facile. En particulier, la réalisation d'hybrides est alors très intéressante, car il suffit de réaliser l'hybridation de deux individus, même s'ils ne sont pas homozygotes, puis le descendant qui présente un intérêt est multiplié végétativement pour produire un nouveau clone.

La multiplication végétative risque de prendre une importance considérable dans l'amélioration des plantes dans quelques années grâce aux développements des biotechnologies.

7.3.5. Intérêt des biotechnologies dans l'amélioration des plantes

Culture in vitro

La culture in vitro est de plus en plus importante dans la multiplication des végétaux et en amélioration des plantes :

- la culture de méristèmes est actuellement le moyen de sélection sanitaire (pomme de terre, culture florales, etc) ;
- la culture de cellules haploïdes consiste à mettre en culture les cellules sexuelles : ovules ou anthères.

L'utilisation de milieux de culture permet appropriées permet l'obtention de plantes haploïdes auxquelles on peut faire subir un traitement à la colchicine pour doubler le nombre chromosomique. On obtient alors immédiatement les individus homozygotes que l'on peut hybrider. Cette technique permet :

- chez les plantes allogames, d'accélérer l'amélioration variétale ;
- chez les plantes autogames, d'augmenter les possibilités d'hybridations (blé, piment, riz).

Génie génétique

Le génie génétique représente toutes les possibilités de manipuler les gènes en dirigeant leur transmission du parent à la descendance. Les manipulations génétiques ne sont pas encore totalement maîtrisées et la recherche fondamentale progresse considérablement chaque année. Les techniques actuelles sont la culture de protoplastes, et au-delà, la production d'organismes génétiquement modifiés (OGM).

Un protoplaste est une cellule végétale débarrassée de sa membrane cellulosique détruite volontairement en faisant agir certains enzymes. La particularité du protoplaste est d'avoir une membrane perméable. Celle-ci peut :

- fusionner avec une autre membrane cellulaire pour former une seule cellule ; ainsi, deux protoplastes d'espèces différents peuvent fusionner et engendrer un hybride dit somatique (sans reproduction sexuée) (pomme de terre, tomate) ;
- laisser s'introduire les gènes qui vont modifier le génotype de la cellule initiale et la plante va alors se trouver différente. C'est la technique de transfert des gènes. Cette technique ouvre de nombreux espoirs pour conférer rapidement à une espèce des caractères particuliers (ex. : introduction d'un gène de résistance à une maladie).

La production d'organismes génétiquement modifiés (OGM) concerne plusieurs espèces végétales, de nouvelles variétés issues de cette technologies existe sur le marché des semences : maïs, soja, colza, tomate. Elles sont appelées variétés transgéniques.

La technologique consiste à introduire un gène étranger à la plante mère dans le génotype, le plus souvent par culture de protoplastes. La nouvelle variété possède alors un nouveau génotype avec des caractères choisis, et avec un cycle de création très court.

Les enjeux actuels des OGM sont économiques et éthiques. Sur le plan économique, l'amélioration de la productivité de la plante et la rentabilité pour les sociétés semencières incitent à la production d'OGM. Sur le plan éthique, la non-connaissance des conséquences à moyen et à long terme de la diffusion d'OGM dans l'environnement oblige à la prudence et au respect du principe de précaution, pour un développement durable.

