

COURS D'AGRONOMIE GENERALE

Enseignants : Pr MVONDO AWONO Jean Pierre
Dr BEYEGUE DJONKO Honoré

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 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 sont : le climat, le sol et la plante. En effet, la plante vit dans un double milieu, le sol ou ce qui en tient lieu dans lequel elle enfonce 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.

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.

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

- connaître et comprendre les principaux mécanismes biophysiques à l'œuvre dans le système sol - plante - atmosphère ;
- mettre en œuvre une démarche de diagnostic et en maîtriser les outils permettant de proposer des actions pertinentes, tant sur le plan de la production agricole que sur celui des impacts sur l'environnement.

1.2. PLAN DU COURS

Le cours comprend une introduction générale (Chapitre I) et trois parties ayant un total de dix chapitres. La Conclusion Générale constitue le Chapitre XII.

La **première partie** sur les composantes de la production comporte les chapitres suivants :

- Chapitre II : la composante climatique
- Chapitre III : la composante édaphique
- Chapitre IV : la composante végétale.

La **deuxième partie** relative aux techniques de production comprend les chapitres ci-après :

- Chapitre V : Actions sur les facteurs climatiques
- Chapitre VI : Actions sur le milieu édaphique
- Chapitre VII : Actions sur le matériel végétal
- Chapitre VIII : Fonctionnement du peuplement végétal cultivé
- Chapitre IX : Systèmes de culture et évolution de l'état du milieu cultivé

La **troisième partie** qui aborde l'impact des activités agricoles sur l'environnement renferme les chapitres suivants :

- Chapitre X : Dommages environnementaux causés par les activités agricoles
- Chapitre XI : Restauration et réhabilitation des écosystèmes agricoles dégradés
- Chapitre XII : Systèmes de production alternatifs.
- Chapitre XIII : Introduction à l'écoagriculture et agroécologie.

Première partie : LES COMPOSANTES DE LA PRODUCTION AGRICOLE

2.1. LA COMPOSANTE CLIMATIQUE

2.1.1. Définitions

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 d'un lieu est caractérisé par l'enchaînement des situations météorologiques, leurs fréquences et leur distribution.

Le climat n'est pas à confondre avec le temps qui étudie les conditions atmosphériques à un moment et un point précis. Le climat est une synthèse de types de temps sur une longue période.

L'étude du climat est la climatologie. La météorologie est la science qui étudie les différents éléments du climat.

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

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.

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

Les grandes zones climatiques se distinguent selon la latitude. Aux latitudes faibles (près de l'équateur) le contraste saisonnier est surtout lié aux régimes pluviométriques alors que les régions situées aux latitudes élevées connaissent des contrastes thermiques plus marqués.

Au Cameroun, les zones climatiques déterminent les zones agro-écologiques à savoir : la zone forestière à pluviométrie monomodale, la zone forestière à pluviométrie bimodale, les hauts plateaux de l'Ouest, la zone de savane guinéenne et la zone soudano-sahélienne.

A l'intérieur de ces zones agro-écologiques on peut distinguer des unités plus petites où règne un climat local. Ce dernier est modifié sous l'influence d'agents climatiques secondaires par exemple une élévation ou une vallée. C'est par exemple le cas du climat

particulier dans les monts Mandara en zone soudano-sahélienne. Le climat de cette zone permet la production des cultures plus adaptées à d'autres écologies.

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.

	<i>Climat régional (Macro climat)</i>				Niveau / Etendue
	<i>Climat local (mésoclimat)</i>				Région
			<i>Microclimat</i>		Petite région
				<i>Microclimat Cultural</i>	Bassin versant
					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.

2.2. Climat et production végétale

Les effets du climat sur la production végétale se manifestent de différentes manières :

- en conditionnant le choix des cultures et des variétés ;
- en agissant sur la croissance et le développement des plantes ou encore,
- en imposant 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. Cependant, l'action anthropique à travers la destruction des forêts, la mise en place de vastes pâturages et les émissions d'industrie par exemple, contribue à modifier le climat de certaines régions du globe. Les effets qui en découlent sont surtout observables à long terme. Les éléments du climat et notamment la température, l'humidité, la lumière et le vent ont une action importante sur la croissance et le développement des plantes.

2.2.1. LA TEMPERATURE

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

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.

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.

2.2.1.2. 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.

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.

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.

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.

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.

Température 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.

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 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.

2.2.1.3. Action des basses températures sur les plantes

Les basses températures sont exceptionnelles en climat tropical. Leur impact sur les végétaux cultivés ne sera pas étudié dans ce cours.

2.2.1.4. Action des hautes températures sur les plantes

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.

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*).

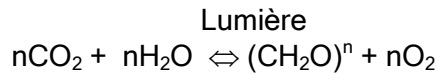
2.2.1.5. Action de la température sur les fonctions physiologiques

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.

2.3. LA LUMIERE

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 photomorphogénèse. Globalement, les effets de la lumière sont fonction des caractéristiques du rayonnement.

2.3.1. Caractéristiques spectrales 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).

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 qui se développent mieux à la lumière et les plantes ombrophiles qui préfèrent l'ombre.

Par exemple, les céréales sont typiquement des plantes de lumière alors que les plantes de sous bois sont généralement des plantes ombrophiles.

L'intensité lumineuse agit différemment selon le stade de développement de la plante ; la plante a besoin de plus en plus de lumière au fur et à mesure qu'elle vieillit. Les éclaircissements faibles sont favorables au développement végétatif alors que les éclaircissements 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
- les plantes de jours courts
- les plantes indifférentes.

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.

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

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.

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

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, etc.

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'éclairement, 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 important 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. L'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 alors d'examiner la valeur agricole respective des différentes formes sous lesquelles l'eau atmosphérique parvient aux plantes à savoir : la vapeur, la rosée, la pluie, la grêle et la neige.

2.4.1.1. Eau de pluie

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 point 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

L'air ambiant renferme toujours une certaine quantité d'eau sous forme de vapeur. 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. Toutefois, il est vraisemblable que cette eau est inutilisable pour la végétation car une fois absorbée la nuit, elle s'évapore le jour.

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. 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.

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. L'absorption de l'eau est généralement très faible au niveau des zones lignifiées.

L'absorption de l'eau du sol dépend du potentiel de l'eau dans le sol. L'eau possède une énergie qui est par exemple exploitée dans les installations des centrales hydroélectriques là où existent des dénivellations des cours d'eau. Parfois, cette énergie est récupérée sous une forme mécanique quelconque. En fait, dans le sol ou dans la plante, les molécules d'eau

perdent une partie de leur mobilité, l'énergie potentielle de cette eau étant le total des énergies de chacune des molécules prise isolément à l'état libre. Cette « confiscation » de l'énergie représente ce qu'il convient d'apporter en contrepartie de l'extérieur (par aspiration, pression, centrifugation, etc) pour restituer aux molécules d'eau leur liberté et par suite leur énergie initiale. (Energie totale initiale = Energie mobilisée par des liaisons + Energie libre).

En agronomie, il ne s'agit pas de demander à l'eau de fournir un travail. Il s'agit au contraire de libérer l'eau des contraintes auxquelles elle est soumise pour la mettre à la disposition des végétaux. L'énergie de l'eau étant partiellement retenue dans des liaisons diverses. Le potentiel désigne non pas le travail cédé par l'eau mais à l'inverse, il s'agit de l'énergie nécessaire pour extraire du matériau l'unité de masse liquide et la porter à l'état d'eau libre sans changement de température ni de concentration saline.

Pour redonner à l'eau du sol l'état libre facilitant son absorption, plusieurs forces d'importance variable selon l'agencement existant entre les particules solides et les molécules d'eau doivent être vaincues.

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. 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.

2.4.3.2. Méthodes de dosage de l'eau

Les méthodes de détermination de l'eau englobent d'une part celles qui déterminent la masse sèche d'un échantillon dont on connaît la masse fraîche et d'autre part, celles qui dosent directement l'eau.

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.

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.

Les méthodes pondérales de dosage de l'eau sont les plus courantes. La méthode la plus simple est celle qui consiste à dessécher des échantillons dans une étuve à 105°C jusqu'à poids constant (en général 24 à 36 heures suffisent). Le principal défaut de cette méthode est qu'elle ne tient pas compte des erreurs possibles dues au départ des substances volatiles et à des réactions d'oxydation qui peuvent altérer le résidu sec.

Une méthode qui permet de réduire le second risque consiste à effectuer un premier passage de l'échantillon à 110°C pendant quelques minutes. Cette opération détruit les systèmes enzymatiques. Il suffit ensuite de sécher à 60°C jusqu'à poids constant. Il est également possible de peser le résidu sec en pratiquant une *lyophilisation*. Cette méthode (opération) extrait l'eau par sublimation et conserve les structures cellulaires.

La teneur en eau d'une plante varie en fonction des différents organes, de l'âge et de l'activité de ceux-ci. La teneur en eau varie de plus de 90 % dans les organes jeunes jusqu'à moins de 10 % dans certaines semences.

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

- L'eau constitue la phase dispersante du milieu cellulaire par la formation de solutions, d'émulsions ou de suspensions ;
- 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).

2.4.4.2. Fonctions de l'eau dans la plante

- 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 ;
- 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.

- 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.
- 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 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.

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. 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'efficacité 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.

2.4.6. Période critique

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 ; ensuite pour chaque espèce, il existe au moins une autre période critique.
- 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.

2.4.7. Interaction eau - plante - sol

La plante est souvent considérée comme une mèche servant à l'écoulement de l'eau entre le sol et l'air. L'atmosphère par sa température, son degré hygrométrique et sa turbulence détermine la transpiration du végétal à laquelle s'ajoute l'évaporation de l'eau du sol.

La transpiration et l'évaporation de l'eau au dessus d'un couvert végétal donné déterminent l'évapotranspiration. Elle connaît des variations journalières importantes. En effet, elle est minimale la nuit et atteint le maximum pendant les heures les plus chaudes de la journée.

L'évapotranspiration potentielle est la hauteur d'eau évaporée et transpirée (exprimée en mm d'eau) au niveau d'une végétation en phase active de croissance, suffisamment couvrante et abondamment pourvue en eau. L'évapotranspiration potentielle définit les conditions idéales de la croissance dans un milieu donné.

Lorsque l'évapotranspiration devient supérieure aux précipitations, le sol se dessèche et les plantes subissent un stress hydrique. L'une des réactions des plantes est la fermeture plus ou moins complète des stomates. Selon l'intensité du déficit, on peut observer un flétrissement ou un dessèchement des plantes.

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

2.4.8.1. 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.

2.4.8.2. 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.

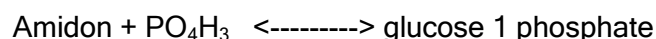
Régulation stomatique

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 phosphorylyse 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

Le vent est l'agent essentiel du renouvellement des masses d'air qui entourent les plantes. Quand sa vitesse 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

Les vents violents ont une action de rupture : *verse des céréales, chute ou déchirure des feuilles etc.* Il convient de classer, parmi les actions mécaniques du vent, le rôle qu'il joue dans les phénomènes d'érosion et le transport.

2.5.3. Action biologique

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.

Exemple d'actions défavorables :

- *Transport de semences de plantes adventices*
- *Accélération de l'extension de certains parasites*
- *Transport de pollen préjudiciable à la production semencière.*

Exemple d'actions favorable

- *Transport de pollen pour les plantes à fécondation croisée*
- *Limitation de la pollution des pucerons, vecteurs de certaines maladies à virus (vents de plus de 6 km/h).*

2.6. PRESSION ATMOSPHERIQUE

La pression atmosphérique/barométrique mesurée à l'aide d'un baromètre permet d'apprécier les perturbations atmosphériques pouvant être à l'origine du changement de temps. Elle correspond au poids de la colonne d'air de surface unité qui surplombe un lieu. La pression atmosphérique normale est de 760 mm de mercure ou 1 013,3 Pa.

Les zones de pression élevée sont des "anticyclones" ; celles de basse pression des "dépressions". Ces zones sont à l'origine du vent. L'air se déplace d'un anticyclone vers une dépression.

2.7. ACTION CUMULATIVE DES FACTEURS DU CLIMAT

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.

2.7.1. 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.

2.7.2. 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.

2.7.3. 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.

2.8. AGRICULTURE ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

2.8.1. Interaction agriculture climat

Selon la FAO, les risques associés au changement de climat se situent à l'interaction de plusieurs systèmes à variables multiples qui doivent être considérées ensemble. L'agriculture (y compris les cultures, l'élevage, la foresterie et la pêche) peut être définie comme un des systèmes et le climat l'autre. Traiter ces systèmes indépendamment conduirait à une approche trop fragmentaire. Le problème est plus global. Maintenant, on considère comme vraisemblable le fait que les activités humaines affectent le climat, une des composantes de l'environnement. A son tour, le climat affecte l'agriculture, source de toute l'alimentation consommée par les êtres humains et les animaux domestiques. De plus, il faut considérer que non seulement le climat peut changer mais aussi que les sociétés humaines et l'agriculture développent des tendances et des contraintes spécifiques que les études sur l'impact du changement de climat doivent prendre en considération.

2.8.2. Facteurs concernés et leurs origines

Les changements prédits du climat concernent notamment - une hausse du CO₂ atmosphérique, de la température et des précipitations, associée à des changements du dépôt azoté, des niveaux d'ozone tropo- et stratosphérique, du rayonnement UV, etc. Ces derniers peuvent avoir de grands impacts sur les modes de production et d'approvisionnement agricoles. Pour que la production agricole soit suffisante afin de rencontrer les demandes de la population humaine toujours croissante, l'impact du climat doit être compris et intégré dans tout planning futur. C'est l'une des préoccupations actuelles de l'Organisation pour l'Alimentation et l'Agriculture des Nations Unies (FAO).

De grandes quantités de dioxyde de carbone sont émises dans l'atmosphère. Elles proviennent surtout de la consommation croissante de combustibles fossiles tels que le pétrole, le gaz et le charbon pour satisfaire les besoins humains. En outre les activités agricoles et industrielles ajoutent aussi des quantités considérables de méthane (CH₄), d'oxydes nitreux (N₂O) et de chlorofluorocarbones (CFCs) dans l'atmosphère. Ensemble, tous ces gaz conduisent à ce que l'on appelle l'effet de serre élargi parce qu'ils absorbent

tous le rayonnement infrarouge. On estime que 50% du CO₂ émis dans l'atmosphère y reste et que les autres 50% sont repris par les écosystèmes océaniques et terrestres.

L'agriculture dépend totalement de la météo et du climat. Malgré les nombreux efforts des climatologues, il y a une incertitude considérable à propos de l'impact potentiel du changement de climat dans ce secteur. On connaît mal comment, quand, où et avec quelle ampleur se produira le changement de climat; un fait incontestable est la hausse de la concentration du dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère. Une autre certitude est la solidité de la théorie de base de l'effet de serre: la composition du mélange de gaz dans l'atmosphère affecte fortement la température de la planète.

2.8.3. Effets sur les processus de physiologie des plantes et dans les sols

2.8.3.1. Effets fertilisants et anti-transpirants du CO₂

Le type de plante et la productivité des plantes sont des déterminants majeurs de la production agricole. C'est pourquoi il est fondamental de comprendre et de quantifier la réponse des cultures les plus importantes aux changements des conditions environnementales. Différentes espèces de cultures ont différentes réponses aux concentrations accrues en CO₂ et aux changements combinés des autres facteurs tels que la température, la précipitation, les polluants, le rayonnement ultraviolet (UV), etc. Par exemple, les expériences d'enrichissement en CO₂ à l'air libre en Arizona, USA, démontrent que le coton répond très fort à une teneur élevée en CO₂ alors que le blé répond beaucoup moins.

Le CO₂ est un facteur-clé dans la photosynthèse et la croissance des plantes. Après diffusion dans la plante à travers les stomates, il est transformé en hydrates de carbone par la photosynthèse. Un grand nombre de molécules d'eau sont perdues par transpiration à travers les stomates pour chaque molécule de CO₂ qui entre dans la feuille. Dans un environnement riche en CO₂, un gradient de concentration plus grand force plus de CO₂ dans la plante tandis que la fermeture partielle des stomates réduira les pertes d'eau de la feuille. Au fur et à mesure de l'ouverture stomatique dans un environnement plus riche en CO₂, la perte d'eau à partir de la plante diminue aussi, ce qui accroît l'efficacité à l'utilisation de l'eau. Par exemple, on rapporte que le doublement des concentrations actuelles en CO₂ réduit la conductance (ouverture) stomatique de 30 à 60% en fonction de l'espèce. La réduction de la consommation d'eau est appelée l'effet anti-transpirant du CO₂.

L'efficacité à l'utilisation de l'eau par la plante s'améliore puisque moins d'eau est utilisée pour une quantité égale ou moindre de CO₂ transformé en matière sèche. En même temps, la photosynthèse nette peut augmenter parce que la photorespiration, qui réduit le gain de carbone, est moindre à des concentrations élevées en CO₂. Dans des conditions optimales de lumière, d'humidité et de disponibilité en nutriments, cet effet de fertilisation pourrait accroître la production de biomasse au-dessus et en-dessous du sol de 10 à 40% en fonction du type de culture et même à des niveaux plus élevés comme c'est le cas chez le coton. Une production foliaire plus précoce et plus rapide est attendue et l'augmentation incrémentielle de biomasse peut avantager même plus le système des racines. La couverture plus précoce du sol à cause d'un développement précoce du couvert végétal peut aussi limiter les pertes d'eau par évaporation directe du sol. Cette réponse est même plus forte à hautes températures puisque la température optimale pour la photosynthèse augmente avec une haute teneur en CO₂ atmosphérique. Par contre, une combinaison de basses températures et d'une concentration élevée en CO₂ pourrait réduire la croissance des plantes.

L'importance des effets fertilisants et anti-transpirants varie avec le type de culture. Par exemple, avec un doublement du CO₂ atmosphérique, on peut s'attendre à ce que la production de biomasse des plantes C₃, qui comprennent les principales cultures comme le riz, le blé, les fèves, le soja, le tournesol, les arachides et le coton, croisse en moyenne de 30% pourvu qu'il n'y ait pas d'autres facteurs limitants.

D'un autre côté, et indépendamment du CO₂, la physiologie des plantes C₄ autorise, en général, une capacité photosynthétique plus élevée que celle des plantes C₃. Cependant, cette efficacité est vite saturée à une concentration accrue en CO₂. Par conséquent, dans un environnement riche en CO₂, l'amélioration nette de la photosynthèse des plantes C₄ est proportionnellement plus petite (de l'ordre de 10%, surtout dans les tiges) malgré que la WUE puisse s'améliorer significativement (de l'ordre de 40%). Cette catégorie inclut les cultures d'importance majeure pour la production alimentaire telles que le maïs, le sorgho, la canne à sucre et le mil mais aussi les herbes tropicales, les pâtures, le fourrage et quelques espèces de mauvaises herbes qui sont critiques pour la production agricole. Les plantes CAM semblent aussi moins sensibles à l'enrichissement en CO₂ (Poorter, 1993).

2.8.3.2. Effets sur la fertilité du sol

Un doublement soudain de la concentration en CO₂ atmosphérique associé à des températures plus élevées - comme c'est le cas dans la plupart des expérimentations à enrichissement sous enceinte fermée ou à l'air libre - peut conduire à la dégradation du sol avec épuisement des nutriments. Une augmentation potentielle de la fertilité initiale du sol sous une teneur élevée en CO₂ atmosphérique est attendue si l'augmentation en CO₂ a lieu graduellement comme en pratique et dans le cas où les modèles de cultures prennent en compte des augmentations transitoires graduelles. Une litière supplémentaire augmentera vraisemblablement la teneur en matière organique du sol à moins que la chimie de la litière ne change radicalement, ce qui causerait un déclin de la vitesse de décomposition de la litière.

Cependant, la température plus élevée du sol peut stimuler la respiration microbienne et la décomposition de la matière organique (c.-à-d., la minéralisation) et causer le largage de nutriments qui deviennent disponibles pour l'assimilation par la plante à travers le système des racines, à moins que la compétition microbienne avec les plantes pour les nutriments disponibles ne s'intensifie. En outre, puisque l'efficacité de l'assimilation des nutriments et la structure (longueur et densité) des systèmes racinaires s'améliorent sous des concentrations élevées en CO₂, le prélèvement des nutriments par la plante peut aussi s'accroître en gros. De plus, on signale qu'un système racinaire étendu peut pénétrer plus profondément dans le sol et atteindre des sources supplémentaires d'humidité et de nutriments

Une force motrice additionnelle est un renforcement de l'association symbiotique entre les systèmes racinaires, les champignons et les bactéries de la rhizosphère sous des concentrations élevées en CO₂. Si ces concentrations n'altèrent pas fort la composition existante des gaz dans la rhizosphère, la colonisation du système de racines par les mycorhizes (champignons en symbiose avec les racines qui facilitent l'assimilation par les plantes du phosphate absorbé) et les bactéries fixatrices d'azote (bactéries qui ont la capacité d'incorporer l'azote atmosphérique dans des composés nitrogenés utilisables par les organismes vivants) va probablement améliorer l'assimilation des nutriments par les plantes hôtes. Cependant, il est possible que ce processus se ralentira à la longue s'il y a des modifications dans la chimie de la litière, par ex., une hausse des rapports C/N et des tannins. Dans ce cas, il y aura une plus forte demande pour des engrais supplémentaires.

2.8.3.3. Incertitudes

L'image prometteuse d'une production alimentaire améliorée avec une teneur plus élevée en CO₂ atmosphérique est modifiée par d'autres facteurs qui peuvent limiter la croissance. En premier lieu, la plus grande partie de notre compréhension des effets positifs sur les cultures est basée sur des études à court terme et contrôlées, d'habitude, sur des plantes individuelles. Malgré une certaine évidence à partir des essais au champ, l'extrapolation et la généralisation à des conditions de terrain à grande échelle ou à une production alimentaire

globale à long terme sont encore incertaines. De même, puisque les réponses des cultures au changement de climat sont spécifiques au site et dépendantes de l'espèce, la connaissance d'une sorte de groupements ou de plantes (par ex., annuelles) peut avoir peu d'intérêt pour d'autres espèces ou groupements (par ex., pérennes). En second lieu, dans des conditions de nutriments du sol ou de rayonnement solaire limitées (par ex., une nébulosité renforcée), une teneur en CO₂ plus haute peut ne pas améliorer les rendements globaux; dans une grande partie du monde, de telles conditions de stress sont la règle plutôt que l'exception. En fait, les nutriments et autres limitations actuelles peuvent être plus critiques à la production agricole que l'impact potentiel du changement de climat surtout si l'urbanisation et la demande accrue de produits agricoles poussent l'agriculture vers des terres marginales.

Il y a des mécanismes physiologiques et biochimiques qui peuvent encore plus limiter les bénéfices à long terme du CO₂. Par exemple, après une amélioration initiale, la vitesse de croissance de nombreuses espèces pérennes exposées à des concentrations élevées en CO₂ tend à chuter à un niveau proche de celle de plantes non exposées. Une explication possible est une réaction biochimique comme la réduction de l'enzyme rubisco due à l'accumulation d'hydrates de carbone dans les feuilles qui ralentit la photosynthèse et réduit la disponibilité du phosphore pour amener les hydrates de carbone dans les parties en croissance des plantes. Il y a aussi une connaissance insuffisante des causes et des conséquences exactes de cette dérégulation dans diverses cultures. Il semble qu'une force puits joue un rôle majeur dans ce processus vu que la dérégulation serait plus forte dans les cultures qui sont limitées au point de vue puits que dans celles qui sont illimitées à ce point de vue. Les réponses physiologiques directes des plantes (par ex., une modification de la résistance stomatique ou de l'indice foliaire) peuvent être différentes aux divers stades de croissance à des concentrations en CO₂ variables au-dessus ou en dessous de celles relatives à la découverte qui a montré que les stades précoces de développement de la plante répondent mieux à une teneur élevée en CO₂ que les stades plus tardifs.

2.8.3.4. Effets sur les processus hydrologiques

Puisque l'eau est un facteur critique pour les rendements des cultures, les avantages d'une teneur élevée en CO₂ atmosphérique ne peuvent être réalisés si l'eau est un facteur limitant. Cependant, il est évident que la réaction au CO₂ croît au cours d'années sèches dans certaines terres de prairies. Quoique certains modèles récents montrent une sécheresse accrue dans certaines régions et des pluies accrues dans d'autres, l'information disponible sur l'effet du changement de climat sur la disponibilité globale en eau est contradictoire et reste fort fragmentée à l'exception d'une affirmation presque gratuite que le cycle hydrologique et, en fin de compte, l'approvisionnement en eau seront probablement affectés.

2.8.3.5. Effets sur la sécurité alimentaire globale

Des modèles ont tenté de simuler les impacts du changement de climat sur la situation alimentaire mondiale en mettant ensemble les données de population, les composantes du système terre-atmosphère-océan et les scénarios du changement de climat ainsi que les modifications potentielles des rendements des cultures importantes. Le but de ces modèles est de prédire les modifications de la productivité des terres et le glissement géographique dans l'usage des terres agricoles en fonction des changements du climat et de la demande alimentaire. Les principaux résultats de ces modèles révèlent de nouvelles prédictions et en confirment de précédentes qu'un doublement du CO₂ atmosphérique causerait comme suit :

- des zones agro-écologiques se déplaceraient à cause d'une hausse de température et d'une meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau avec d'importantes différences régionales;
- les rendements de cultures et le pâturage hivernal dans les régions de moyennes et hautes latitudes (c.-à-d., principalement dans les pays développés) s'amélioreraient à cause d'une

photosynthèse accrue, de plus longues périodes de croissance et d'une extension des régions de croissance sans gel, à condition que les conditions optimales de croissance soient maintenues, par ex-, par un usage judicieux des engrais et des pesticides sur les terres agricoles;

- dans la plupart des pays en développement, la productivité des cultures diminuerait (quelque 10% de réduction en céréales), ce qui augmenterait les prix agricoles sur les marchés locaux et mondiaux et le besoin d'importation de céréales bien que le rapport alimentaire global offre/demande changerait seulement un peu;
- il peut y avoir beaucoup de risques dans les régions tropicales et subtropicales et le risque le plus grand pour la sécurité alimentaire serait en Afrique Sub-Saharienne. L'ampleur de la menace dépendra aussi, à l'avenir, du comportement des secteurs non-agricoles de l'économie.

Il reste beaucoup d'incertitudes autour de ces prédictions. Par exemple, les conditions du sol dans une partie des nouvelles terres devenant disponibles par le glissement des zones climatiques peuvent être impropres à une production soutenable des cultures. De nouvelles variétés peuvent devoir être développées. Les prédictions sont aussi troublées par les incertitudes sur le rôle des volcans, des océans et des écosystèmes terrestres dans les flux globaux de carbone.

Chapitre III : LA COMPOSANTE EDAPHIQUE (LE SOL)

3.1. GENERALITES

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 subséquentement 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.

3.2. DEFINITIONS

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.

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.

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.

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.

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.

Pédologie

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

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.

3.3. FORMATION DU SOL

3.3.1. 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.

3.3.1.1. Décomposition de la roche mère

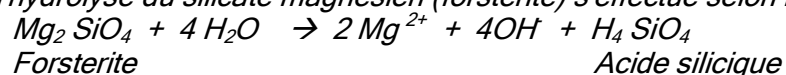
La décomposition de la roche mère aboutit à la formation de la partie minérale du sol. Elle comporte une désagrégation physique et une altération chimique.

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.

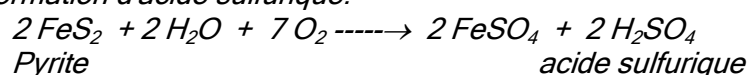
- *L'hydrolyse* comprend toutes les réactions qui se produisent en présence d'eau. Elle a pour rôle premier de libérer les éléments contenus des cristaux, dans la solution de sol.

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



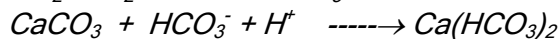
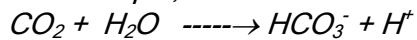
- *L'oxydation* est généralement le premier changement observable. Elle se manifeste surtout dans les roches qui contiennent du fer [minéraux ferromagnésiens (pyroxène, amphibole) et sulfure de fer (pyrite)]. Elle entraîne la dissociation des cristaux

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



3.3.1.2. Enrichissement en matières organiques

Les roches en cours d'altération sont colonisées par des êtres vivants : d'abord les bactéries autotrophes et les lichens ; à leur mort, ils laissent des matières organiques qui se décomposent sous l'action de micro-organismes pour former des sels minéraux et l'humus. Ces derniers permettent l'installation des mousses puis, des plantes supérieures et des animaux.

Une fois l'humus présent dans le sol, il s'associe à l'argile pour former le complexe argilo-humique. Le sol nouvellement formé a un profil homogène ; c'est un sol jeune. Les êtres vivants du sol vont accélérer l'évolution des roches à travers l'augmentation des teneurs en CO₂ par la respiration et l'acidité de certains constituants de la matière organique.

A partir du moment où les éléments minéraux et la matière organique coexistent, le sol a véritablement pris naissance. L'ensemble des processus physiques, chimiques et biologiques se poursuit et le sol évolue.

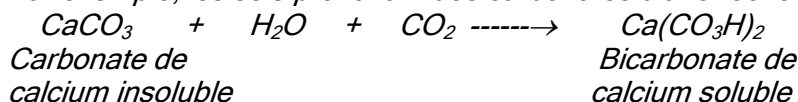
3.3.1.3. Migration d'éléments

Une fois formé, le sol va évoluer, principalement du fait du déplacement de certains éléments. On observe alors des migrations descendantes et des migrations ascendantes.

Les migrations descendantes désignent l'entraînement des éléments par les eaux d'infiltration. Les éléments les plus solubles et les plus fins ont tendance à descendre, entraînés par les eaux d'infiltration. On distingue la lixiviation, la cheluviation et le lessivage.

- La *lixiviation* est la migration de sels solubles (sels de K⁺, Na⁺, Ca⁺⁺, etc).

Par exemple, les sels provenant des carbonates d'une roche calcaire.



- La *cheluviation* est la migration des complexes organométalliques (principalement de fer et d'alumine).

- Le *lessivage* est la migration des argiles. Très souvent, on regroupe les trois formes de migration descendante sous le terme général de "lessivage".

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.

3.3.2. 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.

3.3.2.1. 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).

3.3.2.2. 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.

3.3.2.3. 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.

3.3.2.4. 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.

3.3.2.5. 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 ;

3.3.2.6. 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.

3.3.2.7. 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 (Wisconsin), 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.

3.3.3. Appréciation de l'évolution d'un sol

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.

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.

3.3.4. 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.

Les principales fonctions reconnues aux sols sont les suivantes :

- un support pour les êtres vivants ;
- un lieu de transformation des matières organiques ;
- une réserve organique et minérale ;
- un régulateur des échanges dans l'écosystème ;
- un système épurateur des eaux ;
- le lieu de développement des aires de pâture ;
- un élément constitutif du paysage ;
- le lieu de production agricole et forestière, etc.

Ces multiples fonctions font des sols une composante essentielle des écosystèmes naturels ou anthropisés.

3.3.5. 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. On peut citer la classification belge, la classification de la FAO, la classification américaine, la classification française, etc.

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.

3.3.6. Notion de climax

Le climat et le sol évoluent et font évoluer dans le même temps les êtres vivants présents dans un biotope donné et en particulier la végétation. On obtient ainsi à un certain stade d'évolution du milieu un équilibre "végétation - sol - climat" encore appelé **climax**.

Le climax représente une végétation stable caractéristique d'un milieu naturel donné (sol et climat) non modifié par l'homme.

Ainsi, la notion de climax réfère à un écosystème en équilibre concerne surtout les milieux naturels. Ainsi, cette notion ne s'applique pas aux milieux cultivés. Toutefois, elle reste une connaissance essentielle à l'agronome et notamment, dans les choix qu'il fera lors de la mise en exploitation de son domaine ou des mesures éventuelles de restauration.

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.

3.4.1. 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.

3.4.1.1. 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 car 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 μ m) ou argiles ;
- les particules de diamètre compris entre 0,002 mm et 0,02 mm (2 μ m et 20 μ m) ou limons fins ;
- les particules de diamètre compris entre 0,02 mm et 0,05 mm (20 μ m et 50 μ m), ou limons grossiers ;
- les particules de diamètre compris entre 0,05 mm et 0,2 mm (50 μ m et 200 μ m) ou sables fins
- les particules de diamètre compris entre 0,2 mm et 20 mm (200 μ m et 2 000 μ 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 :

- 30 % d'argile ; 20 % de limons et 50 % de sable ;
- 20 % d'argile, 45 % de limon et 35 % de sable ;
- 25 % d'argile, 35 % de limon et 40 % de sable ;
- 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».

3.4.1.2. 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 électro-négatif 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.

3.4.1.3. 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 flocculat au fond de l'eau (état flocculé).

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.

3.4.1.4. 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

3.4.1.5. 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.

3.4.2. Structure du sol

3.4.2.1. 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.

3.4.2.2. 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.

3.4.2.3. 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 floculants ;
- 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).

3.4.2.4. 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 égale à

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

- 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. E; 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.*

3.4.2.5. 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.

3.5. 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.

3.5.1. 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.

3.5.1.1. 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.

3.5.1.2. 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

3.5.1.3. 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.

- 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).
($V = 100 \times S/T$).

3.5.2. Réaction du sol ou pH

3.5.2.1. 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.

3.5.2.2. 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 ($\text{pH} < 7$) 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.*

EXEMPLE DE PLANTES INDICATRICES DE MILIEUX BASIQUES

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.

3.5.2.3. 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).

3.5.3. 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 plastiques, 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 de ces 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. Chaque élément a une dynamique spécifique et la présence d'un élément ne traduit pas sa disponibilité pour les plantes.

3.5.3.1. 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 absorbant.

3.5.3.2. 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.

3.5.3.3. Le 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.

3.5.3.4. Le 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 CO_2 ou d'acides humiques ;
- dans la solution du sol.

3.5.3.5. Le soufre

Le soufre organique, forme de réserve, se minéralise progressivement et la forme minérale (anions SO_3^{2-} et SO_4^{2-}) n'est pas retenue par le complexe absorbant.

3.5.3.6. Les 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.

3.6. 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.

3.6.1. Les principaux organismes du sol

3.6.1.1. 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 mésofaune 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. Subsidièrement, 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

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).

3.6.1.2. 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'auréomycine, 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.

2.6.2. Rôle des êtres vivants

2.6.2.1. 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 N₂, 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. **FAIM D'AZOTE**

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.

(Représentation du cycle de l'azote)

2.6.2.2. 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.

2.6.2.3. 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 : LA COMPOSANTE VEGETALE (LA 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, croît 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</i> var. <i>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>hypogaea</i>
Tomate	Solanaceae	<i>lycopersicon</i>	<i>esculentum</i>
Poivron	Solanaceae	<i>Capsicum</i>	<i>annuum</i>
Piment	Solanaceae	<i>Capsicum</i>	<i>annuum</i> var. <i>annuum</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</i>	<i>sativa</i>
Maïs	Poaceae (Graminées)	<i>Zea</i>	<i>mays</i>
Maïs sucré	Poaceae	<i>Zea</i>	<i>mays</i> var. <i>rugosa</i>
Maïs à éclater	Poaceae	<i>Zea</i>	<i>mays</i> var. <i>praecox</i>

Exercice : Trouver les noms scientifiques des plantes ci-après : Aubergine, pois, haricot commun, soja, gombo, carotte, persil, morelle noire, amarante, veronique, radis, concombre, pomme de terre.

4.2. COISSANCE ET DEVELOPPEMENT DE LA PLANTE

4.2. CROISSANCE ET DEVELOPPEMENT

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 sans 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 quel que soit l'organe ou le groupe d'organes considérés. Elle se présente sous la forme d'un S aplati ; 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 croissance présente trois phases distinctes successives :

- Une phase initiale où la croissance est faible et sa vitesse lente ;
- Une phase où la vitesse est élevée et atteint une valeur maximale ;
- Une phase où la vitesse décroît à l'approche de la fin de croissance jusqu'à atteindre une valeur proche de zéro.

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 25-30 °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 thermopériodicité n'apparaissent donc que lorsqu'elle est associée à la photopériodicité. 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 poids 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 que 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'acide 0 naphthalène acétique, l'hydrazide maléique par exemple.

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. CYCLE DE VEGETATION ET CYCLE DE CULTURE

4.3.1. 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 étapes du cycle végétatif sont les suivantes :

Principales étapes du cycle de végétation

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.

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.

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.

Croissance active

La croissance est caractérisée par une augmentation en taille, en surface ou en volume. 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 une phase d'initiation où les pièces florales apparaissent à l'état d'ébauches. La mise à fleur ou floraison suit immédiatement ou est différée. En général, le développement végétatif s'arrête lors de l'entrée à l'état reproducteur. 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.

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).

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

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.

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. 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'organogénèse est réglée par un équilibre entre la concentration en auxines et en cytokinines ; les premières sont déterminantes dans la rhizogénèse, 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 radriculaire.

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 par exemple :

- 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.

4.4. 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.

4.4.1. 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.*

4.4.2. 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

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.

4.4.3. 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. La limite actuelle 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 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. La limite

actuelle de du développement de cette technique réside dans la mise au point de milieux de culture appropriés.

4.5. CHOIX DE L'ESPECE ET DE LA VARIETE

4.5.1. 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.

(Gombo l'espèce *callei* vs espèce *esculentus*)

4.5.2. 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 (les 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.

4.5.3. Semence

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.

4.5.3.1. Types de semences :

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).

4.5.3.2. 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

Qualité des semences : l'un des premiers critères de réussite d'une culture

4.5.3.3. Provenance des semences

Les semences utilisées par un agriculteur peuvent avoir deux principales provenances : la récolte d'une année précédente ou l'achat dans le commerce.

L'achat de semence 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.

4.5.3.4. 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.

4.5.3.5. 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.

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

4.6. RELATION SOL-CLIMAT-PLANTE CULTIVÉE

La plante cultivée, dans son environnement, doit trouver des conditions climatiques et édaphiques favorables qui lui permettent de réaliser son cycle de culture et de satisfaire l'objectif de rendement que s'est fixé l'agriculteur.

Pour cela, l'agriculteur doit connaître les techniques lui permettant d'améliorer les conditions de milieu ou les plantes elles-mêmes.

Deuxième partie : MAITRISE TECHNIQUE DE LA PRODUCTION

Chapitre V : AMELIORATION DE L'ENVIRONNEMENT CLIMATIQUE

Les modifications climatiques envisageables par l'homme ne peuvent intéresser qu'un espace agricole restreint. Elles résultent soit d'un apport d'énergie ou d'eau, soit d'une modification de la distribution des flux d'énergie. Dans tous les cas, on aboutit à la création d'un microclimat.

L'agro- météorologie est une discipline qui vise à prendre en compte les interactions entre les facteurs du milieu, en particulier ceux de l'environnement climatique et l'agriculture. Elle fait l'objet d'un cours particulier.

Les principaux moyens utilisés pour modifier le climat sont :

- les serres ;
- les brise-vents ;
- la pluie artificielle ;
- l'irrigation et le drainage ;
- la plasticulture.

L'importance pratique des différents moyens est très inégale. Tous n'intéressent pas le domaine de la grande culture.

5.1. SERRES

5.1.1. Serre et effet de serre

Une serre est un espace fermé, constituée d'une enveloppe, de préférence du verre. Le verre utilisé est transparent pour les radiations de longueur d'onde comprises entre 300 et 3000 nm ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{ m}$) et pratiquement opaque aux longueurs d'onde supérieures, aux infrarouges en particulier. Il laisse donc passer le rayonnement photo synthétiquement actif (400 à 700 nm), mais bloque une part importante du rayonnement thermique du sol et de l'atmosphère (3 000 à 80 000 nm) qu'il réémet en un rayonnement propre, c'est l'effet de serre.

L'effet de serre est dû aux caractéristiques spectrales du verre. Avec le plastique, matériau plus léger et moins coûteux dont les caractéristiques spectrales sont différentes, l'effet est différent car une fraction des rayonnements de grandes longueurs d'onde le traverse.

5.1.2. Facteurs climatiques modifiés

Les facteurs climatiques modifiés à l'intérieur d'une serre sont notamment : la température, le rayonnement et le degré hygrométrique. En effet, l'effet de serre provoque une élévation de température. L'éclairement est atténué ; un éclairage artificiel est nécessaire pour les cultures.

L'élévation de la température de l'air abaisse le degré hygrométrique. Pour y remédier, on utilise des humidificateurs d'air afin de réduire le déficit de saturation et éviter une transpiration trop élevée des végétaux. Mais, l'air étant plus humide, tout refroidissement entraîne des condensations d'eau.

Dans une serre, la composition spectrale du rayonnement est modifiée sous l'effet de l'absorption spécifique et de la diffusion au niveau des parois. L'importance relative du rayonnement direct et du rayonnement diffus est modifiée (*Tableau 1.1*), selon la nature des matériaux utilisés. Le verre est assez transparent aux UV proches ; le polyvinyle est opaque, pratiquement jusqu'à 500 nm.

Aux doses élevées d'UV lointains (120-300 nm), les structures et les activités de l'appareil photosynthétique des végétaux sont perturbées. En plein champ, les doses reçues sont faibles et des polyphénols présents dans les feuilles jouent un rôle protecteur. En serre, il est indispensable de contrôler la qualité des rayonnements.

Le niveau des autres facteurs étant plus élevé, la teneur en gaz carbonique peut devenir limitante pour la photosynthèse. On y remédie surtout en assurant un renouvellement d'air. Des essais de fertilisation carbonée par apports de gaz carbonique ont été tentés.

La faible inertie thermique de la serre oblige à réguler la température. La nuit, il faut chauffer tout en maintenant la température inférieure à celle du jour afin de bénéficier des effets du thermopériorisme. Le brassage de l'air assure aussi l'homogénéité thermique. En climat chaud ou en été dans les zones à climat tempéré, le refroidissement des serres est indispensable. Il est obtenu :

- par une ventilation forcée ;
- en faisant ruisseler de l'eau sur les parois latérales.

5.2. BRISE-VENT

Un brise-vent est un obstacle d'une certaine hauteur placé perpendiculairement à la direction des vents dominants dans le but d'atténuer leur vitesse. Sa présence entraîne notamment :

- une diminution de l'apport d'énergie par advection ;
- une réduction des échanges convectifs de vapeur d'eau, de chaleur et de gaz carbonique derrière le brise-vent.

Les modifications climatiques résultantes intéressent une zone limitée en amont et de manière plus marquée, une zone « sous le vent » de longueur égale à 10 à 20 fois la hauteur du brise-vent.

Figure : Influence du brise vent sur la vitesse du vent

5.2.1. Principaux effets d'un brise-vent

L'effet principal d'un brise-vent concerne l'économie de l'eau. L'énergie apportée et les échanges gazeux dans les couches de la basse atmosphère sont réduits. La demande atmosphérique en eau (E.T.P.) diminue derrière un brise-vent et par conséquent l'évapotranspiration des cultures.

Le brassage de l'air étant réduit, la température diurne du sol augmente et la température nocturne est plus faible. Il en est de même pour celle des basses couches d'air au contact du sol. L'amplitude thermique quotidienne est donc augmentée. Le refroidissement nocturne est en partie atténué, l'air étant plus humide, la chaleur libérée lors de la condensation de la vapeur d'eau est plus importante.

La réduction du brassage de l'air entraîne également une légère élévation de la teneur en gaz carbonique plutôt favorable à la photosynthèse.

Outre les effets strictement climatiques, un brise-vent protège aussi contre l'érosion éolienne et régularise la distribution des pluies dans les zones très venteuses.

5.2.2. Nature des brise-vent

Un brise-vent doit freiner le vent sans l'arrêter. Une perméabilité de 50% est souhaitable. S'il se présente comme un obstacle infranchissable, une circulation tourbillonnaire de l'air s'établit en amont et en aval. On aboutit alors au résultat inverse de celui recherché : la demande climatique en eau augmente.

Figure : Circulation tourbillonnaire de l'air en présence d'un obstacle imperméable

Les brise-vent sont habituellement constitués d'obstacles vivants (haies). Des espèces forestières adaptées aux conditions locales, sont particulièrement recommandées pourvu qu'elles soient de taille élevée et à croissance rapide.

Un brise-vent occupe une certaine superficie et exerce une concurrence nutritive à l'égard des cultures environnantes. Afin d'éviter ces inconvénients des filets plastiques armés ont été utilisés comme brise-vent. Malgré leur plus faible hauteur, des résultats probants ont été obtenus. Des cultures annuelles assez hautes comme le sorgho et le maïs, disposées en bandes assez rapprochées entre deux brise-vent peuvent en prolonger les effets.

5.2.3. Effets des brise-vent

Les expériences réalisées à travers le monde démontrent que le rendement d'une culture protégée par un brise-vent est supérieur à celui d'une culture sans protection pour des conditions climatiques identiques. Un accroissement de rendement sur les céréales de 14% a été observé (en France). En associant brise-vent et irrigation, le gain de rendement a pu atteindre 26%.

Les brise-vent occasionnent une perte de surface agricole utile de 2-3% et gênent la circulation des engins agricoles. Un remembrement parcellaire préalable peut être souhaitable. Ils servent de refuge à une faune et une flore parfois nuisibles aux cultures. Ils sont parfois aussi à l'origine de difficultés particulières comme l'apport des feuilles en culture maraîchère.

Si l'on tient compte de tous les facteurs dommageables, l'installation des brise-vent peut apparaître comme beaucoup moins favorable à la production que ne le laissent supposer les suppléments de rendement signalés précédemment. Avant toute installation, une réflexion et une étude climatique et économique s'imposent.

5.3. PLUIE ARTIFICIELLE

Des expériences en vue de provoquer des précipitations de manière artificielle ont été conduites. Le principe consiste à envoyer dans une masse nuageuse, des cristaux d'iode

d'argent afin de provoquer la réunion des gouttelettes d'eau et leur précipitation. Des expériences sont menées en zone sahélienne dans le but d'augmenter la pluviométrie.

En effet, la principale entrave à une sécurité alimentaire durable et à une gestion rationnelle des ressources naturelles au Sahel est la pluviométrie et sa forte variabilité inter et intra saisonnières. Pour réduire l'impact des déficits pluviométriques devenus chroniques dans le Sahel, l'augmentation des précipitations par ensemencement des nuages constitue une voie que les pays membres du CILSS ont décidé de prospecter. A cet effet, le CILSS a entrepris d'élaborer un programme régional d'augmentation des précipitations par ensemencement des nuages pour l'ensemble de ses Etats Membres. Le Programme d'Augmentation des Précipitations par Ensemencement des Nuages au Sahel (APENS) est l'aboutissement d'un processus politique et scientifique.

Des opérations d'ensemencement des nuages en vue d'augmenter les précipitations ont été menées en zone CILSS depuis les années 1960. Ces actions bien que discontinues, ont montré que la zone sahélienne présente des atouts rendant possibles de telles opérations, dont les fortes convections naturelles et le développement vertical particulier des nuages. Les expériences opérationnelles en cours au Sahel, en au Burkina Faso ont démontré que la sécheresse peut être réduite substantiellement par la mise en œuvre d'un programme d'augmentation des précipitations par ensemencement des nuages, conçu, planifié et conduit de façon organisée.

Sur le plan technique, des pilotes exécutent des missions qui visent à trouver des lieux d'ascendance et y rester le plus longtemps possible de manière à alimenter le nuage avec des noyaux de condensation plus gros que la moyenne des noyaux naturels ce qui y augmentera la vitesse de formation de la pluie sous forme liquide. Sur le plan économique, on s'attend à une amélioration sensible des rendements agricoles et donc d'une réduction conséquente de la pauvreté, en même temps qu'on pourrait satisfaire les besoins en eau des populations. Sur le plan financier, un tel le programme pourrait amener les producteurs agricoles à dégager des surplus financiers qui augmenteraient leurs revenus.

Certains auteurs ont observé qu'on ne crée pas véritablement de pluie mais on provoque et accélère plutôt le processus naturel. La présence d'air humide est nécessaire. Dans les expériences couronnées de succès, on a pu constater que les précipitations étaient réduites dans les régions en aval de la zone traitée. Le processus de déclenchement est loin d'être totalement maîtrisé. La pluie « sur commande » n'est donc pas pour demain !

5.4. IRRIGATION ET DRAINAGE

5.4.1. Notions d'irrigation et de drainage

L'irrigation consiste à apporter de l'eau aux cultures. Elle est nécessaire lorsque les précipitations sont insuffisantes pour couvrir les besoins en eau des cultures. Plusieurs méthodes d'irrigation sont disponibles. Elles sont étudiées en détail dans le cours d'irrigation.

Le drainage est la technique qui consiste à évacuer l'excès d'eau d'un sol. Pour y parvenir, on pose des drains ou on construit des ouvrages d'évacuation.

5.4.2. Effets de l'irrigation et du drainage

L'irrigation et le drainage entraînent des modifications pédoclimatiques. En sols irrigués ou drainés, les propriétés thermiques du sol sont modifiées. Les différences de températures peuvent affecter la croissance et le développement des plantes, surtout dans les régions tempérées.

Dans les sols bien drainés, les échanges gazeux sont facilités par l'accélération du ressuyage. Par contre, un excès d'eau d'irrigation crée des conditions d'asphyxie peu favorables à la croissance et au développement des plantes.

5.5. PLASTICULTURE

5.5.1. Principe de la plasticulture

La plasticulture, dite aussi technique de solarisation, consiste à disposer à la surface du sol un film plastique photodégradable (film de polyéthylène par exemple), qui sera progressivement détruit par la lumière. Les cultures sont implantées sous ou au travers du film. La plasticulture est souvent utilisée en maraîchage.

5.5.2. Effets de la solarisation

Les principaux effets de la solarisation sont :

- un accroissement de la chaleur retenue dans le sol durant le jour, d'où un réchauffement du sol ;
- un moindre refroidissement nocturne du sol ;
- une réduction de l'évaporation de l'eau du sol ;
- une réduction des effets de battance en cas de fortes pluies ;
- une limitation des adventices (réduction de la concurrence vis-à-vis de l'eau).

Le coût du film plastique et de sa mise en place est assez élevé. En culture de maïs, la rentabilité nécessite un supplément de rendement de plus de 2 t/ha.

Chapitre VI : AMELIORATION DU MILIEU EDAPHIQUE

L'une des solutions pour améliorer la production végétale est de modifier les caractéristiques des sols. Très longtemps, les modifications envisageables sont restées limitées. Aujourd'hui les moyens mécaniques disponibles et la diversité des apports envisageables permettent des améliorations et des modifications des sols d'une toute autre ampleur. Dans certains cas particuliers, on aboutit même à une artificialisation complète du milieu. La limite de ces améliorations reste la rentabilité.

En agriculture intensive, le sol doit présenter le moins de contraintes possibles pour les plantes qui se succèdent. Le choix des cultures doit permettre le passage d'une culture à la suivante sans contrainte majeure. Les interventions consistent à modifier l'organisation du profil et certaines de ses caractéristiques.

Les modifications d'organisation par le travail du sol visent à créer des conditions qui, bien qu'en constante évolution, soient le plus longtemps possible favorables au développement et à la croissance des cultures.

Les apports pratiqués sont de différentes natures : fertilisants organiques ou minéraux, amendements, eau. Ils sont destinés soit à augmenter le stock existant pour le porter à un niveau plus favorable soit, en compensant les pertes, à le maintenir. Les pertes sont surtout la conséquence d'un entraînement (lessivage, érosion, évaporation) ou d'un prélèvement par les plantes ou les organismes.

Les principales interventions susceptibles d'améliorer les conditions de sol sont :

- le travail du sol ;
- le contrôle du milieu physico-chimique ;
- les matières organiques et l'azote ;
- l'amélioration et l'entretien des capacités nutritives du sol.

6.1. TRAVAIL DU SOL

Remarque : le travail du sol et notamment par les machines est étudié en détail dans le cours de machinisme agricole.

6.1.1. But du travail du sol

Le but du travail du sol est de créer un environnement favorable au développement racinaire et de permettre le fonctionnement normal d'outils comme les semoirs. Après une culture, il est généralement nécessaire de recréer une structure avant d'implanter la suivante. Les interventions de travail du sol, le labour en particulier, se pratiquent depuis fort longtemps. Dans les plus anciens écrits, l'agriculteur s'identifie au laboureur.

Les types d'outils utilisés sont nombreux et variés. Les possibilités d'intervention ont été considérablement accrues. Les conséquences de cette grande latitude, associée parfois à un certain suréquipement, ne sont pas toutes favorables. Des problèmes nouveaux sont apparus : le compactage des sols, la baisse du taux des matières organiques due en grande partie à un approfondissement inconsidéré des labours, l'accentuation des phénomènes d'érosion, etc.

Actuellement, on conteste la nécessité du travail du sol, du labour en particulier. La réduction des façons est recherchée, des techniques sans labour sont proposées, travail minimum, semis direct sur couverture végétale, etc.

6.1.2. Effets du travail du sol

Les effets habituellement recherchés par le travail du sol sont :

- la création ou le maintien d'un état structural favorable à la germination des semences, à l'installation et au fonctionnement du système racinaire des espèces cultivées ;
- l'enfouissement des résidus culturaux, l'incorporation des amendements, des engrais minéraux ou organiques et de certains pesticides ;
- la destruction de la végétation adventice et des repousses culturales ; dans certains cas, la lutte anti-parasitaire ;
- l'amélioration du stockage et de la circulation de l'eau, de l'air et de la chaleur.

Selon la nature du sol, du précédent cultural et de la culture envisagée, le travail du sol est plus ou moins indispensable. Certains des objectifs précédents peuvent être obtenus partiellement ou totalement par d'autres techniques : désherbage chimique, traitement pesticide, irrigation, etc.

Etat structural favorable

Pour un développement optimum, les végétaux cultivés doivent bénéficier tout au cours du cycle cultural, des conditions qui permettent l'installation d'un réseau de pores dans le profil et une surface de contact sol-atmosphère favorable.

Le réseau de pores dans l'ensemble du profil cultural devrait accueillir le système racinaire, assurer l'évacuation de l'eau saturante et favoriser le renouvellement de l'atmosphère ainsi que le réchauffement du sol.

La surface de contact sol-atmosphère devrait être perméable, dépourvue d'obstacles gênant la levée, les échanges gazeux, la propagation de la chaleur et l'infiltration de l'eau.

Dans la plus part des cas, la régénération de la structure du sol par les facteurs naturels est insuffisante pour assurer ces conditions. Le travail du sol est donc nécessaire pour modifier la porosité, la perméabilité et accroître l'ameublissement.

Enfouissement des résidus culturaux, amendements, engrais et pesticides.

L'enfouissement des résidus culturaux est nécessaire afin de libérer le sol. Un enfouissement profond des résidus peut être un moyen efficace de lutter contre certaines maladies ou formes parasitaires qu'ils hébergent : œufs et larves d'insectes nuisibles, spores des champignons, etc.

Le labour et les façons de travail du sol permettent d'incorporer et de disséminer dans le sol les éléments fertilisants peu mobiles des engrais et des amendements. Certains herbicides volatils à action racinaire et autres produits phytosanitaires contre les ravageurs souterrains sont incorporés au sol par les labours.

Lutte mécanique contre les adventices

L'élimination mécanique des adventices est obtenue de différentes manières :

- en binant et en sarclant en cours de végétation pour provoquer le dessèchement des végétaux ;
- en sectionnant ou en arrachant les racines.
- en enfouissant les semences. Un sol renferme un nombre considérable de semences d'espèces variées d'adventices. Le stock de semences est entretenu

annuellement. Les labours profonds permettent d'enfouir une partie importante des semences de l'année mais en remontent certaines qui étaient enfouies.

Rôle à l'égard de l'eau.

La plupart des travaux du sol permettent d'augmenter l'infiltration de l'eau en augmentant la porosité. La vitesse d'infiltration est plus élevée en sol labouré qu'en sol non travaillé. Si le sol présente suffisamment d'aspérités comme après un labour, le ruissellement est réduit et l'érosion limitée.

La réserve utile du sol et la cession de l'eau sont accrues en sol travaillé. Au total, la quantité d'eau disponible pour les cultures est plus importante.

Le travail du sol est plus particulièrement le labour peuvent contribuer à l'évacuation des excès d'eau.

6.1.3. Création et maintien d'un profil cultural

Le profil cultural est "l'ensemble constitué par la superposition des couches de terre individualisées par l'intervention des instruments de culture, les racines des végétaux et des facteurs naturels réagissant à ces actions". La première étape consiste à définir la constitution ou les caractéristiques du profil cultural souhaitable.

6.1.3.1. Profil cultural optimal

A chaque type de sol et chaque contexte climatique correspond un profil répondant aux exigences de la culture envisagée. Sa définition devrait prendre en compte les facteurs suivants :

- les caractéristiques particulières des plantes : exigences germinatives, type de système racinaire (fasciculé ou pivotant), capacité de pénétration, d'extraction de l'eau et des éléments minéraux, etc.
- la nature du sol : composition, comportement selon l'humidité, constitution de l'espace poral, etc.
- le climat local.

6.1.3.2. Composantes du profil cultural

Dans la plupart des cas, le profil cultural comportera trois couches principales :

- le lit de semences
- la couche arable
- le sous sol (au sens agronomique).

Figure : *Différentes couches souhaitables d'un profil cultural*

Malgré la stratification souhaitée, les couches doivent présenter une continuité suffisante pour ne pas gêner la circulation des fluides et la propagation des racines. Chacune des couches exerce des fonctions distinctes et nécessite des façons culturales différentes.

- le lit de semences doit assurer des conditions favorables à la germination (humidité, aération, etc.) et au premier enracinement ;
- la structure de la couche arable doit assurer des conditions favorables à la croissance et au développement des racines. Dans cette couche, les racines prélèvent beaucoup d'éléments minéraux en phase juvénile. Un bon état physique de la couche arable facilite l'interception radiculaire des éléments chimiques.
- le sous-sol est souvent plus tassé que le reste du profil. La modification de son état structural nécessite des interventions particulières telles que le sous-solage, le décompactage, etc.

6.1.4. Réalisation d'un profil cultural

6.1.4.1. Itinéraire de préparation

Pour beaucoup de cultures, le profil souhaité est assez complexe ; il n'est pas obtenu par une seule façon mais par une succession d'actions qui se complètent. L'ensemble constitue un **itinéraire de préparation**. Lors des façons culturales successives, on modifie des profils successifs jusqu'à obtenir le profil cultural souhaité. Les modifications résultent de deux types d'interventions :

- des opérations primaires comportant un retournement ou non du sol et un ameublissement ;
- des opérations secondaires ou complémentaires plus superficielles destinées à parfaire les actions précédentes, réduire la porosité excessive, affiner le lit de semence superficiellement, créer le lit des semences, etc.

Il n'existe pas d'itinéraire unique pour préparer une terre en vue d'une culture déterminée. Le même profil peut être obtenu avec divers outils ; selon l'état du sol, l'utilisation du même outil conduit à des résultats souvent très différents.

Les différentes étapes de la préparation sont interdépendantes et trois ensembles de caractéristiques interviennent constamment :

- celles du sol : composition, état physique et comportement sous l'action du climat et des outils ;
- celles du climat : le climat détermine en partie l'état hydrique du sol ;
- celles des outils utilisés : la gamme est très vaste, mais chaque agriculteur ne dispose que de quelques-uns qui ne sont pas forcément les plus adaptés à la préparation de toutes ses cultures.

6.1.4.2. Importance de l'état hydrique du sol

L'état hydrique du sol détermine sa consistance et son adhérence. A l'état cohérent, une motte se brise difficilement en fragments; à l'état friable, on obtient facilement de la terre fine.

Suivant l'humidité du sol, il est plus ou moins facile d'obtenir de la terre fine. Les outils, selon leur mode d'action, travaillent plus correctement dans une gamme d'humidité. A égalité de pression exercée, le compactage du sol varie avec l'humidité du sol.

6.1.4.3. Modes d'action des outils

Dans la plupart des cas, après le labour, on cherche à ameublir le sol. Ameublir consiste à réduire la cohésion et à adapter la porosité. Au sens étymologique, un sol est meuble si les agrégats peuvent se mouvoir facilement les uns par rapport aux autres. Le terme est ici plutôt entendu comme une division de la terre en mottes de moindre dimension et la création d'un

espace poral approprié (quantitativement et qualitativement). La modification de la porosité n'est pas toujours une amélioration, l'obtention d'une proportion de terre fine importante peut au contraire aboutir à réduire la porosité totale du sol.

Les outils de travail du sol agissent selon plusieurs modes :

- par fendillement ;
- par sectionnement ;
- par effet de choc ;
- par écrasement ;
- par cisaillement ;
- par tri vertical, etc.

A chaque mode ne correspond pas un type unique d'outils ; plusieurs outils peuvent avoir un même mode d'action et un même outil peut effectuer plusieurs actions.

Le fendillement se manifeste obliquement devant les outils. Des fentes apparaissent en avant des charrues ou des dents de chisel ou de cultivateurs.

Les outils tranchants agissent par sectionnement dans le sens d'avancement. Les charrues, les appareils à disques et les cultivateurs rotatifs travaillent ainsi.

La réduction de taille des mottes est obtenue par cisaillement entre les pièces mobiles des herse aimées, par choc contre les outils ou entre elles dans les outils rotatifs.

L'écrasement des mottes par les rouleaux permet d'obtenir de la terre fine.

La division des mottes est d'autant plus poussée que la vitesse de travail des outils non animés est élevée. Pour les outils animés, c'est l'inverse, la réduction de vitesse augmente la fragmentation des mottes (cas de la fraise).

Les outils à dents verticales ou inclinées opèrent un tri, la terre fine glisse préférentiellement dans le sillon creusé tandis que les mottes restent en surface.

6.1.5. Façons culturales

6.1.5.1. Classification des interventions culturales

Les interventions culturales peuvent être classées, selon qu'elles comportent ou non un retournement du sol, en deux ensembles. Le premier comprend labours et les façons qui les remplacent plus ou moins. Le second les pseudo- labours ou quasi-labours.

On appelle quasi-labour toute opération culturale où un ameublissement du sol est effectué sans retournement systématique. Les pseudo- labours sont réalisés, selon la nature et l'état hydrique du sol, avec différents instruments avant le labour (déchaumage) ou pour la préparation du lit de semences (travaux de reprise). Ils sont alors complétés par des façons superficielles.

Dans la plupart des cas, le labour demeure l'intervention principale de l'itinéraire de préparation. Plusieurs interventions peuvent être distinguées selon leur position chronologique et la profondeur d'ameublissement recherchée. On distingue :

- les interventions préalables : le déchaumage, le sous-solage ;
- les interventions principales : les labours et les façons effectuées avec une charrue non traditionnelle ;
- les interventions complémentaires : façons superficielles et façons d'entretiens.

6.1.5.2. Interventions préalables

Deux interventions peuvent être exécutées avant le labour, le déchaumage et le travail profond : décompactage et sous-solage. Elles intéressent des couches de terre différentes et ne sont pas systématiques.

Déchaumage

On déchaume après la récolte des céréales avec différents outils. Les objectifs sont :

- de pré-incorporer les résidus culturaux : pailles et chaume ;
- de lutter contre les adventices en sectionnant celles présentes et en stimulant la germination des semences des autres pour les détruire ultérieurement ;
- de créer, en climat sec, une couche de terre sèche limitant l'évaporation de l'eau.

L'enfouissement des résidus n'est pas le premier objectif du déchaumage. L'approfondissement, outre qu'il crée des conditions peu favorables à l'évolution des matières organiques, est un inconvénient pour le labour suivant, la quantité de terre fine risque d'être trop importante.

Décompactage et sous-solage

Le but du décompactage est de supprimer la semelle du labour, le tassement excessif, la prise en masse, etc. Il intéresse une couche d'une profondeur de 40 à 45 cm ; il ameublisse le sol en profondeur et crée des fissures.

Les sous-soleuses qui comportent de 1 à 3 éléments sous-soleurs ou étauçons travaillent de 45 cm à 1 m.

Quelque soit le matériel utilisé, la puissance de traction nécessaire est très élevée. Le sous-solage est une opération coûteuse dont les effets ne sont pas toujours évidents même lorsqu'il est réalisé en conditions sèches. En terrains profonds et compacts, les résultats sont aléatoires ; en terrains présentant une couche compacte, ils sont plus souvent bénéfiques. Le sous-solage n'est pas systématiquement à recommander.

6.1.5.3. Façons culturales principales

Les labours

Labourer consiste à découper une bande de terre de largeur et de profondeur variables et à la retourner en l'appliquant sur la bande précédente. Au cours de son déplacement sur le versoir, la bande de terre se déforme, se fracture et augmente de volume : la terre foisonne. La quantité de terre fine obtenue dépend de l'état du sol et surtout de la vitesse de travail.

Les objectifs du labour sont :

- provoquer un réarrangement des éléments structuraux ;
- enfouir les engrais (fumure de fond), les amendements, les résidus culturaux et les adventices ainsi que la matière organique apportée ;
- intervenir sur l'économie de l'eau en facilitant l'infiltration et l'élimination des excès.

Les façons culturales complémentaires

Ce sont les travaux de reprise effectués après les labours. Le sol est travaillé sans être retourné sur 10 à 15 cm : il s'agit de pseudo-labours. Etape entre le labour et les façons superficielles qui précèdent le semis, les pseudo-labours complètent le travail de la charrue et participent à la préparation du lit de semences. Les outils de pseudo-labours peuvent

aussi, dans certains cas, remplacer la charrue (techniques simplifiées). Les façons complémentaires comprennent aussi certaines d'entretien du sol et des cultures comme le roulage, le binage et le sarclage.

Les pseudo-labours sont réalisés avec trois types d'outils :

- des appareils à disques : déchaumeuses, pulvérisateurs, cover-crops, etc. ;
- des appareils à dents : cultivateurs, herbes ;
- des outils animés : fraises.

6.1.6. Evolution des techniques de travail du sol

On recommande de plus en plus une simplification des techniques de travail du sol caractérisée par une réduction du nombre de façons, une réduction des délais entre elles et l'introduction de techniques non traditionnelles sans retournement du sol.

6.1.6.1. Réduction et simplification des façons culturales

Différentes raisons expliquent et permettent ces pratiques réduites : l'accroissement des surfaces, le souci d'une économie d'énergie et de main d'œuvre, la puissance accrue des tracteurs, l'apparition de nouveaux outils, etc.

Par exemple, la puissance plus élevée de tracteurs autorise l'utilisation d'outils particuliers : charrues à plusieurs corps, outils à disques, etc

Les associations d'outils derrière le même tracteur ou mieux, les combinaisons de pièces travaillantes sur le même bâti sont très caractéristiques de l'évolution du travail du sol au cours des dernières années.

6.1.6.2. Techniques simplifiées

Le labour est une opération lente, coûteuse en énergie et en temps. Des arguments agronomiques sont avancés pour justifier son abandon : enfouissement trop profond des matières organiques, risque de semelle, perturbation de l'activité biologique, risque d'érosion, etc.

Deux techniques de travail du sol, avec suppression partielle ou totale du retournement sont proposées : le travail minimum et le semis sans labour.

Le **travail minimum** désigne toute opération culturale portant sur la totalité de la surface cultivée dont la profondeur de travail est limitée (10 à 12 cm). Le travail exécuté avec ou sans retournement du sol, consiste en un brassage des couches superficielles du sol.

En **culture sans labour**, seule la ligne de semis est travaillée superficiellement. La végétation du précédent cultural est détruite à l'aide d'un herbicide non rémanent. La technique est parfois qualifiée de "**labour chimique**".

6.2. MAITRISE D'UN DEFICIT HYDRIQUE

6.2.1. Alimentation hydrique des cultures

Sous l'effet de la demande atmosphérique en eau, un couvert végétal évapo-transpire. Pour compenser la perte d'eau, les plantes utilisent l'eau du sol et des précipitations dont l'ensemble constitue les disponibilités hydriques. Si cette offre est suffisante, la plante aura une croissance et un développement satisfaisants, si les autres facteurs de production sont réunis.

Si les disponibilités hydriques du milieu sont inférieures aux besoins, un déficit d'alimentation existe. Ce déficit devient l'objectif à satisfaire.

En rapport avec les potentialités hydriques d'un milieu, trois situations peuvent se présenter :

- le déficit est faible et peu fréquent ;
- le déficit est élevé et assez fréquent ;
- le déficit est très élevé et quasi-permanent.

La première situation correspond aux conditions dites de « cultures sèches ». Les besoins hydriques sont pratiquement toujours satisfaits les manques d'eau occasionnels sont trop faibles pour qu'il soit envisageable économiquement d'y apporter remède. Les cultures trop sensibles au manque d'eau sont à éviter dans la mesure du possible ; on cherchera à économiser l'eau.

Dans les situations suivantes, si l'eau est disponible, un apport est envisageable mais celui-ci présentera un caractère différent dans la deuxième situation, l'irrigation prendra un caractère complémentaire alors qu'elle sera systématique dans la troisième.

En **irrigation de complément**, on cherche la productivité maximale en raisonnant les apports selon les conditions agro- climatiques. En **irrigation systématique**, l'insuffisance d'eau est quasi-constante, les apports sont indispensables pour obtenir une production. L'irrigation devient une composante obligatoire et permanente de l'itinéraire technique.

La distinction précédente entre les deux types d'irrigation repose ici sur une base climatique. Mais une irrigation peut prendre un caractère systématique pour d'autres raisons : des raisons physiologiques, techniques et économiques. Sa nécessité peut être liée à des besoins physiologiques comme souvent pour le riz ; aux conditions naturelles pour le maïs dans la production de semences, des plants de pomme de terre, de légumes, etc. La recherche de la régularité et de la sécurité de production justifie les apports systématiques d'eau.

En même temps que l'irrigation apporte de l'eau aux plantes, elle diminue la température du sol ce qui peut avoir des effets positifs sur la production de certaines cultures en zones chaudes et sèches. La maîtrise de l'irrigation au niveau de la parcelle peut s'appuyer sur le contrôle de l'état hydrique du sol ou encore sur le bilan hydrique du sol.

6.2.2. Fondements pour la maîtrise de l'alimentation hydrique

L'augmentation des disponibilités peut être obtenue de plusieurs manières :

- par une meilleure économie de l'eau présente ;
- par un accroissement de la quantité d'eau disponible.

Techniques économes

Pour une culture déterminée, plusieurs objectifs sont envisageables :

- éliminer tout facteur limitant l'exploration radiculaire ;
- réserver au maximum l'eau existante aux seuls végétaux cultivés en éliminant les adventices ;
- limiter l'évaporation par un mulch/paillis naturel ou artificiel.

Différentes techniques concourent directement ou indirectement à la réalisation de ces objectifs : le travail du sol, le désherbage, etc. elles sont parfois qualifiées de techniques économes d'eau.

Si le choix de la culture est possible, les moyens suivants sont envisageables :

- des espèces à enracinement profond comme ;

- des espèces ayant la meilleure réponse à l'eau.

Les engrais sont parfois présentés comme des « économiseurs » d'eau. Une telle présentation est inexacte, leur utilisation augmente l'efficacité de l'eau. Le sol étant plus riche, pour une même quantité d'eau consommée, la quantité de matière produite est plus élevée.

Accroissement des quantités disponibles

L'accroissement des quantités disponibles est obtenu en partie en favorisant l'infiltration et surtout par l'irrigation.

Comment favoriser l'infiltration ?

6.2.3. Irrigation fondée sur la mesure de l'état hydrique du sol

L'état hydrique du sol s'apprécie à l'aide de deux caractéristiques :

- la teneur en eau, très utilisée depuis longtemps pour le bilan hydrique,
- les forces de liaison entre l'eau et le sol (potentiel matriciel ou « tension »).

Mesure de la teneur en eau

On peut distinguer deux types de méthodes permettant de mesurer la teneur en eau du sol :

- les méthodes fondées sur des prélèvements d'échantillons à différentes dates et une analyse ultérieure de la quantité d'eau qu'ils contiennent.
- les mesures réalisées dans le sol en place. Pour l'agronome, elles sont d'autant plus intéressantes qu'elles permettent d'accéder à des horizons profonds.

Prélèvement d'échantillons

Les prélèvements d'échantillons permettent d'obtenir des teneurs en eau pondérales. La méthode la plus répandue est la méthode gravimétrique, qui consiste à peser les échantillons avant et après séchage pendant vingt-quatre heures à 105° C. Apparemment simples par le matériel qu'elles exigent (tarière, boîte, balance, étuve), ces méthodes présentent cependant des inconvénients majeurs :

- Méthode destructrice, qui accroît beaucoup les problèmes d'échantillonnages (on ne travaille jamais sur les mêmes échantillons), d'autant plus que l'on envisage de caractériser une évolution,
- Méthode lourde à pratiquer, voire inapplicable dans certains cas :
 - Nombre de répétitions indispensables,
 - Difficulté de réaliser les sondages quand le sol s'assèche,
 - Présence d'horizons consolidés ou de cailloux,
 - Méthode perturbant le milieu analysé (piétinement).

Pour passer de la teneur en eau pondérale (H_p) à la teneur en eau volumique (H_v), ce qui est indispensable pour calculer les volumes d'eau consommés, il faut connaître la masse volumique sèche des échantillons prélevés (appelée encore densité sèche ou apparente, D_a) :

$$H_v = H_p \times D_a.$$

Cependant, la méthode gravimétrique reste la méthode de référence pour l'étalonnage des autres modes de mesure.

Mesures dans le sol en place

Pour réaliser des mesures dans le sol en place, il existe aussi plusieurs méthodes. Sous réserve d'un étalonnage, elles permettent d'obtenir la teneur en eau volumique du sol. Parmi ces méthodes, l'humidimétrie neutronique de profondeur (« sonde à neutrons ») s'est largement développée.

Le principe de mesure de la sonde à neutrons est relativement simple. Des neutrons rapides, émis par une source radioactive (scellée dans une sonde cylindrique), sont ralentis principalement par collision avec des atomes d'hydrogène, dont la teneur varie avec celle de l'eau du sol. Les neutrons ralentis sont détectés par un compteur placé dans la sonde. La mesure s'effectue dans un volume dit « sphère d'influence », dont le rayon, variable selon la teneur en eau, est de l'ordre de 10 à 20 cm.

La sonde elle-même est déplacée en profondeur dans un tube, préalablement mis en place, à l'aide d'un câble qui transfère également l'information jusqu'à l'échelle de comptage. Après avoir été étalonné, l'humidimètre à neutrons donne une mesure immédiate, sans perturbation du milieu, et permet de suivre des évolutions de teneurs en eau.

L'utilisation de radioéléments artificiels doit cependant faire l'objet de certaines précautions. Parfois une autorisation est nécessaire, ainsi qu'une formation particulière et un suivi du personnel. Dans certains pays (Etats-Unis, Australie), les mesures sont effectuées par des prestataires de service.

Utilisation des mesures de teneur en eau

La connaissance de la situation des réserves en eau du sol à un moment donné permet d'orienter judicieusement la conduite des arrosages si l'on a défini une valeur limite ou seuil de dessèchement acceptable des couches de sol.

Grâce à l'utilisation combinée des mesures de sonde à neutrons et de tensiométrie, on peut établir directement le bilan hydrique au champ. Cette combinaison permet également de caler et valider des modèles de bilan hydrique.

Tensiométrie

Les méthodes de mesure de la disponibilité en eau du sol sont nombreuses, mais la plupart s'avèrent mal adaptées aux exigences de la pratique agricole (importance des manipulations nécessaires, coûts des équipements et/ou manque de fiabilité des informations). La tensiométrie constitue un moyen pratique pour évaluer l'évolution de l'état hydrique du sol.

L'eau contenue dans le sol est retenue par des forces de tension superficielle. La succion exercée par les racines permet d'extraire cette eau. Les forces de liaison de l'eau et du sol sont caractérisées par une variable appelée communément tension ou succion, exprimée en unité de pression.

Pour mesurer la tension, on utilise des appareils composés d'un organe de mesure qui traduit la tension de l'eau dans le sol. Dans le cas des tensiomètres, la transmission de la tension jusqu'à l'organe de mesure (manomètre à dépression), s'effectue par une colonne d'eau en équilibre avec l'eau du sol, par l'intermédiaire d'une capsule poreuse. Les capsules sont placées à la profondeur voulue en différents points de la parcelle.

La bougie du tensiomètre est placée dans le sol à la profondeur de mesure voulue.

- la bougie restitue l'eau au sol lorsque celui-ci tend à se dessécher en créant une pression dans le tensiomètre, le réservoir étant étanche

- si le sol est réhumidifié, la dépression provoque un retour de l'eau dans la tensiométrie et le manomètre indique le nouvel équilibre obtenu.

Beaucoup d'eau = Faible tension
 Peu d'eau = Forte tension

A titre indicatif, quelques valeurs caractéristiques de la relation tension - état hydrique du sol sont les suivantes :

- 0 cbar : la macroporosité est pleine d'eau (sol saturé d'eau).
- < 7 cbar la macroporosité n'est plus totalement drainée
- 7 à 15 cbar eau disponible en abondance, même en substrat grossier (sol proche de la capacité au champ).
- >20 cbar Début de dessèchement. Eau encore disponible en quantité.

6.2.4. Irrigation fondée sur le bilan hydrique du sol

Principes du bilan hydrique

Le bilan hydrique permet de déterminer l'état des réserves en eau du sol. Il est alors possible d'estimer L'ETR et son évolution afin de comparer l'état de satisfaction des besoins en eau de la culture aux objectifs fixés, selon les stades végétatifs

L'état des réserves en eau à une date donnée (Stade 2) est calculé à partir de l'état des réserves à une date antérieure (Stade 1) et du bilan des gains et pertes dans la partie du réservoir sol exploitée par les racines.

Gains :

- P : pluie
- R : ruissellement en provenance d'une zone plus élevée
- I : irrigation
- R_m : remontées capillaires.

Pertes :

- ETR : évaporation réelle de la culture, estimée à partir de ETM, en tenant compte du coefficient de sécheresse k_s et de ET_{ref}, au moyen du coefficient cultural k_c
- R¹ ruissellement sortant de la zone concernée,
- D : drainage en dessous de la zone accessible aux racines.

On a donc :

$$S_{\text{date2}} = S_{\text{date1}} + P + I - ETR + R - D + R_m$$

Certains termes sont difficiles à estimer ; aussi R et R_m sont souvent négligés. D' où la formulation simplifiée :

$$S_{\text{date2}} = S_{\text{date1}} + P + I - ETR - D$$

Pour obtenir ET_{ref} (ou ETP), il est possible de s'adresser aux services agro météorologiques. ET_{ref} varie peu dans une petite région homogène et on peut utiliser les valeurs d'une station agro météorologique à condition qu'elle soit située sur un site représentatif.

En revanche, compte tenu de la variabilité dans l'espace des pluies P pendant la période sèche, tout irrigant doit avoir un pluviomètre dans la zone à irriguer.

L'estimation du drainage D est faite en admettant que dès que la réserve utile est pleine, l'excédent est drainé vers la nappe.

Avantages du bilan hydrique

Le bilan hydrique ainsi formulé est une représentation grossière de réalité mais il présente de nombreux avantages :

- il ne demande qu'un nombre limité de données pour son utilisation.
- Il constitue un outil efficace pour juger de l'équilibre entre « moyens et objectifs de production » : choix d'assolement avant la campagne d'irrigation.
- Il permet d'élaborer une gestion prévisionnelle de la sole irriguée, décisions d'ordre stratégique : choix de modes de conduites plus ou moins restrictifs, élaboration de calendriers d'irrigation des différentes productions avec analyse des différents régimes hydriques.
- Lors de l'utilisation en temps réel pour le pilotage de l'irrigation, décisions tactiques, il constitue un premier « garde-fou » contre l'usage abusif éventuel de l'eau.

Limites du bilan hydrique

Dans sa forme simplifiée, le bilan hydrique comporte quelques limites :

- il ne permet pas de prendre en compte les apports d'eau par les nappes (Rm) ou les pertes ou les gains par ruissellement (R) qui peuvent être importants dans certaines situations (pluies d'orage, par exemple).
- le bilan hydrique est sensible à la détermination du taux de remplissage de la réserve utile au semis, ou plus généralement en début de phase végétatif.

Lorsque les pluies sont abondantes, on peut considérer que la réserve est intégralement remplie :

$$S_{\text{date } 0} = \text{RU}$$

Dans le cas contraire, il est nécessaire d'estimer le taux de remplissage de la réserve. Il peut être obtenu par des mesures.

Le bilan hydrique, bien que rigoureux dans son principe, pose de nombreux problèmes d'application, en particulier :

- la RU reste une grandeur difficile à déterminer, particulièrement parce qu'il faut estimer la profondeur du sol contribuant à l'alimentation en eau de culture,
- la représentativité de la station retenue pour obtenir ETR_{ref} doit être analysée,
- dès lors que l'on cherche à rationner la culture ; il faut connaître avec précision suffisante la RFU et la profondeur d'enracinement qui peuvent varier de manière importante,
- le rationnement est plus difficile à définir en irrigation localisée où on ne peut plus utiliser le bilan hydrique,
- les coefficients culturaux k_c (qui permettent de caractériser un objectif de consommation en eau) sont des valeurs moyennes par période, correspondant à des conditions déterminées (espèce, variété, sol et conditions culturelles, climat et rythme d'irrigation). Il en résulte que les conditions d'obtention ne correspondent pas forcément à celles de leur application et leurs utilisations doivent être raisonnées.

Pour éviter une dérive du bilan hydrique, il est nécessaire d'effectuer des contrôles en cours de campagne pour réaliser un recalage des grandeurs utilisées pour le calcul.

6.2.5. Systèmes d'irrigation

Irriguer c'est apporter de l'eau en vue de compléter les disponibilités hydriques du sol. Il existe deux modes ou systèmes d'irrigation où différents procédés ou techniques de distribution sont mis en œuvre :

- l'irrigation de surface ou gravitaire ;
- l'irrigation sous pression.

Irrigation gravitaire

Dans les réseaux gravitaires, l'eau est apportée par ruissellement, submersion ou infiltration. Si la pente du terrain est faible (< 2 %), on fait ruisseler l'eau en une mince couche afin qu'elle s'infilte ; si la pente est nulle, on submerge le sol d'une lame d'eau plus ou moins épaisse le temps qu'elle percole. Pour que l'eau parvienne à l'extrémité de la parcelle, le débit doit être supérieur à la perméabilité du sol.

On apporte aussi l'eau dans les rigoles superficielles ouvertes (des raies) ou dans des fossés profonds afin qu'elle diffuse dans le sol. La durée d'arrosage est plus longue ; les sols doivent être assez perméables et le terrain approximativement plat. Le contrôle des apports est très difficile. A partir d'un canal arroseur on peut alimenter les raies à l'aide de siphons, de gaines souples, de tubes munis de vannettes, de tubes enterrés avec cannes. Ces dispositifs exigent moins de main d'œuvre.

Une forme particulière d'irrigation par infiltration consiste à alimenter sous pression des canalisations poreuses enterrées, un drainage à l'envers en quelque sorte. Un tel système n'est utilisable que pour de petites superficies.

Les procédés précédents sont bien connus mais ils présentent plusieurs inconvénients parmi lesquels : la nécessité de beaucoup de main-d'œuvre, le manque de régularité dans la distribution, l'impossibilité de contrôler les apports, etc.

Irrigation sous pression

L'irrigation est réalisée par aspersion ou par localisation. Dans le système par aspersion, l'eau est apportée superficiellement après avoir été projetée sous forme de pluie. Le système présente de nombreux avantages : peu de main-d'œuvre, une économie d'eau et d'énergie, un contrôle facile, une automatisation possible. C'est aujourd'hui le système le plus utilisé dans les pays développés.

Dans des régions où les ressources en eau sont limitées, un système particulier a été développé : la micro-irrigation ou irrigation localisée. Sur cultures pérennes, petits fruits, cultures légumières et parfois tabac, essentiellement en cultures à faible peuplement.

Le cours sur l'irrigation traite en détails la maîtrise des déficits hydriques des cultures.

6.2.5. Impact de l'irrigation

Les effets de l'irrigation se manifestent :

- sur la croissance et le développement des plantes ;
- sur les systèmes de culture et de production ;
- sur l'environnement.

6.2.5.1. Effets de l'irrigation sur les plantes

L'enracinement est moins profond en culture irriguée qu'en culture sèche surtout si les apports sont pratiqués en tout début de cycle cultural.

L'irrigation modifie la nutrition minérale. L'absorption des éléments nutritifs est accrue et comme les rendements augmentent, les exportations sont plus importantes. La fertilisation annuelle doit être adaptée. Les capacités d'absorption des racines étant plus élevées en sols humides qu'en sols secs, il n'est pas utile d'accroître le niveau de richesse du sol.

Pour certaines cultures, l'irrigation s'accompagne d'un effet sur la qualité. La richesse saccharimétrique de la betterave ou de la canne à sucre par exemple diminue si la culture reçoit des doses élevées d'eau.

6.2.5.2. Effets de l'irrigation sur les systèmes de culture et de production

L'irrigation est une composante de l'itinéraire technique pour certaines cultures. Des mesures spécifiques doivent être prises. Ainsi, la protection phytosanitaire de la pomme de terre irriguée doit être renforcée. D'une manière générale, les arrosages favorisent la germination des graines d'adventices, la lutte contre les adventices doit l'être aussi.

L'irrigation permet de modifier et d'intensifier les systèmes de production. La maîtrise de l'eau acquise, il est possible d'introduire des cultures sensibles au manque d'eau, de pratiquer des cultures intercalaires comme le haricot après un précédent récolté précocement. Des cultures répondant bien à l'eau comme le maïs peuvent et même doivent être introduites là où les possibilités d'irrigation existent. Ces modifications sont indispensables pour rentabiliser l'irrigation.

6.2.6. Aspects économiques de l'irrigation

6.2.6.1. Considérations générales

Le coût de l'irrigation dépend beaucoup du type de ressources en eau (pompage, retenue, puits ou forage), de l'importance du périmètre du matériel de distribution utilisé.

L'irrigation exige des investissements très importants et occasionne des frais de fonctionnement. Elle induit des charges nouvelles importantes : endettement, accroissement des charges fixes, des charges proportionnelles, etc. Sa valorisation dépend de la capacité de l'exploitation à les assumer et de la technicité de l'exploitant. De ce point de vue, l'irrigation présente beaucoup de similitudes avec le drainage. Il se peut qu'il faille accorder la priorité à d'autres améliorations culturales qu'à l'irrigation.

6.2.6.2. Rentabilité de l'irrigation

Pour apprécier correctement la rentabilité, il est essentiel de distinguer l'irrigation complémentaire et l'irrigation systématique. En **irrigation de complément**, on doit comparer, toutes choses étant égales par ailleurs, les résultats nets entre la culture irriguée et la même culture « sèche ». Au contraire, en **irrigation systématique**, on compare la culture irriguée à d'autres cultures praticables en conditions sèche dans la région. Toute comparaison avec la même culture en sec ne démontrerait nullement l'intérêt d'irriguer.

Les comparaisons doivent être faites sur une période continue et suffisamment longue, dix ans au moins, pour tenir compte des variations climatiques et des fluctuations de rendements. Cette durée coïncide souvent avec la durée d'amortissement retenue pour le matériel d'irrigation.

6.3. MAITRISE DES EXCES D'EAU

Il y'a excès d'eau lorsque le sol reste saturé en tout ou en partie durant des périodes suffisamment longues pour gêner le développement des plantes et/ou empêcher le déroulement normal des façons culturales.

En présence d'un excès d'eau caractérisé soit on adapte le choix de la culture et l'itinéraire technique soit on évacue l'excès au moyen de différents procédés.

6.3.1. Excès d'eau et production végétale

Les sols engorgés durant des périodes plus ou moins longues sont qualifiés d'hydromorphes. Des processus physico-chimiques et biologiques spécifiques s'y produisent : redistribution du fer après réduction, accumulation de la matière organique, etc. Certains signes d'hydromorphie sont directement observables sur le terrain.

Les excès d'eau se rencontrent dans diverses situations et ont des origines différentes. La solution appropriée pour les résorber dépend de leur origine.

6.3.2. Effets des excès d'eau

Les excès d'eau ont à la fois des effets directs sur les plantes et des effets indirects sur certaines propriétés des sols.

6.3.2.1. Effets sur les plantes

L'excès d'eau diminue la disponibilité en oxygène (hypoxie). Son absence totale (anoxie) s'accompagne d'une augmentation de teneur en gaz carbonique. La respiration racinaire étant perturbée toutes les fonctions physiologiques exigeant de l'énergie sont affectées ; absorption ionique, transfert d'eau, etc. l'activité photosynthétique et métabolique diminue. Des modifications physiologiques comme l'apparition de produits toxiques (alcool) peuvent se produire également. Les plantes réagissent différemment aux excès d'eau. Leur sensibilité dépend :

- du stade d'apparition de l'excès ;
- des conditions externes ;
- de la durée.

Toutes les plantes sont sensibles aux excès d'eau à la germination, la floraison et la fructification. D'autres stades sont également critiques : ouverture des bourgeons floraux chez le haricot, début de floraison chez le pois, tallage et début montaison chez l'orge.

Tout excès d'eau se traduit par une importante réduction de rendement. La réaction des plantes dépend du contexte climatique et de la durée de l'excès ; le taux de survie diminue si la température est élevée au cours de l'ennoyage.

Il existe des espèces et des variétés tolérantes. L'adaptation est souvent due à des modifications morphologiques ou physiologiques : émission de racines aériennes, développement de canaux aérifères, modifications métaboliques, etc.

6.3.2.1. Effets sur les conditions culturales

L'excès d'eau en début de saison de croissance est particulièrement gênant pour les cultures. Il contrarie l'exécution des travaux de préparation et retarde les semis.

6.3.2.2. Incidence sur le rendement

En situation d'excès, la réduction de rendement dépend de la profondeur de la nappe, de celle des racines, de la nature du sol et de la durée de l'engorgement. D'après les études hongroises, pour un ennoyage de durée limitée τ (en jours), la chute relative de rendement pourrait être traduite pour une relation de type :

$$\Delta R/R = \alpha \tau^n$$

n et α sont des coefficients ;

n est voisin de 2 et

α vaut 0,001 pour les prairies ; 0,003 pour les céréales ; 0,005 pour les tubercules.

6.3.3. Maîtrise des excès d'eau

Selon l'intensité de l'hydromorphie on adapte l'itinéraire technique ou on élimine l'excès d'eau en drainant.

Adaptation de l'itinéraire technique

L'adaptation de l'itinéraire technique peut prendre plusieurs formes :

- décalage des travaux,
- décalage du cycle cultural,
- choix des cultures ou des variétés appropriées, etc.

Drainage

De plus en plus on recourt au drainage. Le drainage désigne toute technique susceptible d'assainir le sol.

6.3.3.1. Principales techniques de drainage

Drainage superficiel

En drainage superficiel, on vise à intercepter les eaux de pluie avant infiltration pour les orienter vers un exutoire. Les principaux types de drainage superficiels sont :

- le drainage par fossés (sur terrains en pente) ;
- le drainage par profilage (on crée un relief artificiel afin d'orienter l'écoulement).

Drainage souterrain

En drainage souterrain, on essaie d'accélérer la circulation interne de l'eau en créant un gradient d'humidité et à collecter l'eau. Les principaux types de drainages souterrains sont :

- le drainage-taupe ;
- le drainage par canalisations (drains) enterrées

On utilise les différents types de drainage seuls ou associés.

6.3.3.2. Choix d'une technique de drainage

Le choix d'une technique de drainage dépend de l'origine et de l'importance des excès d'eau, du comportement hydrique et des propriétés physico-chimiques du sol. Le choix fait aussi intervenir des critères d'ordre agronomique et économique.

6.3.4. Aspects agronomiques et économiques du drainage

6.3.4.1. Précautions agronomiques et effets sur la production

Un sol drainé demeure fragile. Il faut éviter d'y intervenir avant qu'il ne soit ressuyé. La pratique d'amendements calciques et organiques est recommandée. En sol riche en sodium, l'application du gypse améliore la perméabilité. Le sens des labours doit recouper la direction des drains.

Les deux effets essentiels du drainage sont :

- une amélioration des conditions de croissance et de développement des cultures, donc des rendements ;
- une augmentation des possibilités d'intervention mise en évidence par la détermination du nombre de jours disponibles.

En outre, on peut observer que les cultures sensibles aux excès d'eau, jusque là impossibles, deviennent possibles.

6.3.4.2. Rentabilité économique du drainage

Pour déterminer la rentabilité, il faut comparer les gains procurés et les dépenses engendrées. Le coût du drainage comprend les frais de chantier, le coût des collecteurs et de l'infrastructure et le prix des drains. L'augmentation de production due au drainage s'accompagne d'un accroissement des consommations intermédiaires (engrais, produits de traitement, etc.).

La rentabilité économique et la faisabilité du drainage sont souvent évalués au moyen d'une simulation technico-économique. Plusieurs hypothèses de transformation sont alors formulées, l'une étant la situation de l'exploitation sans drainage.

6.4. ETAT CALCIQUE DU SOL ET CHAULAGE

6.4.1. Importance du calcium

Sur le complexe adsorbant, deux types de cations sont adsorbés : des cations acides ou générateurs d'acidité : H^+ , Al^{+++} , Fe^{+++} et d'autres : Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , NH_4 , etc. utiles à la nutrition des plantes et déterminants pour certaines propriétés du sol. Le pH et le taux de saturation « V » caractérisent la situation physico- chimique du sol.

Une importance particulière est portée au calcium, au magnésium et au sodium. Elle est due à leurs multiples interventions en dehors de leur rôle nutritif. Présents en très grande quantité, ils confèrent au sol des caractéristiques très particulières.

6.4.2. Calcium dans le sol

6.4.2.1. Formes de calcium

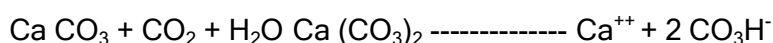
Comme tous les éléments minéraux, le calcium est présent dans le sol sous trois formes :

- la forme combinée de carbonates, silicates, phosphates de calcium. Les carbonates sont quantitativement les composés les plus importants ;
- la forme adsorbée du calcium retenu sur le complexe adsorbant ;
- la forme libre constituée des ions Ca^{++} dissous dans la solution du sol.

Un sol renfermant 1% de carbonate de calcium, contient 30 à 40 tonnes de carbonates à l'hectare soit 12 à 16 tonnes de calcium. Le calcium absorbé et le calcium libre constituent le calcium échangeable ; il n'est pas comptabilisé dans la masse précédente. Les carbonates constituent une réserve calcique plus ou moins altérable.

6.4.2.2. Ions calcium

En présence de gaz carbonique et d'eau, le carbonate de calcium s'altère en donnant du bicarbonate de calcium, 100 fois plus soluble, qui se dissocie. Les équations suivantes traduisent cette altération :



Une partie des ions calcium libérés s'adsorbent sur le complexe absorbant et un équilibre dynamique d'adsorption- désorption s'instaure. Une autre partie reste en solution : la concentration en ions Ca^{++} de la solution du sol est très variable ; elle n'est pratiquement jamais nulle même dans les sols acides. Dans les sols calcaires elle peut atteindre plus de 1500 mg/l. Une concentration de 100 mg/l de calcium dans la solution d'un sol à une humidité moyenne représente un stock d'environ 80 kg de calcium pour la couche arable.

6.4.2.3. Dynamique du calcium

Entre les différentes formes de calcium interviennent les équilibres suivants :

- équilibre de solubilisation- insolubilisation entre les composés calciques solides et la solution de sol ;
- équilibre d'adsorption désorption entre les ions calcium en solution et ceux adsorbés.

Toutes les formes de calcium sont liées. L'ensemble constitue le système sol-calcium. Toutes interventions : absorption de Ca^{++} par les racines, entraînement par drainage, insolubilisation de composés calciques etc. déplacent les équilibres. Les quantités présentes sous les différentes formes définissent « l'état calcique du sol ».

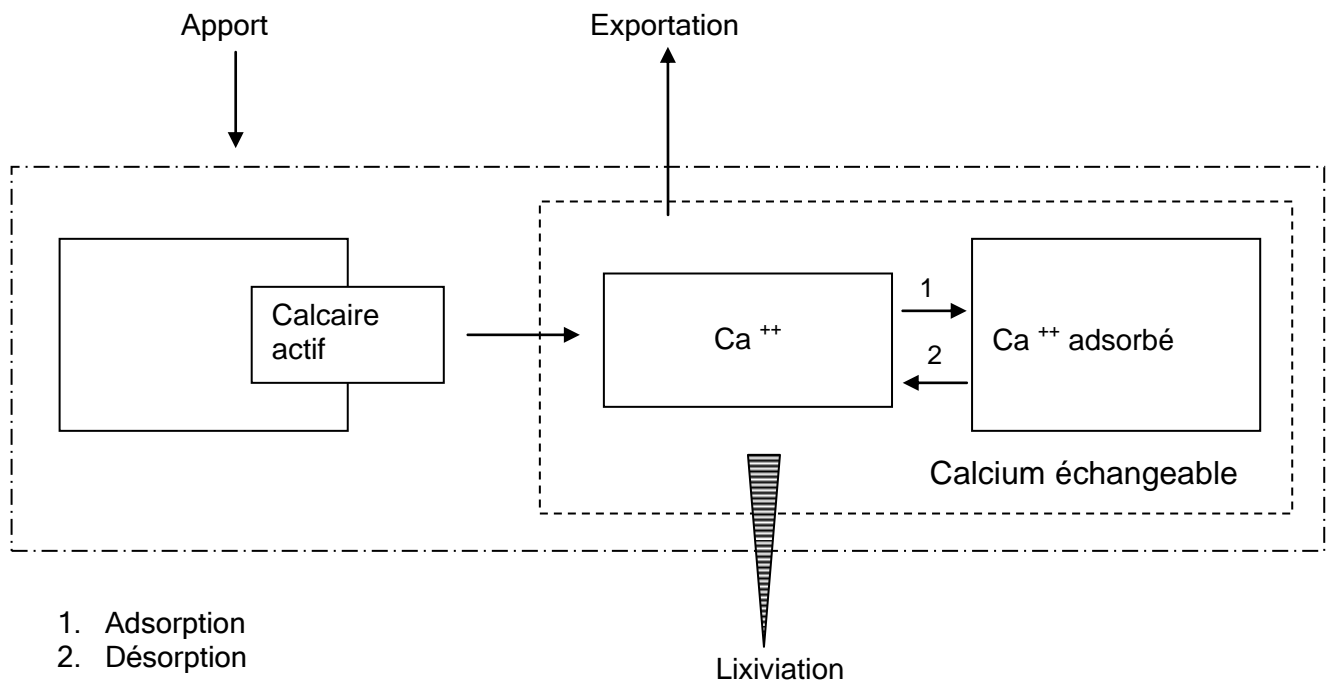


Figure : Système sol-calcium : Etat calcique

6.4.2.3. Relation entre l'état calcique et le pH

Dans la majorité des cas, les ions calcium constituent l'essentiel des cations adsorbés, ce sont donc eux qui déterminent l'état de saturation du complexe. Le pH du sol est donc en liaison avec la quantité d'ions calcium adsorbés. Il est donc d'autant plus faible que le taux de saturation l'est sans qu'une proportionnalité rigoureuse existe.

En sols très acides ($\text{pH} < 4$), les ions calcium sont peu nombreux, le taux de saturation est inférieur à 10 % ; en sols à pH voisin de 7, le taux est voisin de 60 à 90 %, les ions calcium sont assez nombreux. En sols calcaires, il est très proche de 100 %.

Tableau : Etat moyen du complexe absorbant de quelques sols (még./ 100 g)

Cations	Sols très acides pH < 5,5	Sols acides 5,5 < pH < 6,5	Sols neutres pH ≈ 7
H ⁺	0,5	0,5	< 0,5
Al ³⁺	1 à 4	0	0
Ca ⁺⁺	1,5	8	10
Mg ⁺⁺	0,15	0,5	0,5
K ⁺	0,1	0,5	0,5
Na ⁺	0,1	0,2	0,2
V=S/CEC	0,10	0,50	0,80-0,90

6.4.2.4. Rôles et actions du calcium

Le calcium exerce des rôles physiologiques et de nombreuses actions sur les propriétés du sol :

- actions sur la nutrition végétale ;
- actions sur les propriétés physiques ;
- actions sur les mécanismes physico-chimiques ;
- actions sur l'activité biologique.

Actions sur la nutrition végétale

Le calcium est élément nutritif indispensable aux végétaux. Les besoins sont modestes sauf pour quelques cultures (choux, luzerne, etc.). Ils sont facilement satisfaits et les carences calciques sont extrêmement rares.

Le rôle métabolique du calcium est plus important que son rôle plastique. Il assure l'équilibre entre les anions et les cations lors de l'absorption minérale : la balance acido-basique ; il diminue la perméabilité cellulaire et freine la pénétration dans les cellules radiculaires de l'eau et de certains métaux lourds toxiques. Cependant, sa présence en quantité élevée augmente les risques de carence d'autres éléments minéraux présents en faible quantité du fer ou le bore. Le calcium en bloquant par exemple l'assimilation du fer indispensable à la formation de la chlorophylle est à l'origine d'une forme de chlorose ferrique.

Les plantes tolèrent la présence de calcium en quantité plus ou moins importante ; les espèces calcicoles sont tolérantes ; les espèces calcifuges redoutent le calcium.

Actions sur les propriétés physiques

Le calcium modifie pratiquement l'ensemble des propriétés physiques et mécaniques du sol. Il fait flocculer les colloïdes et renforce la cohésion des agrégats. Le calcium n'agit pas sur la structure du sol contrairement à une idée largement répandue mais sur la stabilité structurale.

Le calcium augmente la perméabilité du sol.

Actions sur les mécanismes physico-chimiques

Le calcium intervient dans de nombreux mécanismes physico-chimiques soit directement soit indirectement. Moyennement retenu sur le complexe, il s'échange facilement avec des ions

Mg^{++} ou K^+ . Il remplace facilement le sodium ; les protons sont déplacés en présence de beaucoup de calcium.

Conditionnant le pH, la présence de calcium influence la solubilité de nombreux composés minéraux. En général, ceux-ci sont plus solubles aux pH inférieurs à la neutralité ; l'assimilabilité des éléments est accrue. Tous les oligo-éléments, excepté le molybdène, sont plus solubles en conditions acides.

En présence de beaucoup d'ions calcium, des phosphates calciques insolubles se forment, l'activité des ions phosphates diminue.

Actions sur l'activité biologique

En quantité modérée, le calcium favorise l'activité microbienne et biologique, en particulier l'activité minéralisatrice. C'est au voisinage de la neutralité que les populations microbiennes sont les plus nombreuses et souvent les plus actives. L'activité des bactéries nitrifiantes est par exemple maximale entre pH 6,8 et 7,5. Un excès de calcium limite la minéralisation car les humates calciques sont très stables.

6.4.3. Etat calcique d'un sol

6.4.3.1. Caractérisation

Plusieurs critères sont en relation avec l'état calcique :

- le pH_{eau} ou le pH_{KCl} ;
- le taux de calcium échangeable ;
- le taux de saturation (il faut connaître la C.E.C) ;
- le taux de carbonates totaux ;
- le taux de calcaire actif.

L'état calcique d'un sol n'est correctement caractérisé qu'en associant plusieurs de ces critères. C'est par le pH et la teneur en carbonates totaux qu'il est le mieux défini.

6.4.3.2. Evolution de l'état calcique

L'état calcique d'un sol évolue sous l'effet de plusieurs processus : la décarbonatation, la décalcification et l'acidification et pour différentes causes : la lixiviation et les exportations.

La décarbonatation ou décalcification désigne l'altération du carbonate en bicarbonate ; elle se produit constamment dans le sol. Le carbonate présent ou apporté disparaît progressivement en libérant des ions calcium.

La décalcification correspond à la désorption des ions calcium du complexe absorbant par d'autres ions. Elle se produit par exemple à la suite d'un apport de cations susceptibles de s'échanger avec le calcium : potassium, magnésium, etc. Suite à la décalcification, le taux de saturation du complexe diminue ; il augmente lors de la recalcification.

L'acidification commence lorsque les ions Ca^{++} adsorbés sont remplacés par des protons H_3O^+ ; le pH baisse. Selon la formule consacrée : la décalcification n'est pas l'acidification mais la prépare.

Deux causes sont à l'origine de l'évolution de l'état calcique : l'entraînement par les eaux drainantes et les exportations des cultures. Les apports d'engrais et les techniques culturales y contribuent aussi.

Lixiviation du calcium

La lixiviation concerne les ions Ca^{++} et le bicarbonate de calcium présents dans la solution du sol.

Exportations des cultures

Les exportations de calcium varient selon les espèces cultivées et le niveau de rendement. L'usage est de les exprimer en CaO bien que le calcium soit absorbé à l'état ionique.

Les exportations calciques sont assez faibles à l'exception de quelques cultures. Vu leur faiblesse, on peut les considérer incluses dans les pertes calciques par lixiviation.

Exemples d'exportation de calcium pour quelques cultures (en kg CaO/ha) : maïs grain 5 ; chou 200.

Effet particulier des engrais

Les engrais interviennent dans le bilan calcique de deux manières :

- en accroissant légèrement les exportations en augmentant les rendements ;
- en libérant dans la solution du sol des ions ayant un comportement neutre, acide ou basique.

On exprime l'effet acidifiant ou alcalinisant des engrais par la quantité de carbonate de calcium nécessaire pour l'annuler ou le provoquer pour un apport de 100 kg d'engrais.

Exemple d'effet acidifiant (-) ou alcalinisant (+) des engrais (en CaO pour 100 kg d'engrais)

<i>Engrais</i>	<i>+</i>	<i>=</i>
<i>Nitrate de sodium</i>	<i>17</i>	
<i>Phosphate bicalcique</i>	<i>14</i>	
<i>Nitrate de chaux</i>	<i>12</i>	
<i>Ammonitrate</i>		<i>33</i>
<i>Urée</i>		<i>46</i>
<i>Phosphate de NH_4</i>		<i>38</i>
<i>Sulfate de NH_4</i>		<i>61</i>

Effet des techniques culturales

L'écart de pH entre deux sols de même nature, l'un labouré et l'autre travaillé superficiellement peut atteindre plus d'une demi-unité.

Le labour, en mélangeant les couches de terre, contrarie l'élimination du calcium. Un sol non cultivé s'acidifie dans les horizons superficiels.

6.4.3.3. Diagnostic de l'état calcique d'un sol

Le diagnostic de l'Etat calcique d'un sol résulte d'observations de terrain et/ou de mesures au laboratoire.

Diagnostic sur le terrain

L'application de quelques gouttes d'acide chlorhydrique sur le sol provoque une effervescence si la teneur en carbonates est supérieure à quelques pour mille ; le test ne permet donc que de déceler la présence de carbonate, il n'est pas très sensible.

Des symptômes d'un état calcique déficient apparaissent parfois sur certaines plantes, par exemple le rougissement de feuilles de maïs. C'est un signe d'excès d'acidité.

Diagnostic analytique

Plusieurs méthodes analytiques simples existent pour apprécier l'état calcique du sol. La mesure du pH et le dosage des carbonates totaux sont les deux déterminations les plus représentatives. Pour établir le diagnostic, on les compare à des valeurs de référence. Trois situations se rencontrent :

- la teneur en carbonate et le pH sont élevés : pour certaines cultures sensibles il est opportun de compléter la caractérisation par la mesure du calcaire actif ;
- le pH est satisfaisant mais la réserve calcaire est insuffisante : l'état calcique du sol doit être entretenu ;
- le pH et la réserve calcaire sont insuffisants : l'état calcique doit être corrigé.

Ainsi, la détermination du calcaire actif n'est nécessaire qu'en présence d'une teneur élevée en carbonates. Pour les cultures sensibles, elle permet d'estimer les risques de carence ferrique en particulier qui surviennent en sols calcaires.

6.4.3.4. Modification de l'état calcique

Si l'état calcique a été jugé déficient, il faut le corriger. Périodiquement, il doit être entretenu par des amendements calciques et le chaulage.

6.4.4. Amendements calciques et chaulage

6.4.4.1. Notion d'amendement

L'apport d'un amendement a pour but de restaurer le complexe absorbant, de neutraliser l'acidité du sol et de maintenir les colloïdes floculés. Un produit aura une action amendante s'il libère des ions capables :

- de s'adsorber sur le complexe en provoquant la désorption des protons H_3O^+ ;
 - de neutraliser les protons libres préexistants et ceux libérés ;
 - d'exercer dans la solution du sol une « pression » ionique pour floculer les colloïdes.
- De plus, le produit doit être abondant dans la nature pour être peu onéreux.

6.4.4.2. Principaux amendements calciques et magnésiens

Principales caractéristiques

Un amendement calcique présente quatre caractéristiques principales :

- la richesse (exprimée en CaO ou MgO) ;
- la valeur neutralisante ;
- la finesse de broyage ;
- la solubilité carbonique (uniquement pour les amendements calcaires).

La vitesse d'action d'un amendement calcaire se juge d'après sa solubilité carbonique et sa finesse. Un amendement grossier agira rapidement si sa solubilité carbonique est élevée ; un amendement de faible granulométrie s'altérera plus lentement si sa solubilité carbonique est faible.

Classification des amendements calciques et magnésiens

On distingue les amendements calciques et magnésiens des amendements calciques-engrais.

Les amendements calciques et magnésiens comprennent :

- les amendements calcaires par exemple les craies ;
- les amendements calcaires magnésiens et les amendements magnésiens : dolomie ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$) et carbonate de magnésium ;
- les chaux ;
- les amendements mixtes ;
- d'autres amendements comme les écumes de sucrerie où le calcium est présent à l'état de carbonate très fin (la solubilité carbonique est très élevée).

Les amendements calciques-engrais comprennent :

- les scories Thomas où le calcium est présent à l'état de combinaisons carbonatées, silicatée et phosphatées.
- la cyanamide calcique ;
- les phosphates naturels.

Les teneurs des principaux amendements calciques et magnésiens sont donnés dans le cours de fertilité/fertilisation.

6.4.5. Gestion technico-économique de l'état calcique

Pour une gestion raisonnée du chaulage en cultures, il est commode de distinguer les apports d'entretien et de redressement.

6.4.4.1. Chaulage d'entretien

L'objectif du chaulage d'entretien est de préserver l'état calcique jugé satisfaisant. L'amendement doit avoir une action moyennement rapide, de façon à éviter un relèvement temporaire excessif du pH. Les apports d'entretien étant prévisibles, ils devront être effectués avant les cultures les plus sensibles à un état calcique déficient (cas de la betterave) et inversement, on évitera de chauler avant les cultures comme la pomme de terre.

6.4.4.2. Chaulage de redressement

L'objectif du chaulage de redressement est d'obtenir un état calcique plus favorable. Normalement, le chaulage de redressement n'est à pratiquer qu'une seule fois. Un seul apport est nécessaire ou éventuellement plusieurs si la déficience est très importante pour être corrigée en une seule fois. L'amendement doit assurer assez rapidement la correction souhaitée, c'est donc un amendement à action rapide qu'il faut retenir.

6.5. FERTILISATION RAISONNEE

6.5.1. Nutrition et fertilisation

La nutrition est assurée correctement lorsque les éléments minéraux nécessaires sont présents dans le sol en quantité et en proportion satisfaisantes. L'insuffisance d'un élément limite l'efficacité des autres (*notion de facteur limitant*) ; l'excès de l'un déprime le rendement (*toxicité, compétition, etc*).

De nombreux facteurs physiques et physico-chimiques agissant en interaction conditionnent la nutrition minérale. On a démontré par exemple

- qu'une terre pauvre mais meuble fournissait à une plante plus de phosphore qu'une terre riche, mais dure et compacte ;
- qu'une terre humide et pauvre en phosphore assimilable était capable d'en fournir plus qu'une terre riche mais sèche !

La richesse chimique ne détermine donc pas seule la capacité nutritive d'un sol.

La satisfaction des besoins dépend du potentiel alimentaire du sol et des capacités des racines à l'intercepter. En présence d'engrais, les plantes disposent de deux sources nutritives : les ions préexistants dans le sol et ceux apportés. Dans les récoltes, la quantité d'ions provenant de l'engrais est toujours faible : *0 à 20% pour P* et *15 à 30% pour K*. L'année de l'apport, la participation des engrais n'excède jamais 30%. Une proportion très importante des éléments apportés réagit avec les constituants du sol à l'origine du pouvoir fixateur. Le sol exerce un rôle déterminant dans le devenir des engrais et leur mise à disposition. La nutrition minérale est conditionnée par le flux de désorption d'éléments vers la phase liquide et l'aptitude des racines à coloniser le sol.

L'objectif de la fertilisation est de satisfaire les besoins nutritionnels des cultures en complétant, parfois en créant en partie, l'offre alimentaire du sol dans des conditions économiques rentables, en tenant compte :

- des objectifs de rendements et de qualité des différentes cultures ;
- de la disponibilité des éléments dans le sol ;
- du souci de conserver le potentiel de production ;
- du souci de préserver l'environnement.

6.5.2. Elaboration du raisonnement

Précédemment, un seul critère, la teneur du sol de l'élément considéré était retenue pour déterminer les apports. Jugé insuffisant, l'approche récente prend en compte les besoins et les exigences des cultures, l'état des réserves du sol (quantité et cessibilité) et plus généralement, toutes les conditions influençant la disponibilité des éléments minéraux.

6.5.2.1. Besoins et exigences des cultures

Les besoins en éléments minéraux des cultures varient selon les espèces et les éléments. Pratiquement pour toutes les cultures les prélèvements d'éléments minéraux sont maxima en cours de végétation et assez différents du contenu en fin de cycle. Entre les deux époques, les plantes perdent des éléments par excrétion et chute au sol d'organes sénescents.

L'aptitude des espèces végétales à prélever les éléments minéraux est un autre aspect important. Elle dépend de la géométrie du système racinaire, du pouvoir d'attraction des éléments minéraux et des conditions de milieu : états hydrique et structural principalement.

L'aptitude, caractère génétique, diffère selon les espèces et parfois, pour une même espèce, selon les éléments minéraux.

Les végétaux réagissent différemment à la richesse du sol en éléments nutritifs. En l'absence d'apports d'engrais, le rendement baisse plus ou moins rapidement et plus ou moins intensément selon le niveau initial de richesse, les conditions de milieu et la nature des cultures.

On peut classer les cultures en trois types : cultures très exigeantes, cultures moyennement exigeantes et cultures peu exigeantes.

Tableau : Classe d'exigence des principales cultures

<i>Exigence</i>	<i>En phosphore</i>	<i>En potassium</i>
<i>Elevée</i>	<i>Betterave, pois Pomme de terre</i>	<i>Betterave, Pomme de terre</i>
<i>Moyenne</i>	<i>Mais ensilage sorgho</i>	<i>Pois, maïs ensilage soja, maïs grain</i>
<i>Faible</i>	<i>Soja</i>	<i>Sorgho, maïs grain</i>

6.5.2.2.. Bio disponibilité des éléments minéraux

La bio disponibilité d'un élément minéral est la facilité avec laquelle il est mis à disposition des racines des plantes en un temps compatible avec la durée de l'activité radiculaire. Trois facteurs la conditionnent :

- la teneur du sol ;
- l'importance des restitutions du précédent cultural ;
- le passé récent de fertilisation.

La combinaison des facteurs précédents permet de distinguer trois classes de bio disponibilité : élevée (E) moyenne (M) et faible (F).

6.5.2.3. Stratégies et doses de fumure

Selon le niveau de bio disponibilité, trois stratégies de fertilisation sont possibles :

- une stratégie « S₀ » où une absence d'apport est possible dans certaines conditions ;
- une stratégie « S₁ », la bio disponibilité est satisfaisante et l'objectif est son maintien
- une stratégie « S₂ », le faible niveau de la disponibilité interdit toute suppression d'apport, un apport est indispensable.

La dose correspondant à S₁ continue d'être désignée comme la fumure d'entretien bien que l'objectif ne soit plus, comme dans le système antérieur, de maintenir un niveau analytique mais de préserver la bio disponibilité existante. La dose doit sensiblement compenser les exportations. A S₂ correspond une fumure « renforcée » dont les doses s'expriment par un coefficient multiplicateur, supérieur à 1 appliqué aux exportations des cultures. Les doses augmentent avec l'exigence culturale.

Tableau : les doses d'engrais : coefficients multiplicateurs

<i>Bio disponibilité</i>	<i>Exigence culturale</i>					
	<i>Faible</i>		<i>Moyenne</i>		<i>Elevée</i>	
	<i>P</i>	<i>K</i>	<i>P</i>	<i>K</i>	<i>P</i>	<i>K</i>
<i>Elevée</i>	0	0	0	0	1	1
<i>Moyenne</i>	1	1	1	1,5(1)	1,5	1,2
<i>Faible</i>	1,2	1	1,5	2,0(1,5)	1,5	2,0

L'absence d'apport d'un élément, sans risque de réduction de rendement, n'est possible que si les conditions suivantes sont réunies :

- la culture est moyennement ou faiblement exigeante ;
- la teneur du sol en est élevée ;
- l'apport n'a pas été supprimé depuis plusieurs d'une année pour les cultures moyennement exigeantes ;
- la quantité de résidus culturaux enfouis est assez importante.

6.5.3 Détermination des apports

La détermination des exportations suppose la fixation préalable d'un objectif de rendement. Les apports dépendront des aptitudes culturales du milieu, de l'espèce, de la variété, du système de culture et les objectifs de l'agriculteur.

Des tables de composition moyenne ont été élaborées pour un rendement et des conditions moyennes de cultures. La marge d'erreur est assez importante.

Tableau : Exportations d'éléments minéraux de quelques espèces en unités/ha.

<i>Espèce</i>	<i>Rendement en M.S. q/ha</i>	<i>N</i>	<i>P₂O₅</i>	<i>K₂O</i>
<i>Choux -fleur</i>	47,3	198	67	295
<i>Epinard</i>	71,2	375	112	924
<i>Artichaut</i>	29,8	229	104	478
<i>Pois (conserverie)</i>	45,6	146	43	125
<i>Carotte</i>	92,8	140	95	477
<i>Tomate</i>	48,3	136	55	232
		20	10	10

6.5.4. Gestion technique et économique de la fertilisation

Après avoir déterminé les quantités d'éléments fertilisants nécessaires aux cultures, il faut choisir les engrais et fixer les quantités à apporter. Différentes contraintes externes à l'exploitation limitent le choix. Afin de rationaliser sa fertilisation, l'exploitant doit établir un plan de fumure pour l'ensemble des cultures où seuls quelques types d'engrais figurent.

6.5.4.1. Plan de fumure

Un plan de fumure est un budget technique et prévisionnel qui comporte l'évaluation des besoins quantitatifs et qualitatifs des fertilisants (amendements, engrais) nécessaires à l'exploitation pour réaliser l'objectif de production fixé par l'exploitant.

Etablissement d'un plan de fumure

L'agriculteur fait la synthèse entre des exigences de différentes natures : agronomiques, techniques, économiques, etc. et opère des choix. L'agriculteur opère des choix avec le souci de ne pas multiplier les formules d'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 l'action 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 plus 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 moyen 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 désoxyribonucléiques), 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, portions 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 génotypes 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 génotype 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 génotypes 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 génotypes 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 *doublement 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 il n'existe quasiment plus que des variétés hybrides 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.

On a alors créé des variétés synthétiques. 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 polyploidie 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. Un **clone** est un ensemble d'individus reproduits à partir d'un seul (un seul génotype) par reproduction asexuée. L'amélioration des 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 diffèrent 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 appropriés 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 technologie 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.

Chapitre VIII. DOMMAGES ENVIRONNEMENTAUX CAUSES PAR LES ACTIVITES AGRICOLES

Les interventions agricoles ne se sont pas toutes transformées en catastrophes écologiques ou même socio-économiques. Lorsque leurs impacts ne sont pas irréversibles, les opérations agricoles sont généralement positives pour les populations et les écosystèmes. Les impacts négatifs peuvent porter sur la dégradation des sols, la dégradation de l'écosystème forêt, la contamination des écosystèmes par les engrais et les pesticides et la pollution atmosphérique.

8.1. DEGRADATION DES SOLS

Des observations de IUCN/UNEP/WWF (1991) indiquent que re50% de la surface terrestre sont affectés par des processus anthropiques de dégradation des sols. On estime qu'il y a environ 6 à 7 millions d'hectares de terres agricoles qui sont rendues improductives chaque année par l'érosion. La dégradation des terres est largement répandue dans les régions sèches du globe : elle affecte 5,5 millions d'hectares, soit près de 70 % de leur superficie et conduit à une perte de production qui est estimée à 42 milliards de dollars US".

8.1.1. Dégradation de la structure du sol et compactage

Le passage des outils agricoles et le piétinement des animaux causent un compactage du sol par cisaillement et par compression.

La déformation due au poids des tracteurs et de l'équipement se traduit par une perte de volume du sol. On observe alors une diminution de la porosité et une augmentation de la masse volumique apparente avec l'accroissement du compactage.

La pression qui résulte du poids des machines, des outils ou des animaux cause une distribution inégale de la porosité qui est minimale à un niveau légèrement inférieur au point d'application. Cet effet est appelé effet de voûte.

La zone de compactage ne se situe pas à la surface mais à différentes profondeurs dans le profil. Ce processus affecte particulièrement les pores de grande dimension, pores très importants pour le drainage et l'aération des sols.

Plusieurs conditions favorisent le compactage. C'est le cas :

- d'une humidité du sol élevée
- d'une circulation excessive d'engins ou du passage répété d'animaux
- du dérapage des roues des machines
- d'un équipement surchargé.

Les causes du compactage sont aussi liées à de mauvaises pratiques agricoles. Par exemple :

- la monoculture
- l'absence de résidus en surface
- le travail fréquent du sol
- la préparation excessive du lit de semence.

Les effets du compactage se font sentir sur la croissance végétale par :

- des baisses de rendement, aucune plante ne semble donner de rendement satisfaisant à des masses volumiques apparentes supérieures à 1,9 Mg/m³.
- une sensibilité accrue des plantes aux maladies racinaires
- un développement racinaire peu profond et surtout horizontal

- des besoins accrus en fertilisation dus à une baisse du volume d'exploration racinaire.

Au niveau du sol, le compactage se traduit par :

- la création d'une semelle de labour
- l'apparition de nappe perchée à cause de la semelle de labour
- la réduction de l'efficacité du drainage
- la baisse de l'aération du sol
- la réduction des volumes totaux et d'éléments nutritifs disponibles pour la croissance et le développement des plantes
- l'augmentation du ruissellement et de l'érosion de surface
- la décomposition plus lente des résidus
- des besoins en énergie plus grands pour le travail du sol (consommation de carburant plus importante ou utilisation de tracteurs plus gros).

8.1.2. Perte de matière organique et de l'humus

Le brûlis, le défrichement mécanisé, le travail du sol mécanisé et le surpâturage se traduisent par une perte de matière organique et d'humus (couche superficielle noire du sol formée par la décomposition de débris organiques).

8.1.2.1. Influence des facteurs agro-sylvo-pastoraux sur la matière organique

Influence du feu

Le feu transforme la biomasse en cendres. Le brûlage des résidus de culture entraîne une baisse obligatoire du retour de la matière organique au sol.

Influence du défrichement mécanisé

La matière organique du sol se retrouve en plus forte concentration en surface qu'en profondeur du sol. Le défrichement mécanisé peut décaper cette couche superficielle riche en matière organique et en humus. Ce phénomène est surtout observé lorsque le défrichement est réalisé au bulldozer équipé d'une lame plutôt que d'un râteau.

Influence du travail du sol

Le travail du sol en profondeur tend à diminuer la concentration de la matière organique en mélangeant les horizons superficiels avec les horizons plus profonds de plus faible concentration en matière organique. Egalement, des travaux mécanisés qui déplacent la couche arable peuvent causer des pertes de matière organique importantes. C'est le cas du nivellement, de la formation de planches et du travail du sol dans le sens de la pente de haut en bas.

Le travail excessif du sol (labours répétés) cause la brisure mécanique des agrégats, exposant la matière organique à une dégradation microbienne accélérée. De même, lorsque des agrégats d'horizons plus profonds sont ramenés à la surface, ils éclatent suite à des chocs de ré humectation - dessiccation plus forts en surface qu'en profondeur. Lorsque ces agrégats éclatent, ils exposent de la matière organique (résidus fins, polysaccharides, racines) auparavant enfermée dans l'agrégat et plus difficilement décomposable par les microbes.

8.1.2.2. Impact de la perte de matières organiques

La réduction de certaines composantes de la matière organique, particulièrement la diminution du nombre de racines, d'hyphes fongiques et de sucres de synthèse microbienne

résulte en une destruction des macro - agrégats (i.e. des agrégats de grandes dimensions) et en une diminution des pores de grandes dimensions qui les séparent. On assiste alors à une densification du sol. Ainsi, la diminution de la matière organique conduit à une augmentation de la masse volumique apparente et à une diminution de la porosité totale.

Les effets d'une perte de quantité et de qualité de la matière organique sont immédiatement perceptibles dans la stabilité structurale du sol. La perte de matière organique se traduit par une diminution de la cimentation entre agrégats et à l'augmentation de l'entrée de l'eau dans les agrégats, ce qui provoque alors une diminution de la stabilité structurale. Cette perte de stabilité entraîne alors un plus grand risque de compactage et d'érosion.

La diminution de porosité et les pertes de stabilité entraînent une baisse de la conductivité hydraulique, à cause de la réduction de la taille des pores. L'eau s'infiltré moins dans le sol et les volumes ruisselés en surface sont plus importants. L'érosion hydrique est donc accrue. Le drainage du sol étant devenu plus lent, on observe la présence de nappes d'eau libre à la surface et la formation de croûtes de battance.

8.1.3. Erosion hydrique

Les causes naturelles de l'érosion hydrique sont associées à certaines conditions climatiques et à des caractéristiques spécifiques liées aux sites. L'action anthropique accentue l'érosion hydrique surtout là où les caractéristiques du site la favorisent. En climat tropical, le principal facteur qui favorise l'érosion hydrique est la pluie intense. Sous climat tempéré on pourrait ajouter la fonte des neiges et le sol saturé ou gelé. Il s'agit là de conditions sur lesquelles on peut difficilement intervenir.

Les caractéristiques spécifiques des sites pouvant favoriser l'érosion hydrique sont :

- les pentes abruptes ou longues,
- le sol battant avec une faible perméabilité structurale
- le sol compacté avec une faible infiltration et un faible drainage
- la culture dans le sens de la pente
- l'absence de résidus ou de couverture végétale en surface.

Les effets environnementaux de l'érosion hydrique sont :

- la perte des particules fines du sol (les plus significatives pour la fertilité);
- la perte de matière;
- la sédimentation des cours d'eau, des canaux et des rigoles ;
- l'appauvrissement chimique du sol à travers le transport des fertilisants (et notamment le phosphore lié aux particules) vers les cours d'eau
- le transport des fertilisants et des pesticides vers les cours d'eau.

8.1.4. Erosion éolienne

L'érosion éolienne est aussi peu importante là où existe un couvert végétal. Par contre, le défrichement et l'exploitation de la végétation accentuent l'effet érosif du vent. L'érosion éolienne est favorisée par :

- l'intensité du vent ;
- l'absence de brise - vent ;
- l'absence de couverture végétale ;
- l'absence de résidus de culture ;
- le travail excessif du sol qui crée des particules trop fines (< 1 mm).

Les effets les plus marquants de l'érosion éolienne sont :

- le remplissage des fossés et des rigoles de drainage
- la formation de dunes

- les dommages aux cultures et à la végétation (ex. verse, déracinement des plantes, déchirure des feuilles, chute des fleurs ou coulure)
- la perte et la dispersion d'éléments nutritifs et de pesticides.

8.1.5. Salinisation et sodicité

Les sols salins ne sont pas sodiques mais contiennent suffisamment de sels solubles pour entraver la productivité des cultures. Les sols sodiques ne sont pas salins mais contiennent suffisamment de sodium échangeable pour nuire à la croissance des plantes et à la structure du sol. Les sols salins sodiques sont ceux qui contiennent des sels solubles et du sodium échangeable en quantités suffisantes pour nuire à la croissance des plantes.

Les sels solubles qui déterminent qu'un sol est salin sont principalement les sulfates, les chlorures, les bicarbonates et les carbonates de sodium, de magnésium et de calcium. Les sols sont salins lorsque le seuil de sodium échangeable est à 6% de la CEC.

Une certaine salinité est d'origine géologique (salinité naturelle) alors que le reste est causée par l'homme et ses activités (salinité secondaire). La salinité secondaire des sols résulte surtout de l'irrigation. L'eau d'irrigation renferme toujours une certaine quantité de sels. Lorsque l'eau d'irrigation s'évapore ou est absorbée par la végétation, ce qui en reste devient de plus en plus chargé de sels.

Les plantes sont dotées de mécanismes qui limitent une absorption importante de sels. Ces mécanismes font intervenir entre autres des membranes hémi - perméables et des perméases de nature protéique. Donc, au moment où l'eau d'irrigation est utilisée par les plantes, les sels contenus dans l'eau restent dans le sol.

Par exemple, une culture de saison sèche sur sol mal drainé et recevant 12 000 m³/ha d'une eau refermant 0,05 g de sel par litre. Quelle quantité de sel laisse-t-elle dans le sol ?

L'eau saline résiduelle s'infiltré dans le sol pour atteindre la nappe d'eau souterraine qu'elle contamine après les horizons de sol situés au dessus. Un dépôt de sel blanc en surface est souvent caractéristique des sols irrigués, mal drainés et affectés par la salinisation (e.g. en Californie, en Irak, dans la zone de Kousseri, etc).

Les sels ont des effets chimiques, physiques et biologiques. Les ions sodium sont généralement toxiques pour les cellules vivantes. C'est la raison pour laquelle les cellules végétales les excluent, les absorbent moins ou alors les séquestrent dans des compartiments cellulaires spécialisés. Ainsi par exemple, les ions Na⁺ sont souvent séquestrés dans les vacuoles cellulaires et interviennent peu dans le métabolisme.

Les effets chimiques des sels sont principalement liés à la concentration des solutions et à la valeur du pH développé. Lorsque la quantité de sel dans le milieu devient trop élevée, la nutrition hydrique des plantes est affectée du fait de la pression osmotique élevée. Le potentiel de l'eau du sol devient plus bas lorsque la salinité augmente ; l'activité de l'eau diminue lorsque la concentration de sels augmente dans la solution de sol. L'extraction de l'eau par les racines des plantes est alors plus difficile.

Dans le cas des sols sodiques, les effets sur les propriétés physiques des sols deviennent prépondérants et s'expliquent par le rôle spécifique du sodium au niveau des argiles. Le sodium en solution s'échange avec les cations de l'argile et se localise préférentiellement sur les sites externes des feuillettes. Il peut alors provoquer la dispersion des particules de sol. La dégradation physique des sols peut intervenir pour de très faibles teneurs en sels alors que la dégradation chimique et les effets biologiques sont encore quasi nuls.

La salinisation affecte la composition floristique des milieux. Les plantes les plus sensibles disparaissent les premières.

8.1.6. Contamination par les métaux lourds

Les métaux lourds sont ceux dont la densité est au moins 5 fois supérieure à celle de l'eau. Ils se retrouvent à l'état naturel dans l'écorce terrestre à des niveaux divers de concentration. Toutefois, une partie importante des métaux et métalloïdes trouvés dans les sols agricoles provient des engrais.

Pour des raisons de prix de revient, les engrais ne sont pas suffisamment purifiés. Aussi renferment-ils à l'état de traces, de nombreux métaux et métalloïdes toxiques et peu mobiles dans le sol. C'est le cas des superphosphates dont le coût de purification est très élevé. Le Tableau III présente les principales impuretés contenues dans les superphosphates.

Les métaux et particulièrement les métaux lourds ont une importance sur le plan environnemental importante à cause de leur toxicité sur les systèmes biologiques. Les métaux les plus en cause sont : le cadmium, le chrome, le mercure, le cobalt, le plomb, le nickel, le vanadium et le zinc. Parmi les métalloïdes (éléments dotés de certaines propriétés de métaux), on cite l'arsenic et le sélénium.

A l'apport de métaux lourds par la fumure, il convient d'ajouter ceux qui résultent des pulvérisations de pesticides, par exemple des sels de cuivre.

Les effets du cadmium se font sentir au niveau des reins et des organes respiratoires. La toxicité du cadmium est cumulative.

Les dérivés du mercure sont très toxiques. L'ingestion d'aliments contenant de farines de céréales traitées au moyen de fongicides à base d'alcoyl (éthyl ou méthyl) mercure ont été à l'origine de plusieurs intoxications. L'intoxication la plus grave a été enregistrée en Irak pendant l'hiver 1971/1972. Elle a entraîné l'hospitalisation de plus de 5 000 personnes dont plus de 500 sont décédées. Le méthyl mercure contenu dans les denrées alimentaires est absorbé dans sa quasi-totalité par le tractus digestif.

Tableau : Principales impuretés dans les superphosphates

<i>Elément</i>	<i>Concentration</i>	<i>Elément</i>	<i>Concentration</i>
<i>Arsenic</i>	<i>2.2 à 12 ppm</i>	<i>Plomb</i>	<i>7 à 92 ppm</i>
<i>Cadmium</i>	<i>50 à 170 ppm</i>	<i>Nickel</i>	<i>7 à 32 ppm</i>
<i>Chrome</i>	<i>66 à 243 ppm</i>	<i>Sélénium</i>	<i>0 à 4.5 ppm</i>
<i>Cobalt</i>	<i>0 à 9 ppm</i>	<i>Vanadium</i>	<i>20 à 180 ppm</i>
<i>Zinc</i>	<i>50 à 1430 ppm</i>		

La concentration de plomb peut être très élevée dans les légumes produits au bord des routes et ceux produits avec du compost issu des déchets urbains. Le plomb avalé par un être humain adulte est éliminé à 90% par la voie intestinale. L'être humain concentre donc le plomb dans ses déjections. La quantité de plomb maintenue dans l'organisme (10 %) se répand dans tous les tissus. Le plomb crée des lésions de foie, des reins, du cerveau, du système nerveux central et de l'appareil reproducteur.

8.1.7. Pratiques culturales

Le **défrichement manuel** se caractérise par une perturbation minimale du milieu. Par contre, le **défrichement mécanisé** avec lame comme outil se traduit par un décapage des horizons

humifères superficiels et la mise à nu des horizons pauvres sous - jacents. La perturbation du sol est maximale aux endroits où s'effectue le dessouchage des arbres.

Outre une aggravation des risques d'érosion, le **dessouchage** entraîne une rupture définitive de la remontée biotique des éléments fertilisants qui ne peut être assurée que par l'enracinement profond des arbres.

Le **sous-solage** s'accompagne d'une perturbation importante des horizons de sol superficiels.

Le **labour** du sol à la houe crée souvent un horizon meuble de quelques centimètres et provoque la formation d'une discontinuité à laquelle les plantes sont souvent sensibles.

Le **travail mécanisé** du sol se traduit par une hétérogénéité du profil cultural. Très souvent, les outils utilisés (et notamment les charrues à soc), ramènent en surface de façon irrégulière, la terre moins fertile des horizons de profondeur.

Le travail du sol est donc une opération agricole essentielle mais qui perturbe profondément le sol. Mal exécuté, le travail du sol peut rendre les sols incultes. Ce risque est surtout présent au niveau de l'agriculture mécanisée par rapport à l'agriculture traditionnelle.

L'introduction de la mécanisation dans les régions tropicales entraîne une dégradation des sols surtout là où le climat est agressif et là où les sols ont une faible stabilité structurale. Les phénomènes les plus observés sont : l'évolution rapide de la matière organique; l'augmentation de l'acidité et la faible teneur en bases; la réduction de la perméabilité accroît le ruissellement et l'érosion ; la diminution de l'infiltration et le compactage.

L'**application d'engrais** à la volée éparpille l'engrais sur toute la surface et n'assure pas une répartition homogène de l'engrais. Les applications en bande localisent l'engrais près des racines des plantes. L'impact de l'engrais sur la croissance et le développement des plantes et notamment leur efficacité d'utilisation de l'engrais varient en fonction de la méthode d'application. Les pertes d'éléments nutritifs sont plus importantes pour les applications à la volée. L'efficacité d'utilisation de l'engrais est plus élevée pour les applications en bande.

8.2. DESTRUCTION DE L'ECOSYSTEME FORET

8.2.1. Déforestation et cycles d'éléments nutritifs

La biomasse d'une forêt dense tropicale est généralement supérieure à 800 t/ha. Cette donnée pourrait amener un observateur à croire que les sols sous forêt sont très fertiles. Or, il n'en est rien ! La végétation tropicale luxuriante vit sur ses résidus : le taux de renouvellement ou "*turnover*" est très rapide et il fournit l'essentiel des éléments utilisés par la végétation. La roche mère est si profondément altérée qu'il ne reste plus dans la couche arable que du quartz (silice), de la kaolinite, du fer, de l'aluminium et des traces de minéraux incomplètement altérés.

Les racines prélèvent les éléments nutritifs dans le sol et ceux - ci sont retournés sous forme de litière (matière organique végétale) qui se minéralise rapidement sous les tropiques et libère des éléments nutritifs que les plantes ré - absorbent, assurant alors à la remontée biotique des éléments.

Tout défrichement interrompt cette chaîne d'accumulation de fertilité potentielle. Il s'en suit une diminution rapide du taux de matière organique et une détérioration de toutes les propriétés liées à la matière organique.

8.2.2. Déforestation et climat

Les grandes forêts jouent un rôle important de régulateur thermique, hydrique et chimique sur la terre. La disparition des forêts pour satisfaire les besoins de l'industrie du bois, de l'agriculture et de pâturages.

Une relation de cause à effet rigoureuse n'a pas encore été établie entre l'absence de végétation et la baisse sensible des pluies. Les précipitations sont sous la dépendance de phénomènes complexes faisant intervenir la circulation générale dans l'atmosphère.

Toutefois, on sait avec certitude qu'une fraction seulement de l'eau qui tombe du ciel est disponible pour les plantes. Seule la fraction d'eau qui s'infiltré profite à la plante, par opposition à l'eau qui ruisselle et à celle qui s'évapore. Plus la végétation est dense, plus l'infiltration est importante. L'absence de végétation entraîne un ruissellement important qui a comme conséquence l'érosion des sols et l'apparition de crues qui iront s'amplifiant d'année en année pour une même hauteur des pluies.

Parce que l'infiltration est insuffisante, il s'en suit une baisse du niveau des nappes phréatiques et une mauvaise régulation du régime des sources et des cours d'eau. Pour les météorologues on notera probablement une même hauteur des pluies alors que les plantes auront à leur disposition de moins en moins d'eau.

Les précipitations occultes (i.e. rosée, brume, brouillard) sont interceptées et dirigées au sol par la végétation.

8.2.3. Déforestation et diversité biologique

Les écosystèmes forestiers sont très riches et diversifiés en espèces animales et végétales. Ils sont une source de matériel génétique extrêmement riche. Plus particulièrement, les forêts des régions équatoriales et tropicales humides sont les systèmes vivants les plus complexes au monde.

Le défrichement de la forêt naturelle peut entraîner la disparition totale de plusieurs espèces connues et de nombreuses autres qui n'ont pas encore révélé leurs propriétés et leur importance. La science commence à peine à inventorier et à analyser ces trésors biologiques. La perte de la diversité biologique peut être liée à l'élimination physique des espèces ou à la transformation de l'habitat des espèces concernées.

La disparition/perturbation de l'habitat naturel des animaux et plus particulièrement des oiseaux, présente des inconvénients majeurs pour leur survie. De plus, elles peuvent avoir des conséquences pour l'homme. On cite par exemple le cas des moustiques qui vivent dans la strate supérieure des arbres en parasites sur les singes. La disparition des arbres fait fuir les singes et dès lors, ces moustiques descendent pour rencontrer les hommes auxquels ils transmettent des nombreuses maladies.

Il existe de nombreux cas de symbiose entre les animaux et les plantes de la forêt. La suppression des uns entraîne la disparition des autres. Par exemple, des animaux qui assurent la dissémination des semences d'arbres, etc.

8.2.4. Exploitation forestière et écrémage

L'exploitation forestière ne porte seulement que sur un nombre restreint d'espèces de grande valeur commerciale comme le *Sapelli*, le *Bubinga*, le *Sipo* et l'*Ayous* qui sont surexploitées. On dit alors qu'il y a écrémage de la forêt.

En effet, le volume de bois extrait de la forêt est généralement très faible. Il varie en moyenne entre 10 à 15 m³ par ha en Guyanne, soit près de 3 % du volume sur pied; autour

de 5 m³ par ha en Côte d'Ivoire soit 2 % du volume sur pied ; il peut être dix fois plus élevé en Asie en raison de l'abondance de certains arbres exploitables.

Les dégâts dus à l'abattage et surtout à l'extraction et au transport du bois (débardage) sont très importants. Les pistes ouvertes à cet effet favorisent la pénétration en forêt d'espèces envahissantes normalement cantonnées à la périphérie des forêts, et aussi l'entrée des paysans dans la forêt.

Entre le quart et le tiers des arbres laissés en place sont abîmés par les engins qui provoquent également une compaction du sol pouvant être à l'origine des phénomènes d'érosion et de dépérissement des peuplements. De plus, des superficies importantes sont défrichées en forêt pour l'installation des parcs à bois où de nombreuses billes de bois sont parfois abandonnées.

8.2.5. Déforestation et érosion

La mise à nu du sol par le défrichement crée des conditions favorables à l'érosion hydrique et éolienne. L'une des conséquences les plus désastreuses de la disparition de la végétation est l'augmentation du ruissellement et de manière concomitante de l'érosion du sol.

L'érosion des sols est quasi nulle sous forêt et le ruissellement presque inexistant quelle que soit la pente du terrain, l'abondance et la violence des précipitations. L'effet de la chute des gouttes d'eau est considérablement atténué par le couvert végétal. Ainsi, les gouttes d'eau ayant perdu leur énergie cinétique arrivent au sol à très faible vitesse. En outre, la litière qui recouvre la surface du sol joue le rôle d'éponge.

On estime à 75 milliards de tonnes, la quantité de terre qui est érodée dans le monde entier chaque année par l'eau et le vent ; les deux tiers de environ proviennent des terres agricoles (PIMENTEL et al., 1995).

En Ethiopie, on évalue la perte de sol annuelle entre 1,5 et 3 milliards de tonnes dont 50 % concernent les terres cultivées où la perte de sol peut atteindre 296 T/ha/an sur les pentes escarpées (FAO, 1986).

Au Zimbabwe, l'érosion des sols dans les aires communales a été estimée entre 50 et 75 T/ha/an (ELWELL, 1985) Le coût financier représenté par la perte en éléments nutritifs due à l'érosion des sols a été évalué à 2,5 milliards de dollars (valeur de 1985) pour l'ensemble du pays).

RAMADE (1995) rapporte quelques exemples d'érosion de sols en Afrique. En 1956, la forêt secondaire d'Adiopodoumé en Côte d'Ivoire, perdait 2 t/ha/an de sol contre 98 t/ha sous culture de manioc, après déboisement d'une parcelle à proximité ; A Sefa (Sénégal), l'érosion sous forêt sèche se chiffrait à 0,02 t/ha alors que les terres voisines cultivées d'arachide perdaient environ 15 t/ha/an soit 300 fois plus.

L'abattage des arbres sur les pentes conduit souvent à des désastres écologiques. La terre des collines disparaît, le ravinement est important ; les glissements de terrain fréquents. Les répercussions des abattages inconsidérés sur les terrains en pente dépassent souvent le cadre local.

8.2.6. Déforestation et latérisation

La latérisation des sols observée surtout dans les régions tropicales résulte de l'effet combiné du défrichement des forêts ombrophiles, de fortes températures et d'une pluviométrie abondante (RAMADE, 1995). Les sols latéritiques sont caractérisés par la présence d'une forte teneur en fer et en alumine, une réaction acide et une faible

concentration en silice. Ils ont une couleur rouge ou jaune, ce qui atteste de leur richesse en oxydes ferriques et en aluminium.

Une coupe verticale pratiquée dans un sol latéritique met en évidence un horizon supérieur ferrugineux, très pauvre en matières organiques, et dont la silice et les éléments nutritifs minéraux ont été enlevés par lessivage et au dessous un horizon poreux, également latéritique. Si la forêt ou la végétation au dessus sont détruites pour être mises en culture, l'exposition au soleil et aux intempéries de la surface du sol transforment l'horizon ferrugineux en cuirasse latéritique indurée.

8.2.7. Dénudation des berges

La végétation qui se développe le long des berges assure la cohésion du sol et protège les rives contre l'érosion. Le défrichement jusqu'au bord de l'eau laisse la berge sans protection. Le cours d'eau entamera et emportera le sol des berges d'autant plus facilement que l'ouverture a lieu sur la rive concave exposée au courant.

8.2.8. Influence du type de coupe

Plusieurs techniques de coupe sont utilisées en exploitation agricole. Chacune a des objectifs spécifiques et les impacts sont différents. Trois principales méthodes sont utilisées: la coupe à blanc, la coupe sélective et la récolte étagée.

Coupe à blanc

La coupe à blanc consiste à raser complètement le couvert végétal, sans tenir compte de l'espèce ou de l'âge. C'est la technique la plus controversée. Elle est la plus susceptible de créer des problèmes d'érosion et de destruction de l'habitat de la faune sauvage. La coupe à blanc est souvent utilisée lorsque les peuplements renferment peu d'espèces et lorsque les arbres sont uniformes.

Coupe sélective

La coupe sélective est souvent pratiquée sur des peuplements à âge mixte ou dans les forêts renfermant des espèces de valeur économique différente. Les espèces les plus intéressantes sont récoltées en laissant en place les autres. Ce mode de prélèvement a pour effet de réduire la diversité biologique.

Récolte étagée

La récolte étagée fait intervenir des séries d'éclaircissage et de coupe. Les espèces de moindre valeur sont complètement éliminées. Cette opération permet une meilleure pénétration de la lumière dans le sous bois et une stimulation de la croissance des jeunes plants dans un milieu moins compétitif. Lorsque les jeunes plants atteignent un développement suffisant, les arbres matures sont prélevés progressivement. Cette technique peu utilisée est pourtant écologiquement intéressante sur de petites parcelles forestières ayant des peuplements peu diversifiés.

8.2.9. Influence de l'agriculture itinérante sur brûlis

L'agriculture itinérante est un système de culture surtout pratiqué en zone de forêt où quelques années de culture sont suivies par plusieurs années de jachère. Le paysan défriche une portion de forêt, installe ses cultures et quand le sol s'épuise, il va défricher de nouvelles parcelles après abandon des premières.

Lorsque la densité humaine est faible, l'agriculture itinérante sur brûlis est considérée comme un mode de mise en valeur de la forêt très sophistiqué qui respecte la fertilité à long terme. Dans ces conditions, il a été remarqué que l'agriculture itinérante ne s'attaque que marginalement à la forêt. Les paysans préfèrent revenir sur leurs anciennes parcelles, là où les arbres qui ont repoussé sont plus faciles à couper. Le système dans ces conditions est connu sous l'appellation "essartage". Le principal facteur limitant du système est le respect obligatoire d'une longue période de jachère, dont l'optimum écologique est de l'ordre de 30 ans pendant lesquels la forêt et les sols peuvent se reconstituer.

Par contre, le raccourcissement de la jachère au dessous d'un certain seuil conduit à une rupture d'équilibre. La forêt cesse de se régénérer spontanément car les arbres n'ont plus le temps de se développer suffisamment pour produire leurs graines. La sédentarisation de l'agriculture, l'introduction de cultures de rente et la forte croissance démographique sont des facteurs pouvant conduire à dépasser le seuil de rupture dans la dynamique forestière.

L'une des premières conséquences néfastes de la culture itinérante est la destruction anarchique de la forêt. Les autres aspects environnementaux de ce système sont surtout liés à l'utilisation du feu pour le nettoyage des parcelles.

Selon une étude récente de la F.A.O., la forêt tropicale disparaîtrait au rythme de 7,3 millions d'hectares par an et l'agriculture itinérante à elle seule serait responsable de près de 80 % de cette destruction. La matière organique issue de l'abattage des arbres ainsi que des autres végétaux est brûlée. Dans ces conditions, le sol perd vite sa fertilité, obligeant le paysan à de nouveaux défrichements. Ce processus est d'autant plus important que la population s'accroît rapidement.

Le brûlis détériore certaines propriétés du sol. En effet, le brûlage se traduit par :

- une déshydratation irréversible du le sol autour des points où le feu persiste,
- la formation des croûtes superficielles,
- une stérilisation partielle du sol surtout lorsque les températures dépassent 450° C
- la perte de matière organique et de certains éléments dont le carbone, l'azote et le soufre.
- l'enrichissement temporaire en éléments minéraux puisque les éléments produits par le brûlis sont rapidement lessivés.

L'étude de la relation entre la durée de la jachère et la productivité du sol en agriculture itinérante est révélatrice des dommages potentiels de cette culture (RUTHENBER, 1976). La durée de la jachère doit alors être suffisante pour permettre au sol d'atteindre le niveau de fertilité initial.

Sous la pression démographique et de l'insuffisance des terres, la durée de la jachère est devenue de moins en moins importante. La moyenne se situe en deçà de 2 ans à l'Extrême-Nord et en deçà de 5 ans (2 à 3 ans dans la Lékié), ce qui est insuffisant pour assurer la régénération du sol. A l'aide de figures simples on peut illustrer comment la durée de la jachère affecte la productivité des sols.

Figure : Baisse de la productivité du sol

La productivité du sol chute très rapidement après la mise en culture du sol et elle prend plus de temps pour se reconstituer. En outre, après une période de mise en culture, il existe une durée de jachère minimale pour atteindre le niveau de productivité initial.

Lorsque la durée de jachère diminue, le sol n'a pas le temps de se reconstituer et sa productivité baisse avec le temps. Plus les cycles de culture sont rapprochés, plus le temps de régénération devient plus important.

Par ailleurs, lorsque le nombre d'agriculteurs augmente, l'agriculture itinérante constitue une menace pour l'environnement. En effet, la pression démographique de plus en plus forte amène les populations à détruire des étendues de végétation de plus en plus importantes au profit d'une agriculture qui rapportera de moins en moins. Très vite, le seuil d'équilibre est atteint, puis dépassé. Il est donc urgent, d'améliorer ce système de culture.

8.2.10. Impact des grandes plantations

L'agriculture de plantation s'étend habituellement sur des dizaines, des centaines voire des milliers d'hectares, en culture souvent mono spécifique. Cette agriculture est souvent mécanisée et notamment, à l'ouverture des plantations.

Les grandes plantations détruisent la flore et la faune naturelles sur de grandes superficies. La transformation des forêts en grandes plantations agro- industrielles comporte le risque de réduction de la diversité biologique qu'offre la forêt naturelle. Ainsi, les grands complexes agro-industriels ne devraient s'établir en forêt qu'après une étude d'impact qui devrait dégager toutes les conséquences écologiques des transformations que subira l'environnement.

8.3. CONTAMINATION DES ECOSYSTEMES PAR LES ENGRAIS

Le potentiel de contamination de l'environnement par les engrais chimiques est surtout attribué aux engrais azotés et phosphatés qui apportent ou engendrent notamment les nitrates et les phosphates peu retenus par le complexe absorbant. Les oligo éléments sont présents en quantités souvent très petites qu'ils sont rarement source de pollution. Le potassium bien qu'utilisé abondamment en agriculture ne semble pas avoir d'effets néfastes sur l'environnement.

8.3.1. Contamination des eaux par les nitrates

L'utilisation des engrais azotés n'a cessé de croître. L'azote constitue l'un des facteurs limitant les plus courants de la production agricole. Très souvent, les agriculteurs appliquent plus d'azote que nécessaire. Ils préfèrent alors une perte d'engrais à une perte de récolte.

Les engrais azotés appliqués à n'importe quelle dose ne seront utilisés qu'à 35 à 55% par les cultures l'année d'application (TRAN, 1995). D'autres processus d'utilisation et de transformation d'azote se produisent en même temps que son absorption par les plantes : immobilisation d'N par les micro- organismes du sol, fixation d'N par l'argile, pertes d'N par volatilisation, dénitrification ou par lessivage. La quantité d'engrais qui n'est pas utilisée par la plante augmente avec les doses appliquées.

Les quantités d'azote perdues peuvent contaminer les cours d'eau et les nappes phréatiques. L'eau contaminée par les nitrates présente un danger pour la santé humaine et animale.

La présence des nitrates dans l'eau ou les aliments cause une affection appelée méthémoglobinémie souvent fatale chez les nouveaux-nés. Les nitrates favorisent la

transformation de l'hémoglobine sanguine en méthémoglobine. L'affection qui en résulte (méthémoglobinémie) se manifeste par des difficultés respiratoires et des vertiges.

L'hémoglobine sanguine joue un rôle important dans le transport de l'O₂. Les difficultés respiratoires caractérisant la méthémoglobinémie sont liées à l'incapacité de la méthémoglobine à fixer l'oxygène de l'air et à la céder aux tissus. Le problème commence à se poser lorsque 10% de l'hémoglobine sanguine a été transformé en méthémoglobine. On considère qu'il y a danger lorsque la teneur en nitrates de l'eau de boisson est supérieure à 50 ug NO₃/litre soit 10 ppm N (BOCKMAN, 1990). La dose critique de nitrates dans les tissus végétaux est de 300 ppm (RAMADE, 1995).

L'ingestion de nitrates à travers l'eau ou les aliments serait source de certains cancers et notamment ceux de l'appareil digestif. En effet, les nitrites formés dans le tractus digestif à partir des nitrates seraient des précurseurs de nitrosamines, substances carcinogènes connues.

Toutefois, les études ayant associé l'ingestion des nitrates et l'incidence de cancers sont de nature corrélative. Par conséquent, elles ne sauraient établir des relations de cause à effet. D'autres études corrélatives ont associé l'ingestion des nitrates à l'apparition de maladies cardio-vasculaires. Cependant, les causes principales restent de loin le tabac et une alimentation trop riche en graisses.

La méthémoglobinémie se manifeste également chez les animaux. Les ruminants (mouton, chèvre, bœuf, etc.) sont les plus sensibles aux nitrates. Cependant, c'est moins l'eau de boisson que l'ingestion des végétaux exceptionnellement riches en nitrates qui est responsable des troubles.

En effet, les conditions très réductrices du rumen des ruminants favorisent la transformation des nitrates ingérés en nitrites. L'intoxication aiguë se manifeste par des difficultés respiratoires, une faiblesse généralisée et une coloration brune du sang. A un stade chronique, la maladie engendre des retards de croissance, des avortements, la stérilité, des goitres, des avitaminoses A, etc.

8.3.2. Eutrophisation des eaux

L'eutrophisation des eaux se manifeste par un développement explosif d'algues dans les lacs, les étangs et les bas fonds. Le phénomène est dû à la présence d'azote et surtout de phosphore de source agricole dans les eaux.

Les composés phosphatés sont généralement peu solubles dans l'eau. Cependant des concentrations de l'ordre de 0,01 ppm sont capables de provoquer l'eutrophisation. L'eutrophisation des eaux n'est pas compatible avec la vie aquatique.

8.4. CONTAMINATION DES ECOSYSTEMES PAR LES PESTICIDES

8.4.1. Toxicité des pesticides

Les pesticides sont globalement des poisons plus ou moins spécifiques. Aussi représentent-ils des dangers immédiats ou potentiels pour toute forme de vie. Chaque pesticide est caractérisé par une DL₅₀ ou dose létale 50. C'est la dose pour laquelle 50% des individus d'une population cible de parasites sont détruits. Plus la DL₅₀ d'un produit est faible, plus le produit en question est dangereux.

Pour un produit qu'on peut absorber par voie orale, on considère :

- qu'il est dangereux lorsque la DL₅₀ (exprimée en mg/kg) < 50
- qu'il est moyennement toxique lorsque 50 < DL₅₀ < 500

- qu'il faut prendre des précautions lorsque $500 < DL_{50} < 5000$

Pour une substance qu'on peut inhaler on considère

- qu'elle est dangereuse lorsque la DL_{50} exprimée en mg/L $< 0,2$
- qu'elle est moyennement toxique lorsque $0,2 < DL_{50} < 2$
- qu'il faut prendre des précautions lorsque $2 < DL_{50} < 20$

Pour des pesticides qui agissent par contact, on considère :

- qu'ils sont dangereux lorsque la DL_{50} exprimée en mg/kg est < 200
- qu'ils sont moyennement dangereux lorsque la $200 < DL_{50} < 2000$
- qu'il faudrait prendre des précautions lorsque $2000 < DL_{50} < 20000$.

L'utilisation des pesticides dans l'environnement présente un danger pour les organismes cibles mais aussi pour les utilisateurs et pour les organismes utiles. Le cas des abeilles constitue un exemple intéressant. En plus de fabriquer le miel, les abeilles assurent la pollinisation de nombreuses espèces végétales. L'application de pesticides dans un milieu a souvent pour conséquence, leur extermination au même moment où les parasites cibles sont atteints. Autre exemple, les pesticides détruisent non seulement les organismes nuisibles dont on veut se débarrasser mais aussi, les prédateurs qui dans la nature se chargent de limiter le nombre de parasites et d'ennemis des cultures.

L'un des problèmes majeurs associés à l'utilisation de pesticides dans l'environnement est qu'ils sont mis sur le marché sans que tous les effets toxiques immédiats ou potentiels soient connus ou évalués. C'est ainsi que des pesticides sont souvent retirés du marché quelques années après leur commercialisation. Les retraits interviennent malheureusement après que ces pesticides soient responsables de dommages environnementaux importants.

Par ailleurs quand bien même des pesticides sont bannis d'utilisation en occident à cause des dangers qu'ils représentent, on continue à les utiliser plus longtemps dans le tiers monde là où il n'existe pas souvent pas de contrôle de pesticide véritable.

Ainsi par exemple,

- *les produits à base de lindane ont été bannis aux U.S.A. mais plusieurs décennies après, on les utilisait encore dans cacaoyère camerounaise ou dans les produits de traitement des semences.*
- *le dibromochloropropane (DBCP) qui a montré des effets néfastes sur la fertilité masculine a été proscrit aux USA en 1977 mais en 1984, il était encore utilisé par certaines compagnies américaines à l'étranger et notamment au Costa Rica.*
- *le DDT (Dichloro Diphényle Trichloroéthane), insecticide puissant, a longtemps été utilisé dans le tiers monde longtemps après qu'il fut banni du monde occidental.*

Pourtant, ce produit a fait des ravages importants. Plus grave, ce produit s'est infiltré dans la chaîne des aliments en s'accumulant dans le bœuf, la volaille et le poisson.

8.4.2. Résidus de pesticides

Les résidus de pesticides dans les aliments constituent un problème très important qui met en danger les consommateurs des produits contaminés. Il arrive que la matière active des pesticides pénètre et persiste dans les produits récoltés. Ces produits deviennent alors de véritables poisons pour les consommateurs.

En Californie en 1986, une demi - douzaine de consommateurs de pastèques ont trouvé la mort à la suite de l'ingestion de pastèques traitées avec un produit à base de lindane. Les

pesticides sont des poisons, autant pour les organismes cibles que pour les organismes utiles et l'homme.

4.4.3. Résistance aux pesticides

L'emploi répété de pesticides favorise le développement d'espèces résistantes. L'apparition de souches résistantes est due à la survivance sélective. Après usage d'un pesticide sur une population de parasites, certains individus dotés de gènes de résistance survivent et peuvent ensuite proliférer. La plupart des facteurs génétiques régissant le processus de résistance sont connus et plusieurs mécanismes permettant aux parasites d'acquérir cette résistance ont été élucidés. Ces derniers incluent :

- la production d'enzymes qui neutralisent le pesticide ou modifient son mode d'action sur l'organisme
- le ralentissement de la pénétration du pesticide jusqu'aux organes vulnérables.

Dans les années 60 à 80, la F.A.O. s'est particulièrement intéressée au problème de résistance aux pesticides utilisés en agriculture. Les études portant sur les arthropodes nuisibles (insectes et mites) ont identifié 182 souches résistantes en 1965, 228 en 1968 et 364 en 1977. Ces études avaient clairement établi que l'accroissement d'espèces résistantes de parasites du coton et du riz était imputable à l'utilisation répétée de pesticides dont ces cultures faisaient l'objet. Ces études avaient également permis de déceler une intensification des problèmes de résistance tant sur le plan de l'extension géographique que pour le nombre de pesticides.

En effet, sur les 364 espèces résistantes décelées en 1977, 223 avaient acquis une résistance à 9 des principaux groupes de pesticides. Ces parasites agricoles incluent la teigne du cotonnier, la sauterelle du riz, le doryphore, les charançons des céréales.

L'OMS (Organisation Mondiale pour la Santé) quant à elle avait noté une augmentation du nombre d'espèces résistantes aux pesticides chez les moustiques anophélidés, vecteurs du paludisme. En 1969, l'OMS reportait que 15 espèces de moustiques étaient résistantes au DDT. S'agissant de moustiques culicidés au nombre desquels figurent les vecteurs de la fièvre jaune et de la filariose, l'incidence de la résistance est passée de 19 espèces en 1968 à 41 espèces en 1975. La mouche domestique serait l'insecte le plus apte à acquérir une résistance aux insecticides. En 1975, 121 espèces résistantes aux pesticides ont été dénombrées.

Les herbicides constituent à l'heure actuelle plus de 50 % de tous les pesticides employés. L'emploi annuel ou plus fréquent du même type d'herbicide peut rapidement modifier la composition herbeuse d'un site donné.

De nombreux champignons sont devenus résistants aux fongicides même après le développement de fongicides systémiques.

Les rongeurs ont toujours posé des problèmes tant dans le domaine de l'agriculture que dans celui de la santé publique. En effet, les rongeurs s'attaquent aux récoltes et aux réserves alimentaires et transmettent plusieurs maladies dont la lèpre, le typhus et la peste. Des données récentes de la F.A.O. indiquent qu'une dizaine d'espèces de rongeurs y compris deux espèces largement répandues : *Rattus rattus* et *Rattus norvegicus* sont devenues résistantes aux rodenticides. Ainsi, l'usage répété de pesticides peut se traduire par le développement d'espèces nouvelles résistantes aux produits utilisés.

8.4.4. Pesticides et fertilité masculine

Les pesticides rendraient les hommes stériles ! Par exemple, le dibromochloropropane, un nématicide plus connu sous le sigle de DBCP longtemps utilisé dans l'industrie agroalimentaire a eu des effets désastreux sur les hommes.

Des études publiées entre 1977 et 1984 aux USA ont montré que parmi 142 ouvriers mâles exposés au DBCP :

- 13,1 % étaient azoospermiques (c'est à dire qu'ils ne produisaient pas le moindre spermatozoïde) contre 2,9 % dans un groupe témoin non soumis au DBCP.
- 16,8 % du même échantillon étaient oligospermiques (leur production de sperme était au dessous du seuil minimum de normalité soit 20 millions de spermatozoïdes par ml) contre 5,9 % dans le groupe témoin.

Toutefois, on signale une corrélation positive entre la durée d'exposition au DBCP et l'importance des altérations. Les effets semblaient disparaître dès que l'exposition au DBCP était arrêtée.

Au Costa Rica, plus de 4 000 ouvriers travaillant dans des bananeraies sont devenus stériles après avoir été en contact avec ce pesticide. Si le DBCP constitue un exemple très spectaculaire et bien documenté, il existe d'autres substances qui agissent de manière plus insidieuse.

8.6. POLLUTION ATMOSPHERIQUE

8.6.1. Effet de serre

Plusieurs gaz engendrés par des activités agricoles, sylvicoles et pastorales contribuent à l'effet de serre. C'est le cas du méthane, des oxydes d'azote, des gaz rares et surtout, du gaz carbonique. Le CO₂ contribue pour près de la moitié de l'effet de serre ; la contribution du méthane est estimée à un quart de l'effet de serre total alors que celle des oxydes d'azote est de 8 % environ (CUTTER et al., 1991).

Le CO₂ d'origine agro - sylvo - pastorale est surtout produit lors de la déforestation (incluant le brûlis) et pendant les réactions de dégradation du sol. La déforestation contribue pour près de 22 % des émissions totales de CO₂ (WONG, 1978). La plus grande partie du CO₂ libéré par les activités anthropiques provient de la combustion des matières fossiles.

Le méthane (CH₄) atmosphérique provient surtout de processus naturels et principalement de réactions anaérobiques. En agriculture, le méthane est produit lors du compostage et de la fermentation de nombreux sous produits et déchets agricoles. C'est le cas de la décomposition de paddy de riz (46 % du total) et de la déforestation (10 % du total).

Les oxydes d'azote proviennent de la combustion des matières fossiles, des engrais azotés et de la déforestation. Deux autres gaz contribuent aussi à l'effet de serre. Ce sont : le tétrachlorure de carbone (CCl₄), un intermédiaire de la fabrication des chlorofluoro-carbones (CFC) et, le méthyl -chloroforme (CH₃CCl₃), agent dégraissant souvent utilisé comme solvant dans les peintures.

Le gaz carbonique et les autres gaz à effet de serre n'interceptent pas le rayonnement solaire incident et principalement les ondes courtes. Par contre, ils absorbent le rayonnement infrarouge retransmis par la surface terrestre provoquant alors le réchauffement des basses couches de l'atmosphère, phénomène appelé effet de serre. Ainsi, ces gaz se comportent comme le verre recouvrant les serres. Le verre est transparent aux ondes courtes mais opaque aux ondes longues aussi les serres sont-elles surchauffées pendant les journées chaudes.

Plusieurs études présentées en 1979 à la Conférence mondiale sur le climat ont démontré qu'un doublement de la concentration de CO₂ pourrait élever de 1.5 °C à 3°C la température mondiale avec des changements à l'échelle régionale nettement plus élevés que cette moyenne. L'accroissement de la température s'accompagnerait de la fonte d'une partie des calottes glaciaires des pôles et d'une montée du niveau général des mers de l'ordre de 0.6 à 2.0 m (GENY et al. 1992).

8.6.2. Destruction de la couche d'ozone

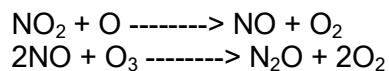
En marge des chlorofluorocarbones produits par l'industrie, de nombreux gaz issus d'activités agricoles, sylvicoles et pastorales participent à la destruction de la couche d'ozone stratosphérique ; c'est le cas des oxydes d'azote.

Les oxydes d'azote et notamment l'oxyde azotique (NO), l'oxyde nitreux (N₂O) et le dioxyde d'azote ou peroxyde d'azote (NO₂) figurent parmi les constituants normaux de l'atmosphère. Ils proviennent de différentes combustions et de l'utilisation d'engrais azotés en agriculture. Ils contribuent à la diminution de la couche d'ozone.

L'oxyde nitreux (N₂O) est le plus abondant des oxydes d'azote avec une concentration moyenne de 0.25 ppm. Il ne joue aucun rôle dans la pollution de l'air. A l'opposé, l'oxyde azotique (NO) et le dioxyde d'azote ou peroxyde d'azote (NO₂) jouent un rôle important dans la diminution de la couche d'ozone (O₃), gaz ayant la propriété d'absorber le rayon ultra - violet en provenance du soleil et agit donc comme un bouclier protecteur. Un excès ou une diminution de cette couche protectrice se traduiraient par des conséquences importantes sur les phénomènes vitaux comme des cancers de la peau, des mutations génétiques, la diminution des défenses immunitaires en particulier des mammifères, une diminution de la photosynthèse et des rendements des cultures.

La concentration d'ozone s'élève avec l'altitude pour atteindre un maximum (autour de 10 ppm) dans la stratosphère entre 18 et 35 km. Les variations de la concentration de la couche d'ozone sont des phénomènes saisonniers naturels mais depuis quelques années, on observe une diminution accélérée de la destruction de l'ozone, au delà de son rythme naturel de renouvellement.

Les principales réactions de destruction de l'ozone stratosphérique sont :



8.6.3. Pluies acides

Pendant le brûlis, la fumée et de nombreux gaz s'échappent vers l'atmosphère. Parmi ces gaz, le dioxyde de soufre (SO₂) peut s'oxyder et engendrer l'acide sulfurique (H₂SO₄) dans l'atmosphère. De même, les oxydes d'azote (NO_x) peuvent s'oxyder et produire l'acide nitrique (HNO₃). Ces acides contribuent alors à acidifier les pluies.

Toutefois, la principale source de SO₂ dans l'atmosphère est constituée d'émanations industrielles. Les pluies acides sont donc surtout dues aux émissions des industries plutôt qu'à celles des activités agro-sylvo-pastorales.

Les pluies acides contribuent à l'acidification des eaux de surface, les rendant parfois impropres à la vie aquatique. En Occident, les pluies acides détruisent les forêts. Environ, 35 % des forêts européennes sont affectées par les pluies acides (CUTTER, 1991).

Les pluies acides provoquent une diminution du pH, ce qui contribue à la solubilisation de nombreux minéraux dont l'aluminium. L'aluminium est connu pour ses effets toxiques sur les plantes. D'autres métaux peuvent être solubilisés suite à une baisse du pH. C'est le cas du plomb et du cuivre qui peuvent alors se retrouver dans les eaux de consommation.

Les pluies acides ont aussi un effet corrosif sur les bâtiments, les métaux exposés, etc.

Chapitre IX. RESTAURATION ET REHABILITATION DES ECOSYSTEMES DEGRADEES

L'homme peut - il refaire ce qu'il a défait est le titre très à propos de l'ouvrage édité par PONTANIER *et al.* (1995). Tout en reconnaissant la difficulté de l'exercice, quelques interventions permettraient à l'homme et particulièrement à l'agriculteur, d'atténuer ou de rectifier quelques-uns des dommages environnementaux liés à la pratique de l'agriculture de l'élevage et de la sylviculture. C'est le cas de l'éducation relative à l'environnement, de l'amélioration des pratiques agricoles, de la restauration et de la réhabilitation des écosystèmes dégradés et de l'utilisation de technologies d'exploitation durable des ressources.

9.1. DEFINITIONS ET DESCRIPTION DE CONCEPTS

9.1.1. Restauration

La restauration est la transformation intentionnelle d'un milieu pour y rétablir l'écosystème considéré comme indigène et historique. Le but de cette intervention est de revenir à la structure, à la diversité et à la dynamique de cet écosystème de départ.

Il est implicite dans cette définition que la restauration consiste autant que possible à rétablir la composition taxonomique intégrale de l'écosystème préexistant. Le terme restauration est réservé au rétablissement de la biodiversité, de la structure et des fonctions d'écosystèmes présentant encore un niveau suffisant de résilience (dégradation non irréversible).

Lorsque la pression exercée sur un écosystème a été trop intense, ou trop longtemps maintenue, celui - ci est alors susceptible de ne plus présenter de capacité dynamique suffisante pour que seule la diminution de la pression humaine lui permette de "se restaurer", c'est à dire de revenir à ce qui constituait son état antérieur. Une intervention humaine plus forte est alors nécessaire pour faire évoluer le système, soit en replaçant l'écosystème sur une trajectoire favorable (réhabilitation), soit en le transformant pour un nouvel usage (réaffectation).

9.1.2. Réhabilitation

La réhabilitation vise à réparer, aussi rapidement que possible, les fonctions (résilience et productivité) endommagées ou tout simplement bloquées d'un écosystème en le repositionnant sur une trajectoire favorable (la trajectoire naturelle ou une autre trajectoire à définir).

Plusieurs moyens peuvent être employés dans la réhabilitation d'un écosystème dégradé. De plus, il y a au moins autant de trajectoires potentielles que d'actions pouvant être entreprises. Ces trajectoires sont le plus souvent distinctes de la trajectoire naturelle de l'écosystème avant sa dégradation.

La réhabilitation est favorisée par des actions telles que la réintroduction du matériel végétal et des micro - organismes associés ou encore des travaux du sol permettant une amélioration conséquente de son fonctionnement hydrique ou des cycles d'éléments nutritifs, etc.

La réhabilitation à la différence de la restauration nécessite fréquemment que soit imposé un "démarrage forcé" d'une nouvelle trajectoire de l'écosystème. Le terme réhabilitation a fréquemment été nommé *reclamation* en anglais. Les projets de restauration par contre s'appliquent à des écosystèmes présentant encore la capacité de réparer eux - même les effets négatifs de perturbations légères.

9.1.3. Réaffectation

La réaffectation est le terme général qui décrit ce qui se passe quand une partie (ou la totalité) d'un écosystème est transformée et qu'un nouvel usage lui est assigné. Ce nouvel état est éventuellement sans relation de structure et/ou de fonctionnement avec l'écosystème préexistant. Modifier un écosystème par la gestion qui en est faite afin d'en privilégier un élément ou une fonction particulière constitue également une réaffectation.

Réhabilitation et restauration nécessitent que soit imposé un démarrage forcé d'une trajectoire évolutive de l'écosystème. A l'inverse, des actions de réaffectation sont moins contraignantes. La réaffectation peut intervenir à tous les niveaux et même sur un écosystème non encore perturbé.

Restauration, réhabilitation et réaffectation peuvent être utilisées conjointement, ou successivement sur les mêmes écosystèmes. On peut par exemple envisager sur un espace très dégradé d'avoir d'abord recours à une phase de réaffectation permettant de stopper les méfaits d'une érosion et conjointement (ou dans une seconde phase) d'entreprendre la réhabilitation du même espace par un reboisement.

9.1.4. Ecosystème de référence

L'écosystème de référence est l'écosystème historique indigène. Cependant, il est souvent difficile de déterminer avec exactitude à quoi ressemblaient ou comment fonctionnaient les écosystèmes historiques ou préhistoriques préexistants ; il est seulement possible de ré-établir les espèces de communautés connues ou alors de créer un état alternatif stable.

9.1.5. Espèce clef de voûte

Les espèces clef de voûte sont celles dont la présence à une densité suffisante, est nécessaire au maintien de la structure et du fonctionnement de l'écosystème.

Ainsi, la réhabilitation d'un écosystème dégradé peut être facilitée par la réintroduction soigneuse, ou l'accroissement de la densité des espèces clef de voûte.

9.1.6. Seuils d'irréversibilité

Ce sont des niveaux de changements au delà desquels la restauration n'est plus possible. Les seuils d'irréversibilité ne sont généralement pas facilement détectables ou quantifiables.

9.1.7. Résistance et résilience

La résistance est l'inertie d'un écosystème au changement, et la résilience est son aptitude à revenir à sa trajectoire antérieure après disparition des perturbations externes qui l'en avaient dévié. Dans une phase donnée de dégradation, l'accroissement de la résistance coïncide avec une réduction de la résilience.

9.1.8. Trajectoire

La trajectoire regroupe tous les itinéraires possibles de développement ou d'évolution d'un écosystème sous quelque pression que ce soit. La trajectoire de retour vers l'écosystème de référence peut éventuellement, dans le cas de la restauration, être l'inverse de celle parcourue lors de la dégradation. En général, il existe plusieurs trajectoires possibles pour parvenir à un même "état alternatif" stable.

On conçoit que l'on puisse "piloter" un écosystème sur une trajectoire préalablement choisie en fonction d'objectifs à atteindre. Piloter la trajectoire d'un écosystème, c'est agir sur l'ensemble des forces et des processus qui à terme détermineront sa structuration. Le choix

des trajectoires doit être effectué sans perdre de vue que le futur est pour une bonne part imprévisible et que d'éventuels changements locaux ou globaux sont toujours possibles.

9.2. EDUCATION RELATIVE A L'ENVIRONNEMENT

L'éducation relative à l'environnement est une forme d'éducation dont le but est de développer des connaissances et des compétences, des valeurs et des attitudes nouvelles, éléments essentiels d'un mouvement vers une meilleure qualité de vie des générations contemporaines et futures vivant dans cet environnement. Les principaux axes de l'éducation relative à l'environnement sont : l'initiation, la sensibilisation, la formation et la vulgarisation.

9.2.1. Initiation

L'initiation est la situation d'éveil et de prise de conscience face aux réalités et aux problèmes de toute nature reliés à l'environnement. Généralement informelle, l'initiation peut se révéler sous la forme d'un événement particulier vécu ou rapporté.

Le fait par exemple d'apprendre que des personnes sont mortes suite à la consommation de pastèques contaminées ou encore que l'exposition à certains pesticides provoque la stérilité masculine peut faire prendre conscience des dangers liés à leur utilisation.

9.2.2. Sensibilisation

La sensibilisation environnementale peut être réalisée à travers des programmes particuliers de communication. Ils peuvent prendre la forme de conférences, de projection de documents visuels (cinéma, vidéo), de représentation théâtrale, d'expositions, d'ateliers éducatifs, de projets d'intervention pédagogique en environnement, etc.

9.2.3. Formation

La formation permet le développement d'attitudes (savoir être), de connaissances (savoir) et d'habiletés (savoir-faire) en vue d'interventions moins préjudiciables sur l'environnement.

9.2.4. Vulgarisation

La vulgarisation vise à diffuser des attitudes et des connaissances favorables à la préservation de l'environnement. Le piège de la vulgarisation réside dans la transposition des connaissances sans adaptation suffisante. Des méthodes d'exploitation et de gestion des ressources naturelles peuvent s'avérer efficaces à un endroit et être inadaptées à d'autres. La complexité et la diversité des réalités environnementales commandent une certaine prudence dans la démarche de vulgarisation.

9.3. ETUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

(Cf. Travaux dirigés et travaux pratiques)

9.4. AMELIORATION DES PRATIQUES CULTURALES

9.4.1. Atténuation des impacts négatifs du défrichement et travail du sol mécanisés

La formation des agriculteurs et des conducteurs appelés à pratiquer l'agriculture mécanisée est un préalable essentiel. Un conducteur maladroit, inexpérimenté ou non motivé causera plus de dommages qu'un conducteur averti et consciencieux. La formation de conducteurs d'engins agricoles au Cameroun était l'une des préoccupations du CENEEMA.

Les terres particulièrement sensibles à l'érosion et/ou en pente doivent être laissées sous couvert végétal permanent. La pente est un critère de classement des terres. Au delà 12 % de pente, la mécanisation des opérations agricoles n'est plus recommandée. L'emploi de certains outils peut être exclu.

Par exemple,

- *préférer un râteau à une lame*
- *en terre légère, remplacer le labour avec charrue à soc par un pseudo - labour superficiel exécuté avec des outils à dents tels que les vibroculteurs, les scarificateurs ou les extirpateurs).*
- *l'emploi de pulvérisateurs à disques à grande vitesse émiette excessivement la terre*
- *l'utilisation d'outils lourds comprime le sol en profondeur.*

Le choix de certaines pratiques culturales peut éviter d'affecter le sol.

Ainsi, on peut choisir :

- *de ne pas conduire les travaux en période trop sèche ou trop humide*
- *de ne pas labourer toujours à la même profondeur, etc.*

9.4.2. Réduction de la perte des nitrates

La suggestion faite par certains courants de pensée d'éliminer les engrais chimiques de la production agricole ne semble pas une alternative viable. La contamination de l'environnement par le P et surtout l'N peut aussi provenir d'engrais organiques. La minéralisation de la matière organique libère des quantités importantes d'éléments chimiques (TRAN, 1995).

De plus, revenir à une agriculture sans engrais nécessiterait des superficies considérables pour nourrir la population mondiale actuelle. Plutôt que de supprimer leur utilisation, il vaudrait mieux apprendre à les utiliser de façon appropriée.

Les principales méthodes qui permettent de réduire les pertes d'N dans l'environnement sont : le fractionnement de la fertilisation azotée, l'ajustement des apports aux besoins en azote des cultures, l'utilisation d'inhibiteurs de la nitrification, les rotations culturales et la rationalisation de l'épandage des différents effluents d'élevage.

9.4.2.1. Ajustement des apports aux besoins des cultures.

L'ajustement des apports aux besoins en azote des cultures est une approche très utilisée dans la méthode du bilan azoté. Le choix d'une dose d'N s'effectue en tenant compte du prélèvement d'azote, du coefficient réel d'utilisation de l'azote appliqué, et des contributions en azote autres que la fertilisation tels que la minéralisation, les précipitations et les antécédents culturaux.

Dans la méthode du bilan azoté, l'objectif de rendement est très déterminant. Par exemple, les besoins d'N pour un objectif de 4 t/ha sont moins importants que lorsqu'on envisage obtenir 7 T/ha.

9.4.2.2. Le fractionnement de la fertilisation azotée

Le fractionnement de la fertilisation azotée vise essentiellement à apporter l'azote aux cultures aux périodes où les plantes en ont besoin. Plus l'azote est apporté près de la période d'absorption intense, mieux il est utilisé. Ainsi, des apports fractionnés améliorent le coefficient d'utilisation de l'azote.

Au Québec par exemple, on recommande d'appliquer 25 kg d'N/ha au maïs pendant les semis et 155 kg N/ha au moment de la moisson.

9.4.2.3. L'utilisation des inhibiteurs de la nitrification

Les pertes par lessivage et par dénitrification interviennent principalement lorsque l'azote est appliqué sous forme de nitrates ou après conversion des autres formes en nitrates. Ainsi, l'inhibition ou le ralentissement de la nitrification de l'ammonium et des amides peut améliorer l'efficacité d'utilisation de l'azote.

9.4.2.4. Les rotations culturales

L'utilisation de légumineuses dans les rotations culturales permet de diminuer les quantités d'azote minéral à apporter aux cultures. L'effet résiduel des légumineuses est attribué à l'enrichissement du sol en azote par la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique avec les bactéries des genres *Rhizobium* et *Bradhyrhizobium*. L'azote de source organique est libéré lentement par la minéralisation des nodosités des légumineuses. Cet N est donc moins susceptible au lessivage que l'azote minéral.

9.4.2.5. La rationalisation de l'épandage des différents effluents d'élevage

La connaissance de la valeur fertilisante des effluents d'élevage ainsi que de leur devenir dans le sol est essentielle. Des apports d'azote provenant des fumiers pourraient dépasser les capacités agronomiques des sols destinés à les recevoir. Il s'en suivrait alors des pertes dans le milieu.

9.4.3. Réduction des problèmes liés à l'irrigation

L'irrigation a été identifiée comme une principale cause d'érosion et de salinité des sols. Dans le monde, environ 14% des terres cultivées sont irriguées. Elles contribuent pour 50% dans la production agricole.

Le choix du système d'irrigation peut limiter les dommages environnementaux. En général, l'irrigation par ruissellement cause plus de dommages que l'irrigation par aspersion. Cette dernière à son tour cause plus de dommages que l'irrigation localisée (goutte à goutte ou trickle irrigation).

La salinisation des sols peut être évitée par l'utilisation d'un bon système de drainage avec pratique de lessivages réguliers. D'autres mesures peuvent permettre de diminuer l'accumulation des sels dans le profil cultural. On pourrait citer :

- le choix d'une eau d'irrigation renfermant moins de sels
- l'installation de drains pour évacuer l'eau résiduelle chargée de sels
- le lessivage périodique pour nettoyer la surface du sol. Toutefois le problème avec cette mesure est que l'eau constitue elle-même une ressource à conserver
- le choix d'un système d'irrigation qui affecte peu l'environnement. Ainsi par exemple, l'irrigation localisée bien que dispendieuse, présente l'avantage de réduire les pertes d'eau (de conserver l'eau) et de diminuer l'accumulation des sels.

Une fois les sols contaminés, l'utilisation des plantes résistantes ou tolérantes aux sels permet de continuer la production. Le développement très récent des techniques du génie génétique permet d'obtenir plus facilement des plantes plus tolérantes aux sels.

9.4.4. Utilisation appropriée des pesticides

La première étape vers une meilleure utilisation de pesticides est d'informer les populations agricoles des risques qu'elles courent et des problèmes potentiels de ces substances sur l'environnement. Le contrôle chimique des pestes doit intégrer plusieurs éléments dont : le cycle vital des parasites et le respect des normes d'utilisation des pesticides.

9.4.4.1. Respect des normes d'utilisation

L'utilisation appropriée de pesticides commence par le choix du produit et le respect des doses prescrites, du temps d'utilisation et de toutes les indications prescrites par les fabricants. Ces derniers précisent le cas échéant, les méthodes de conservation, la façon de réaliser les traitements, l'équipement adéquat et les mesures à prendre en cas de contamination.

9.4.4.2. Choix des pesticides moins toxiques

La découverte récente de pesticides moins toxiques tels que des chimio - stérilisants, des substances hormonales et des inhibiteurs de croissance a permis de réduire considérablement les quantités de substances toxiques introduites dans les écosystèmes agricoles. Cependant, des cas de résistance à ces produits ont déjà été signalés.

9.4.4.3. Utilisation du cycle vital des parasites (méthode biologique de contrôle)

La connaissance du cycle vital des parasites permet une utilisation rationnelle et circonspecte des pesticides. Elle permet de déterminer la période au cours de laquelle un traitement pesticide peut être plus efficace.

9.5. REHABILITATION DES ECOSYSTEMES DEGRADEES SPECIFIQUES

9.5.1. Assainissement des sols halomorphes (salins, salins sodiques et sodiques)

En règle générale, l'abaissement du niveau de la nappe phréatique et l'élimination des sels du sol constituent les premières conditions au rétablissement de la productivité des terres affectées par la salinité secondaire. Pour les sols salins engorgés, le drainage sert non seulement à abaisser le niveau de la nappe phréatique, mais également à maîtriser la salinité. Le drainage peut être assuré par des fossés ou drains de surface, des drains souterrains et des puits de pompage.

Pour assainir un sol engorgé d'eau et halomorphe, il est recommandé de procéder par étapes :

- abaisser la nappe phréatique
- lessiver le sol de sels excédentaires et
- pour les sols riches en sodium, remplacer le sodium par un cation plus approprié comme le calcium.

Les sols salins sont relativement plus faciles à récupérer. L'extraction du surplus d'eau par élimination de la source ou par drainage et lessivage des sols est généralement ce qu'il faut pour les mettre en valeur. La quantité de sels lessivés du sol est tributaire de la quantité d'eau appliquée et de la solubilité des sels. En général, les chlorures et les bicarbonates sont plus solubles que les sulfates et les carbonates. Les sels de sodium sont généralement plus solubles que les sels de magnésium, qui à leur tour, sont plus solubles que les sels de calcium.

Il est difficile de prédire avec exactitude la quantité d'eau à appliquer pour obtenir la mise en valeur voulue. Mais en général, le recouvrement continu d'une nappe d'eau permettra d'extraire 70 à 80 % des sels solubles par application d'une quantité d'eau égale à la profondeur du sol à mettre en valeur.

Autrement dit, pour réduire 70 à 80% de la concentration originale de sels dans les 40 premiers cm du sol, il faut appliquer 40 cm d'eau (SOMMERFELDT, 1988).

Pour les sols sodiques, le drainage et le lessivage ne suffisent généralement pas. Des amendements comme les sels de calcium, les acides et sels acidogènes ou la matière organique sont généralement nécessaires.

9.5.2. Traitement des eaux contaminées par les nitrates

Plusieurs méthodes sont disponibles pour traiter les eaux contaminées par les nitrates. Elles incluent : le mélange d'eaux de salinités différentes, l'utilisation de membranes séparatrices (osmose inverse), l'électrodialyse, l'échange d'ions et la dénitrification biologique. Les résines échangeuses d'ions et la dénitrification biologique sont les méthodes couramment utilisées dans les stations de traitement d'eau. Le coût d'exploitation des autres limite leur utilisation à grande échelle.

9.5.2.1. Mélange d'eau

Le principe consiste à mélanger l'eau à teneur élevée en nitrates à une eau qui en est dépourvue afin d'obtenir un mélange acceptable pour l'utilisation envisagée. Il s'agit donc d'un simple phénomène de dilution.

9.5.2.2. Osmose inverse

La méthode consiste à faire passer l'eau sous pression à travers une membrane semi-perméable dont les pores sont suffisamment petits pour empêcher le passage des ions nitrates. La pression appliquée est supérieure à la pression osmotique à travers la membrane. Le filtrat obtenu renferme très peu d'ions et sa qualité est proche de celle de l'eau distillée.

9.5.2.3. Résines échangeuses d'ions

Les résines échangeuses d'ions enrichissent l'eau en chlorures mais enlèvent d'autres cations et notamment les sulfates (90 %) et les carbonates (30 %). En général, les résines ne sont pas spécifiques. Les ions possédant une charge électrique (valence) élevée, un poids moléculaire élevé et un petit rayon sont vite retenus par les résines. L'ordre de préférence est le suivant :



Le renouvellement régulier des résines est un problème important lié à leur utilisation.

9.5.2.4. Dénitrification biologique

En milieu anaérobie, les nitrates sont utilisés comme source d'oxygène pour les bactéries. Les bactéries autotrophes présentent l'avantage de ne pas nécessiter de sources externes de carbone. Toutefois leur efficacité est faible à cause de leur faible taux de croissance. La dénitrification par des bactéries hétérotrophes est plus efficace. Cependant, l'addition d'une source de carbone et le développement explosif de bactéries font que cette méthode nécessite un bon système de filtration pour améliorer la qualité finale de l'eau.

L'attrait pour le traitement biologique de l'eau est lié à son faible coût et à la réduction des problèmes potentiels de santé et de goût.

9.5.2.5. Electrodialyse

L'électrodialyse utilise un champ électrique comme force motrice pour purifier l'eau à travers des membranes. Le champ électrique force les ions à migrer. Cette migration est limitée par l'introduction de membranes sélectives. Ainsi, les anions ne peuvent passer qu'à travers la

membrane appropriée. Des membranes spécifiques ont pu être développées pour les nitrates et permettent d'extraire le maximum de nitrates tout en laissant la majeure partie des autres ions dans l'eau.

9.5.3. Reconstitution de la matière organique

La matière organique du sol peut être reconstituée par l'utilisation de sources organiques diverses dont :

- l'application du compost
- les gadoues de ville (ordures ménagères)
- la biomasse végétale
- le bois raméal fragmenté, etc.

9.5.4. Reboisement

Les activités de reboisement ont principalement pour objectifs :

- de redensifier des espèces surexploitées ;
- de recréer des écosystèmes forestiers à travers la plantation d'arbres.

Très souvent, des pépinières d'arbres doivent être préalablement préparées. Les plants sont ensuite distribués pour fin de plantation individuelle ou lors de campagnes spécifiques.

Un exemple de campagne fut l'*Opération Sahel Vert*. Un autre est offert par le PDRM qui contribue à réaliser des reboisements dans l'Extrême - Nord.

CHAPITRE X : METHODES D'EXPLOITATION ALTERNATIVES

10.1. CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS

La finalité essentielle de la conservation de l'eau et de la préservation du sol est la possibilité de poursuivre des activités agricoles, sylvicoles et d'élevage. Les mesures de conservation de l'eau et de la préservation du sol peuvent entrer dans le cadre de la prévention, la restauration ou l'accroissement du potentiel naturel.

Les mesures préventives peuvent être : la plantation d'espèces végétales herbacées et/ou ligneuses, la confection de terrasses, l'implantation de brise - vent, la réduction de l'intensité d'exploitation du sol, la culture suivant les courbes de niveau, etc. Toutefois, les mesures restauratrices et préventives n'ont de sens qu'en présence d'un entretien continu.

Les technologies utilisables pour la restauration incluent : le reboisement, la pose de barrages de pierres (biefs), la construction de diguettes, la protection intégrale (fermeture à l'utilisation), etc.

Les mesures d'accroissement des réserves d'eau incluent la récolte de l'eau suivie du stockage dans des citernes, la construction de barrages et de canaux, le traitement et l'utilisation des eaux usées (i.e. désalinisation).

10.2. GESTION INTEGREE DES CULTURES

La gestion intégrée vise à utiliser les ressources et les mécanismes de régulation naturels pour diminuer les impacts négatifs sur l'environnement. Les secteurs les plus importants de la gestion intégrée des cultures sont : la fertilité du sol et la lutte contre les ennemis des cultures.

10.2.1. Gestion de la fertilité du sol

La gestion de la fertilité du sol fait appel à un large éventail de techniques dont :

- la préservation de la teneur en substances organiques par incorporation à la terre de compost, d'engrais vert, de fumier, de bois raméal fragmenté, etc.
- les techniques culturales favorisant la lutte contre l'érosion, la rétention d'eau et l'enracinement
- l'insertion de légumineuses dans le couvert végétal en vue de mieux recycler les éléments nutritifs et la fixation d'azote atmosphérique;
- le faible recours aux engrais minéraux ;
- la mise en jachère longue là où c'est encore possible.

10.2.2. Protection intégrée des cultures

La protection intégrée des cultures a pour objet la mise en oeuvre d'un ensemble de méthodes de lutte contre les maladies, les fléaux et les mauvaises herbes les moins agressives envers l'environnement.

La base de la protection intégrée est constituée de pratiques culturales telles que l'assolement, la sélection de semences et de plants sains et résistants, etc. Les moyens chimiques n'interviennent qu'au-delà de certains seuils critiques.

10.2.3. Intégration culture - élevage

Dans la perspective de l'utilisation durable du sol, élevage et culture peuvent être bien harmonisés. Par exemple, le bétail apporte à la production végétale sa force de traction et le

fumier contribue à l'amendement du sol et au recyclage d'éléments nutritifs. En retour, la culture des plantes livre au bétail une partie de son alimentation sous forme de produits, sous-produits et résidus de cultures.

Lorsqu'une partie des produits d'origine animale quitte l'exploitation, la perte d'éléments nutritifs qui y est associée est relativement limitée par la valorisation des produits végétaux. En effet, on estime que 50 % des éléments nutritifs absorbés par le bétail demeurent dans l'exploitation sous forme de fumier.

10.4. ALTERNATIVES A L'UTILISATION DE PESTICIDES

Des méthodes de lutte ne faisant pas usage de formulations chimiques pourraient remplacer les pesticides chimiques. On pourrait citer la lutte environnementale, les techniques génétiques, la lutte biologique, la modification du comportement et la production de variétés résistantes.

10.4.1. Lutte environnementale

La lutte environnementale comprend toutes les modifications apportées au micro-environnement ou au macro - environnement du parasite et de son hôte. Les techniques appliquées à cet effet peuvent consister en des pratiques simples comme le déterrement des oeufs de parasites, le recours à des cultures pièges, le mouillage, le défrichage d'une bande de végétation.

10.4.2. Technique génétique de stérilisation des mâles

La stérilisation des mâles limite les possibilités de reproduction et réduit à terme les populations de parasites.

10.4.3. Lutte biologique

Les modalités de lutte biologique impliquent l'importation dans le milieu de prédateurs de parasites ou des ennemis des cultures. Cependant, l'importation de prédateurs dans un milieu ne devrait être envisagée qu'après évaluation de tous les risques environnementaux.

10.4.4. Modification du comportement sexuel

La modification du comportement sexuel des parasites au moyen de phéromones (hormones généralement odorantes produites par des glandes de certains insectes et qui jouent un rôle d'information pour les autres individus de l'espèce) et de substances analogues répulsives ou attractives donne des résultats satisfaisants sur le terrain.

10.4.5. Production de variétés résistantes

La production de variétés de plantes dotées de caractéristiques génétiques permettant au génotype de résister à un parasite ou à un groupe de parasites spécifiques constitue l'une des méthodes les plus ingénieuses. Toutefois, des souches capables de surmonter la résistance des plantes peuvent apparaître au sein des populations de parasites. Ce phénomène s'explique par la co - évolution du parasite et de son hôte en vertu de laquelle une modification de l'hôte va de pair avec une pression sélective suffisante qui finit par entraîner une modification correspondante du parasite.

10.5. AGROFORESTERIE OU AGRO - SYLVICULTURE

L'implantation d'espèces ligneuses aux applications multiples permet de réduire la pression que les populations exercent sur les autres types de forêt. Les principaux arbres et arbustes utilisés en agroforesterie sont : *Leuceana leucocephala*, *Calliandra calothyrsus*, *Gliricidia sepium*, *Acacia spp.*

Les arbres et arbustes utilisés permettent le recyclage des éléments nutritifs (remontée biotique des éléments), la suppression des adventices, la lutte érosive sur les sols en pente. Les émondes ou biomasse végétale issue des arbres et des arbustes servent de paillis et d'engrais vert. Les légumineuses arbustives contribuent à l'enrichissement du sol en azote à travers la fixation d'azote atmosphérique.

10.5.1. Utilisation de légumineuses herbacées dans les jachères

Comme alternative ou approche complémentaire à l'agroforesterie, des légumineuses herbacées peuvent contribuer à l'amélioration des conditions de sol. En effet, des légumineuses herbacées ont été utilisées pour améliorer la fertilité des sols sous pâturage (GILLER et WILSON, 1991). L'implantation de la luzerne a eu pour effet d'améliorer la structure du sol à court terme (ANGER et MEHUYS, 1986)

Des travaux effectués au Nigeria indiquent un rendement en azote de légumineuses fourragères de 30 à 300 kg par hectare (IITA, 1993). Il s'agit des espèces *Centrosoma Pubescens*, *Pueraria phaseoloides*, *Desmodium heterocarpon* et *Mucana pruriens* (IITA, 1993). Ces légumineuses ont donné des résultats intéressants quant à la fixation d'azote atmosphérique mais aussi, pour la production de biomasse.

10.5.2. Pâturage par rotation

Une pâture par rotation, même sous une forte charge, préserve une période de reconstitution. Plus le temps de repos est long, mieux les pâturages sont maintenus en état (BOUTRAIS, 1992).

Une rotation des secteurs pâturés exigerait un contrôle permanent des déplacements du bétail, voire un aménagement de l'espace permettant une mise en défens périodique, après une période de pâture intense.

10.5.3. Reforestation

La reforestation est principalement effectuée de trois façon : naturellement, par semis et par repiquage de plantules.

La régénération naturelle est réalisée sans intervention humaine. Elle s'effectue à partir des semences ou des plantules qui existaient avant la coupe. Le semis s'effectue à l'aide de semences distribuées à la volée.

La mise en place de plantules est la technique de reforestation la plus rapide. Le taux de survie est plus élevé et les densités peuvent être mieux contrôlées.

Chapitre XI. CONCLUSION

L'agriculture est une activité humaine fondamentale. Elle fournit à l'homme des produits alimentaires, des matières premières, de l'énergie, etc. Le développement de l'agriculture est cependant entravé par de nombreuses contraintes agronomiques, économiques, sociales, culturelles, etc. Le développement de l'agriculture nécessite la levée de ces contraintes.

L'environnement naturel de la plante comprend le climat, le sol, le milieu biologique et le milieu économique. La connaissance du milieu de production est fondamentale puisque la production devra le supporter, s'y adapter ou alors le transformer.

Le climat intervient par la température (chaleur), la lumière, les précipitations et le vent. Différents moyens empiriques sont utilisés pour apprécier ces éléments mais de nombreux instruments modernes ont été développés pour leur détermination. Les éléments du climat ont des niveaux optimaux loin desquels la production agricole est difficile. De plus, les différents éléments du climat agissent simultanément sur les plantes et leur action combinée définit le climat agricole.

Le sol est la base de la production agricole en milieu naturel. Il constitue pour la plante un support et un réservoir d'eau et d'éléments nutritifs. L'un des rôles de l'agriculteur est de maintenir ou d'améliorer les conditions du sol. Les caractéristiques texturales, structurales, chimiques et biologique du sol sont déterminantes pour la croissance végétale.

Malgré de nombreuses contraintes liées au milieu, l'agriculture continue à prospérer à cause des progrès dans divers domaines agronomiques. Ces avancées ont permis de repousser les limites imposées par les contraintes du milieu. C'est ainsi par exemple qu'on peut pratiquer l'agriculture sous l'abri pour se soustraire des aléas climatiques ou encore, qu'on peut modifier les conditions du sol. Les modifications apportées au sol peuvent porter sur la les aspects physiques, chimiques ou biologiques.

Les améliorations faites au milieu ne peuvent assurer des résultats satisfaisants à l'agriculteur que si celui-ci choisit en plus, la meilleur plante et l'utilise de la façon la plus efficace. La connaissance des exigences de la plante est un facteur très important puisque le choix de la plante doit s'opérer en prenant en compte ses besoins et les possibilités offertes par le milieu. La plante choisie devra avoir une production élevée et des rendements réguliers, indicateurs d'une bonne adaptation. La création de nouvelles variétés permet de modifier l'éventail d'espèces qui pourront être cultivées dans un endroit donné. Il est donc important de suivre les progrès enregistrés dans le domaine de la génétique et l'amélioration des plantes. Une fois la variété choisie, l'agriculteur doit s'assurer qu'il utilise de bonnes semences. La semence sous son petit volume renferme en puissance la plante entière. Toute défaillance sur la qualité des semences a des répercussions négatives sur la production.

Le milieu et la plante étant choisis, l'agriculteur a à disposition un large éventail de techniques culturales lui permettant d'assurer un niveau de production donné.

Bien que la pratique de l'agriculture remonte à la sédentarisation de l'homme, il y a lieu de reconnaître qu'elle a de tous temps eu un impact sur l'environnement. Les impacts négatifs se sont exacerbés au cours des dernières décennies suite à l'utilisation de moyens technologiques à haut impact ou encore par l'utilisation massive de pratiques agricoles mal adaptées. Face à une population de plus en plus importante, il est important et même urgent de maintenir et de développer une agriculture performante à long terme qui préserve les ressources naturelles. Somme toute, il est essentiel de développer et d'utiliser des pratiques agricoles performantes mais préservatrices de l'environnement.

La prévention des phénomènes de dégradation et de pollution est plus efficace et elle devrait recevoir plus d'intérêt car certaines ressources ne sont pas renouvelables à l'échelle humaine. De plus, les coûts de restauration et de réhabilitation des écosystèmes dégradés limitent considérablement leur utilisation à grande échelle. En d'autres termes, même lorsque cela est possible, il est très onéreux de réparer ce que l'homme a détruit. Il est donc plus économique, et qui plus est, plus pédagogique pour le futur de se préoccuper dès le départ, de l'impact environnemental des activités agricoles.

BIBLIOGRAPHIE

- Adjété, P. et A. Valiquette. 1994. Les quatre composantes de l'éducation relative à l'environnement. *Ecodecision*. Pp 8-10.
- Altieri, M. 1986. *Agroécologie : bases scientifiques d'une agriculture alternative*. Debard, Paris. 237 p.
- André, P., C.E. Delisle, J.P. Revéret, A. Sène, D. Bitondo et L. Rakotoarison. 1998. L'étude d'impact sur l'environnement. Document de travail (En cours de publication).
- Caron, J. 1995. Dégradation des sols. Module 6, cours de gestion des sols, SLS 19510. Département des sols. FSAA, Université Laval. Sainte-Foy, Canada.
- Commission des Communautés Européennes. 1993. Manuel sur l'environnement. Procédures relatives à l'environnement et méthodologie régissant les projets de coopération au développement dans le cadre de la quatrième Convention de Lomé. Direction Générale du Développement
- Cutter, S.L., H.L. Renwick et W.H. Renwick. 1991. *Exploitation, Conservation, Preservation : A Geographical Perspective on Natural Resource Use*. 2nd Edition. Wiley. New York. 455 p.
- Gallichand, J. 1995. Evaluation environnementale. Module 9, cours de gestion des sols, SLS 19510. Département des sols. FSAA, Université Laval. Sainte-Foy, Canada.
- Gény, P., P. Waechter et A. Yatchinovsky. 1992. *Environnement et développement rural. Guide de la gestion des ressources naturelles*. Éditions Frison-Roche, Paris.
- IUCN/UNEP/WWF. 1991. *Caring for the Earth : A Strategy for Sustainable Living*, IUCN, Gland.
- Elwell, H. 1985. *An assessment of soil erosion in Zimbabwe, Zimbabwe Science News*, vol. 19
- Laverdière, M.R. 1995. Matière organique et pratiques de conservation des sols. Module 7, Cours de gestion des sols, SLS 19510. Département des sols. FSAA, Université Laval. Sainte-Foy, Canada.
- Mougeot, L.J.A. 1998. Farming inside and around cities. *Urban age, The global city magazine*. Pp 18-21.
- Mvondo-Awono, J.P. 1984. Effet de deux modes de défrichement sur quelques caractéristiques du sol : manuel et motorisé. Mémoire de fin d'études. Ecole Nationale Supérieure Agronomique. Yaoundé, Cameroun.
- Mvondo-Awono, J.P. 1997. Fertilisation azotée du maïs-grain (*Zea mays* L.) en rotation avec une luzerne non dormante (*Medicago sativa* L. Var. Nitro). Thèse de doctorat. Université Laval. Sainte-Foy. Canada. 209 p.
- Parent, S. 1990. *Dictionnaire des sciences de l'environnement*. Ottawa. Broquet.
- Ramade, F. 1995. *Éléments d'écologie. Ecologie appliquée. Action de l'homme sur la biosphère*, 5e édition. Ediscience International, Paris.
- Reijntje, C., B. Haverkort et A Waters-Bayer. 1995. *Une agriculture pour demain. Introduction à une agriculture durable avec peu d'intrants externes*. Kartala. Paris.

Sommerfeldt, T.G., E. Rapp, C.Chang, H.H. Janzen. 1988. Gestion des sols salins irrigués. Agriculture Canada. Publication 1624/F.

Tessier, S. 1995. Travail du sol. Module 8, Cours de gestion des sols, SLS 19510. Département des sols. FSAA, Université Laval. Sainte-Foy, Canada.

USAID, 1996. Environmental guidelines for small-scale activities in Africa. SD Publication Series. Technical paper No 18.

Wong, C.S. 1978. Atmospheric input of carbon dioxide from burning wood. Science 199 : 197-200.