
**PARTIE IV : BASES AGRONOMIQUES
DE LA PRODUCTION VÉGÉTALE**

Chapitre 13

**CRÉATION VARIÉTALE
ET AMÉLIORATION DES PLANTES**

J. Bouharmont

Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgique

Sommaire

1. Généralités

- 1.1. Origine des plantes cultivées
- 1.2. Objectifs de l'amélioration
- 1.3. Adaptation des variétés et des méthodes agricoles
- 1.4. Uniformité et plasticité des variétés

2. Principes de la création variétale

- 2.1. Diversité génétique
- 2.2. Conservation de la diversité
- 2.3. Sélection et hybridation
- 2.4. Les modes de reproduction

3. Sélection clonale

- 3.1. Origine des clones
- 3.2. Création de la variation
- 3.3. Sélection
- 3.4. Synthèse de clones hybrides
- 3.5. Les chimères

4. Sélection de lignées

- 4.1. Principes
- 4.2. Sélection de lignées
- 4.3. Création variétale
- 4.4. Introgression
- 4.5. Composites et multilignées

5. Les variétés hybrides

- 5.1. Consanguinité et dépression
- 5.2. Hétérosis
- 5.3. Aptitude à la combinaison
- 5.4. Production de la semence hybride
- 5.5. Applications aux autogames

6. Amélioration des populations

- 6.1. Sélection massale
- 6.2. Sélection récurrente
- 6.3. Plantes pérennes

7. Résistance aux maladies et parasites

- 7.1. Importance de l'amélioration génétique
- 7.2. Contrôle génétique de la résistance
- 7.3. Amélioration de la résistance

8. Hybridation interspécifique et polyploidie

- 8.1. Objectifs et difficultés
- 8.2. Autopolyploidie
- 8.3. Hybrides et allopolyploïdes artificiels
- 8.4. Amélioration par introgression

9. Mutagenèse artificielle

- 9.1. Méthodes
- 9.2. Utilité des mutations induites

Bibliographie

CRÉATION VÉGÉTALE ET AMÉLIORATION DES PLANTES

1. GÉNÉRALITÉS

1.1. Origine des plantes cultivées

Les nombreuses plantes utilisées par l'homme pour son alimentation, son agrément et ses industries ont été domestiquées à des époques plus ou moins lointaines. Cette domestication implique la protection, la propagation, la récolte, la conservation et l'extension des cultures par migration et échanges. La culture entraîne automatiquement une évolution progressive des populations, qui les écarte des plantes sauvages dont elles dérivent ; cette évolution est une adaptation au nouvel environnement agricole. D'autre part, l'agriculteur a exercé une sélection inconsciente ou réfléchie, favorisant les individus les plus intéressants pour lui. Les plantes domestiquées sont ainsi caractérisées par l'hypertrophie des organes récoltés (racines, tiges, feuilles, fleurs, fruits, graines), par leur rendement, leur précocité, l'uniformité, la facilité de conservation et d'utilisation, leur goût ou leur couleur.

Certaines familles ont été, dès l'origine de l'agriculture, une source particulièrement importante de formes domestiques : c'est le cas des graminées et des papilionacées, mises en valeur dans toutes les grandes régions du monde en raison de diverses caractéristiques, surtout de la valeur nutritive et de la facilité de conservation des graines. L'action des agriculteurs a parfois transformé considérablement l'aspect des plantes : les affinités entre le maïs cultivé et le téosinte sauvage ne sont pas évidentes. Pendant plusieurs millénaires parfois, cette sélection empirique a conduit beaucoup d'espèces essentielles pour l'homme à des rendements appréciables.

Il y a environ deux siècles que des sélectionneurs ont entrepris une amélioration des plantes domestiquées sur des bases scientifiques. Cependant, pour certaines espèces et dans des régions peu développées, des méthodes empiriques sont encore utilisées par les agriculteurs eux-mêmes.

1.2. Objectifs de l'amélioration

Une amélioration des rendements est indispensable pour faire face aux besoins croissants de l'humanité. Cette amélioration peut être très rapide pour des espèces récemment domestiquées (palmier à huile, hévéa). Les progrès restent importants pour les céréales traditionnelles et d'autres plantes cultivées depuis des millénaires. Il existe cependant une limite : c'est la quantité de matière organique qui peut être produite dans une région donnée en fonction de la température et de l'insolation.

Un objectif constant est une répartition des produits du métabolisme de la plante en faveur des organes récoltés, limitant au maximum les déchets : chez les céréales, cette répartition implique un développement maximal du grain et un appareil végétatif réduit. Le sélectionneur doit tenir compte non seulement de la productivité, mais aussi de caractères plus qualitatifs, comme la valeur nutritive, les propriétés organoleptiques et la composition des produits, l'esthétique, la résistance, la facilité de récolte, de transport, de conservation, le rendement à l'usinage.

En résumé, le sélectionneur doit se fixer un **idéotype**, une image idéale de la plante qu'il souhaite créer. Un idéotype très précis est cependant utopique, parce que trop de facteurs souvent contradictoires interviennent, entre lesquels un équilibre doit être trouvé. D'autre part, la création d'une nouvelle variété demande généralement de nombreuses années, pendant lesquelles le sélectionneur doit être capable de modifier ses objectifs et ses méthodes pour s'adapter à des conditions nouvelles, corriger ses erreurs ou profiter de l'expérience de ces concurrents.

1.3. Adaptation des variétés et des méthodes agricoles

L'accroissement des rendements n'est dû qu'en partie à l'amélioration génétique : les variétés modernes ne sont pas adaptées aux conditions de culture primitives et les variétés traditionnelles utilisent mal les engrais. On estime généralement que la génétique et les techniques agricoles prennent une part équivalente dans l'amélioration du rendement des céréales. Les populations peu améliorées sont rustiques, peu sensibles aux aléas climatiques, à la concurrence des adventices et aux maladies ; elles assurent ainsi une production relativement constante, mais faible. La création variétale aboutit, comme la sélection naturelle, à des écotypes spécialisés, mais ils sont adaptés aux conditions artificielles qui sont celles de l'agriculture moderne, impliquant l'utilisation d'engrais, l'élimination des adventices, la protection contre les parasites, éventuellement l'irrigation.

La révolution verte, résultat de la diffusion des variétés semi-naines de blé et de riz vers 1965, ne fut un succès que dans les régions et chez les agriculteurs qui purent adapter leurs techniques aux nouveaux besoins. Pour que l'amélioration atteigne ses objectifs essentiels qui sont l'intérêt des agriculteurs et le bien-être de l'humanité, il faut, d'une part, que les variétés nouvelles soient adaptées aux conditions locales et que, d'autre part, l'environnement agricole dans son ensemble s'améliore parallèlement.

1.4. Uniformité et plasticité des variétés

Les méthodes actuelles de culture et de récolte, les exigences commerciales et industrielles, ainsi que les législations sur le contrôle des semences, conduisent à la mise sur le marché de variétés très uniformes, quel que soit le mode de reproduction de la plante. D'autre part, si une variété est visiblement supérieure aux autres ou si la publicité est efficace, le même génotype se répand sur de très grandes surfaces. Cette situation est *dangereuse, parce qu'elle met les cultures à la merci d'aléas climatiques et surtout des épidémies*. Parmi d'autres exemples historiques, on peut rappeler la famine de 1844-46, provoquée en Irlande et en Europe occidentale à la suite de l'infection des clones de pomme de terre par le mildiou, les dégâts dus à la rouille chez les variétés hybrides de maïs aux États-Unis et la perte de plus de deux millions de tonnes due à l'infection du blé par la rouille au Pakistan en 1979.

Il existe des clones et des variétés homogènes moins sensibles que d'autres aux fluctuations climatiques et leur résistance aux maladies est plus ou moins durable. Ce sont des critères importants dans le choix des variétés. Très souvent, il sera nécessaire d'adapter les méthodes d'amélioration de manière à pouvoir diffuser des combinaisons de génotypes ou des populations dont l'hétérogénéité génétique limite les risques de pertes. La plasticité des cultures est primordiale dans les régions où les conditions locales sont hétérogènes, où le climat est irrégulier et les maladies dangereuses, mais aussi lorsque la survie des agriculteurs et l'alimentation du pays sont conditionnées par des récoltes suffisantes.

2. PRINCIPES DE LA CRÉATION VARIÉTALE

Dans la nature, l'évolution résulte de **pressions de sélection** qui s'exercent sur des **populations polymorphes**. De même, la création variétale suppose l'existence d'une diversité parmi les plantes cultivées et l'application de pressions sélectives par l'homme.

2.1. Diversité génétique

Dans certains cas, l'objectif est la création de variétés entièrement nouvelles à partir de génotypes de provenances diverses. Le plus souvent, le point de départ est une variété déjà bien acceptée dont on veut améliorer certains caractères en faisant appel à des génotypes introduits d'ailleurs. Dans les deux cas, la base génétique disponible est souvent déficiente.

Beaucoup d'espèces domestiquées à une époque récente proviennent de l'introduction de petits échantillons et leur potentiel n'a pas eu le temps de s'enrichir par mutation : les cultures de pomme de terre, de colza, de caféier arabica, d'hévéa, de betterave sucrière ont été développées à partir d'un nombre très limité de plantes. Les espèces cultivées anciennes, comme les céréales, sont représentées par de nombreux génotypes souvent très divers. Cependant, lorsqu'une variété de bonne qualité est disponible, elle est régulièrement utilisée dans beaucoup de programmes d'amélioration, de telle sorte que la plupart des variétés cultivées dans une même région sont plus ou moins étroitement apparentées. Lors de nouveaux croisements effectués entre elles, le nombre de caractères susceptibles de se recombiner est donc limité et les véritables innovations sont rares.

Pour élargir la diversité génétique, on peut rechercher dans la nature des formes spontanées proches des variétés domestiques ou réaliser des hybridations avec des espèces voisines. Pour les céréales, les croisements entre variétés très différentes et l'emploi de formes anciennes peu améliorées donnent des descendances hétérogènes, avec une majorité de combinaisons de caractères sans intérêt, mais aussi des possibilités de transgressions dans des directions utiles.

La mutagenèse artificielle a été appliquée avec un certain succès chez quelques espèces, mais son impact sur l'amélioration variétale est restée marginale. Quant aux techniques récentes de génie génétique, on peut en espérer une nouvelle diversification du matériel soumis à la sélection, grâce aux possibilités qu'elles offrent de surmonter les barrières entre groupes d'organismes très différents.

2.2. Conservation de la diversité

Les populations sauvages et les variétés traditionnelles (*landraces*) nécessaires aux progrès futurs de l'amélioration tendent à se raréfier, d'une part, à cause de la disparition des habitats naturels et, d'autre part, en raison de l'élimination rapide des variétés locales par des variétés modernes à haut rendement.

La conservation de ces génotypes sur place, dans des réserves naturelles, est pratiquement exclue, mais de nombreux organismes internationaux, nationaux et privés, ont créé des banques de gènes qui peuvent compter plusieurs dizaines de milliers d'accessions d'une même espèce : on y trouve le plus grand nombre possible de variétés améliorées, des mutants, les races anciennes et des formes spontanées. Beaucoup d'espèces pérennes sont maintenues en culture (arbres et arbustes), les annuelles autogames (céréales, légumineuses) sont semées périodiquement en petites parcelles et les allogames (maïs) en parcelles isolées plus vastes. Pour réduire la fréquence des cultures et les risques de mélanges, les semences sèches et propres sont souvent conservées en atmosphère amorphe à basse température. Pour d'autres plantes (pomme de terre), on expérimente la conservation prolongée de méristèmes ou de tissus dans l'azote liquide (-196 °C).

À côté des grandes banques de gènes, les institutions engagées dans l'amélioration ont besoin de collections de travail qui se limitent aux souches potentiellement utiles pour les croisements. Le matériel nécessaire à ces collections peut être obtenu auprès des organismes nationaux et internationaux, ainsi que par des échanges entre organismes travaillant sur les mêmes plantes.

Le rôle du sélectionneur ne doit cependant pas se limiter à l'exploitation des banques de gènes ; il peut aussi contribuer à leur enrichissement par l'envoi de son propre matériel amélioré et des échantillons de populations non sélectionnés. Il peut aussi participer à l'évaluation des génotypes en collection en communiquant aux responsables des banques de gènes des informations sur leur comportement dans les environnements où ils sont cultivés.

2.3. Sélection et hybridation

L'améliorateur exerce, sur les populations hétérogènes, des pressions sélectives plus ou moins fortes, par élimination des individus qui s'écartent du type recherché ou choix de quelques plantes qui produiront la génération suivante. Lorsqu'un caractère est très héritable, la sélection est généralement facile. Pour les autres caractères, l'observation d'un individu ne suffit pas, il faut contrôler sa valeur génotypique après multiplication clonale ou semis de sa descendance.

Les populations allogames sont suffisamment hétérogènes pour que la sélection y soit efficace. Chez les autogames, les variétés anciennes sont également polymorphes, mais les modernes sont très uniformes : dans ce cas, la recherche de nouvelles combinaisons de gènes est précédée de croisements entre plusieurs génotypes. En général, il suffit d'obtenir quelques plantes hybrides : les fleurs sont castrées, isolées et pollinisées manuellement. On se contente souvent de combiner deux parents choisis pour leurs caractères complémentaires. Cependant, une population issue de croisements successifs entre un plus grand nombre de génotypes représente une source potentielle de combinaisons génétiques exceptionnelles.

2.4. Les modes de reproduction

L'application des principes d'amélioration dépend beaucoup du mode de reproduction de l'espèce. Chez les autogames, les populations sont composées d'individus plus ou moins homozygotes et le premier objectif de l'amélioration est l'isolement de lignées supérieures. Les allogames sont hétérogènes : le sélectionneur cherche à améliorer ces populations en maintenant une diversité importante (variétés **synthétiques**) ou privilégie l'uniformité par la création de variétés **hybrides**. Les plantes propagées par voie végétative sont des allogames où des génotypes sélectionnés sont cultivés sous forme de clones.

La liaison entre les différentes méthodes d'amélioration et le mode de reproduction n'est pas absolue, en premier lieu parce que la frontière entre autogames et allogames n'est pas toujours nette. La plupart des allogames peuvent être autofécondées et toutes les autogames peuvent être croisées. Les taux d'allogamie sont variables, ils dépendent de l'espèce, du génotype et de l'environnement. Lorsqu'elles sont avantageuses, les variétés hybrides sont utilisées aussi chez les plantes autogames. Les lignées obtenues par autofécondation ou consanguinité chez le maïs et d'autres espèces allogames se comportent à peu près comme des lignées autogames et peuvent être traitées comme telles.

La propagation végétative et la sélection clonale sont les seules voies possibles pour les espèces stériles comme les bananiers. Les clones représentent un moyen rapide d'amélioration chez des plantes pérennes récemment domestiquées comme le caféier robusta, l'hévéa, le cacaoyer, mais les populations synthétiques et les variétés hybrides sont parfois plus intéressantes. A l'inverse, les progrès de la micropropagation permettent la création de clones chez des espèces habituellement reproduites par graines comme le palmier à huile. Beaucoup de méthodes d'amélioration décrites d'abord pour un type particulier de plantes ont ensuite été adaptées pour des groupes différents.

Dans son sens strict (**agamospermie**), l'**apomixie** est une forme de reproduction végétative par graines, où l'embryon se développe parthénogénétiquement à partir d'une cellule diploïde de l'ovule. Comme les autres mécanismes naturels ou artificiels, elle produit des clones uniformes.

3. SÉLECTION CLONALE

3.1. Origine des clones

La multiplication végétative est le seul mode de propagation possible pour des plantes stériles, qui sont souvent des hybrides interspécifiques ou des polyploïdes apparus spontanément ou obtenus artificiellement (bananiers triploïdes, canne à sucre, plantes vertes et bulbeuses). C'est aussi le mode de propagation le plus utilisé chez beaucoup d'arbres fruitiers et de plantes ornementales qui possèdent cependant une reproduction sexuée : ces espèces sont allogames, fortement hétérozygotes, elles combinent parfois des caractères de plusieurs espèces spontanées. Les semis donnent des descendance très hétérogènes, alors que la propagation végétative conserve les qualités commerciales de l'individu choisi.

Plusieurs espèces allogames récemment domestiquées sont multipliées soit par boutures, soit par graines. L'amélioration génétique est lente, à cause de la durée du cycle de ces espèces et parfois de mécanismes d'auto-incompatibilité, et le clonage permet de conserver les combinaisons de caractères choisis, ainsi que l'hétérosis. Cependant, le semis peut devenir avantageux lorsque l'amélioration génétique est assez avancée pour aboutir à des descendance ou des hybrides suffisamment uniformes. Le polymorphisme résiduel des semis favorise l'adaptation des populations à des environnements instables.

3.2. Création de la variation

Lorsqu'un clone est cultivé pendant de nombreuses années sur de grandes surfaces, des mutations apparaissent spontanément. Chez les arbres fruitiers (citrus, pêchers, pommiers), beaucoup de nouvelles variétés sont des mutants trouvés dans les vergers et caractérisés par des modifications dans la croissance de l'arbre, la couleur, l'aspect ou la fertilité des fruits. Des mutations apparaissent aussi pour des caractères quantitatifs importants pour la productivité, mais leur identification est plus difficile, à cause de l'influence de l'environnement. Des clones dérivés de greffons prélevés sur des pommiers d'une même variété et cultivés dans des conditions identiques, montrent des différences très significatives, aux points de vue précocité, production, taille des fruits et résistance aux maladies.

La mutagenèse induite, surtout par irradiation, est souvent appliquée pour accélérer l'apparition de nouveaux caractères : elle est à l'origine, chez les plantes ornementales, de nombreuses nouveautés caractérisées par des formes ou des pigmentations différentes. Les mutations induites par la culture des cellules (**variation somaclo-nale**), éventuellement complétées par une sélection appliquée aux cellules elles-mêmes, pourraient apporter une solution à des problèmes spécifiques, comme la sensibilité des bananiers à plusieurs maladies. La mutagenèse présente l'avantage de conserver les caractères variétaux en corrigeant un défaut particulier.

Lorsque la reproduction sexuée est possible, des clones possédant des caractères intéressants et complémentaires sont croisés ; la sélection s'effectue parmi les individus issus de ce croisement.

3.3. Sélection

Beaucoup de caractères qualitatifs sont faciles à détecter, et un premier tri peut s'effectuer parmi les mutants ou dans les descendance de croisements. Pour apprécier la productivité, la résistance aux maladies, la qualité du produit et divers caractères quantitatifs souvent peu héréditaires, il est indispensable de soumettre les têtes de clones potentiels à une sélection plus ou moins sévère.

Après un choix basé sur l'aspect des plantes, et donc surtout sur des caractères qualitatifs, les individus retenus sont multipliés végétativement (greffe, bouture) et cultivés en petites parcelles, dans un environnement uniforme. Sur base de la croissance, du comportement et du rendement, quelques clones seront conservés pour une seconde étape (figure 13.1). Celle-ci est nécessaire pour mieux faire ressortir les performances de ces clones ; les génotypes sélectionnés sont comparés sur des parcelles plus grandes, avec plusieurs répétitions et généralement des essais multi-locaux destinés à estimer leur adaptabilité. En fin d'expérimentation, un ou plu-

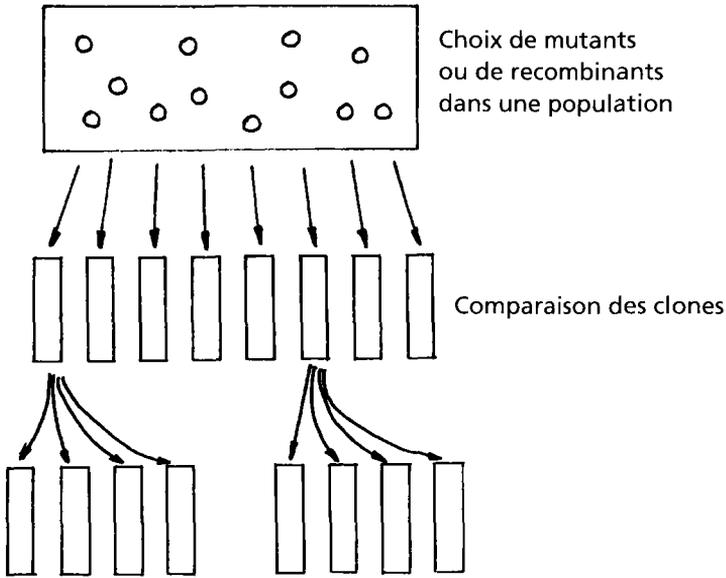


Figure 13.1. Sélection clonale.

sieurs clones seront proposés, éventuellement pour des régions ou des conditions d'exploitation particulières.

Pour certaines espèces, les cultures peuvent être établies à partir d'un seul clone, mais il est souvent indispensable de prévoir des plantations pluriclones, surtout quand elles sont établies pour de nombreuses années et sur des surfaces importantes (espèces forestières). L'hétérogénéité des populations diminue les risques d'accidents climatiques et d'épidémies. Lorsqu'une espèce cultivée pour la production de fruits ou de graines est auto-incompatible (cacaoyer, caféier robusta), le choix des clones doit aussi tenir compte des possibilités de pollinisation efficace entre eux.

3.4. Synthèse de clones hybrides

Lorsqu'une plante cultivée est stérile, la sélection clonale classique repose uniquement sur les mutations. La stérilité provient généralement d'irrégularités méiotiques, provoquées elles-mêmes par l'origine hybride des clones. Lorsque les espèces parentales fertiles sont identifiées et existent encore, elles peuvent servir à la synthèse de nouveaux hybrides, parmi lesquels des clones seront sélectionnés.

Cette possibilité existe chez les bananiers cultivés : la plupart sont triploïdes et dérivent de deux espèces diploïdes (*Musa acuminata* et *M. balbisiana*), vivant en Asie du Sud-Est. Bien que les triploïdes ne produisent pas de graines, des ovules viables non réduits (triploïdes) sont souvent différenciés dans les fleurs et leur fécondation par du pollen haploïde donne des embryons et des plantes tétraploïdes. Un second croisement par une espèce diploïde spontanée rétablit le niveau triploïde initial. Après plusieurs dizaines d'années, ce schéma n'a pas abouti à des tétraploïdes ou triploïdes commercialisables : Stover et Buddenhagen (1986) proposent plutôt de synthétiser de nouveaux triploïdes à partir de diploïdes actuels.

Une stratégie comparable est appliquée pour la création d'hybrides commerciaux (arabusta) entre *Coffea arabica* et *C. canephora* : la descendance des hybrides étant trop disparate pour servir de base à la sélection, l'obtention de clones supérieurs re-

pose sur le choix d'arabicas et de robustas autotétraploïdes capables de donner des hybrides de bonne qualité.

3.5. Les chimères

Chez les angiospermes, le méristème apical dont dérivent les organes aériens est formé d'une ou de plusieurs assises externes, indépendantes du corpus central. Chaque assise dépend de l'activité de plusieurs cellules méristématiques et se prolonge dans l'épiderme, les assises sous-épidermiques et les tissus internes de la tige, des feuilles et des fleurs. En conséquence, une mutation survenant dans une cellule méristématique ne se transmet pas à l'ensemble de la tige, mais reste limitée aux tissus qui dérivent de la cellule mutée. La plante devient donc hétérogène : c'est une chimère.

On distingue plusieurs types de chimères en fonction de la répartition des tissus. La chimère est **péricline** lorsqu'une mutation est présente dans toutes les cellules d'un tissu (épiderme, sous-épiderme, corpus). Elle est **sectorielle** lorsqu'elle se limite à un secteur de la tige et aux organes insérés sur cette partie de la tige. Le plus souvent, dans une chimère désignée comme sectorielle, la mutation (par exemple l'absence de pigmentation) n'est présente que dans une assise : elle est apparente parce que cette assise est superficielle ou visible par la transparence de l'épiderme : c'est une chimère **méricline** (figure 13. 2).

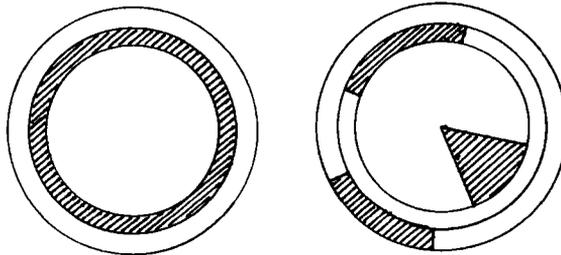


Figure 13.2. Types de chimères : péricline à gauche, mériclines (ou sectorielles) à droite.

Les chimères périclines sont normalement reproduites fidèlement par les méthodes traditionnelles de propagation végétative, ainsi que par microbouturage, parce que la structure des méristèmes axillaires correspond à celle du méristème apical. Par contre, l'induction de méristèmes adventifs à partir de tissus divers provoque des remaniements ; la reproduction par graines donne des plantules homogènes, possédant uniquement les gènes présents dans l'assise sous-épidermique. Lorsque la chimère est méricline (ou sectorielle), les bourgeons axillaires donnent des tiges homogènes ou chimériques selon leur position sur l'axe.

Beaucoup d'espèces ornementales, d'arbres fruitiers et de plantes à tubercules sont des chimères. Des clones diffèrent uniquement par la coloration de l'épiderme et sont recherchés pour leur esthétique. La résistance de l'épiderme des feuilles ou des fruits aux prédateurs et aux blessures représente aussi un avantage. Les ronces sans aiguillons sont des chimères périclines. La grande majorité des chimères sont dues à des mutations spontanées et sont donc aléatoires. On en obtient parfois à la suite de greffes entre espèces ou génotypes différents, par sélection de tiges développées au niveau de la cicatrice.

4. SÉLECTION DE LIGNÉES

4.1. Principes

Les variétés anciennes de céréales (*landraces*) étaient hétérogènes, à la suite de fréquents mélanges de semences, de mutations, de recombinaisons après croisements spontanés. L'agriculture moderne a conduit à l'uniformisation et à la stabilité des variétés. En théorie, une variété moderne est une lignée pure, produit de la multiplication de plantes homozygotes identiques entre elles. L'uniformité et la stabilité des variétés répondent à une nécessité pour la culture, la récolte, le conditionnement et le commerce. Elles représentent un avantage si la combinaison génétique a été bien choisie ; les dispositions légales concernant la commercialisation et la protection des variétés supposent un contrôle de l'uniformité.

Cependant, le manque de plasticité des lignées pures est un défaut lorsque les conditions climatiques, l'incidence des maladies et parasites diffèrent au cours des saisons ou selon les régions. Dans de nombreux cas, il sera utile de rechercher un compromis entre l'uniformité des variétés pour leurs caractères agronomiques et commerciaux d'une part, un polymorphisme génétique suffisant pour leur adaptation d'autre part.

4.2. Sélection de lignées

Une simple sélection massale a permis aux agriculteurs eux-mêmes de transformer peu à peu des plantes spontanées en variétés cultivées, puis d'obtenir des lignées homogènes à partir de populations disparates. Elle peut consister en une simple élimination des individus indésirables (**hors types**). Pour aboutir rapidement à une variété stable, on peut aussi produire la semence pour la génération suivante à partir d'une ou de quelques plantes choisies dans une population hétérogène.

La plupart des plantes étant homozygotes pour la majorité de leurs gènes, la descendance d'un individu représente une lignée pure. Si les caractères sélectionnés sont

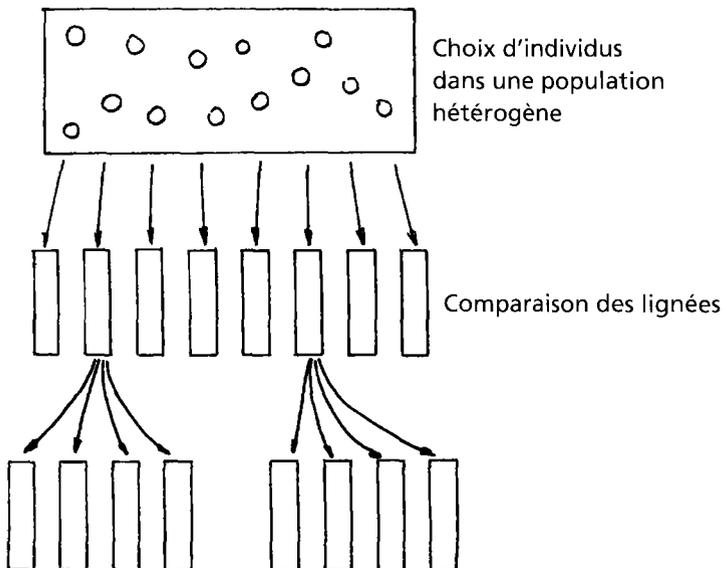


Figure 13.3. Sélection de lignées.

très héréditaires et facilement identifiables (couleur des fleurs, forme du fruit), la sélection massale est efficace, aboutissant, dès la première étape, à une lignée stable. Pour d'autres caractères fortement influencés par l'environnement, comme le rendement, elle est par contre peu efficace. Après un premier choix d'individus dans la population, leur descendance doit être observée de façon plus précise. Les semences récoltées sur les plantes choisies sont semées en petites parcelles, dans des conditions uniformes, où le rendement, mais aussi d'autres caractères agronomiques importants sont comparés. Après cette seconde sélection, les meilleures lignées subissent de nouveaux tests, avec répétitions et essais multilocaux (figure 13.3). La sélection de lignées est comparable à la sélection clonale.

4.3. Création variétale

Les méthodes traditionnelles d'amélioration ont deux objectifs : d'une part, sélectionner de nouvelles combinaisons de gènes dans une population dérivée d'un croisement et, d'autre part, rétablir l'homozygotie, au moins pour les caractères agronomiques visibles. Parmi les méthodes disponibles, certaines favorisent surtout la sélection, d'autres privilégient plutôt la stabilisation des descendance.

4.3.1. Sélection généalogique (pedigree)

A partir de la F_2 , les recombinaisons de caractères sont apparentes et un choix peut être fait, en fonction des critères définis. La descendance de chaque plante choisie est semée individuellement (figure 13.4). Dans chacune des parcelles, en F_3 et au cours des générations suivantes, des individus sont choisis pour leurs caractères propres, mais on prend aussi en considération les performances des familles dont

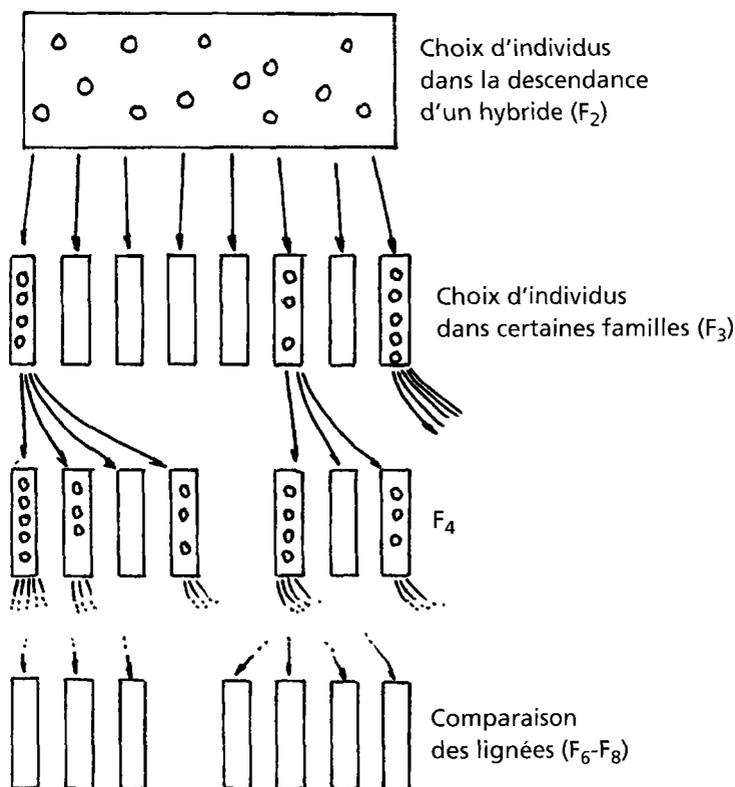


Figure 13.4. Sélection généalogique.

ils font partie. Lorsqu'une descendance est homogène, toute la famille est retenue ou éliminée. Les lignées retenues sont encore multipliées pour vérifier leur stabilité et étudier des caractères qui demandent un nombre plus important de plantes (productivité, qualité boulangère, etc.).

La séparation des familles en parcelles distinctes réduit les risques de croisement accidentel entre génotypes différents et facilite donc le rétablissement rapide de l'homozygotie. L'observation continue des descendance donne au sélectionneur une bonne connaissance de son matériel, facilite l'identification des caractères à forte héritabilité et l'isolement des lignées uniformes requises par l'agriculture moderne. Cependant, c'est une méthode coûteuse en travail, demandant l'observation de nombreux individus ; au cours des premières générations, le niveau élevé d'hétérozygotie peut masquer des caractères récessifs. Cette hétérozygotie peut aussi provoquer l'hétérosis et rendre difficile la sélection des gènes responsables de la productivité.

4.3.2. Les populations hybrides (*bulk-populations*)

Le principe de cette méthode est simple : pendant plusieurs générations, les semences sont récoltées sans sélection précise et semées en mélange. Pendant cette période, les populations sont soumises à la sélection naturelle, qui favorise l'adaptation aux conditions locales (tolérance au froid, à la sécheresse ...). Pour certains caractères (sensibilité aux maladies, taille de la plante) il est utile de compléter l'action de l'environnement par élimination sélective des individus qui ne conviennent pas. Après quelques générations, l'homozygotie s'est progressivement rétablie et de nouvelles lignées peuvent être sélectionnées dans la population (figure 13.5).

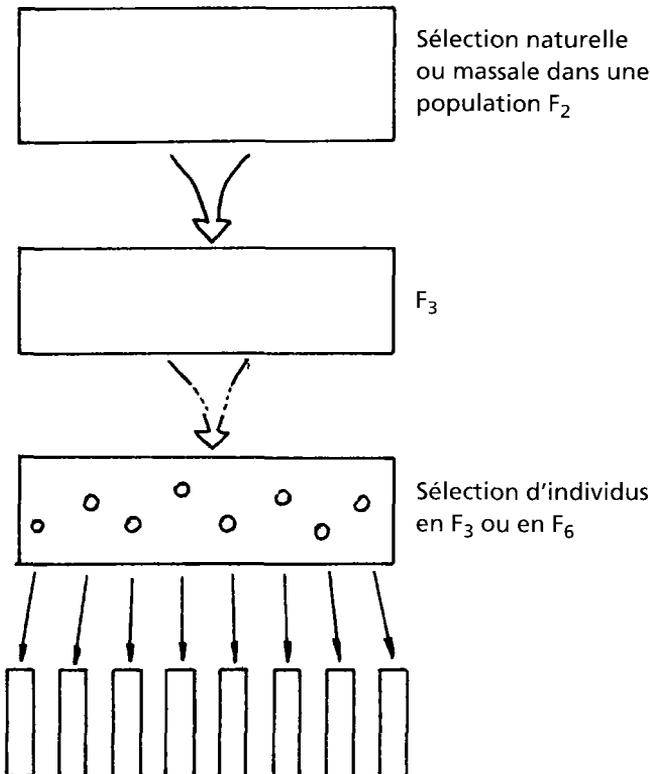


Figure 13.5. Populations hybrides.

Outre sa simplicité, la méthode des populations hybrides a l'avantage de mieux préserver les gènes multiples responsables du rendement et d'autres caractères de nature quantitative. Si les populations sont cultivées dans les conditions auxquelles les nouvelles variétés sont destinées, l'adaptation sera facilitée : à partir d'un même hybride, plusieurs variétés adaptées à des régions différentes peuvent ainsi être isolées. Cependant, des caractères désavantageux seront conservés si une sélection artificielle n'est pas appliquée : couleur du grain, morphologie de la plante, précocité. D'autre part, le rétablissement de l'homozygotie peut être ralenti par la promiscuité de plantes génétiquement différentes, surtout en cas de stérilité pollinique partielle ou si l'hétérosis avantage les plantes hétérozygotes.

4.3.3. *Single seed descent* (SSD, filiation unipare)

Cette méthode est destinée à rétablir rapidement l'homozygotie après une hybridation, sans aucune sélection artificielle : à chaque génération, depuis la F_1 , une graine est conservée pour chaque plante semée. Sauf accident, le nombre de lignées, après 5 à 8 générations, correspond au nombre de plantes F_1 . Puisqu'il n'y a pas de sélection et le nombre de plantes cultivées étant minime, la culture peut être faite en serre ou dans une région autorisant plusieurs cycles en un an, ce qui réduit beaucoup la durée de l'expérience. Cette méthode convient pour des espèces déjà fortement améliorées, pour combiner des caractères présents chez deux variétés ne différant que par peu de gènes.

Chez les espèces où la culture d'anthères est efficace, les haploïdes doublés jouent le même rôle que la méthode SSD. Les anthères d'hybrides sont mises en culture et les plantes haploïdes qui en résultent sont traitées par la colchicine, produisant des individus F_2 parfaitement homozygotes.

4.3.4. Méthodes combinées

De nombreux schémas ont été décrits : ce sont des combinaisons et adaptations des méthodes de base, imposées par la biologie des espèces, les conditions locales, les moyens disponibles, le but de la sélection. Très souvent, l'application de la sélection généalogique est précédée par une ou deux cultures de populations sur lesquelles une sélection est exercée uniquement en faveur de la tolérance à une maladie importante. A ce stade, le choix des individus et des familles est plus facile qu'en F_2 , le niveau d'hétérozygotie étant déjà réduit.

Pour accélérer l'obtention des lignées, deux générations peuvent être cultivées chaque année, l'une en station, l'autre dans une région chaude, en contre-saison ; dans ce cas, la sélection ne peut être appliquée qu'en station, les autres cultures servant uniquement au rétablissement de l'homozygotie.

4.4. Introgression

Lorsqu'un seul caractère, ou quelques caractères doivent être introduits dans une variété déjà améliorée, le croisement initial est suivi d'une série de **rétrocroisements** (*back-cross*) par cette variété, désignée comme **parent récurrent**. A chaque génération, les plantes possédant le caractère souhaité sont choisies. La méthode ne s'applique donc, en principe, qu'aux caractères qualitatifs dominants. Lorsque le gène à introduire est récessif, il n'est pas possible de distinguer les hétérozygotes des homozygotes dominants : après chaque rétrocroisement, des plantes sont pollinisées par le parent récurrent, mais d'autres fleurs de ces mêmes plantes sont auto-

pollinisées, de façon à identifier les hétérozygotes pendant la saison suivante. Seules sont conservées pour les étapes ultérieures, les semences provenant de ces hétérozygotes pollinisés par le parent récurrent (figure 13.6).

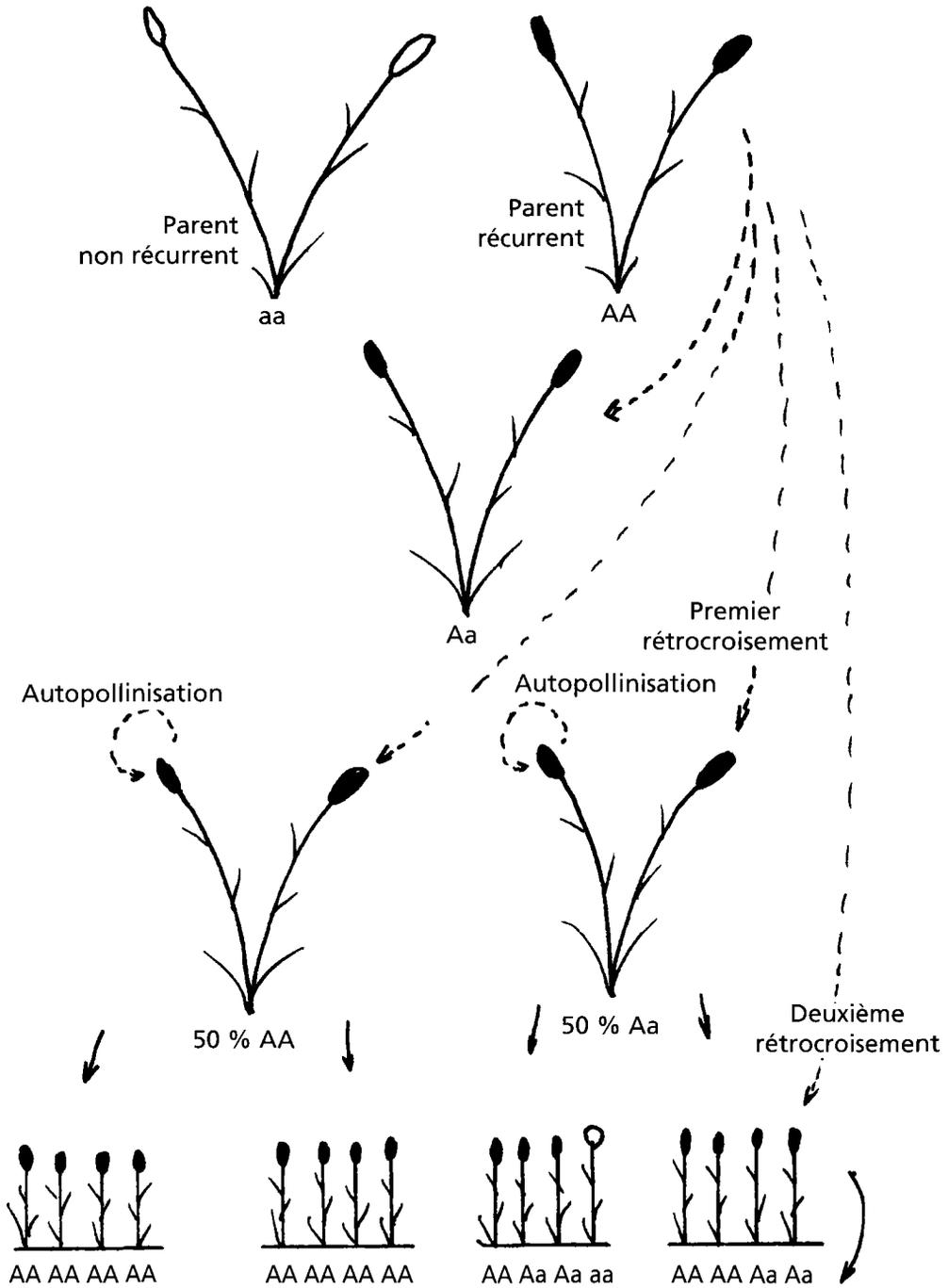


Figure 13.6. Amélioration par introgression d'un allèle récessif "a".

On utilise une méthode comparable pour réunir, dans une même variété, les caractères nucléaires d'une lignée et cytoplasmiques d'une autre (stérilité pollinique). Après un premier croisement, on prend comme parent récurrent la lignée dont on veut conserver les caractères nucléaires. A chaque étape, le cytoplasme du parent

“femelle” est conservé, tandis que les gènes nucléaires du pollinisateur s’accumulent dans le noyau.

4.5. Composites et multilignées

L’homogénéité des lignées pures les rend vulnérables aux aléas climatiques et aux maladies. C’est pour éviter cette vulnérabilité génétique que les variétés composites sont proposées. Il s’agit de populations hybrides résultant le plus souvent de croisements entre lignées plus ou moins nombreuses. Ces populations sont soumises à la sélection naturelle, évoluent et s’adaptent progressivement aux conditions locales. Pour éviter le rétablissement de l’homozygotie et la stabilisation de la population, on peut ajouter quelques plantes “mâle-stériles” (à contrôle nucléaire) qui sont spontanément pollinisées par les plantes voisines, provoquant à chaque génération de nouveaux brassages de gènes.

Le principal mérite des composites est leur plus grande sécurité lorsque l’environnement est instable. Le rendement moyen augmente peu : pour maintenir leur compétitivité par rapport aux variétés plus récentes, ces populations peuvent être améliorées en y introduisant des génotypes modernes disponibles.

Les multilignées représentent un autre moyen de limiter les risques, en cultivant un mélange de lignées semblables pour la majorité de leurs caractères agronomiques. Des lignées isogéniques peuvent dériver d’une même variété dans laquelle différents allèles de résistance à une maladie ont été introduits par back-cross. Dans ces populations hétérogènes, la progression de l’agent pathogène est ralentie et les pertes sont réduites.

5. LES VARIÉTÉS HYBRIDES

Cette méthode a été développée pour le maïs, aux États-Unis ; elle a été appliquée ensuite à plusieurs autres espèces allogames, puis à quelques autogames. Elle implique l’obtention de lignées fortement homozygotes, suivie d’une hybridation entre lignées qui manifestent une bonne aptitude à la combinaison. Les variétés hybrides sont uniformes et vigoureuses, mais elles sont hétérozygotes et leur descendance est donc hétérogène, ce qui nécessite le remplacement des semences à chaque culture.

5.1. Consanguinité et dépression

Chez beaucoup de plantes allogames, autofécondations et croisements consanguins réduisent plus ou moins la vigueur des plantes, leur fécondité et leur production. Cette dépression est importante chez le maïs, où les meilleures lignées épurées (*inbred lines*) obtenues par autofécondation produisent deux fois moins que les populations initiales. D’autres espèces, comme la luzerne et la carotte, sont encore plus sensibles à l’autofécondation, qui provoque l’apparition d’un grand nombre de plantes **létales** ou **sublétales**. D’autres espèces sont au contraire très peu sensibles à la consanguinité (seigle, tournesol, cucurbitacées) et il est possible d’obtenir des lignées pures non dégénérées.

La dépression s'explique, au moins en partie, par l'existence de nombreux allèles létaux récessifs (albinisme) ou d'allèles désavantageux, qui se manifestent seulement à l'état homozygote, donc surtout après autofécondation.

5.2. Hétérosis

La vigueur des plantes est restaurée lorsque deux lignées provenant d'autofécondations sont croisées. Souvent, la vigueur est également accrue lorsque deux populations hétérozygotes sont croisées. Cette vigueur hybride ou **hétérosis** se traduit par un meilleur état général des plantes : croissance, rendement, précocité, tolérance aux parasites, aux conditions climatiques défavorables. La réunion, chez l'hybride, d'allèles dominants présents chez les parents peut expliquer en partie l'hétérosis. Certains auteurs privilégient cette interprétation, estimant donc que la plus grande partie de l'hétérosis peut être fixée à l'état homozygote (Gallais, 1988). Cependant, si les nombreux efforts faits depuis le début du siècle ont amélioré le niveau des lignées de maïs, la différence entre lignées épurées et hybrides ne s'est pas réduite. Bien que les mécanismes précis responsables de l'hétérosis restent inexpliqués, la superdominance reste la meilleure interprétation : la vigueur est attribuée à l'hétérozygotie des hybrides pour un nombre élevé de gènes.

5.3. Aptitude à la combinaison

A cause du niveau élevé d'hétérozygotie, le phénotype d'une plante ou d'une lignée ne représente pas son potentiel génétique : pour connaître celui-ci, il faut observer les descendance. Cependant, la consanguinité entraîne une perte de vigueur, quelle que soit la valeur intrinsèque de la plante. Après un croisement, le potentiel de la plante testée peut être masqué par les gènes de l'autre.

Les tests d'aptitude à la combinaison ont pour but d'estimer le niveau d'hétérosis qui peut être attendu lorsqu'une lignée épurée sera croisée avec d'autres. Le choix du testeur est conditionné par l'objectif recherché : il peut être une plante, une lignée, une population définie ou un mélange quelconque. Une lignée possède une bonne aptitude générale si elle donne des hybrides productifs avec divers autres génotypes. Son aptitude est spécifique si l'hétérosis se manifeste à l'égard d'une autre lignée.

Deux tests sont d'habitude appliqués, souvent successivement, pour le choix des lignées parentales. Le *top-cross* (croisement) est un test où des plantes ou des lignées sont croisées avec un testeur commun. Les croisements **dialèles** sont plus précis, mais ils demandent aussi plus de travail : chaque lignée est croisée avec chacune des autres ; les croisements réciproques sont réalisés si une influence maternelle est suspectée.

5.4. Production de la semence hybride

Chez le maïs, la semence hybride a d'abord été produite après élimination manuelle des inflorescences mâles d'un des parents. Actuellement, le parent femelle est une lignée mâle-stérile cytoplasmique et le pollinisateur possède un allèle dominant qui restaure la fertilité dans la F_1 . Pendant une certaine période, on a utilisé des hybrides doubles, par pollinisation d'un hybride F_1 par un autre. Les semences ainsi produites étaient moins coûteuses et de meilleure qualité, à cause de la vi-

gueur plus grande des géniteurs, mais la descendance produite est hétérogène, puisqu'elle provient d'un croisement entre deux hétérozygotes. Une amélioration des lignées épurées elles-mêmes a permis d'en revenir aux hybrides simples.

Les variétés hybrides sont utilisées sur une grande échelle chez les cucurbitacées, l'épinard, certaines plantes ornementales. Les croisements sont facilités par la dioécie chez l'asperge, par la stérilité mâle chez le tournesol, les choux, l'oignon, par l'auto-incompatibilité chez certaines variétés de choux.

5.5. Applications aux autogames

La commercialisation d'hybrides F_1 est justifiée chez les espèces autogames lorsque l'hétérosis est suffisante pour compenser le prix plus élevé de la semence. Une autre justification, pour le producteur de semences, est l'obligation pour le cultivateur de renouveler chaque année son matériel végétal.

La production des hybrides sur une grande échelle est difficile : il faut disposer de lignées mâle-stériles fiables, induites soit par des gènes cytoplasmiques (riz, tomate), soit par des traitements gamétocides (blé). D'autre part, la quantité de pollen produite par les autogames et leur biologie florale sont peu compatibles avec une pollinisation croisée efficace. Celle-ci peut être améliorée par sélection ou par introduction de gènes à partir d'espèces allogames apparentées. La production des champs semenciers reste toujours faible et le coût élevé de la semence hybride doit être compensé par un accroissement suffisant du rendement de la culture. L'exemple le plus spectaculaire est le développement des variétés hybrides de riz en Chine : en une dizaine d'années, ces hybrides ont couvert plus de 8 millions d'hectares et l'augmentation du rendement dû à l'hétérosis atteint 20 à 30 %.

6. AMÉLIORATION DES POPULATIONS

Le principal défaut des variétés hybrides est leur manque de souplesse et leur susceptibilité aux maladies. L'amélioration des populations passe essentiellement par une modification des fréquences alléliques, aboutissant à la fixation des allèles recherchés, mais conservant un niveau élevé d'hétérozygotie. La sélection massale est d'abord phénotypique et s'adresse aux caractères fortement hératables. Pour les caractères quantitatifs comme la productivité, des tests de descendance sont indispensables. Les populations améliorées sont reproduites indéfiniment, alors que les variétés synthétiques sont régulièrement reconstituées à partir de leurs parents ; ceux-ci peuvent être annuels ou pérennes. Les populations parentales sont elles-mêmes progressivement améliorées, en particulier par sélection récurrente.

6.1. Sélection massale

Cette méthode a longtemps été appliquée avec succès chez beaucoup d'espèces allogames. Elle consiste à récolter la semence destinée à la génération suivante sur les plantes correspondant aux souhaits de l'agriculteur. Pour les caractères fortement hératables, la sélection est efficace, elle se traduit par une augmentation progressive de la fréquence des allèles favorables dans les populations ; elle est plus

lente que chez les autogames, surtout lorsque plusieurs gènes sont impliqués. L'observation du phénotype suffit pour la couleur du fruit, la morphologie de l'inflorescence ou la précocité. Pour des caractères tels que la teneur en sucre de la betterave ou en huile dans les grains de maïs, la sélection est conditionnée par l'existence de méthodes d'analyse applicables à de nombreux individus.

La sélection massale pour le rendement est plus difficile : un test de descendance portant sur quelques dizaines de plantes est nécessaire pour contrôler la valeur des individus repérés au champ. Après une pollinisation libre ou par un testeur, une partie de la semence est conservée, l'autre est semée pour la comparaison des descendance. La génération suivante est constituée à partir des graines conservées, provenant des plantes qui ont satisfait au test de descendance (figure 13.7).

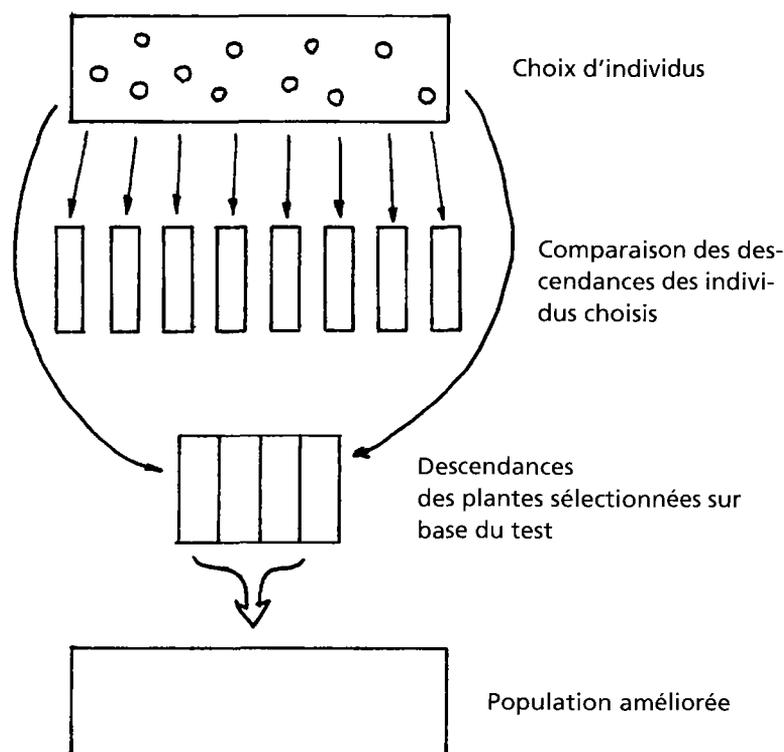


Figure 13.7. Sélection massale avec test de descendance

6.2. Sélection récurrente

Cette méthode consiste à améliorer progressivement une population par une série de cycles où alternent autofécondation et croisement. Des plantes sont choisies dans une population, elles sont autopollinisées et les descendance sont semées en lignes contiguës. Après croisement entre ces descendance, la semence récoltée donne une nouvelle population qui sera soumise à d'autres cycles de sélection (figure 13.8). Une variété synthétique peut être commercialisée après un ou plusieurs cycles. La sélection accroît la fréquence des gènes recherchés, l'alternance autofécondation-croisement maintient la vigueur.

La sélection récurrente s'applique à des caractères mesurables sur les plantes indi-

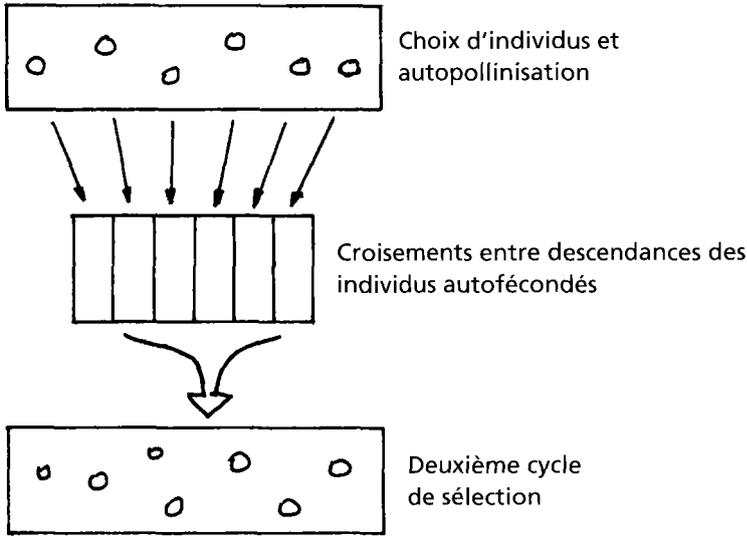


Figure 13.8. Sélection récurrente simple.

viduelles, comme la teneur en huile chez le maïs. Pour améliorer la productivité (hétérosis), des tests de descendance sont indispensables, comme pour la sélection massale, ce qui allonge d'un an la durée de chaque cycle. Sur les plantes choisies dans la population, certaines fleurs ou inflorescences sont autopolinisées, d'autres sont croisées avec un testeur. Pendant la seconde année, les descendance des croisements sont comparées ; les semences provenant de l'autofécondation des plantes qui manifestent une bonne aptitude à la combinaison sont semées et les plantes obtenues sont croisées. La population synthétique est obtenue après croisement de la population améliorée et du testeur.

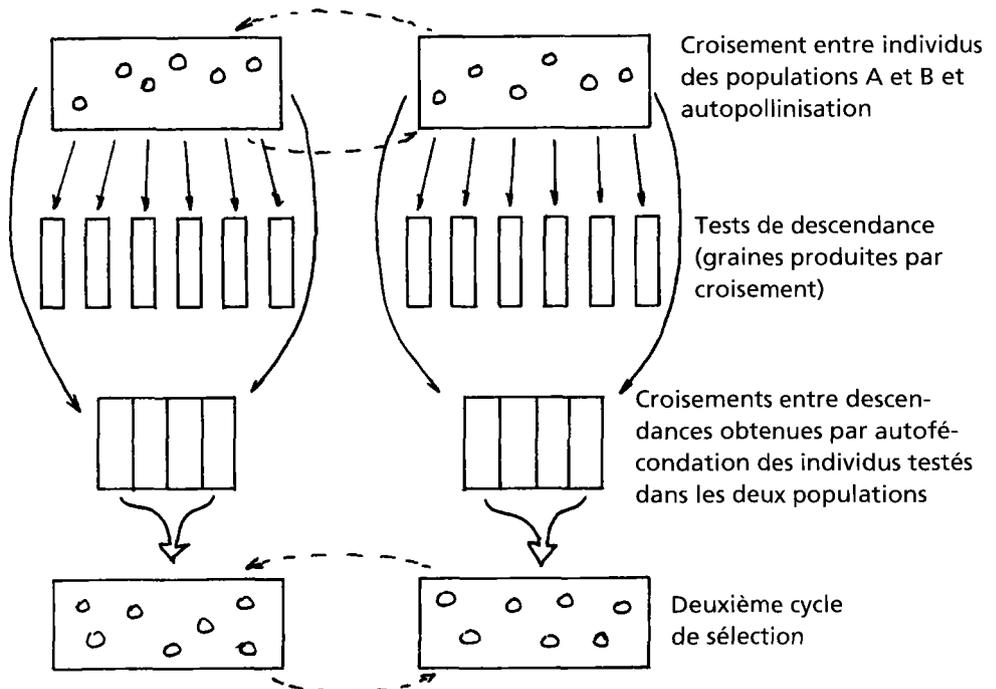


Figure 13.9. Sélection récurrente réciproque.

La sélection réciproque est une variante de la précédente, où deux populations sont améliorées pour leur aptitude réciproque à la combinaison : des plantes de chaque population servent de testeur pour l'autre (figure 13.9). Le croisement entre les deux populations fournit la semence commerciale.

6.3. Plantes pérennes

Les méthodes appliquées à certaines de ces plantes rappellent les variétés hybrides, les semences étant produites à partir de deux ou de plusieurs génotypes parentaux (plantes ou clones) choisis pour leur aptitude à la combinaison. Cependant, ces génotypes ne sont pas des lignées épurées, ils sont hétérozygotes ; les variétés produites sont des synthétiques.

Les plantations de palmier à huile sont formées d'individus de type *tenera*, dont le fruit possède une coque mince c'est un hétérozygote Dd obtenu par croisement entre *dura* (DD) et *pisifera* (dd). De nombreux tests de descendance sont réalisés, afin de choisir les individus complémentaires. Ceux-ci peuvent produire une descendance nombreuse, en raison de leur longévité, de la taille des inflorescences femelles et de l'abondance du pollen. Les croisements sont facilités par la séparation des inflorescences des deux sexes et la longévité du pollen. Les hybrides produits sont uniformes en ce qui concerne l'épaisseur de la coque, mais restent hétérozygotes pour d'autres caractères.

Chez le cacaoyer, la plupart des plantations sont actuellement établies après hybridation entre clones préalablement testés pour leur aptitude à la combinaison. Lorsqu'un clone au moins est auto-incompatible, des plantations biclonales sont installées et la pollinisation est assurée par les insectes. Même pour ces clones, une pollinisation manuelle améliore beaucoup la fructification. L'hétérozygotie des clones parentaux assure, aux populations synthétiques qui en dérivent, une plasticité suffisante. Cependant, pour réduire encore la probabilité de combinaisons incompatibles, les descendance de plusieurs hybrides sont souvent plantées en mélange.

Les semences de graminées et de légumineuses fourragères sont généralement des populations synthétiques. Beaucoup de ces plantes peuvent être propagées végétativement et sont auto-incompatibles. Le principal critère de sélection est le développement végétatif, fortement influencé par l'hétérosis. L'aptitude à la combinaison est généralement testée par un *polycross* : les plantes choisies dans un premier temps sont clonées et les clones sont répartis sur le terrain de façon à assurer à chacun une pollinisation aléatoire par l'ensemble des autres. Les clones qui donnent les descendance les plus vigoureuses sont propagés en champs semenciers.

7. RÉSISTANCE AUX MALADIES ET PARASITES

7.1. Importance de l'amélioration génétique

Maladies, parasites et prédateurs ont toujours provoqué des pertes considérables. En l'absence d'une protection efficace, les variétés modernes sont plus exposées que les populations anciennes à cause de la disparition d'adaptations protectrices au cours de la domestication, de l'uniformité des variétés, qui facilite l'adapta-

tion des agents pathogènes, et de l'extension des cultures, favorable à celle des parasites.

La protection des cultures par des pesticides devrait être réservée à la lutte contre des épidémies accidentelles et localisées. L'utilisation prolongée de ces produits n'est pas justifiée, à cause de leur coût, de leurs conséquences écologiques et de l'adaptation inévitable des parasites. *L'amélioration de la résistance des variétés est donc primordiale, mais elle est difficile parce que les agents pathogènes s'adaptent aussi à la résistance des plantes*, obligeant le sélectionneur à modifier sans cesse les variétés pour surmonter la virulence du parasite.

7.2. Contrôle génétique de la résistance

Bien que certains cas paraissent intermédiaires, les mécanismes de résistance se répartissent en deux groupes : une résistance complète (**immunité**) et une **tolérance** qui se manifeste surtout par un ralentissement de la prolifération du parasite et par des symptômes moins graves. Le contrôle génétique est surtout étudié pour les rouilles et autres infections disséminées dans l'atmosphère, mais les mécanismes se sont souvent révélés comparables pour d'autres cryptogames, des virus, insectes, nématodes et même angiospermes parasites.

- **Résistance spécifique.** Cette résistance, appelée aussi **verticale**, est en principe totale, mais n'est efficace qu'à l'égard de certaines souches du parasite. Elle s'explique par une interaction entre molécules des deux partenaires. Cette interaction se traduit généralement par une réaction d'hypersensibilité impliquant la destruction presque immédiate des cellules végétales autour du site d'infection et la mort de l'agent pathogène. Souvent sont impliqués des **phytoalexines**, antibiotiques de nature généralement phénolique, dont la synthèse est induite localement par des "éliciteurs" émis par le parasite. Cette faculté de réaction de la plante dépend d'un gène, le plus souvent dominant.

La résistance verticale disparaît si le parasite devient virulent, c'est-à-dire s'il ne produit plus, à la suite d'une mutation, le signal qui déclenche la réaction de la plante. Certains parasites, comme *Phytophthora infestans*, se modifient et s'adaptent particulièrement vite. De façon générale, la présence continue de populations importantes du parasite augmente la probabilité de voir apparaître des mutants virulents et la pression de sélection en faveur de ces mutants s'accroît avec l'étendue des cultures résistantes. En conséquence, la résistance verticale ne protège que temporairement une plante de grande culture contre des agents pathogènes endémiques, polymorphes et qui possèdent une grande capacité de dissémination.

- **Résistance non spécifique.** Cette forme de résistance (résistance **horizontale**) se manifeste par une inhibition variable, mais partielle, de l'infection par les différentes souches d'un parasite. Elle est contrôlée par un nombre indéterminé de gènes dont l'action exacte est diverse, mais pour une bonne part inexpliquée. En principe, cette résistance est stable, parce que le parasite ne s'y adapte pas.

Lorsqu'une population végétale reste en présence d'un parasite, sa résistance s'accroît progressivement par accumulation de gènes horizontaux. Au contraire, ceux-ci tendent à disparaître si le parasite est absent ou si la population est protégée par un pesticide ou par un gène vertical.

7.3. Amélioration de la résistance

La résistance spécifique étant contrôlée par des gènes majeurs dominants, l'amélioration est facile. L'introduction d'un gène de résistance à l'égard d'une souche de l'agent pathogène à partir d'une espèce ou d'une variété résistante se fait par back-cross. Il faut toutefois se souvenir que cette introgression n'a pas d'intérêt si le parasite est capable de s'adapter rapidement. Dans certains cas, on a pu protéger des variétés de façon durable en y accumulant préventivement deux ou trois gènes de résistance ; ces gènes représentent, pour le parasite, un obstacle qui ne peut être surmonté que par la mutation de deux ou trois de ses propres gènes.

L'amélioration de la résistance non spécifique est souvent indispensable, mais elle est plus difficile, à cause de la difficulté d'identifier les gènes. On peut espérer trouver ces gènes dans des populations d'origines diverses, soumises à l'action du pathogène et non protégées par des gènes majeurs. Les populations hybrides seront cultivées en présence de cet agent pathogène, de façon à accumuler les gènes de résistance. La sélection récurrente est aussi possible.

8. HYBRIDATION INTERSPÉCIFIQUE ET POLYPLÔIDIE

8.1. Objectifs et difficultés

Beaucoup d'espèces cultivées (blés, avoine, cotonniers, tabac) sont des **allopolyploïdes**, provenant d'hybridations interspécifiques spontanées et d'un doublement du nombre chromosomique. D'autres sont des **autopolyploïdes**, réunissant généralement quatre lots chromosomiques homologues (luzerne, pomme de terre). Dans les deux cas, le doublement du nombre de chromosomes procure un enrichissement génétique en rassemblant les génomes d'espèces ou de variétés différentes.

L'hybridation interspécifique artificielle a pour but de reconstituer des polyploïdes à partir de leurs parents ou de créer des formes nouvelles sur le modèle de celles qui existent en nature, ou encore de transférer un certain nombre de gènes d'une espèce sauvage à une variété cultivée.

Cette hybridation se heurte souvent à des obstacles d'incompatibilité et à la stérilité des hybrides dès que les relations entre les parents sont distantes. Divers artifices sont appliqués pour surmonter ces difficultés : fécondation *in vitro*, culture d'embryons, choix des génotypes parentaux ou d'espèces ponts pour le transfert de caractères entre parents incompatibles.

8.2. Autopolyploïdie

Le traitement des cellules en division par la colchicine est une méthode simple permettant d'obtenir des cellules et des plantes tétraploïdes. Aux alentours de 1950, ce traitement a été appliqué à la plupart des plantes cultivées, dans l'espoir d'accroître la taille des organes et la production, grâce à l'augmentation du nombre de chromosomes. Cependant, la polyploïdie a presque toujours une influence négative sur la fertilité, qui ne peut être éventuellement corrigée que par une sélection de longue durée.

Les formes cultivées autopolyploïdes ne sont nombreuses que chez des espèces ornementales, où des fleurs ou inflorescences plus grandes représentent un objectif prioritaire ; la fertilité réduite et l'augmentation du coût des semences restent acceptables. Il existe aussi des lignées cultivées autotétraploïdes de seigle et de trèfle rouge, mais l'accroissement des rendements par rapport aux diploïdes n'est pas suffisant pour encourager une généralisation de cette méthode.

L'autopolyploïdie est surtout importante chez la betterave sucrière : la majorité des variétés cultivées, en Europe et au Japon, sont des triploïdes. La semence est obtenue par pollinisation de diploïdes mâle-stériles par des autotétraploïdes. La polyploïdie réduit la tendance à la floraison prématurée et permet de réunir un plus grand nombre d'allèles dans un même génome. La production de sucre est la meilleure au niveau triploïde, mais la stérilité des plantes nécessite la reconstitution de la variété hybride chaque année.

8.3. Hybrides et allopolyploïdes artificiels

Beaucoup de plantes ornementales sont des hybrides interspécifiques stériles, mais propagés végétativement (orchidées). Les hybrides sont également fréquents parmi les essences forestières, pour lesquelles la réduction éventuelle de la fertilité est compensée par la longévité des arbres. Lorsqu'une plante est cultivée pour ses fruits ou ses graines, la fertilité est essentielle : beaucoup de ces hybrides sont polyploïdes.

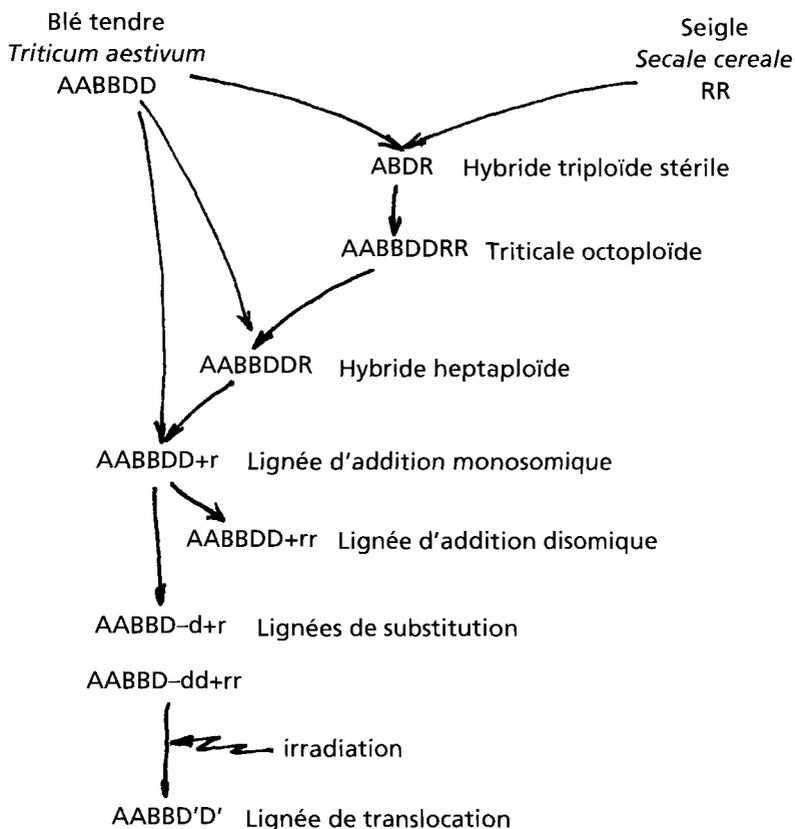


Figure 13.10. Allopolyploïdie et manipulations chromosomiques chez le blé.

Les **triticales** sont des allopolyploïdes réunissant les génomes du blé (dur ou tendre) et du seigle (figure 13.10). Ils sont connus depuis plus d'un siècle, combinant la productivité et les qualités boulangères du blé à la rusticité et à la composition des protéines du seigle. Les triticales sont principalement cultivés sur sols pauvres, où ils remplacent avantageusement le blé. Leur amélioration repose surtout sur des croisements avec le blé, qui aboutissent en fait à l'élimination d'une grande partie du génome du seigle.

La création du caféier "arabusta", hybride entre *Coffea arabica* (tétraploïde) et *C. canephora* (diploïde) avait pour but d'améliorer surtout la résistance aux maladies du caféier cultivé à basse altitude. Le croisement est précédé d'un doublement du nombre chromosomique chez *C. canephora*. Un choix judicieux des génotypes parentaux a donné des hybrides de bonne qualité. Cependant, leur fertilité reste insuffisante et, à long terme, l'amélioration semble devoir passer par des croisements, afin d'éliminer une partie des gènes du robusta.

8.4. Amélioration par introgression

Chez les plantes de grande culture, seuls les hybrides entre deux espèces cultivées possèdent des qualités agronomiques acceptables. Même dans ces conditions, une tendance se dessine en faveur de l'élimination de la majorité des caractères d'un des parents (seigle, caféier robusta, *Oryza glaberrima*). L'objectif des croisements impliquant une forme cultivée et une spontanée est toujours le transfert d'un nombre limité de gènes de celle-ci vers les variétés cultivées. Les méthodes disponibles diffèrent selon le niveau d'homologie entre les génomes parentaux. Leur application demande généralement beaucoup de temps mais, quand un gène étranger est introduit dans une variété, il peut être ensuite transféré facilement à d'autres par back-cross.

- **Introgression génique.** Lorsque les chromosomes de deux espèces sont capables de s'apparier et de former des crossing-over, par exemple lors de croisements entre une plante cultivée et son ancêtre non domestiqué, les méthodes ne diffèrent guère de celles qui sont utilisées à l'occasion de croisements entre deux variétés, sauf que des problèmes d'incompatibilité et de stérilité se posent souvent. C'est de cette façon que de nombreux caractères ont été introduits chez la tomate à partir de quelques espèces sauvages.

Le niveau de ploïdie différent chez les parents n'empêche pas les transferts de gènes par introgression, pour autant que ces gènes soient localisés sur des génomes homologues. Par exemple, un gène de résistance présent dans le génome A de *Triticum timopheevi* (AAGG) peut être introduit chez le blé tendre (AABBDD) après une série de croisements où ce dernier est le parent récurrent. Mais les gènes de G ne pourront être introduits de cette manière.

- **Lignées d'addition.** A la suite de back-cross et d'une sélection pour un caractère porté par un chromosome non homologue, on obtient parfois des lignées de type cultivé possédant ce caractère (figure 13.10). Ces lignées ont recouvert tous les chromosomes du parent récurrent et possèdent, en plus, une paire supplémentaire (42 chromosomes du blé et une paire du génome G de *T. timopheevi* par exemple). Ces lignées sont souvent instables, parce que le chromosome supplémentaire tend à disparaître en l'absence de pression de sélection, et la présence d'un chromosome "sauvage" complet implique le maintien de nombreux gènes indésirables qui y sont localisés.

• **Lignées de substitution.** Certaines plantes obtenues après croisements et sélection ont le nombre chromosomique du parent cultivé récurrent : ce sont des lignées de substitution, où une paire de chromosomes de la variété a été remplacée par une paire de l'espèce spontanée. Cette substitution n'est possible que si les chromosomes échangés sont homéologues, s'ils possèdent des gènes capables d'assurer les mêmes fonctions vitales. Les lignées de substitution sont plus stables que les lignées d'addition, parce que la perte accidentelle du chromosome échangé est létale. Comme les précédentes, elles possèdent cependant trop de caractères sauvages.

• **Substitution par translocation.** Pour diminuer l'importance des caractères de l'espèce spontanée, il faut pouvoir transférer un petit segment chromosomique portant le gène souhaité et l'insérer sur un chromosome de la variété. La méthode appliquée consiste à irradier des lignées d'addition ou de substitution, afin de provoquer des translocations entre les génomes ; une sélection est exercée en faveur d'un caractère porté par le chromosome supplémentaire. Une des premières applications de cette méthode a été l'introduction, chez le blé tendre (AABBDD), d'un gène de résistance à la rouille présent chez *Aegilops umbellulata* (CC).

• **Transformation génétique.** Les différentes techniques expérimentées pour transformer les cellules végétales ont aussi pour but de surmonter les barrières d'incompatibilité et d'introduire des gènes étrangers, par exemple par l'intermédiaire du plasmide tumorigène d'*Agrobacterium tumefaciens* ou d'un plasmide recombiné. En théorie, les applications possibles sont beaucoup plus larges que pour l'hybridation interspécifique, puisque les vecteurs peuvent transporter non seulement des gènes provenant d'espèces végétales plus ou moins éloignées, mais aussi des gènes bactériens (pour l'insecticide de *Bacillus thuringiensis*) ou viraux (protéine de la capsid) et même des gènes synthétiques, comme celui qui a été inséré au génome de la pomme de terre afin de lui faire produire des protéines riches en méthionine.

Les hybrides asymétriques obtenus par fusion de protoplastes correspondent à des lignées d'addition ou de substitution ; comme la transformation, la fusion de protoplastes permet de surmonter les obstacles qui s'opposent à la transmission de certains caractères par voie sexuée.

9. MUTAGENÈSE ARTIFICIELLE

9.1. Méthodes

A partir des années 1950, on a mis beaucoup d'espoir dans l'irradiation des plantes comme moyen de diversification génétique. Cependant, les radiations ionisantes produisent surtout des cassures chromosomiques, entraînant des délétions, inversions et translocations. Ultérieurement, il a semblé plus judicieux d'utiliser des mutagènes chimiques : ce sont des substances, le plus souvent des alkylants ou des analogues de bases, qui agissent au niveau de l'ADN en cours de répllication et produisent donc surtout des mutations ponctuelles.

Les différents mutagènes augmentent la fréquence des mutations qui peuvent être soumises à la sélection, mais aucun n'est spécifique d'un type de mutation. La plupart des mutations induites sont récessives : elles correspondent à la perte d'un segment d'ADN (délétion) ou à son altération (mutation ponctuelle). Sauf quand le

traitement est appliqué à une plante haploïde, les mutations récessives ne s'observent que dans la descendance des plantes traitées.

Une nouvelle source de mutation est apparue avec l'application des cultures *in vitro*. La variation somaclonale et gamétoclonale comprend, à côté de modifications non héréditaires, des mutations ponctuelles et chromosomiques dont le spectre peut différer de celui des mutations spontanées et induites par d'autres voies.

9.2. Utilité des mutations induites

La mutagenèse est beaucoup utilisée pour les plantes ornementales propagées végétativement. Les clones obtenus diffèrent souvent de leur géniteur par des modifications dans la forme ou la couleur des fleurs, ou par leur structure anatomique chimérique.

Pour les céréales et autres plantes de grande culture, le temps qui s'écoule entre l'isolement d'un mutant et la commercialisation éventuelle d'une nouvelle variété est toujours plus long, parce que les critères d'appréciation sont plus nombreux. Certaines nouvelles variétés ainsi obtenues dérivent directement d'une autre variété améliorée dont un caractère a été corrigé par mutagenèse. D'autres mutations sont utilisées indirectement, après leur transfert à une autre variété.

Plusieurs centaines de variétés dérivent directement ou indirectement de mutations induites, surtout à la suite d'irradiations. Elles ne représentent qu'une faible proportion des variétés mises chaque année sur le marché, mais certaines ont une importance commerciale notable. Les principaux caractères améliorés sont surtout des modifications de la morphologie de la plante (réduction de la taille), la précocité, la résistance aux maladies, la production, la qualité du produit. La majorité des variétés produites par mutagenèse appartiennent à des plantes annuelles autogames (riz, blé, orge). Il y en a beaucoup moins chez les allogames, où la distinction entre mutations et recombinaisons n'est pas toujours facile.

BIBLIOGRAPHIE

- Allard R.W. (1960), *Principles of plant breeding*, Wiley, New York, 485 p.
- Demarly Y. (1977), *Génétique et amélioration des plantes*, Masson, Paris, 287 p.
- Fehr W.R. (1987), *Principles of cultivar development*, Vol. 1. *Theory and technique*, MacMillan, New York, 672 p.
- Fehr W.R. (ed.) (1987), *Principles of cultivar development*, Vol. 2. *Crop species*, MacMillan, New York, 761 p.
- Gallais A. (1988), "Heterosis : its genetic basis and its utilization in plant breeding", *Euphytica*, **39** : 95-104.
- Gallais A. (1990), *Théorie de la sélection en amélioration des plantes*, Masson, Paris, 588 p.
- North C. (1979), *Plant breeding and genetics in horticulture*, MacMillan, Londres, 150 p.
- Plucknett D.L., Smith N.J.H., Williams J.T. & Murthi Anishetty N. (1990), *Banques de gènes et alimentation mondiale*, INRA-Economica, Paris, 228 p.
- Richards A.J. (1986), *Plant systems*, Allen & Unwin, Londres, 529 p.

- Russell G.E. (1978), *Plant breeding for pest and disease resistance*, Butterworth, Londres, 485 p.
- Simmonds N.W. (ed.) (1976), *Evolution of crop plants*, Longman, New York, 349 p.
- Simmonds N.W. (1979), *Principles of crop improvement*, Longman, New York, 408 p.
- Stover R.H. et Buddenhagen I.W. (1986), "Banana breeding : polyploidy, disease resistance and productivity", *Fruits*, **42** : 175-191.
- Valdeyron G. (1961), *Génétique et amélioration des plantes*, Baillière, Paris, 374 p.
- Van der Plank J.E. (1978), *Genetic and molecular basis of plant pathogenesis*, Springer, Berlin, 167 p.

Chapitre 14

LE TRAVAIL DU SOL

A. Berrada* et M. Gandah

Institut national de recherche agronomique de Niamey, Niger

* Adresse actuelle : Station expérimentale de l'université d'État du Colorado,
États-Unis

Sommaire

1. Caractéristiques du profil cultural

- 1.1. Définition
- 1.2. Éléments constitutifs du profil cultural

2. Contraintes agronomiques liées au travail du sol

- 2.1. Climat
- 2.2. Caractéristiques du terrain

3. Réalisation du travail de sol : choix des outils et dates d'intervention

- 3.1. Travaux primaires
- 3.2. Travaux superficiels du sol
- 3.3. Combinaison d'outils

4. Méthodes conventionnelles de travail du sol et tendances futures

- 4.1. Méthodes conventionnelles
- 4.2. Tendances futures

5. Conclusion

Bibliographie

LE TRAVAIL DU SOL

Les objectifs assignés au travail du sol peuvent être multiples :

- amélioration de la condition physique du sol, en détruisant les semelles de labour et autres obstacles à l’infiltration de l’eau et la prolifération des racines ;
- contrôle des mauvaises herbes, des insectes et maladies ;
- incorporation des engrais, herbicides et résidus de récolte ;
- préparation du lit de semences ;
- conservation de l’eau et du sol.

Il est souvent nécessaire de recourir à plusieurs opérations de travail du sol pour aboutir au résultat recherché. L’agriculteur peut choisir parmi un grand nombre d’outils aratoires pour effectuer ces opérations. Le choix des outils, des dates d’opération et de leur séquence dépend de plusieurs facteurs, tels que les conditions climatiques, l’état du profil cultural et le système de production.

Il n’y a pas de programme de travail de sol “passe-partout”. Chaque programme doit être adapté aux conditions spécifiques imposées par le milieu physique et socio-économique pour lequel ce programme est conçu. Néanmoins, la tendance générale, depuis quelques années, est à la réduction du nombre d’opérations aratoires, et au recours de moins en moins fréquent au labour profond, pour réduire les risques d’érosion et les pertes d’eau par évaporation.

1. CARACTÉRISTIQUES DU PROFIL CULTURAL

1.1. Définition

Le **profil cultural** a été défini par Hénin et al. (1969) comme étant “l’ensemble constitué par la succession des couches de terre, individualisées par l’intervention des instruments de culture, les racines de végétaux et les facteurs naturels réagissant à ces actions”.

La description du profil cultural permet de dégager les principales caractéristiques des diverses couches de terre qui constituent le profil cultural et la façon dont elles sont exploitées par les racines. Hénin et al. (1969) ont décrit en détail les techniques de préparation de tranchées et d’observation du profil cultural. Nous n’y reviendrons pas dans ce chapitre.

L’examen détaillé du profil cultural permet de tirer beaucoup de renseignements utiles sur son état et sur celui de la culture en place. Cependant, il est souvent né-

cessaire de compléter ou de confirmer ces renseignements par des analyses au laboratoire. Celles-ci peuvent porter sur des propriétés physiques, comme la composition granulométrique du sol, sa densité apparente, ou sa stabilité structurale, ou sur des propriétés chimiques (pH, CEC, etc.). Les méthodes de détermination des propriétés physiques et chimiques des sols sont décrites en détail dans de nombreux ouvrages dont celui de Bonneau et Souchier (1994). La biodynamique du sol a été traitée dans le chapitre 5 de ce manuel.

En plus des résultats des analyses au laboratoire, il est utile de connaître l'histoire parcellaire sur au moins les deux à trois dernières années pour pouvoir établir des relations entre l'état du profil cultural et les techniques culturales qu'il a subies.

1.2. Éléments constitutifs du profil cultural

Dans ce qui suit, nous allons passer en revue les éléments essentiels dont il faudra tenir compte pour faire un diagnostic aussi complet que possible de l'état du profil cultural.

1.2.1. Épaisseur des couches de terre

Il convient de mesurer l'épaisseur approximative des couches de terre qui constituent le profil cultural. La distinction entre ces couches se fait sur la base du changement de texture et structure de sol, sa couleur, la profondeur de travail du sol, etc.

1.2.2. Texture du sol

Le sol est constitué d'éléments grossiers (cailloux, concrétions, gravier) et de terre fine (particules < 2 mm). Cette dernière est composée de sables (0,02-2 mm), limons (0,002-0,02 mm) et argiles (< 0,002 mm). La proportion exacte de chacune de ces composantes est déterminée au laboratoire. Toutefois, il existe des méthodes simples d'appréciation de la texture du sol au champ. Une personne expérimentée peut parvenir à une estimation tactile (pétrissage entre les doigts) assez précise de la texture du sol (Baize, 1988). Ainsi, on dira qu'un sol ou qu'une couche de sol a une texture très fine (argileuse), fine (argilo-limoneuse, argilo-sableuse), moyenne (limoneuse, sablo-argileuse), ou grossière (sableuse).

La composition granulométrique du sol, et surtout sa fraction argileuse ont une grande influence sur ses propriétés physiques (infiltration et capacité de rétention de l'eau, cohésion, plasticité) et chimiques (capacité d'échange cationique). L'argile elle-même présente plus ou moins intensément certaines de ces propriétés selon sa nature minéralogique.

1.2.3. Structure du sol

Elle traduit la manière dont les constituants élémentaires (sables, limons, argiles) et complexes (agglomérats, éléments structuraux) du sol sont disposés les uns par rapport aux autres (Monnier, 1973). La structure du sol est le résultat d'interactions multiples entre ces constituants, d'une part, et un ensemble de facteurs liés au climat, à l'activité de la faune et des racines, et aux techniques culturales, d'autre part.

Au cours de l'observation du profil cultural, il convient de noter la taille (grossiers, fins, très fins) des éléments structuraux, leur forme, cohésion et agencement des uns par rapport aux autres. Ces éléments de diagnostic devront être complétés par

des analyses au laboratoire de la stabilité structurale du sol, de sa porosité, et d'autres propriétés physiques (exemple : limites d'Atterberg) qui permettront d'évaluer de manière objective l'état du profil cultural.

On distingue généralement trois grands types de structure de sol :

- **Structure particulière** : il n'y a pas de cohésion entre les éléments constitutifs du sol (exemple : sables).
- **Structure continue** : type ciment, grès, ou poudingue.
- **Structure fragmentaire** : les éléments fragmentaires sont constitués de particules grossières englobées par un ciment argileux. Les ensembles ainsi constitués se détachent aisément les uns des autres. Ils peuvent avoir plusieurs formes : arrondie (structure grenue), angulaire (structure polyédrique, cubique, lamellaire, prismatique), ou intermédiaire (structure grumeleuse).

La cohésion entre les éléments structuraux peut être appréciée par la force nécessaire pour en provoquer la rupture. Elle peut varier selon l'état d'humidité du sol (Hénin, 1969). La stabilité structurale est étroitement liée à la quantité et forme de la matière organique présente dans le sol, et à la composition de son complexe absorbant. Ainsi, par exemple, les sols pauvres en matières organiques et les sols dont le complexe absorbant est riche en sodium sont généralement peu stables.

Le volume de sol qui n'est pas occupé par la matière solide représente la porosité totale du sol. Les pores les plus gros (macropores) permettent la circulation de l'eau et de l'air, alors que les pores plus fins (micropores) permettent le stockage de l'eau. Les fissures résultant des phénomènes de dessiccation et d'humectation, ne sont pas incluses dans la définition de la porosité totale (Baize, 1988).

1.2.4. Matières organiques

Elles comprennent les matières organiques libres (racines mortes, résidus de récolte, résidus animaux, amendements organiques enfouis par le travail du sol, etc.), et les matières organiques évoluées liées à la fraction minérale du sol. Ce sont les matières organiques libres qui sont les plus faciles à observer sur le terrain. Il convient de noter la présence d'amas de matières organiques, leur localisation dans le profil cultural, leur couleur, odeur et état de décomposition.

1.2.5. Faune

Elle est constituée de plusieurs espèces, dont certaines ont une action favorable sur le profil cultural (vers de terre), alors que d'autres sont nuisibles aux cultures (vers blancs, taupins). Par exemple, les vers de terre créent des galeries qui permettent une bonne circulation de l'eau. Ils assurent également le mélange de la matière organique avec le sol. Les termites que l'on trouve en abondance dans les régions tropicales, remontent la terre fine des couches profondes en surface, ce qui entraîne des effets notables sur les propriétés physiques et chimiques du sol (Lee et Wood, 1971).

1.2.6. Racines

L'observation des racines constitue un élément très important du diagnostic du profil cultural. Parmi les observations à faire, il faut noter la forme des racines, leur répartition dans le profil cultural, et leur état de développement ainsi que leur état sanitaire. Il faut également noter les obstacles à la pénétration et au développement normal des racines, et la réaction (déformations, courbures, déviations) de celles-ci à ces obstacles. En plus de la méthode d'observation des racines dans le sol en

place, il existe des méthodes quantitatives de mesure du poids de racines, de leur longueur, et de leur densité (nombre de racines par unité de volume). Une méthode assez récente d'évaluation et de suivi du système racinaire, consiste à placer des tubes en plexiglass à proximité des racines et à y introduire des lentilles pour observer et photographier les racines (Bohm, 1979).

Les systèmes racinaires les plus fréquents chez les plantes cultivées sont le système pivotant et le système fasciculé. Le **système pivotant** (exemple : betterave à sucre et luzerne) est constitué par une racine principale d'où partent des racines secondaires de plus faible diamètre qui s'étendent latéralement et se raméfient de plus en plus (Hénin et al., 1969). Le **système fasciculé**, par exemple chez les graminées, est caractérisé par un grand nombre de racines de faible diamètre.

Les racines jouent le rôle d'ancrage, d'alimentation du végétal, et d'organe de réserve. L'absorption de l'eau et des éléments nutritifs se fait essentiellement par les jeunes racines grâce à leurs poils absorbants. Ces poils ont un faible diamètre (de l'ordre de 1/100 mm) et s'insèrent facilement dans les petits pores de sol.

Dans un sol meuble et homogène, les racines se développent normalement. Mais quand elles rencontrent des obstacles sur leur trajet, elles réagissent de plusieurs manières, selon la nature et la sévérité de l'obstacle. Ainsi, il peut y avoir arrêt ou réduction de la croissance des racines, courbures, déviations, changement de section, ou absence de ramification. Les changements brusques de compacité du sol, par exemple, peuvent provoquer des malformations et une mauvaise répartition du système racinaire dans le profil cultural. Certaines déformations des racines peuvent être dues à des maladies ou parasites comme les nématodes qui provoquent des protubérances.

Les obstacles à la croissance et au développement des racines au niveau du profil cultural peuvent être mécaniques ou chimiques. Quelques exemples d'obstacles mécaniques sont : les graviers, cailloux, zones indurées, couches compactes, zones lissées, cavités, fissures, couches de matières organiques grossières, et nappe d'eau. Les obstacles de nature chimique sont par exemple le manque d'oxygène (milieu asphyxiant), ou la présence de certaines substances (Al, Mn) en quantités toxiques.

2. CONTRAINTES AGRONOMIQUES LIÉES AU TRAVAIL DU SOL

Certains obstacles (exemple : semelles de labour, compaction) à la pénétration des racines et l'infiltration de l'eau peuvent être dus à un travail de sol effectué dans de mauvaises conditions (exemple : sol trop humide), ou avec des outils peu ou non adaptés à ces conditions. Ainsi, le choix des outils et des dates de travail de sol doit tenir compte de plusieurs contraintes. On peut citer parmi ces contraintes : l'état du profil cultural, le climat, le système de production, les conditions socio-économiques, la politique gouvernementale (incitation à l'utilisation de tel ou tel outil de travail du sol) et la tradition. Dans ce chapitre, nous nous intéresserons uniquement aux contraintes agronomiques liées au climat, à l'état du profil cultural et au système de culture.

2.1. Climat

Les facteurs climatiques qui ont une influence majeure sur le travail du sol sont la pluie, la température, l'ensoleillement et le vent (Unger, 1984).

2.1.1. Pluie

Les agriculteurs se trouvent souvent affrontés à des situations d'excès ou de déficit hydrique, selon la zone climatique (aride, semi-aride, tempérée) dans laquelle ils se trouvent et l'époque de l'année. Dans les régions à faible pluviométrie, un des objectifs majeurs des techniques culturales doit être la conservation de l'eau et son utilisation efficiente par les plantes cultivées. Pour cela, plusieurs mesures peuvent être prises :

- augmentation de l'infiltration de l'eau dans le sol ;
- réduction des pertes d'eau par évaporation, en maintenant par exemple une couche de résidus végétaux sur la surface du sol ;
- réduction des pertes d'eau par ruissellement, en favorisant l'infiltration de l'eau dans le sol (destruction de la croûte de battance) et par le biais de techniques de défense et de restauration des sols (terrasses) ;
- élimination des mauvaises herbes ;
- choix judicieux des cultures, variétés (exemple : variétés à cycle court), dates et densités de semis.

Dans les régions ou époques de l'année à forte pluviosité, plusieurs phénomènes peuvent se produire selon la durée et l'intensité des pluies, et la nature du terrain (pente, type de sol). Ainsi, si le sol est peu perméable, il peut y avoir stagnation d'eau et ruissellement, ce qui entraînera le retard des opérations culturales et l'érosion du sol. L'excès d'eau peut également entraîner la dégradation de la structure du sol (battance, prise en masse), ce qui accélérera l'érosion. Dans ces conditions, le drainage sera nécessaire pour évacuer l'excès d'eau, et permettre les opérations de travail de sol. La protection de la surface du sol par une couche de paille ou de végétation cultivée réduira les risques de formation de croûte de battance et donc de ruissellement, et favorisera l'infiltration de l'eau dans le sol (Damagnez, 1973).

2.1.2. Température et ensoleillement

La forte insolation à certaines époques de l'année dans les régions arides et semi-arides impose au sol nu un régime de température élevé, ce qui accroît l'évaporation de l'eau. De même, les températures élevées entraînent une dégradation rapide de la matière organique, ce qui est peu favorable au maintien d'une bonne structure du sol. Par conséquent, les agriculteurs de ces régions auront intérêt à maintenir une couche de résidus végétaux sur la surface du sol. Ces résidus agiront sur la température du sol en reflétant une partie de la radiation solaire (effet "mulch"), et assureront une protection contre l'érosion hydrique et éolienne. En saison chaude, la température du sol à proximité du mulch sera légèrement inférieure à celle de la température ambiante. On peut s'attendre à un effet inverse pendant la saison froide, ce qui permettra par exemple d'avancer la date de semis de certaines cultures. L'effet des résidus végétaux sur la température du sol et l'évaporation de l'eau peut varier selon la nature de ces résidus, leur quantité et leur pourcentage de couverture du sol, leur couleur, et leur âge (Van Doren et Allmaras, 1978).

2.1.3. Vent

Les vents forts peuvent accélérer l'évaporation de l'eau, l'érosion du sol et entraîner des dégâts sur les jeunes plantules (exemple : vents de sable). Certaines tech-

niques de travail du sol permettent d'atténuer les effets du vent sur le sol et la culture, alors que d'autres techniques les accentuent. Ainsi, par exemple, le travail excessif du sol accélère les risques d'érosion éolienne et hydrique en créant des particules fines qui peuvent être emportées facilement par le vent ou transportées par l'eau. Par contre le travail minimal du sol permet de maintenir les résidus de récolte sur le sol, et donc de réduire les risques d'érosion. Une autre technique consiste à faire des billons perpendiculaires à la direction prédominante du vent, et à semer dans les sillons ou sur les flancs des billons, ce qui permet de protéger les jeunes plantules contre les vents forts.

2.2. Caractéristiques du terrain

Les caractéristiques de terrain qui ont une influence sur le travail du sol sont la pente, la profondeur du sol et l'état du profil cultural. La variabilité spatiale dans certaines de ces caractéristiques, ainsi que la forme et les dimensions du champ à cultiver peuvent également influencer sur le choix des techniques de travail du sol et sur le résultat de ce travail.

2.2.1. Pente

Plus la pente du terrain est élevée, plus les risques d'érosion sont importants, et plus le choix des techniques de travail du sol devient limité. Dans les terrains accidentés, il est nécessaire de faire des aménagements anti-érosifs (exemple : terrasses) avant de pouvoir les cultiver. Si la pente est moins importante, certaines techniques telles que le travail du sol selon les courbes de niveau, l'alternance de bandes cultivées et de bandes enherbées permettent une exploitation rationnelle du terrain tout en minimisant les risques d'érosion.

2.2.2. Profondeur du sol

La profondeur de travail du sol est limitée par les facteurs tels que l'outil de travail, la puissance de traction, mais aussi par la profondeur de sol. En sol peu profond, la multiplication des opérations de travail du sol augmente les risques d'érosion.

2.2.3. État du profil cultural

La présence de cailloux peut entraîner l'usure des outils de travail du sol, et diminuer la vitesse et la profondeur de travail. Le comportement du sol vis-à-vis de l'action des engins et outils mécaniques est étroitement lié à sa texture et à son humidité. Les sols légers sont relativement faciles à travailler, ce qui n'est pas le cas pour les sols lourds (argileux). Ces derniers deviennent très durs quand ils sont secs, et collent aux outils à l'état humide. Hénin et al. (1969) ont défini trois zones de comportement du sol selon son humidité (figure 14.1). Il apparaît donc que la gamme d'humidité optimale pour la préparation du lit de semences est située autour de l'intersection entre les courbes d'humidité et d'adhérence du sol.

Après une pluie, il faut attendre que le sol soit suffisamment ressuyé avant de pouvoir circuler dans le terrain sans causer de dégâts. Le temps de ressuyage dépend en particulier de la quantité d'eau tombée et de la perméabilité du sol. En général, le temps de ressuyage est rapide pour les sols sableux, et plus long pour les sols à texture fine. Dans les vertisols, la présence de fentes de retrait permet d'accroître l'infiltration de l'eau et/ou son évaporation.

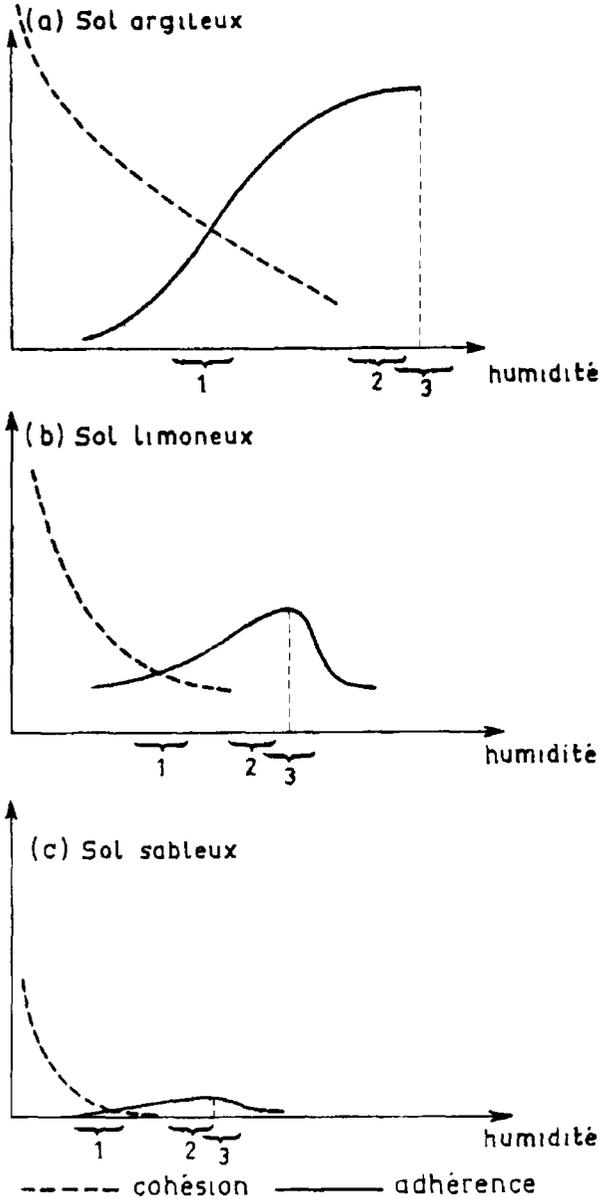


Figure 14.1. Cohésion et adhérence du sol en fonction de son humidité. 1 : zone de rupture ; fabrication de terre fine 2 . zone de labour moulé. 3 : zone de gâchage possible

Source . Hénin et al (1969), *Le Profil cultural*, Masson, Paris, p 175.

Le passage des engins de travail du sol, d'entretien des cultures, et de récolte entraînent la compaction du sol, surtout en conditions humides (figure 14.2). La stagnation de l'eau dans les zones compactées peut favoriser le développement de certaines maladies cryptogamiques. De même, les zones compactées peuvent constituer un obstacle à la pénétration des racines. La susceptibilité des sols à la compaction varie selon leur texture. Par exemple, les sols sableux sont moins susceptibles à la compaction que les sols sablo-limoneux et sablo-argileux.



Figure 14.2. Compaction du sol par les roues du tracteur.

2.2.4. Système de culture

Le système d'assolement et de rotation pratiqué par l'agriculteur lui impose certaines contraintes quant au choix des outils et des dates de préparation de sol. Parmi ces contraintes on peut citer :

- le *temps disponible pour la préparation de sol*. Ce temps est délimité par la récolte de la culture précédente et la date optimale de semis de la culture suivante ;
 - l'*état du profil cultural après la récolte* de la culture précédente ;
 - l'*état de profil cultural qui convienne le mieux à la culture ou cultures suivantes*.
- Ainsi, les plantes qui fructifient dans le sol (exemple : betterave, pomme de terre et arachide) nécessitent un sol bien travaillé dans la zone racinaire pour donner un bon rendement. A leur tour, ces cultures laissent un sol assez meuble qui nécessite peu d'interventions pour la préparation du lit de semences pour la culture suivante. Certaines cultures dites nettoyantes (exemple : coton) laissent derrière elles un sol assez propre, ce qui réduit également le nombre d'opérations de travail de sol.

Les systèmes de cultures faisant intervenir la jachère permettent suffisamment de temps pour la préparation de sol. Elles permettent également au sol de reconstituer une partie de ses réserves en eau et éléments nutritifs. Ceci est à nuancer en fonction du type de jachère (exemple : jachère travaillée ou jachère pâturée) et de sa durée. Dans beaucoup de pays, la pression démographique fait que les superficies en jachère sont de plus en plus réduites, ce qui contribue à la longue à la dégradation du sol.

3. RÉALISATION DU TRAVAIL DE SOL : CHOIX DES OUTILS ET DATES D'INTERVENTION

Depuis l'invention de la charrue par l'empereur Chin Noug de Chine en l'an 3200 av. J.-C. (Lacombe, 1973), un grand nombre d'outils de travail de sol ont été déve-

loppés. Le choix des outils les mieux adaptés à une opération donnée dépend de l'objectif recherché, de l'état du profil cultural, ainsi que des conditions socio-économiques prédominantes. Souvent, plusieurs opérations de travail de sol sont nécessaires pour aboutir à l'état souhaité de profil cultural. Le temps disponible pour effectuer ces opérations est limité par le système de culture (dates de récolte et de semis), et les conditions climatiques, en particulier.

Dans beaucoup de pays africains, la majorité des terres sont travaillées à l'aide d'outils manuels ou à traction animale (figure 14.3). L'utilisation des outils à traction mécanique est généralement limitée aux grandes exploitations, mais prend de plus en plus en d'ampleur.



Figure 14.3. Préparation de billons dans un champ de mil en zone sahélienne.

Jones et al. (1990) ont groupé les outils de travail de sol selon leur fonction primaire :

1. **retournement du sol** : charrues à disques ou à socs ;
2. **ameublissement du sol** : ce sont essentiellement les outils à dents comme *chisel*, *ripper* (sous-soleuse) et "*paratiller*" ;
3. **pulvérisation du sol** : houes rotatives (*rotavator*), *cover-crop*, *offset disque*, cultivateurs ;
4. **finition** (préparation du lit de semences) : herses, rouleaux ;
5. **billonnage** : butteuses ;
6. **entretien** (cultures en lignes) : cultivateurs.

Pour plus de clarté, nous distinguerons deux grandes catégories d'opérations de travail de sol : (1) les opérations primaires (sous-solage, labour) qui consistent à travailler le sol sur une profondeur importante, et (2) les opérations de travail plus ou moins superficiel du sol qui permettent de compléter l'action des outils de travaux primaires et/ou de préparer le lit de semences. Nous donnerons des exemples d'outils couramment utilisés pour chaque opération, et les conditions sous lesquelles leur utilisation serait ou non recommandée.

3.1. Travaux primaires

3.1.1. Sous-solage

Le sous-solage a pour but de désorganiser les couches imperméables ou rocheuses profondes pour assurer un meilleur drainage et une meilleure aération, sans modifier la structure de la zone arable (*Mémento de L'Agronome*, 1980). La profondeur de sous-solage est généralement 50 à 60 cm, ce qui demande un effort de traction considérable. Le sous-solage doit être effectué de préférence en sol sec pour permettre un bon éclatement de la couche travaillée.

3.1.2. Labour

Le labour est traditionnellement effectué par les charrues à disques ou à socs. Celles-ci se distinguent des autres appareils à disques ou à dents, du fait qu'elles permettent le retournement complet de la terre. Leur action permet également de détruire les mauvaises herbes et d'enfouir les résidus de récolte, le fumier et les engrais (figure 14.4). La profondeur de travail des charrues peut atteindre 35 cm.



Figure 14.4. Labour avec la charrue à socs.

• **Charrues à socs.** Les agriculteurs disposent d'une gamme complète de corps de labour (contre-soc-versoir) de forme et de dimensions variées. Les versoirs cylindriques courts sont recommandés pour les labours d'hiver ou d'automne émiettés en terres sèches avant semis (Chaussade, 1973). Les versoirs cylindriques longs sont utilisés pour effectuer des labours profonds (≥ 30 cm), alors que les versoirs hélicoïdaux sont utilisés pour des labours légers ou moyens (≤ 25 cm). Ces derniers donnent des labours moulés et sont recommandés lorsqu'on veut éviter de trop briser la bande de terre. Les versoirs universels sont intermédiaires entre les deux formes précédentes. Ils conviennent bien aux terres franches pour des labours moyens.

- **Charrues à disques.** Elles sont mieux adaptées que les charrues à socs aux (1) sols durs et secs, (2) sols collants, (3) sols meubles et (4) aux sols abrasifs qui contiennent par exemple des cailloux (Bolton and Booster, 1977). L'action de découpage et de soulèvement du sol par le disque permet de bien mélanger les résidus de cultures au sol.

Il y a deux grands types de charrues à disques : les charrues standard et les charrues à disque vertical. Ces dernières sont utilisées pour les labours moins profonds (5-20 cm). Elles ont tendance à retourner moins bien le sol que les charrues standard. Elles sont aussi plus difficiles à régler.

En retournant la terre, le labour expose les couches profondes à l'action des agents atmosphériques, ce qui permet entre autres un dessèchement rapide du sol, et son réchauffement. C'est un des objectifs des labours de printemps en climat méditerranéen, et dans les sols peu perméables ou l'excès d'eau peut retarder le semis. Cependant, si le labour est effectué en sol trop humide, il y aura formation de mottes qui deviennent très dures à l'état sec. La destruction de ces mottes nécessitera de nombreuses façons superficielles qui entraîneront une compaction préjudiciable de la partie inférieure de la couche labourée (Hénin et al. 1969).

3.1.3. Pseudo-labour

Dans les régions semi-arides, où un des soucis majeurs est la conservation de l'eau, les outils à dents tels que le **chisel** sont parfois utilisés en remplacement des charrues. Les chisels peuvent avoir des dents de formes variées : droites, incurvés, plus ou moins souples, ou rigides. L'espacement standard entre les dents est de 30 cm. La profondeur de travail des chisels peut varier de 15 à 46 cm (Marshall, 1978). Deux passages croisés obliques sont souvent nécessaires pour atteindre la profondeur de travail optimale pour la croissance de certaines cultures. Le passage des dents du chisel entraîne le fendillement du sol et son éclatement. L'intensité de ces actions dépend de l'état du profil cultural avant le passage du chisel, de l'espacement entre les dents, de leur forme et dimensions, et de la vitesse de travail (Dalleine, 1973). C'est en sol sec que l'action d'éclatement du chisel est la plus importante. Si le sol est humide, le chisel peut créer de grosses mottes qui peuvent être remontées en surface et devenir très dures à l'état sec.

Des socs de forme variée peuvent être attachés aux dents des chisels selon l'objectif recherché. Par exemple, les socs pointus sont utilisés de préférence en sol dur et compacté. Les socs à pattes d'oie (de 15 à 50 cm de largeur) sont très efficaces dans la lutte contre les mauvaises herbes, à faible profondeur. Elles permettent de découper les racines de mauvaises herbes sous la surface de sol.

Les chisels peuvent être employés juste avant le semis, en terres sablonneuses ou limoneuses par exemple. En terre argileuse, il est préférable de faire le labour, avec ou sans retournement de sol, quelques mois avant le semis pour permettre au sol de s'affiner sous l'action de dessèchement et de gel (s'il y en a). Dans les sols qui ont été labourés auparavant, les chisels permettent de briser les semelles de labours, et donc de favoriser la circulation de l'eau et la pénétration des racines.

Parmi les avantages attribués aux chisels par rapport aux charrues, on peut citer :

- Du fait que les chisels ne retournent pas le sol (ou très peu), une grande partie des résidus de récolte reste en surface (figure 14.5), ce qui contribue à la lutte contre l'érosion éolienne et hydrique.



Figure 14.5. Préparation du sol avec le chisel.

- La puissance de traction des chisels est environ la moitié de celle de la charrue à socs pour des profondeurs de travail similaires (18 à 25 cm). Par conséquent, des chisels plus larges peuvent être opérés avec le même tracteur, et donc plus de terre peut être travaillée pendant le même temps (Marshall, 1978). Toutefois, la force de traction des chisels augmente considérablement si la profondeur de travail est importante (> 25 cm).
- Les chisels sont mieux adaptés que les charrues au travail en sol sec. Ils y ont une meilleure pénétration. De même, l'équilibre entre mottes et terres fines y est plus riche en particules fines, ce qui permet d'éviter les sols trop creux (Dalleine, 1973).
- Les chisels sont aussi mieux adaptés que les charrues au travail du sol en terres caillouteuses, sur les pentes et dans les parcelles de forme irrégulière.

L'inconvénient majeur de l'usage généralisé du chisel est le salissement plus important des terres par les mauvaises herbes. Un autre inconvénient est le maintien d'une grande proportion des débris végétaux en surface ce qui peut nuire au passage du semoir, et favoriser le développement de maladies et parasites. Enfin, il est nécessaire de disposer d'un gros tracteur, d'une puissance nominale de 10 à 15 chevaux par dent, pour faire un travail convenable avec les chisels. La puissance nécessaire est d'autant plus élevée que le sol est sec et argileux, et que la vitesse requise pour un bon émiettement est importante (Dalleine, 1973).

3.2. Travaux superficiels du sol

Les opérations de travail superficiel du sol se distinguent des labours en ce que les outils utilisés ne réalisent pas de retournement de sol, mais provoquent essentiellement sa division et son brassage (Hénin et al. 1969).

3.2.1. Outils à disques

Ils se distinguent de la charrue à disques par l'assemblage des trains de disques sur un axe unique et par le fait que les disques travaillent perpendiculairement au sol (*Mémento de l'Agronome*, 1980). Les **déchaumeuses** comprennent un seul train de disques reposant sur une roue de guéret qui permet de régler la profondeur de travail.

Les **pulvérisseurs** sont composés de plusieurs trains de disques assemblés en X (pulvérisseurs-tandem) ou en V (cover-crop ou offset disque) (figure 14.6). L'angle d'attaque des pulvérisseurs à disques varie selon les réglages souhaités, pour en accroître la pénétration dans le sol, ou pour modifier l'émiettement obtenu. La pénétration de ces outils peut être gênée par la présence de masses importantes de débris végétaux sur lesquels les disques ont tendance à rouler. De même, leur pénétration est limitée par une dessiccation et une compaction excessive de la surface du sol (Dalleine, 1973).

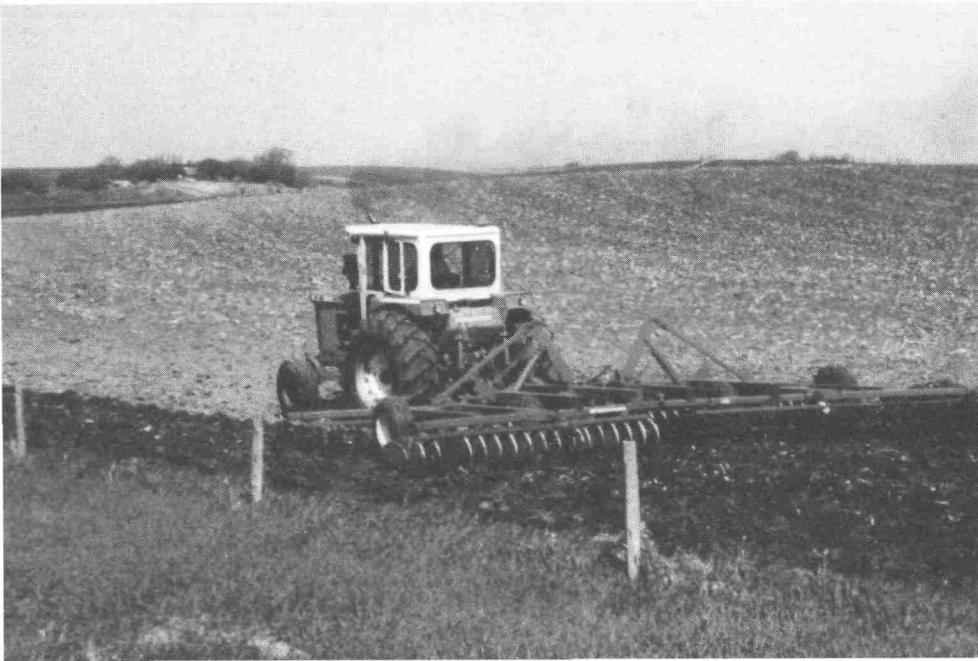


Figure 14.6. Travail du sol avec un pulvériseur tandem.

Les pulvérisseurs à disques sont probablement les outils à traction mécanique les plus utilisés en Afrique. Parfois, ce sont les seuls outils utilisés pour le travail du sol et la préparation du lit de semences. Leur utilisation abusive entraîne l'affinement excessif du sol, ce qui accroît les risques d'érosion, surtout en sols battants. En conditions humides, les outils à disques entraînent le tassement du sol en dessous d'eux, et la création de zones lissées. Ce tassement est d'autant plus important que le nombre de passages de ces outils est élevé. Un autre danger de l'utilisation abusive des appareils à disques est leur action de dissémination des mauvaises herbes à rhizomes (Hénin et al. 1969).

3.2.2. Outils à dents

Ils peuvent être utilisés pour le pseudo-labour, la préparation du lit de semences, ou l'entretien des cultures en place. Nous distinguerons deux groupes : les cultivateurs et les herses.

- Les **cultivateurs** ressemblent aux chisels, mais ils sont plus légers. Ils peuvent avoir des dents souples, semi-rigides ou rigides portant les pièces travaillantes de diverses formes et dimensions selon l'objectif recherché, et l'état du profil cultural. Ainsi, les cultivateurs équipés de socs à pattes d'oie sont utilisés pour le contrôle des mauvaises herbes, l'affinement du sol et la préparation du lit de semences (figure 14.7). Cependant, il est nécessaire de compléter l'action des cultivateurs par celles d'autres outils comme les herse pour réaliser un lit de semences compact.

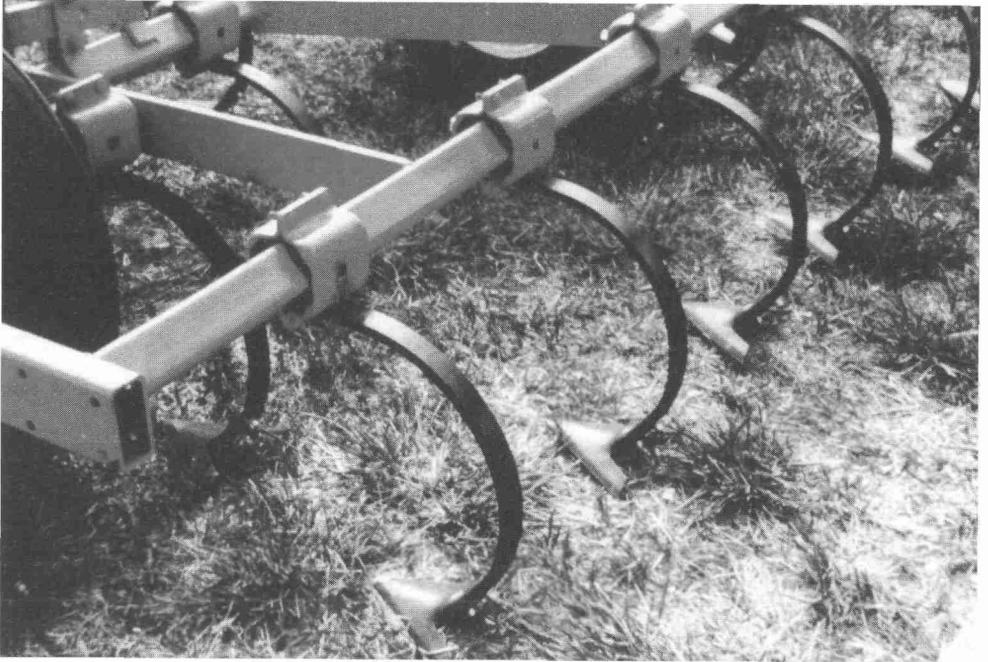


Figure 14.7. Cultivateur à dents munies de socs à pattes d'oie.

- Les **herse**s possèdent des dents moins longues que celles des cultivateurs. Les herse à dents rigides (herse-peignes) sont munies de pointes à section carrée de 10 à 20 mm de côté et de 15 à 28 cm de longueur utile (*Mémento de l'Agronome*, 1980). Elles sont utilisées pour égaliser la surface travaillée, briser les mottes, tuer les jeunes plantes de mauvaises herbes et compacter le lit de semence avant le semis (Bolton & Booster, 1977). La herse canadienne est équipée de dents semi-rigides munies d'un soc analogue à celui d'un cultivateur. Il existe aussi des herse dont les dents sont groupées sous forme d'étoiles montées sur un axe leur permettant de tourner (figure 14.8). Ces herse sont utilisées pour briser les croûtes de battance et les mottes dures (Hénin et al. 1969).

Les dents montées sur des cages roulantes offrent l'avantage de réaliser en une seule opération l'émiettement du sol et le tassement du lit de semences. Les **rouleaux** (exemple : *crosskills*) sont généralement des appareils lourds qui, grâce au tassement qu'ils produisent, permettent un bon contact entre le sol et les semences. Ce contact doit être d'autant plus intime que les semences sont petites ou entourées d'une enveloppe cellulosique qui s'humecte difficilement (Hénin et al. 1969). Mais si le tassement est excessif ou effectué dans des conditions humides, il peut gêner le développement des jeunes plantules.

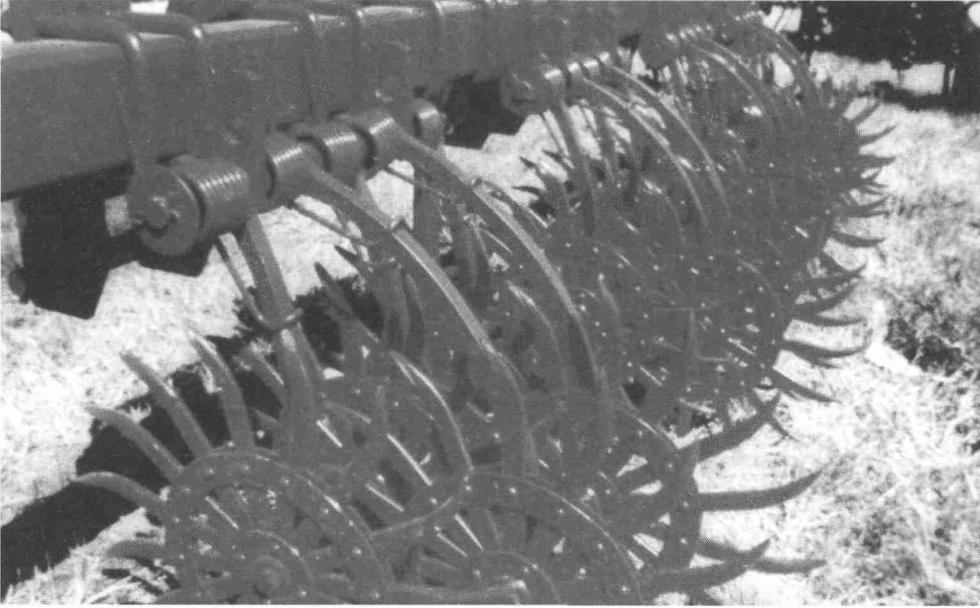


Figure 14.8. Herse à dents groupées en forme d'étoiles.

3.2.3. Outils rotatifs

“Ils sont constitués par un tambour muni de pièces travaillantes tournant autour d'un axe horizontal perpendiculaire à l'axe de déplacement” (*Mémento de l'Agro-nome*, 1980). Les outils rotatifs puisent leur énergie à partir du tracteur. Ils peuvent être utilisés pour ameublir le sol, détruire la végétation superficielle, ou pour enfouir les résidus de récolte et les engrais verts. Parmi les outils rotatifs on peut distinguer les **houes rotatives** qui sont munies de lames en forme de L (figure 14.9), et les **fraises** qui sont munies de griffes à ressorts. Leur action énergique permet de diviser les mottes les plus dures, que d'autres outils ont du mal à briser. Il y a cependant le danger d'une pulvérisation excessive du sol, et aussi les risques de formation de semelles de pseudo-labour en conditions humides (Hénin et al. 1969).

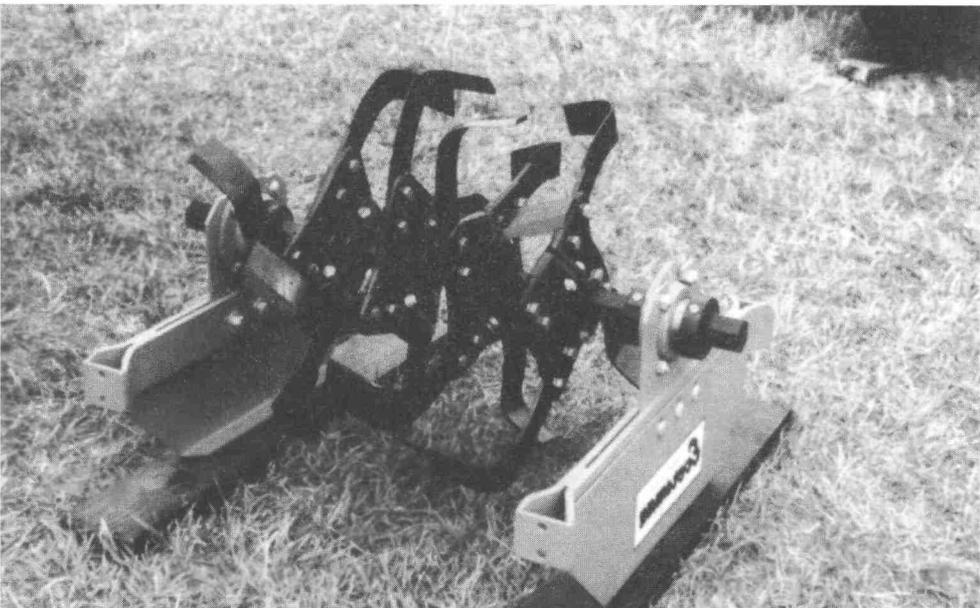


Figure 14.9. Houe rotative munie de lames en forme de L.

3.2.4. Le "sweep"

Il s'agit d'un outil qui possède une ou plusieurs lames en forme de V montées sur un support rigide (figure 14.10). La largeur de ces lames varie typiquement de 1,5 à 2,4 m. Ces lames permettent de couper les racines des mauvaises herbes sous la surface du sol (5 à 10 cm de profondeur), et de laisser les résidus en surface puisqu'elles ne retournent pas le sol. Quand le sweep est en opération, ses lames doivent être bien plats, sinon la profondeur de travail ne sera pas homogène, et la force de traction sera élevée (Bolton and Booster, 1977). Le pourcentage élevé de résidus de récolte laissés sur la surface de sol après le passage du sweep permet de réduire les risques d'érosion hydrique et éolienne et les pertes d'eau par évaporation.

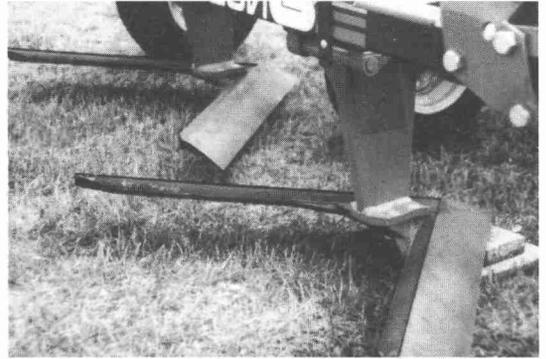


Figure 14.10. Sweep muni de lames en forme de V.

3.3. Combinaison d'outils

Dans les exploitations mécanisées, on assiste de plus en plus à l'utilisation de deux ou plusieurs outils de travail de sol en une seule opération. Ceci peut avoir comme avantages : (1) une meilleure utilisation de la puissance de traction, (2) la réalisation des travaux au moment opportun, (3) la réduction du nombre de passages du tracteur, et donc de la compaction du sol ; et (4) la réduction du coût de préparation du sol. Nous donnerons deux exemples de combinaisons d'outils de travail de sol : (1) la herse utilisée derrière le cultivateur, ou un pulvérisateur à disques, permet de compléter l'action de triage de la terre fine et des mottes, et d'égaliser la surface travaillée ; (2) la combinaison d'un semoir et d'une houe rotative permet en même temps de préparer le lit de semences et de semer.

4. MÉTHODES CONVENTIONNELLES ET TENDANCES FUTURES

4.1. Méthodes conventionnelles

Comme nous l'avons plus ou moins décrit auparavant, le schéma conventionnel de préparation du sol comprend plusieurs opérations :

- une opération primaire comme le labour pour enfouir les résidus de récolte, détruire les mauvaises herbes et les obstacles à la pénétration de l'eau et des racines ;
- des opérations secondaires pour briser les mottes créées par le labour, contrôler les mauvaises herbes et préparer un lit de semences à structure fine et compacte. Ces opérations peuvent être effectuées par un grand nombre d'outils tels que le cover-crop, les cultivateurs et la herse. Enfin, les rouleaux permettent de tasser le sol sur quelques centimètres, et d'affiner le sol s'ils sont équipés de dents, ce qui permet un bon contact sol-graine. Après le semis, les mauvaises herbes sont contrôlées par l'intermédiaire d'herbicides, ou par le sarclage.

Dans les régions arides et semi-arides, le labour avec retournement de sol est peu pratiqué. Par contre on a recours à des outils comme le cover-crop pour pulvériser le sol et détruire les mauvaises herbes. Les passages répétés de ces outils permettent également d'enfouir une grande partie des résidus de récolte, si ceux-ci n'ont pas déjà été broutés par les animaux, brûlés, ou enlevés du champ pour servir à des fins diverses.

Parmi les avantages attribués aux méthodes conventionnelles de préparation du sol, on peut citer :

- le contrôle efficace des mauvaises herbes,
- l'amélioration de l'infiltration de l'eau,
- l'augmentation de l'aération du sol,
- la préparation d'un lit de semences propre, bien affiné et compact,
- l'augmentation du taux de minéralisation de l'azote grâce à l'incorporation de la matière organique, et l'amélioration de l'aération du sol,
- la réduction de l'érosion éolienne et hydrique dans le cas où le sol n'est pas trop affiné (surface rugueuse).

Ces méthodes ont également plusieurs inconvénients (Jones et al., 1990) tels que :

- l'augmentation des risques d'érosion et de dégradation du sol à cause de (1) l'absence d'une couverture protectrice de résidus végétaux sur la surface du sol, et de (2) son affinement excessif ;
- l'augmentation des pertes d'eau par évaporation pour les mêmes raisons citées ci-dessus, plus les actions de retournement et d'ameublissement du sol par les outils conventionnels ;
- l'augmentation de la compaction du sol sous l'effet de passages répétés de tracteurs et d'outils de travail du sol ;
- les besoins élevés en traction et en énergie.

4.2. Tendances futures

Les données contenues dans le tableau 14.1 proviennent de stations de recherche situées dans une région semi-aride des USA, où le système de culture le plus pratiqué est la rotation : blé d'hiver-jachère. Ces données reflètent plus ou moins bien l'évolution des systèmes de travail de sol dans beaucoup d'autres régions du monde où la conservation de l'eau et des sols constitue un objectif prioritaire. Cette évolution est caractérisée par :

- l'élimination totale ou partielle du labour profond avec retournement du sol ;
- la réduction du nombre d'opérations de travail du sol ;
- l'utilisation d'outils qui permettent de contrôler les mauvaises herbes, tout en maintenant le maximum de résidus végétaux sur la surface du sol. Il s'agit par exemple de *sweeps*, *rod weeders*, *chisels* et cultivateurs équipés de socs à pattes d'oie ;
- le remplacement total ou partiel des opérations de travail de sol par les herbicides pour contrôler les mauvaises herbes.

Les systèmes de **travail minimal** du sol permettent de diminuer les risques d'érosion éolienne et hydrique, et les pertes d'eau par évaporation. En outre, les risques de compaction du sol sont réduits par rapport aux méthodes conventionnelles de travail du sol. Ces systèmes sont recommandés pour les régions où l'eau constitue un facteur limitant, pour les terrains en pente et pour les sols sensibles à l'érosion.

Un des inconvénients majeurs des systèmes de travail minimal du sol est relatif au

Tableau 14.1. Évolution des systèmes de travail du sol durant la période de jachère, dans la partie centrale des grandes plaines des USA.

Système de travail du sol	Période	Nb. d'opérations de travail du sol	% eau* stockée
Travail maximal • avec retournement du sol • sans retournement du sol	1916-30	7-10	19
	1931-45	5-7	24
Travail réduit • <i>sweep</i> et <i>rodweeder</i> • herbicides + <i>sweep</i> et <i>rod weeder</i>	1946-60	4-6	27
	1961-75	2-3	33
Pas de travail du sol (<i>no-till</i>)	1975-90	0-1	40

* Pourcentage d'eau de précipitations (pluie + neige) stockée dans le sol à la fin de 14 mois de jachère à Akron, Colorado.

Source : adapté de Greb et al. (1979).

contrôle des mauvaises herbes. En effet, en éliminant le labour et d'autres opérations de travail du sol, les agriculteurs doivent compter de plus en plus sur les herbicides pour contrôler les mauvaises herbes. Ce système de gestion du sol peut avoir plusieurs limitations : (1) la disponibilité et le coût des herbicides, (2) les dangers que représentent l'emploi des herbicides pour l'environnement et (3) la sélectivité des herbicides par rapport aux plantes cultivées et adventices. Ceci est particulièrement important en culture continue, où certaines plantes adventices ont un cycle de développement similaire à celui de la plante cultivée.

Un autre problème potentiel des systèmes de travail minimal du sol concerne la transmission de certaines maladies et parasites par les résidus de récolte laissés sur la surface du sol. Ces résidus peuvent également gêner l'opération de semis, mais ceci n'est plus un problème depuis le développement de semoirs capables de semer dans des champs entièrement couverts de résidus de récolte (figure 14.11).

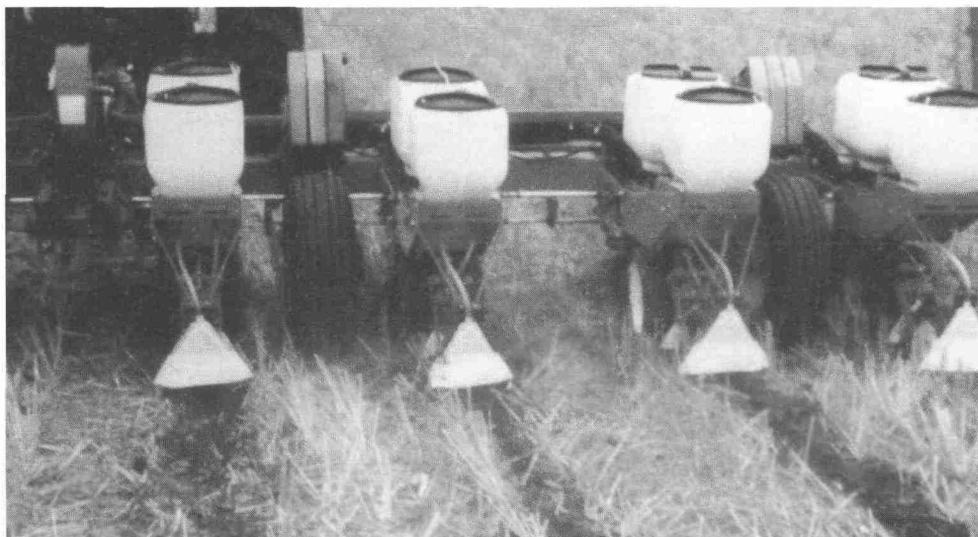


Figure 14.11. Semis dans un champ à précédent blé (système *no-till*).

Ces inconvénients expliquent l'adoption très lente du système de "no-till" où aucune opération de travail du sol n'est effectuée avant le semis. Le meilleur système est probablement celui qui combine un nombre réduit d'opérations de travail de sol avec l'utilisation rationnelle d'herbicides et d'autres moyens (exemple : rotations de cultures) pour lutter contre les mauvaises herbes.

Une autre méthode assez récente de préparation du sol dans les régions semi-arides est celle des **billons cloisonnés**. La distance entre les cloisons dépend de la pluviométrie, de la pente, et du type de sol. Elle varie généralement entre 1 et 2 m. L'eau des pluies retenue dans les sillons aura le temps de s'infiltrer dans le sol, au lieu d'être perdue par ruissellement. Ceci est particulièrement important pour les sols des régions où l'intensité des pluies dépasse souvent la vitesse d'infiltration de l'eau (Jones et al., 1990).

5. CONCLUSION

L'objectif à court terme du travail du sol est de créer un état de profil cultural favorable à la germination, à l'émergence et à la croissance des plantes cultivées. Un programme conséquent de gestion du sol ne doit pas se limiter à des objectifs à court terme. Il doit viser à long terme le maintien ou l'amélioration de la productivité du sol, ce qui implique en particulier le maintien d'un niveau satisfaisant de matière organique dans le sol et le contrôle efficace de l'érosion éolienne et hydrique. Les systèmes conventionnels qui font intervenir plusieurs outils et/ou opérations pour la préparation du sol peuvent entraîner, à la longue, la dégradation de la structure du sol et une baisse de sa productivité. Par contre, les méthodes de travail minimal du sol permettent de préserver la stabilité structurale du sol, de réduire les risques d'érosion, et de réaliser une économie substantielle de l'eau des pluies.

BIBLIOGRAPHIE

- Baize D. (1988), *Guide des analyses courantes en pédologie*, INRA, Paris.
- Bohm W. (1979), "Methods of studying root systems", *Ecological Studies* 33, Springer-Verlag, New York.
- Bolton F.E. and Booster D.E. (1977), "Tillage, moisture conservation and water use efficiency for dryland cereal production in winter rainfall regions", in *An international symposium on rainfed agriculture in semi-arid regions*, April 17-22 1977, University of California, Riverside, p. 552-588.
- Bonneau M., Souchier B. et al. (1994), *Pédologie*, tome 2 : *Constituants et propriétés du sol*, 2^e édition, Masson, Paris, 692 p.
- Greb B.W., Smika E.E., and Welch J.R. (1979), "Technology and wheat yields in the central Great Plains.", *Experiment Station Advances. J. Soil and Water Conserv.* 34 : 264-268.
- Hénin, S., Gras, R., et G. Monnier (1969), *Le Profil cultural*, Masson, Paris.
- Jones O.R., Allen R.P., and Unger P.W. (1990), "Tillage systems and equipment for dryland farming", in *Dryland Agriculture : Strategies for Sustainability*, R.P. Singh, J.F. Parr, and B.A. Stewart (eds.), *Advances in Soil Science*, Volume 13, Springer-Verlag, New York, p. 89-130.

- Lee K.E. and Wood T.G. (1971), *Termites and soils*, Academic Press, London & New York.
- Marshall F.F. (1978), *Farm machinery fundamentals*, American Publishing, Madison, États-Unis, p. 141-175.
- Mémento de l'Agronome* (1980), 3^e édition, Ministère de la Coopération, p. 442-451.
- Unger P.W. (1990), "Conservation tillage systems.", in *Dryland Agriculture : Strategies for Sustainability*, R.P. Singh, J.F. Parr, and B.A. Stewart (eds.), Advances in Soil Science, Volume 13, Springer-Verlag, New York, p. 27-66.
- Unger P.W. (1984), "Tillage systems for soil and water conservation", *FAO Soils Bulletin*, n° 54.
- Van Doren D.M., Jr., and Allmaras R.R. (1978), "Effect of residue management practices on the soil physical environment, microclimate, and plant growth", in *Crop residue management*, ASA Special Publication n° 31, Madison, États-Unis, p. 49-83.
- Les articles suivants ont été publiés dans le *Bulletin technique d'information*, numéro spécial 278 : Le travail du sol et ses conséquences en zone méditerranéenne, Ministère de l'Agriculture et du Développement rural, Paris :
- Chabert F. (1973), "Infiltration de l'eau et processus de dessèchement", p. 191-194.
- Chamayou H. (1973), "Relations entre la réserve en eau et le travail du sol", p. 185-190.
- Chaussade J. (1973), "Les charrues, travail du sol et corps de labour", p. 209-216.
- Dalleine E. (1973), "Choix des outils à dents et à disques pour le travail du sol sous climat méditerranéen", p. 217-226.
- Damagnez J. (1973), "Le climat méditerranéen et les travaux agricoles", p. 171-176.
- Lacombe R. (1973), "Évolution des façons culturales et des appareils correspondants", p. 205-208.
- Lucas A. (1973), "Les outils rotatifs commandés", p. 227-236.
- Monnier G. (1973), "Problèmes de physique du sol soulevés par l'introduction de nouvelles techniques culturales", p. 177-184.

Chapitre 15

IRRIGATION ET RESSOURCES EN EAU

Étienne Persoons

Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgique

Sommaire

1. Introduction

2. Origine des eaux d'irrigation

- 2.1. Eaux souterraines
- 2.2. Eaux de surface

3. Distribution de l'eau

- 3.1. Modes de distribution
- 3.2. Types de distribution

4. Régulation de la distribution

- 4.1. Régulation hydraulique
- 4.2. Régulation manométrique
- 4.3. Régulation dynamique

5. Économie en eau et énergie

6. Techniques particulières

- 6.1. Irrigation localisée
- 6.2. Pivots centraux
- 6.3. Rampe linéaire

7. Conclusion

Bibliographie

IRRIGATION ET RESSOURCES EN EAU

1. INTRODUCTION

L'irrigation consiste à suppléer le manque d'eau de pluie nécessaire à l'alimentation de la végétation.

Rappelons, dès l'abord, qu'il faut de l'ordre de 1 000 litres d'eau pour produire 1 kg de matière sèche. Si on admet qu'un hectare produit de l'ordre de 6 000 kg de matière sèche par cycle végétatif, il faut 6 000 000 litres d'eau, soit 6 000 m³ à l'hectare ou encore 600 mm d'eau pour alimenter la végétation lors d'un cycle, du moins si l'on souhaite aboutir à une production qualifiée d'agricole.

Dans les pays où la pluviosité est insuffisante ou mal répartie pendant l'année, la mobilisation de la ressource en eau permet de disposer d'eau d'irrigation, soit en collectant les eaux de pluie d'une grande surface pour irriguer une petite, soit en déplaçant géographiquement des eaux de pluie qui tombent sur des surfaces incultes – des montagnes – vers des endroits propices à la culture – des plaines.

Une attention particulière doit être apportée au renouvellement de la ressource afin de ne pas déséquilibrer le cycle naturel et de ne pas aboutir à des situations irréversibles. L'agronome est et doit rester le gardien de la nature. En tant qu'ingénieur du vivant, il doit *veiller à respecter les grands équilibres naturels et à sauvegarder le renouvellement des ressources qu'il utilise.*

Dans ce chapitre, nous comptons passer en revue les grands types de mobilisation et de distribution de l'eau tels que pratiqués en cultures irriguées. Nous désirons avant tout initier l'agronome à quelques principes de base qui devraient lui permettre de dialoguer en connaissance de cause avec ceux qui seront chargés du projet d'irrigation et de son exécution.

Il n'est pas aisé de traiter en une dizaine de pages du vaste dossier de l'irrigation. C'est pourquoi, ce chapitre doit être considéré comme une rapide introduction à l'irrigation et principalement en ce qui concerne la relation avec la ressource en eau. Ce document est forcément incomplet, nous invitons le lecteur à ne considérer les valeurs citées en toute première approximation et à l'étoffer à partir de documents spécialisés cités dans la bibliographie, ainsi que les documents édités par la FAO qui existent en plusieurs langues.

2. ORIGINE DES EAUX D'IRRIGATION

Les eaux susceptibles d'être utilisées en irrigation sont soit des eaux souterraines, soit des eaux de surface.

2.1. Eaux souterraines

Les eaux souterraines exploitables sont les eaux qui occupent les interstices restés libres entre les particules de sols ou les fissures dans les roches. Une nappe d'eau se crée dans le sol lorsque l'eau rencontre dans son parcours vertical une assise moins perméable. La vitesse de l'eau est ralentie. L'eau s'accumule dans ce qu'on appelle une **nappe** plus ou moins importante, compte tenu de l'importance relative de la perméabilité et de l'apport.

La quantité d'eau exploitable dépend de la porosité du milieu, généralement 5 à 10 % en volume, parfois plus pour des roches perméables telles des roches calcaires.

Les nappes souterraines ont deux origines comme nous le voyons ci-dessous.

2.1.1. Apport vertical

La partie d'eau de pluie infiltrée dans le sol sature la couche arable, la traverse et est drainée vers la profondeur. Notons que la partie d'eau de pluie qui atteint le sous-sol est faible pour deux raisons :

- la partie d'eau de pluie qui s'infiltré est très variable, quelques % lors d'averses intenses sur sols imperméables à forte pente, à cent pour cent lors de pluies faibles sur sols perméables à pente nulle ;
- l'eau infiltrée alimente d'abord la couche arable. Ce n'est que lorsque cette couche est saturée que l'eau draine vers la profondeur. Le drainage profond ne se produit donc qu'en période de faible évaporation, c'est-à-dire lorsque la couche arable se sèche lentement et reste constamment à saturation.

Ce trajet de l'eau de la surface vers les nappes profondes est extrêmement lent. En Belgique, sur sols limoneux, la vitesse a pu être estimée à environ 10 mètres par an.

La quantité d'eau exploitable dans ces conditions est donc peu importante puisque l'alimentation est faible. Cette eau ne devrait pas être exploitée pour l'irrigation, il faut la réserver pour l'eau potable. En effet, vu l'importance du volume d'eau nécessaire en irrigation, l'exploitation d'une nappe alimentée "localement" ne mènerait qu'à un assèchement rapide et irrévocable de la nappe.

2.1.2. Alimentation différée dans le temps

Il s'agit essentiellement de nappes fossiles qui sont situées à grande profondeur – plus de 100 mètres – et qui ont été alimentées localement à une époque où le lieu recevait des pluviosités importantes. L'exploitation de ces nappes est irréversible.

2.1.3. Alimentation différée dans l'espace

La figure 15.1 montre comment une nappe située dans une plaine peut être alimentée par drainage profond à partir de montagnes voisines où la pluviosité est impor-

tante. L'exploitation doit se faire avec prudence, car même s'il y a réalimentation par le transfert horizontal, ce transfert est extrêmement lent – moins de 10 m par an.

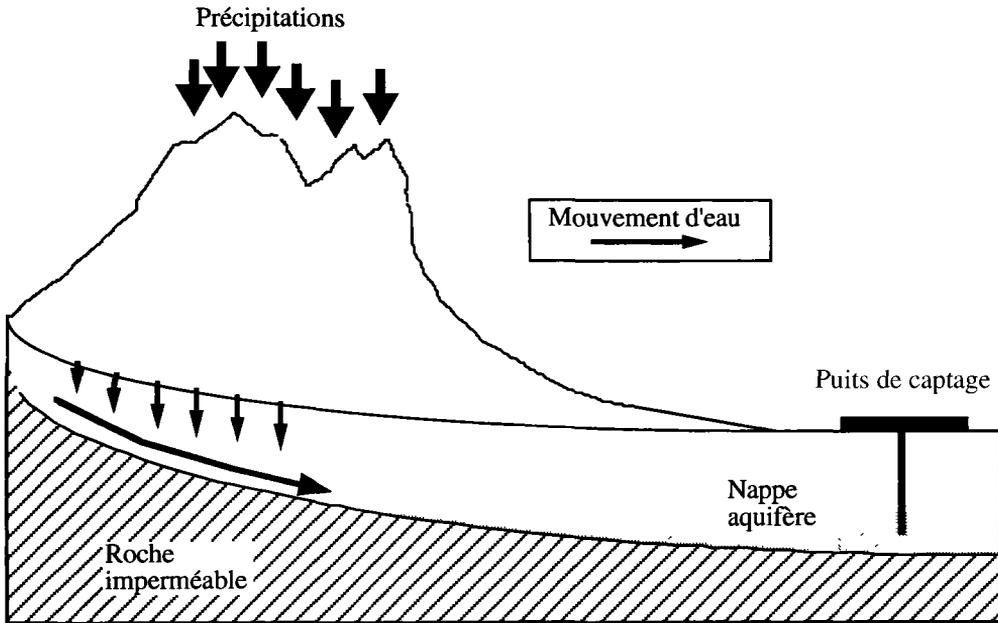


Figure 15.1. Alimentation différée dans l'espace.

2.2. Eaux de surface

Les eaux de surface sont issues de la partie de la pluie qui ruisselle. Il s'agit de celles qui ne sont pas infiltrées. Le pourcentage varie donc aussi de 0 à 100 %, mais en sens opposé de l'infiltration. Ces eaux ruissellées alimentent, en partie, les ruisseaux, les rivières, les fleuves, les oueds...

L'autre partie est le débit de base, c'est-à-dire celui provenant des nappes souterraines dont le trop-plein passe vers les rivières.

L'irrigation peut se concevoir en puisant l'eau directement dans un cours d'eau. Sans soutien du débit de la rivière, on risque rapidement de perturber le cours d'eau et d'entraver d'autres activités en aval. En effet, l'irrigation se fait en période de faible pluviosité, c'est-à-dire en période de faible alimentation. C'est pourquoi, dans la majorité des cas, il faut mobiliser la ressource pendant une période plus ou moins longue, ce qui revient à stocker l'eau et à la relâcher lors du besoin. La construction de barrages permet de créer des réserves de taille très variable, quelques millions de mètres cubes pour les retenues collinaires à quelques milliards pour les grands barrages.

Il n'est pas dans l'objet de ce chapitre de parler de constructions de barrages. Signalons toutefois quelques aspects particuliers sur lesquels il faut attirer l'attention du maître d'œuvre :

- La création d'un réservoir d'eau entraîne des pertes considérables. Ainsi, le barrage de Ouagadougou (Burkina Faso) perd annuellement deux tiers de sa capacité

par évaporation et infiltration. Celui de Ouarzazate (Maroc du Sud) perd de manière identique 100 à 150 millions de mètres cubes par an pour une capacité maximale de 530 millions de mètres cubes.

- La majorité de cette perte est de l'évaporation, d'où augmentation de la salinité de l'eau stockée.
- L'arrêt de l'eau courante provoque des **atterrissements** importants. Une récente étude marocaine montre que le Maroc perdra en 20 ans 10 % de sa capacité de mobilisation à cause de l'ensablement. On cite aussi le cas de ce barrage algérien qui s'est empli de terre en une crue.
- Le barrage sert aussi à écrêter les crues, ainsi la crue du 5 au 7 décembre 1989 dans la vallée du Drââ (Sud marocain) a permis de limiter la crue à 1 500 m³/s alors qu'à l'entrée du barrage le débit a atteint 4 000 m³/s.
- L'inondation dans la vallée se trouve ainsi limitée – au grand bonheur des habitants –, mais le lessivage des sels est réduit sur les terres traditionnellement inondées.

3. DISTRIBUTION DE L'EAU

L'eau d'irrigation doit être distribuée de son lieu de mobilisation ou de stockage vers l'utilisateur. Différencions les modes de distribution et les types de distribution.

3.1. Modes de distribution

En périmètres irrigués, il existe deux grands modes de distribution.

3.1.1. Distribution au tour d'eau avec contrôle par l'amont

Chaque parcelle à irriguer reçoit "à son tour" l'eau nécessaire. Le tour d'eau est l'intervalle entre deux périodes successives d'irrigation. Le gestionnaire organise le tour d'eau, c'est-à-dire qu'il planifie la distribution de telle sorte que chaque parcelle cultivée reçoive régulièrement la quantité d'eau nécessaire à la bonne tenue de ses cultures.

Ce mode de distribution est aussi en commande par l'amont. En effet, puisque le gestionnaire est le décideur, c'est lui qui gère le lâcher de l'eau, par exemple du barrage, pour qu'elle aboutisse là où il faut. C'est l'amont qui contrôle l'ensemble du système et à chaque nœud de la distribution.

Le tour d'eau (T_e en jours) est calculé à partir du rapport entre la réserve d'eau facilement utilisable (RFU en mm) et le besoin journalier des plantes calculé à partir de l'évaporation réelle (ET_r en mm/jour) :

$$T_e = \frac{RFU}{ET_r}$$

La réserve d'eau facilement utilisable est égale à la capacité utile (CU en % en volume) multipliée par la profondeur d'enracinement (p en mm) et par un facteur "f" qui dépend de la limite acceptée quant à la facilité pour la plante de puiser l'eau dans le sol.

La capacité utile est la différence entre le volume d'eau retenu dans le sol à la capacité au champ F_{cy} (*field capacity*) et au point de flétrissement permanent W_p (*wilting point*). D'où :

$$CU = F_{cy} - W_p \quad \text{en \% en volume}$$

$$RFU = (CU)pf \quad \text{en mm}$$

Ainsi, pour un sol de $F_{cy} = 35 \%$, et de $W_p = 15 \%$ en volume, pour une profondeur d'enracinement de $p = 600$ mm et pour un $f = 0,6$, on a :

$$RFU = (0,35 - 0,15) \times 600 \times 0,6 = 72 \text{ mm}$$

Si l' ET_r est de 6 mm/jour, le tour d'eau est donné par :

$$T_e = 72/6 = 12 \text{ jours.}$$

3.1.2. Distribution à la demande avec contrôle par l'aval

Dans ce cas, l'agriculteur décide du moment où il irrigue. Dès lors, il aura sa vanne et se sert d'eau quand le besoin se fait ressentir. Le gestionnaire du réseau d'irrigation doit quant à lui organiser sa distribution pour que l'eau soit disponible lorsque l'agriculteur le demande.

Comme c'est l'aval qui appelle l'eau, le système est organisé avec appel à commande par l'aval.

3.1.3. Critique des deux modes de distribution

Chaque mode de distribution a ses défauts et ses qualités. Notons, dès l'abord, que l'eau se déplace en canaux ou en conduites à des vitesses rarement supérieures à 1 m/s. Or, il est courant dans les grands périmètres irrigués de constater des distances de l'ordre de 100 km ou plus entre le barrage et la parcelle, c'est-à-dire des temps de transfert dépassant largement la journée. Une distribution qui serait intégralement à commande par l'aval est impensable.

En effet, lorsque l'agriculteur ouvre sa vanne il faudra plus de 24 heures pour que "sa commande" agisse sur la vanne du barrage, et plus de 24 heures pour que l'eau arrive à sa parcelle.

Si on multiplie l'intervention de l'agriculteur par 100 agriculteurs, le système se trouve totalement désorganisé. On se trouve très loin d'une distribution à la demande.

D'où, distribution par commande par l'amont : le gestionnaire du périmètre irrigué décide quand il faut irriguer et quel ordre respecter en fonction, bien sûr, des besoins des agriculteurs.

Cette technique demande une organisation considérable dans laquelle l'agriculteur manifeste le souhait de disposer de l'eau à un instant donné et le gestionnaire essaie de satisfaire au mieux les souhaits de chacun.

Ce système, très lourd en organisation, est aussi très peu économe en eau, car l'eau lâchée du barrage n'est pas nécessairement utilisée vu les temps de transfert qui peuvent atteindre plusieurs jours.

3.2. Types de distribution

La distribution de l'eau peut être gravitaire ou sous pression.

3.2.1. Distribution gravitaire

L'eau se déplace dans des canaux à ciel ouvert uniquement sous l'effet de forces de gravité. La surface de l'eau est à la pression atmosphérique. Les canaux ont des pentes de l'ordre de 0,1 à 1 m par 1 000 mètres. Il s'agit dans ce cas, de disposer de terrains suffisamment plats. Généralement, ce sont des vallées. Les canaux "montent" sur les pentes le long du "thalweg", c'est-à-dire que les canaux auront des pentes inférieures à celles du thalweg. On peut ainsi amener l'eau en surplomb par rapport aux terres à irriguer. Souvent cependant il faudra soit creuser le sol pour passer une butte, ou porter le canal pour passer un creux ou encore installer un siphon inversé pour passer une route.

3.2.2. Distribution sous pression

L'eau est véhiculée dans des tuyaux et s'y trouve à une pression différente de la pression atmosphérique. Dans ce cas, on pourra délivrer de l'eau sous pression et actionner directement un réseau d'irrigation par aspersion.

4. RÉGULATION DE LA DISTRIBUTION

Quel que soit le mode et le type de distribution, il s'agit de réguler la distribution de manière plus ou moins automatisée.

4.1. Régulation hydraulique

Les grands maîtres de la régulation hydraulique sont issus des écoles et industries hydrauliques de Grenoble avec successivement Neyrpic, Neyrtec et Alsthom qui ont transféré des licences de fabrication dans le monde entier.

Le principe de base est d'équiper les canaux de systèmes à commandes purement hydrauliques. L'ouvrage de base est la vanne à niveau constant, ainsi la vanne AMIL – amont constant – montre un niveau constant à l'amont (figure 15.2). Quand l'eau monte en amont, la vanne s'ouvre, le débit augmente et la montée de l'eau est limitée. L'asservissement hauteur-ouverture est tel que la variation de niveau en amont de la vanne est fortement limitée.

Pour la vanne AVIS à niveau aval constant, c'est le niveau aval qui est maintenu stable (figure 15.3). Ce dispositif permet d'automatiser le transfert de l'eau uniquement en ouvrant l'amont pour la commande par l'amont, ou l'aval pour la commande par l'aval.

Par ailleurs, le gestionnaire doit moduler les débits entre les différentes régions, secteurs ou utilisateurs. En chaque nœud, il faut pouvoir partager l'eau vers différents endroits. Ce partage doit être modulable. Les débits doivent rester les plus constants possible.

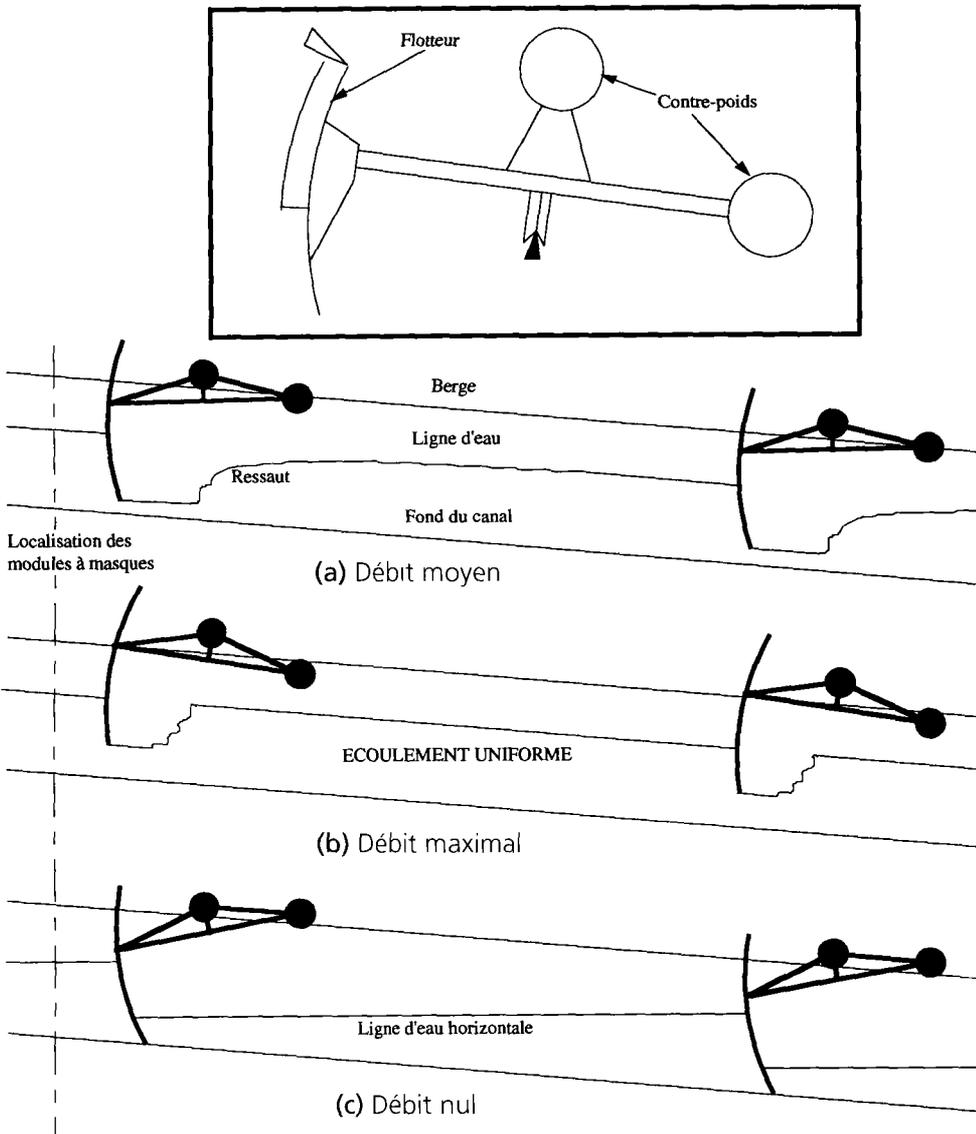


Figure 15.2. Vanne Amil = contrôle par l'amont

L'appareil inventé ici est la batterie de "module à masque". Le module à masque est équipé d'une vannette qui permet d'ouvrir le module.

Une batterie de module à masque est composée de plusieurs modules dimensionnés chacun pour un débit nominal en litre par seconde. Une batterie de modules est composée de plusieurs masques, par exemple 1 de 10 ; 2 de 20 ; 3 de 40. On peut ainsi moduler le débit de 10 à 170 litres par seconde de 10 en 10 litres.

L'hydraulique nous apprend que le débit Q qui passe au-dessus d'un déversoir de largeur l sous une charge h est donné par :

$$Q = mlh (2gh)^{0.5}$$

où m est un coefficient de débit.

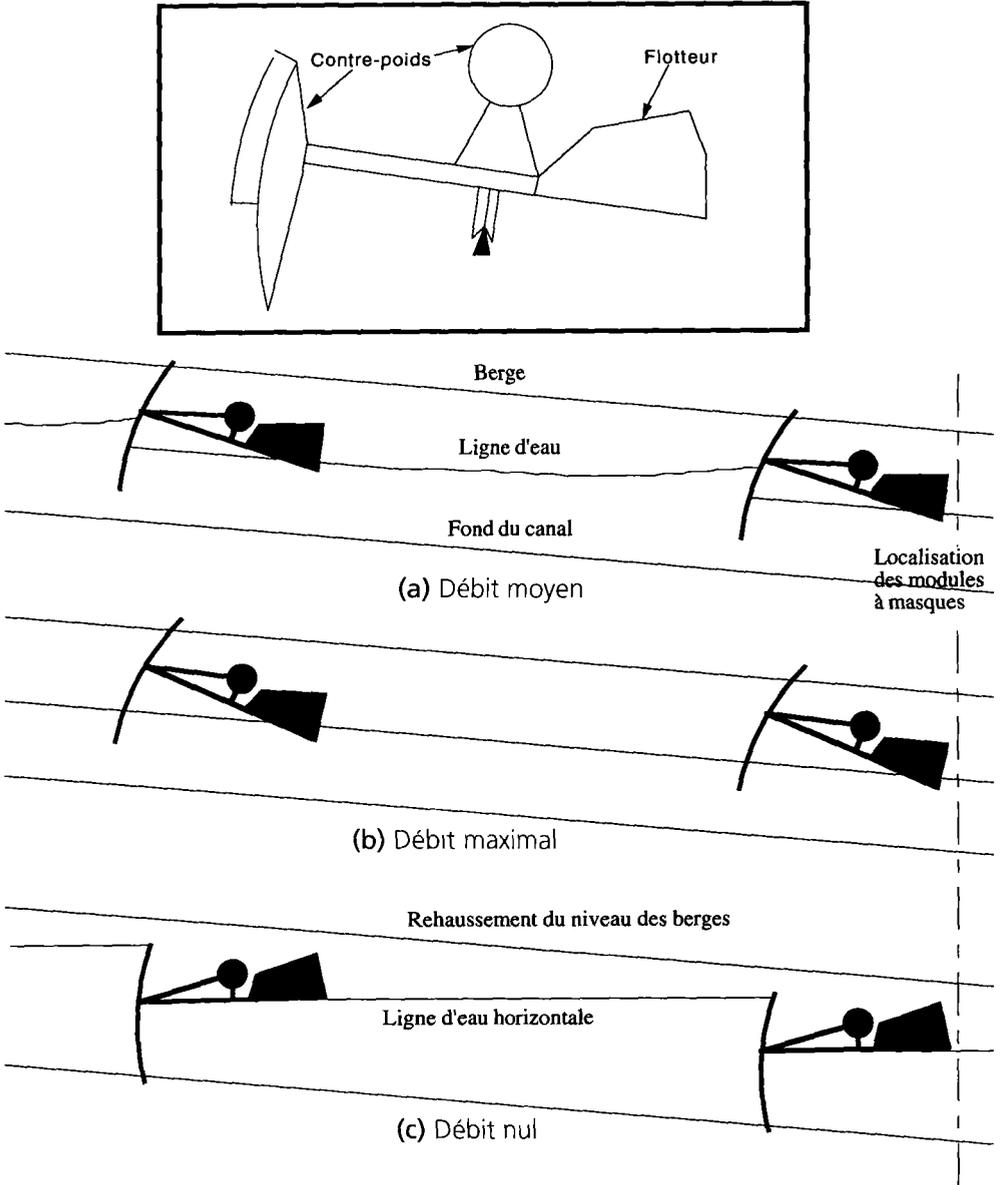


Figure 15.3. Vanne Avis = contrôle par l'aval.

Introduisons :

$$k_1 = ml(2g^{0,5})$$

On obtient :

$$Q = k_1 h^{1,5}$$

Sans dispositif particulier, le débit passant par l'orifice délivrant l'eau vers un canal secondaire serait fortement influencé par la variation de hauteur d'eau en amont de l'ouvrage.

Aussi, les batteries de modules à masque sont placées aux endroits où le niveau bouge peu : en amont de vannes AMIL et en aval de vannes AVIS.

Le (ou les) masque(s) tels qu'ils apparaissent dans la figure 15.4 a comme mission de minimiser l'influence d'une variation de hauteur sur le débit. En effet, tant que l'eau ne touche pas le masque, la relation hauteur-débit répond à une équation du type :

$$Q = k_1 h^{1,5}$$

avec h charge d'eau et k_1 le coefficient de débit comprenant $\sqrt{2g}$.

Par contre, quand l'eau touche le masque cette relation devient :

$$Q = k_2 O h^{0,5}$$

avec O ouverture entre l'arête inférieure du masque et le sommet du seuil.

La courbe h, Q prend la forme globale de la figure 15.4. On a ainsi minimisé l'influence d'une variation de hauteur sur le débit.

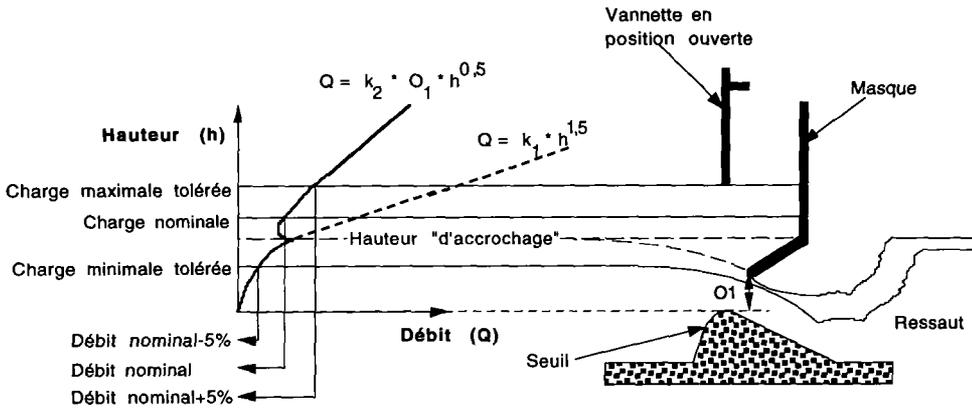


Figure 15.4. Principe de fonctionnement d'un module à masque.

La disposition d'une batterie de modules à masques par rapport à un canal d'alimentation est donnée à la figure 15.5.

A côté de ces équipements classiques, il existe toute une série d'autres tels Giraudet, bec de canard, vanne à commande mixte (amont et aval), etc. Nous renvoyons le lecteur à des ouvrages spécialisés.

La régulation hydraulique permet donc d'automatiser la distribution de l'eau sans intervention manuelle tant en commande par l'amont que par l'aval. Rappelons toutefois qu'en commande par l'aval, il ne peut fonctionner sur longue distance.

Ce type de régulation exige, d'une part, de la part du concepteur une excellente connaissance de l'hydraulique et, d'autre part, lors de l'exécution, un respect scrupuleux des cahiers des charges.

En effet, une fois réalisé, il n'y a souvent plus aucune possibilité de corriger les défauts. Prenons un exemple simple pour illustrer ces exigences.

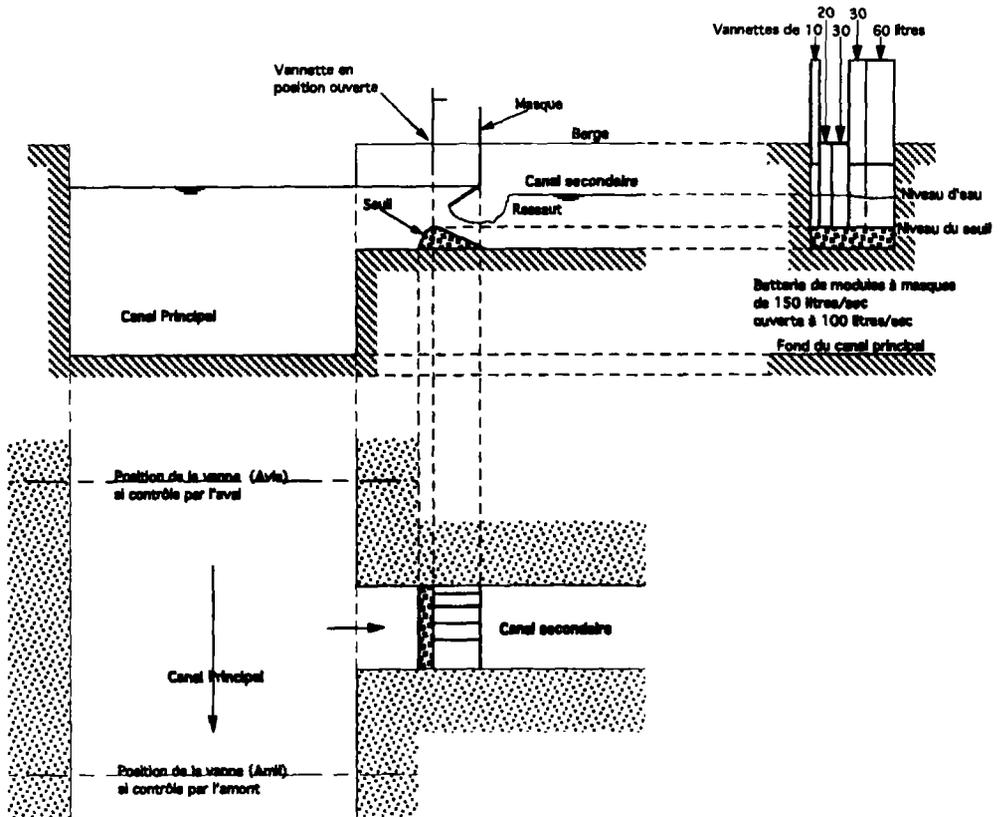


Figure 15.5. Module à masque.

L'équation la plus couramment utilisée aujourd'hui pour le calcul des écoulements uniformes est celle de Manning. Elle s'écrit :

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2}$$

avec n coefficient de rugosité

A section en m^2

R rayon hydraulique est égal à A/P et où

P est le périmètre mouillé

S est la pente du canal.

Dans cette équation, le coefficient de rugosité est toujours très difficile à estimer pour un auteur de projet. On peut aisément montrer que, toutes choses égales par ailleurs, le passage d'un coefficient de rugosité $n = 0,015$ (bon béton) à $n = 0,018$ (béton légèrement rugueux) entraîne une diminution du débit transporté de plus de 15 %. Or, il est courant de constater de telles variations dues simplement au vieillissement du béton. Une fois que le projet est fait, il n'est plus possible de modifier, ni les dimensions du canal, ni sa pente.

4.2. Régulation manométrique

Cette technique est réservée aux réseaux d'irrigation sous pression. L'eau est délivrée dans un réseau de tuyaux amenant l'eau à une borne d'irrigation où elle doit être disponible à un débit et sous une pression déterminée.

Très classiquement, l'ouvrage de régulation est un château d'eau dont le niveau maintient une pression constante au départ du réseau. La commande des batteries de pompe se fait à partir de détecteurs de niveaux placés au sommet du château d'eau.

Notons que le château d'eau sert uniquement à réguler la pression. Son volume est tout à fait insignifiant pour compenser une quelconque panne des pompes. Le volume sera calculé en fonction de l'intervalle de temps admis entre débuts de démarrage et arrêts successifs d'une pompe.

Le développement récent de l'électronique de puissance qui permet de réguler aisément la vitesse des moteurs électriques conduit au développement de systèmes de régulation sans château d'eau où les variations de pression sont compensées par la variation du nombre de tours d'une pompe. A notre connaissance, cette technique a été réservée jusqu'à ce jour à la distribution d'eau potable où les débits sont nettement moins importants.

4.3. Régulation dynamique

Le paragraphe sur la régulation hydraulique s'est terminé sur les difficultés de mise en œuvre correcte de ce type de régulation. Aussi, les hydrauliciens ont songé à développer des systèmes de régulation, dite dynamique, comportant un réseau de télémesure vers un centre de gestion qui télécommande des ouvrages de régulation.

Les progrès récents de l'électronique, de la télémesure et de l'informatique rendent cette technique très attrayante. Sa mise en œuvre s'avère cependant très délicate. En effet, le calage des modèles de transfert hydraulique sont très difficiles à cause de l'intervention de plusieurs coefficients qui varient au cours du temps (rugosité des parois, viscosité de l'eau, vitesse de transfert des ondes hydrauliques, etc.). Par ailleurs, le système ne fonctionne que si la totalité de la chaîne de mesures et de commandes est fonctionnelle.

Un capteur en panne, un moteur de commande en panne, une télémesure manquante, une télécommande défectueuse... bloquent tout le système. Il s'agit donc de bien mesurer les risques avant de se lancer dans une régulation dynamique.

5. ÉCONOMIE EN EAU ET ÉNERGIE

L'efficacité globale E de l'irrigation est le grand souci des gestionnaires de périmètres irrigués. Elle se calcule par le rapport entre le volume d'eau réellement utilisé par la plante et le volume total d'eau délivré aux périmètres.

Dans un grand périmètre irrigué de plusieurs dizaines de milliers d'ha, on estime qu'un E voisin de 50 % est bon. Toutefois, il n'est pas rare d'atteindre du 25 %, donc 75 % de perte. Cette perte se trouve à tous les niveaux : fuite dans les canaux, mauvais fonctionnement hydraulique, mauvaise utilisation à la parcelle, erreur de gestion... Notons que l'évaporation des canaux considérée par certains comme une partie importante est en fait tout à fait négligeable, de l'ordre de 0,5 %.

C'est pourquoi, d'aucuns se sont orientés vers l'irrigation sous pression qui devrait conduire à moins de perte parce que l'eau se trouve dans des tuyaux étanches et que surtout la fourniture se fait à la demande. Cependant, les coûts d'investissements y sont beaucoup plus importants et surtout les coûts de fonctionnement. Par ailleurs, même si l'efficacité est améliorée, il reste que par exemple au niveau des aspersion l'efficacité est de l'ordre de 80 % à cause de la non-uniformité.

Et l'énergie dans tout cela ? Pomper de l'eau coûte cher. La puissance se calcule comme suit :

$$N_{\text{eff}} = \frac{H_m Q}{\eta}$$

avec N_{eff} = puissance effective en kW

H_m = hauteur manométrique en Pa, 10 m de CE (colonne d'eau) est égal à 10^5 Pa

Q = le débit en m^3/s

η = le rendement global comprenant le rendement de la pompe.

Ainsi, pomper $1 \text{ m}^3/\text{s}$ à 10 m de CE nécessite une puissance de 125 kW.

Exemple : Quel est le coût énergétique pour alimenter un périmètre irrigué de 2 000 ha par aspersion ?

Admettons une évapotranspiration moyenne de 6 mm/jour et une efficacité globale de 0,75. Le besoin global est de :

$$6 \text{ mm/jour} \times 2\,000 \text{ ha} \times 10 \text{ m}^3/\text{mm}\cdot\text{ha} = 120\,000 \text{ m}^3/\text{jour}$$

et $120\,000 \text{ m}^3/\text{jour}$ utile avec une efficacité E de 0,75 nécessite $160\,000 \text{ m}^3/\text{jour}$, ou encore $1,852 \text{ m}^3/\text{s}$ en tête de réseau.

Notons au passage que cela fait de l'ordre de 1 litre/s·ha.

Il est courant dans ce type de projet de construire des châteaux d'eau de 70 m de hauteur. La puissance P_{eff} est donc de :

$$P_{\text{eff}} = 70 \times 10^4 \times 1,852 \times \frac{1}{0,80} = 1\,620 \text{ kW}$$

$70 \text{ m de CE} \times 10^4 \text{ Pa par m de CE} \times 1,852 \text{ m}^3/\text{s}$ divisé par un rendement de 0,80 = 1 620 kW effectifs.

En une heure, l'énergie consommée est de 1 620 kWh ou encore de $1\,620 \text{ kWh} / 1\,852 \times 3\,600 = 0,243 \text{ kWh}/\text{m}^3$.

En énergie électrique comptée à 0,12 écus/kWh, le coût est de 0,03 écus/ m^3 d'eau.

En énergie GO (gas-oil) utilisons les éléments suivants :

- consommation : 0,250 kg de GO/kWh ;
- masse volumique : 0,85 kg de GO/litre ;
- coût du GO : 0,24 écus/litre.

$$\begin{aligned} 0,243 \text{ kWh}/\text{m}^3 \text{ d'eau} \times 0,250 \text{ kg de GO/kWh} \times \frac{1}{0,85} \text{ kg/l} \times 0,24 \text{ écu/l} \\ = 0,017 \text{ écu}/\text{m}^3 \text{ d'eau.} \end{aligned}$$

L'irrigation par aspersion entraîne des coûts énergétiques importants. Ainsi, irriguer les 2 000 ha pendant 4 mois nécessite, dans les conditions énumérées ci-dessus, des dépenses de fonctionnement pour l'énergie de :

$$120\,000 \text{ m}^3/\text{j} \times 30 \text{ jours} \times 4 \text{ mois} = 14\,400\,000 \text{ m}^3$$

- à 0,03 écu/m³ en électricité, cela donne : 432 000 écus/2 000 ha ou 200 écus/ha pour 4 mois ;
- à 0,017 écu/m³ en GO, cela donne : 245000 écus/2 000 ha ou environ 120 écus/ha pour 4 mois.

A une époque où l'énergie coûte cher, ce surcoût énergétique pour l'aspersion par rapport au gravitaire, fait que beaucoup de pays hésitent à encore investir en irrigation par aspersion, même si l'efficienne globale est meilleure.

6. TECHNIQUES PARTICULIÈRES

Le souci d'économiser l'eau, de minimiser les coûts énergétiques, de diminuer la main d'œuvre, d'améliorer l'efficacité et de minimiser l'effet de la salinité, font fonctionner l'imagination des chercheurs et des constructeurs d'équipement.

Ceci a conduit au développement de nouvelles techniques.

6.1. Irrigation localisée

L'irrigation localisée consiste à humidifier localement le volume de sol directement intéressé par une plante. Ce type d'irrigation permet une sérieuse économie en eau, c'est pourquoi il est pratiqué principalement dans les pays où l'économie en eau est un souci majeur.

6.1.1. Le goutte à goutte

Des dispositifs particuliers sont placés sur un tuyau principal. Ce sont des goutteurs qui permettent de distribuer l'eau en permanence suivant les besoins de la plante. Il permet de maintenir le système racinaire dans un milieu humide proche du F_{cy} . Un autre avantage est que la migration de l'eau se faisant vers l'extérieur du bulbe humide, les sels s'y concentrent en périphérie. Avec le danger cependant qu'en cas d'arrêt de l'irrigation, ces sels contamineront rapidement le bulbe humide et provoqueront l'empoisonnement de la plante.

6.1.2. Les mini-sprinklers

Dans ce cas, des mini-asperseurs – rayon de projection de l'ordre du mètre – mouillent le sol localement au pied de la plante à irriguer.

Nous conseillons les documents FAO (cf. bibliographie) pour tout complément d'information sur ces techniques.

6.2. Pivots centraux

La recherche de la minimisation des coûts de main d'œuvre a conduit au développement de matériel qui permet d'irriguer de grandes surfaces sans déplacement de matériel nécessitant beaucoup de main d'œuvre.

Le pivot central est essentiellement équipé d'une rampe mobile qui tourne autour d'un point d'où il est alimenté (souvent par pompage souterrain). Les asperseurs sont montés sur cette rampe.

Le rayon peut atteindre plusieurs centaines de mètres. La surface irriguée est de 20 ha pour un rayon de 250 mètres.

6.3. Rampe linéaire

L'inconvénient du pivot est d'irriguer un cercle. Aussi, des constructeurs ont développé des rampes qui se déplacent suivant la technique du pivot central, mais linéairement en pompant l'eau dans un canal ou alimentées par un tuyau souple.

7. CONCLUSION

Dans ce chapitre consacré à l'irrigation et la ressource en eau, le lecteur aura trouvé quelques informations générales sur l'origine des eaux d'irrigation et sur les modes de distribution. Il est clair que tout ingénieur qui souhaite œuvrer en la matière ne se contentera pas de ces informations et se référera à la bibliographie sur le sujet, entre autres, celle donnée ci-après.

BIBLIOGRAPHIE

- Association française pour l'étude des irrigations et du drainage, Compte rendu du séminaire "Drainage et Salinité", Montpellier, du 29 septembre-1^{er} octobre 1986.
- Carlier M. (1972), *Hydraulique générale et appliquée*, Eyrolles, Paris.
- Chow V.T. (1959), *Open Channels Hydraulics*, McGraw-Hill, New York, 655 p.
- Commission internationale des irrigations et du drainage (1985), *Les besoins en eau des cultures*, Conférence internationale (Versailles, septembre 1984), INRA, Paris, 927 p.
- FAO, *Bulletin FAO d'irrigation et de drainage*, 46 numéros disponibles auprès des points de vente des publications de la FAO, ou en s'adressant directement à la section distributions et ventes, FAO, Via delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italie.
- Jensen M.E. (1983), *Design and Operation of Farm Irrigation Systems*, American Society of Agricultural Engineers, St Joseph, 829 p.

Chapitre 16

LA FERTILISATION MINÉRALE ET ORGANIQUE

A. Falisse¹ et J. Lambert²

1. Faculté des sciences agronomiques, Gembloux, Belgique
2. Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgique

Sommaire

1. Notions générales

- 1.1. Notion de fertilité
- 1.2. La fertilisation
- 1.3. Les matières fertilisantes

2. Les amendements minéraux

- 2.1. Principaux effets des amendements minéraux
- 2.2. Appauvrissement du sol en calcium et acidification
- 2.3. Les matières utilisables

3. Les amendements organiques

- 3.1. Rôle de la matière organique dans la fertilité du sol
- 3.2. Évolution de la matière organique et son renouvellement
- 3.3. Les amendements humifères ou les sources de matières organiques restituables au sol

4. La fertilisation azotée

- 4.1. Rôles agronomiques de l'azote
- 4.2. Comportement de l'azote dans le sol
- 4.3. Comportement de l'azote en relation avec la nutrition des plantes
- 4.4. Complexité de la fertilisation azotée
- 4.5. Les engrais azotés

5. Fertilisation phosphatée et potassique

- 5.1. Rôles et comportement du phosphore
- 5.2. Les engrais phosphatés
- 5.3. Rôles et comportement du potassium
- 5.4. Les engrais potassiques
- 5.5. Principes des fertilisations phosphatées et potassiques

6. Schéma général de raisonnement de la fertilisation

Bibliographie

LA FERTILISATION MINÉRALE ET ORGANIQUE

Ce chapitre définit d'abord des notions générales concernant la fertilité, la fertilisation et les matières fertilisantes. Il présente ensuite les notions principales et les principes de base se rapportant aux amendements minéraux, aux amendements organiques, aux engrais azotés et à la fertilisation azotée, aux engrais et fertilisations phosphatés et potassiques. Il est fait appel à des notions exposées ailleurs dans cet ouvrage, en particulier dans le chapitre 5 et dans le chapitre 11. Ce texte ne constitue en aucune manière un cours de matières fertilisantes et de leur utilisation, il se veut seulement une base à leur connaissance.

1. NOTIONS GÉNÉRALES

1.1. Notion de fertilité

La fertilité d'un sol est sa capacité à produire des fruits c'est-à-dire à fournir des récoltes ayant un rendement élevé et de bonne qualité. Cette capacité repose sur un ensemble de propriétés du sol lui-même, telles la texture, la structure, la profondeur, la réaction du sol, sa teneur en éléments nutritifs, en humus, ses propriétés de sorption et ses teneurs éventuelles en éléments toxiques.

1.2. La fertilisation

La fertilisation est un ensemble de pratiques culturales coordonnées ayant pour objectif d'assurer aux plantes cultivées une alimentation correcte dans l'ensemble des éléments nutritifs. Par l'apport de matières fertilisantes (engrais et amendements), elle a pour buts :

- de créer, améliorer ou maintenir les caractéristiques biologiques et physico-chimiques du sol aptes à optimiser l'absorption par les plantes des éléments nécessaires à leur croissance et au rendement ;
- d'assurer la complémentarité des fournitures en provenance du sol.

1.3. Les matières fertilisantes

Les matières fertilisantes sont habituellement regroupées en deux catégories : les amendements et les engrais.

Les **amendements** sont des substances destinées à améliorer l'ensemble des propriétés des sols : propriétés physiques, chimiques et biologiques. Parmi les amendements, on distingue d'une part les matières minérales, d'autre part les matières organiques.

Les **engrais** sont des substances destinées à fournir aux plantes, en général par l'intermédiaire du sol, un ou plusieurs éléments destinés à compléter les fournitures en provenance du sol lui-même. Parmi les engrais, on distingue les engrais minéraux auxquels il convient d'ajouter des engrais organiques dits de synthèse.

La distinction entre amendements et engrais n'est pas parfaitement nette. Certains amendements, destinés dans un premier temps à l'amélioration des propriétés du sol, contiennent des éléments utilisables par la plante et qui participeront à sa nutrition.

2. LES AMENDEMENTS MINÉRAUX

Parmi les amendements minéraux, on trouve des matières qui ont pour effet essentiel de modifier la texture : ce sont par exemple le sable, destiné à alléger la texture d'un sol trop argileux, ou la marne argileuse, destinée à enrichir en fraction fine colloïdale les sols sableux trop légers. L'usage de ces amendements minéraux texturaux est en général réservé à des surfaces limitées, compte tenu qu'ils doivent être apportés en masses importantes à l'unité de surface cultivée.

Un autre groupe d'amendements minéraux, les amendements calcaires, a pour rôle d'améliorer les propriétés physico-chimiques du sol, en particulier l'état ionique de la solution du sol et du complexe argilo-humique. Il provoque comme modification principale l'augmentation du pH ainsi que celle des teneurs en calcium et en magnésium des sols.

2.1. Principaux effets des amendements minéraux

2.1.1. Amélioration des propriétés physiques des sols

- Le calcium rend les sols plus meubles et plus stables ; il favorise la porosité, donc l'économie en eau et l'aération ; il facilite le travail du sol et sa colonisation par les racines.
- Les ions Ca^{++} et Mg^{++} se fixent sur les colloïdes chargés négativement et provoquent la floculation.
- Le calcium favorise l'humification.
- Le calcium contribue à la formation du complexe argilo-humique.

2.1.2. Amélioration des propriétés chimiques des sols

- Le calcium et le magnésium régularisent le pH et favorisent les échanges d'ions nécessaires à la plante.
- Ca^{++} maintient le pH du sol dans des limites favorables à l'activité biologique, à la vie et à la croissance de la plante, à l'assimilabilité des ions nutritifs. En effet, les éléments nutritifs sont difficilement absorbables, voire inassimilables pour certains pH. Par exemple :

– en dessous de pH 5 : P, K, N, Ca, Mg, S, Mo sont difficilement absorbés ; par contre, certains éléments toxiques sont très assimilables à pH faible : l'aluminium contenu dans les minéraux silicatés, le manganèse, le cuivre...

– au-dessus de pH 7 : P cristallise ; Fe, Mn et Bo sont bloqués.

Le pH idéal pour la production végétale est donc, en moyenne, compris entre 6 et 7. Mais les possibilités de production sur des sols ayant d'autres pH sont bien réelles et il est parfois vain, voire néfaste de vouloir modifier ceux-ci (figure 16.1).

- Le calcium peut être échangé contre d'autres cations en particulier (K^+ , NH_4^+), avec remise en solution du Ca et perte possible (action décalcifiante de certains engrais souvent accompagnée d'une acidification du sol).
- Le calcium permet la fixation réversible du phosphore. Les ions $H_2PO_4^-$ et HPO_4^{2-} sont retenus sur le complexe par l'intermédiaire du calcium fixe sur les particules du sol, puis rendus disponibles facilement pour les plantes.
- L'excès de calcium insolubilise le phosphore et le rend peu disponible pour la plante.

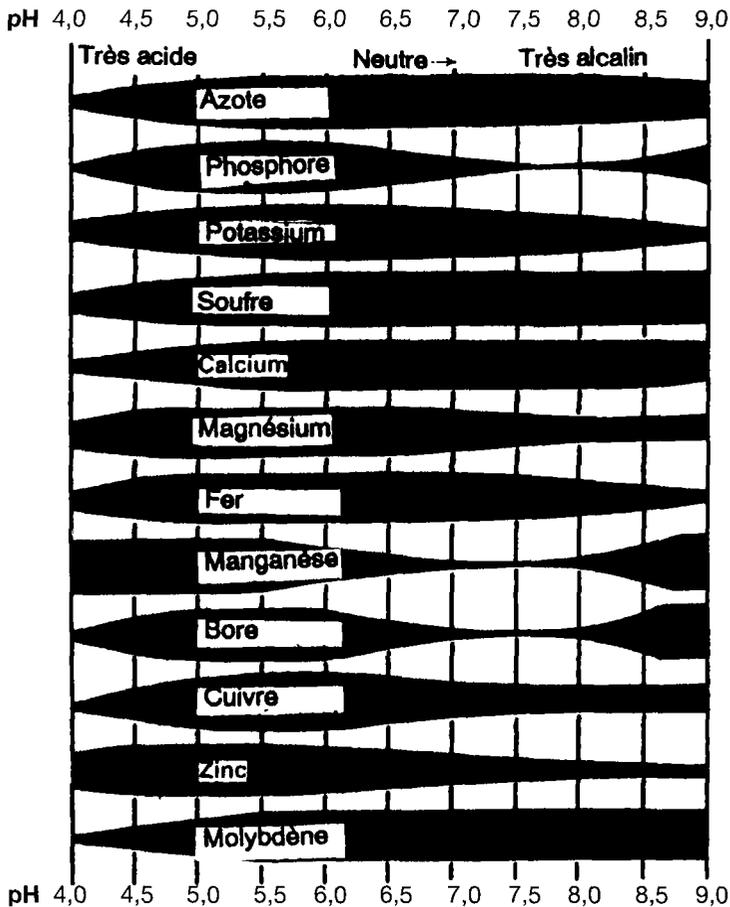


Figure 16.1. Influence des pH sur la disponibilité des éléments nutritifs dans des sols contenant de la matière organique, les zones larges des surfaces noires indiquent une disponibilité élevée.

Source : Mengel and Kirkby (1987)

2.1.3. Effets sur les propriétés biologiques

Le calcium et le magnésium rendent le milieu favorable aux micro-organismes du sol, agents de la décomposition des matières organiques, de l'humification, de la minéralisation, de la fixation symbiotique, etc.

Si le pH est nettement acide, les bactéries sont absentes tandis que se développent les champignons peu actifs dans l'humification, avec pour résultat une accumulation de la matière organique non décomposée. De même certains champignons parasites peuvent se développer (pied noir de la betterave, hernie des crucifères...).

D'autre part, si le milieu est asphyxiant, du fait de la mauvaise structure du sol par exemple, les bactéries anaérobies se développent, avec pour résultats la formation de gleys et l'apparition d'oxydes toxiques pour les plantes, ainsi qu'une tendance accélérée vers l'acidification.

Les plantes supérieures sont sensibles à l'acidité des sols et présentent une croissance optimale dans certaines zones de pH.

Le tableau 16.1 présente les zones de pH optimales pour quelques plantes cultivées.

Tableau 16.1. Limites de pH de différentes cultures.

Zones de pH	Cultures
3,5 - 8,0	<i>Hevea brasiliensis</i>
4,0 - 5,5	<i>Thea sinensis</i>
4,5 - 7,0	<i>Coffea</i> sp
4,8 - 6,5	<i>Solanum tuberosum</i>
5,0 - 6,0	<i>Gossypium hirsutum</i>
5,0 - 6,5	<i>Oryza sativa</i> , <i>Sorghum vulgate</i> v. <i>technicum</i> , <i>Ananas sativa</i>
5,0 - 7,0	<i>Secale cereale</i> , <i>Linum usitatissimum</i>
5,0 - 7,5	<i>Avena sativa</i>
5,5 - 7,0	<i>Fagopyrum esculentum</i> , <i>Brassica napobrassica</i> , <i>B. rapa</i>
5,5 - 7,5	<i>Zea mays</i> , <i>Nicotiana tabacum</i>
6,0 - 7,5	<i>Triticum aestivum</i> , <i>Brassica napus</i> , <i>Helianthus annuus</i> , <i>Musa sapientium</i> , <i>Cocos nucifera</i>
6,0 - 8,0	<i>Saccharum officinarum</i> , <i>Olea europea</i>
6,5 - 8,0	<i>Hordeum sativum</i> , <i>Beta vulgaris</i>
	(Fabacées)
4,5 - 6,5	<i>Lespedeza japonica</i>
5,0 - 6,0	<i>Lupinus hirsutus</i> , <i>Lupinus luteus</i>
5,0 - 6,5	<i>Vigna sinensis</i> , <i>Medicago denticulata</i>
5,2 - 7,0	<i>Vicia villosa</i>
5,3 - 6,6	<i>Arachis hypogea</i>
5,4 - 6,5	<i>Ornithopus sativus</i>
5,5 - 6,5	<i>Lespedeza striata</i>
5,5 - 7,0	<i>T. incarnatum</i> , <i>T. repens</i> , <i>Lupinus albus</i>
5,5 - 7,5	<i>Trifolium hybridum</i>
6,0 - 7,0	<i>Glycine maxima</i> (soja)
6,0 - 7,5	<i>T. pratense</i> , <i>Pisum sativum</i> , <i>T. alexandrinum</i>
6,2 - 7,8	<i>Medicago sativa</i>
6,5 - 7,5	<i>Melilotus alba</i> , <i>Melilotus officinalis</i>

2.2. Appauvrissement du sol en calcium et acidification

Ces deux termes sont souvent confondus, bien qu'ils n'aient pas nécessairement la même signification.

L'acidification est le résultat du remplacement des cations minéraux par des ions H^+ sur le complexe absorbant du sol.

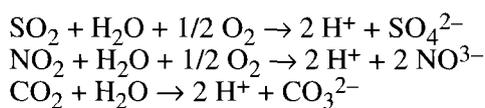
La décalcification est la perte d'ions Ca^{++} par le complexe, ions qui peuvent être remplacés par :

- des ions H^+ , avec modification de pH, acidification ;
- d'autres ions métalliques sans modification de pH.

En fait, les ions Ca^{++} étant en quantité relativement élevée, le plus souvent, la décalcification se traduit par une acidification, sauf s'il y a des réserves de Ca^{++} dans le sol.

Cette acidification est due à de nombreux facteurs dont le climat, principalement les précipitations ; l'eau de pluie contient, comme l'atmosphère, de faibles quantités des gaz carbonique, sulfureux et nitreux.

Cette acidification se déroule suivant une des réactions suivantes :



L'acidification est due aussi à la matière organique des sols et à sa décomposition. Ainsi, la minéralisation de l'azote, et surtout la nitrification, intervient d'une manière très active dans ce processus d'acidification.

Des pertes de calcium et de magnésium sont dues au lessivage des carbonates provoqués par le CO_2 et les acides organiques faibles excrétés par les plantes ou la matière organique du sol. Les pertes par lessivage des carbonates diffèrent suivant les types de sols et le climat.

Cumulées avec l'acidification, ces pertes peuvent s'élever, en région à drainage important, à environ :

- 200 - 300 kg CaO/(ha·an) en sols acides ;
- 300 - 400 kg CaO/(ha·an) en sols neutres, avec modification de pH ;
- 600 kg CaO/(ha·an) en sols calcaires, sans modification de pH.

Dans un sol cultivé, les pertes doivent aussi tenir compte des exportations par les récoltes ; celles-ci varient en fonction de l'espèce cultivée, des rendements exportés et de la richesse des sols.

Pour une céréale, les exportations par les grains et les pailles se situent à environ 50 kg de CaO par ha et par an pour un niveau de rendement de 5 tonnes de grain par ha ; elles peuvent atteindre 100 kg de CaO pour une betterave sucrière et jusque 300 kg par ha et par an pour une luzernière exploitée intensivement.

Enfin, certains engrais minéraux (en particulier les engrais ammoniacaux) ont une action décalcifiante.

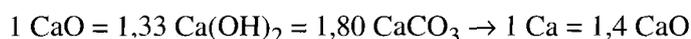
2.3. Les matières utilisables

De nombreux produits sont utilisables pour remédier à la décalcification des sols ou pour entretenir leur niveau en calcium.

2.3.1. Expression de la valeur des amendements

La valeur des amendements calcaires ou magnésiens dépend de leur teneur en CaO et/ou en MgO, de leur valeur neutralisante, de leur solubilité carbonique et de leur finesse de mouture.

On passe à la teneur en CaO par les relations suivantes :



La législation définit la valeur neutralisante comme le nombre indiquant la quantité, exprimée en ml, de HCl 0,357 N qui est neutralisée par 1 g de produit. L'oxyde de calcium pur (CaO) a ainsi une valeur de 100, celle des autres produits purs découle de leurs poids moléculaires respectifs (CaCO₃ pur : 56 ; Ca(OH)₂ pur : 75,7 ; MgO pur : 140).

La rapidité d'action dépendra de la solubilité carbonique (celle de CaO est plus élevée que celle de Ca(OH)₂, elle-même plus élevée que celle de CaCO₃) et de la finesse de mouture. Les normes de moutures seront donc plus sévères pour les carbonates.

2.3.2. Description des amendements

Chimiquement on peut classer ces produits en trois grandes catégories : les chaux vives (CaO et MgO), les chaux hydratées (Ca(OH)₂, Mg(OH)₂) et les carbonates ou produits crus (CaCO₃ et MgCO₃) ; il convient d'y ajouter des résidus industriels composés de ces différentes formes en proportion plus ou moins variable (écumes de sucrerie ou de papeterie, les cendrées de chaux...).

- Chaux vive (CaO) et chaux éteinte (Ca(OH)₂). Il s'agit essentiellement de chaux vive : plus de 80 % de CaO ; de chaux éteinte : de 50 à 70 % de CaO ; de cendres de chaux ; de chaux magnésienne (dolomies) : au moins 10 % de MgO.
- Calcaires (CaCO₃). Il s'agit essentiellement des calcaires broyés (58 % de CaO), des craies (environ 50 % CaO), des dolomies (au moins 17 % MgO), des marnes (minimum 25 % CaO), des dépôts marins (le maërl (40 % CaO + 4 % de MgO) et le trez, coquillages broyés).
- Résidus d'industrie. On trouvera essentiellement : écumes de sucreries (environ 40 % CaO) ; laitier de hauts fourneaux.
- Certains engrais minéraux jouent aussi un rôle d'amendement : les scories Thomas (environ 50 % CaO), les phosphates naturels, la cyanamide de chaux, le nitrate de chaux.

3. LES AMENDEMENTS ORGANIQUES

La matière organique est un constituant normal des sols où elle subit une série de transformations qui la font se décomposer, se transformer en humus, puis se minéraliser, sous l'action des micro-organismes et sous l'influence du milieu. L'apport

ou la restitution de matières organiques au sol constituent à la fois un “amendement” pour le sol et un apport alimentaire pour la plante.

3.1. Rôles de la matière organique dans la fertilité du sol

3.1.1. Action sur les propriétés physiques du sol

- **Structuration du sol.** L’humus permet d’obtenir la structure grumeleuse dans les sols légers aussi bien que dans les sols lourds, en raison des liaisons entre les grandes particules d’humus, les particules minérales, les matières adhésives produites par les micro-organismes du sol, les humates ou sels d’acides humiques ayant un effet stabilisant.

- **Maintien de la stabilité structurale.** La stabilité structurale est l’aptitude du sol à résister à la dégradation de leurs propriétés structurales lorsqu’agissent les agents destructeurs de cette structure ; ces agents destructeurs sont l’eau, le gel, certains travaux du sol, la compaction, etc. La structure obtenue à un moment donné a une plus grande stabilité lorsque le sol contient de la matière organique (fraîche ou humifiée) ; à cet égard, les différents types de matière organique utilisés ont des actions différentes :

- engrais vert = action nette mais de courte durée ;
- paille = effet plus prolongé ;
- fumier = action durable ;
- prairie = effet rapide et durable.

- **Action sur l’économie en eau.** L’humus améliore la capacité de rétention de l’eau dans les sols.

- **Amélioration de l’aération par la structuration du sol.**

- **Augmentation de la température du sol,** par un meilleur drainage et par la coloration foncée de la matière organique en cours d’humification.

3.1.2. Action sur les propriétés chimiques du sol

- **Augmentation de la capacité d’échange des sols.** La capacité d’échange de l’humus est plus élevée que celle de l’argile : il peut stocker en surface des ions nutritifs minéraux.

- **Contribution à la nutrition des plantes** par :

- la décomposition très rapide des matières organiques fraîches peu lignifiées ;
- la minéralisation lente de l’humus stable.

- **Maintien dans le sol d’un pH légèrement acide** favorable à l’assimilation des éléments minéraux.

- **Libération, par oxydation de l’humus, de gaz carbonique** qui accroît la solubilité de certains éléments nutritifs dans le sol et facilite leur utilisation par la plante, et qui est recyclé pour la photosynthèse.

- **Formation de complexes phospho-humiques** : du phosphore peut ainsi être maintenu sous forme assimilable malgré la présence de calcaire libre ou de fer libre.

- **Diminution de la rétrogradation du potassium.**

- **Amélioration de la pénétration des éléments fertilisants minéraux** à travers la membrane cellulaire des radicelles, d’où une meilleure utilisation des engrais minéraux par exemple.

3.1.3. Action sur les propriétés biologiques

La présence de matière organique jeune dans le sol est déterminante de la vie de la faune et de la flore des sols ; l'humus stable est moins favorable à leur prolifération.

De plus, l'humus libère des agents actifs de différents types, des sortes de substances de croissance, des inhibiteurs de croissance, des substances améliorant la résistance des plantes.

Au total donc, l'humus est un des agents de la capacité de production des sols : il améliore les conditions de vie pour la plante et lui permet de produire davantage.

3.2. Évolution de la matière organique et son renouvellement

3.2.1. Évolution de la matière organique dans le sol

Celle-ci peut se schématiser par les trois étapes suivantes :

- la décomposition des matières organiques jeunes,
- l'humification,
- la minéralisation.

Ces différentes étapes sont étudiées par ailleurs de manière approfondie (chapitre 5). On se limite ici à quelques mots de rappel.

- Décomposition de la matière organique jeune en sucres, amidon, cellulose, lignine, protéines et autres composés, y compris des matières minérales.
- Humification : phase de synthèse résultant de l'action d'agents physiques et biologiques qui provoquent l'apparition de types d'humus différents (voir 3.1).
- Minéralisation : phase de décomposition lente, progressive, continue sous l'action des micro-organismes.

La proportion du stock total d'humus minéralisé, donc détruit, au cours d'une année est donné par un **coefficient de minéralisation** parfois désigné par K_2 . Ce coefficient K_2 est fonction essentiellement du climat et du type de sol. Il varie de 1 à 2 % dans les sols normaux des régions tempérées, mais peut être beaucoup plus élevé dans certaines conditions de températures et d'humidité élevées au niveau du sol.

3.2.2. Rendement en humus des matières organiques enfouies

La quantité d'humus fournie varie suivant le type de matières organiques enfouies. A cet égard, le rapport C/N est une caractéristique importante de la matière organique. Un humus stable a un rapport C/N d'environ 10 à 15. Les matières organiques animales (muscle, graisse, sang...) ne contiennent pas de lignine, donc ne produisent pas d'humus.

Les matières à C/N faibles produisent peu d'humus, mais leur décomposition et la libération de l'azote qu'elles contiennent sont rapides.

Les matières à C/N fort, compris entre 15 et 30 par exemple, permettent une bonne humification, les micro-organismes trouvent suffisamment d'azote dans les matières organiques enfouies.

Les matières à C/N très élevé, supérieur à 30, sont capables de donner de très fortes

quantités d'humus, à condition que les micro-organismes puissent trouver ailleurs un complément d'azote minéral (pré-existant dans le sol ou apporté par une fumure minérale).

Le **coefficient iso-humique** K_1 définit la proportion d'humus relativement au poids sec de la matière organique.

Les valeurs indicatives du C/N, de la matière sèche et du K_1 de quelques matières organiques sont données dans le tableau 16.2.

Tableau 16.2. Valeurs indicatives de quelques caractéristiques de matières organiques utilisées en agriculture

Matière organique	C/N	Matière sèche	K_1	Quantité d'humus
Pailles et chaumes de céréales sans engrais azoté	80-100	90 %	0,11	100 kg/t
avec engrais azoté			0,22	200 kg/t
Luzeerne (2 à 3 ans)	10	24 %	0,25	
Engrais vert jeune		15 %	0,10	15 kg/t
Prairie (vieille)		22 %		20 kg/t
Fumier bien décomposé	20-25	20 %	0,50	100 kg/t
Fumier pailleux	30	25 %	0,30	75 kg/t

3.3. Les amendements humifères ou les sources de matières organiques restituables au sol

Dans un sol cultivé, entre 300 et 1 000 kg d'humus sont détruits chaque année par la minéralisation. Simultanément, la matière organique jeune disparaît du fait de prélèvements par les plantes ou de formation d'humus stable.

Afin de maintenir le "statut" organique et humique du sol, l'agriculteur dispose essentiellement des ressources suivantes :

- les effluents d'élevage : les fumiers, purins et lisiers ;
- les résidus de cultures, c'est-à-dire pailles et résidus non pailleux ;
- les engrais verts ;
- les prairies ;
- les composts ;
- de nombreux résidus de l'activité industrielle ou humaine : les gadoues de ville et les boues résiduaires de stations d'épuration des eaux.

3.3.1. Le fumier de ferme

• **Définition et composition.** Le fumier est constitué par un mélange de litière et de déjections animales ayant subi des fermentations plus ou moins poussées en étable et en tas. La composition varie dans de très larges limites suivant :

- la nature et la proportion des matières premières en présence (litières, excréments) ;
- la façon dont les fermentations ont été menées ;
- les soins d'entretien apportés de manière à éviter les pertes.

Composition des excréments. La composition des excréments varie suivant :

- l'espèce animale,
- l'âge et la production des animaux,
- le régime alimentaire de ceux-ci.

Tableau 16.3. Composition des excréments.

Espèces	Excréments	MS en %	N en % de la matière fraîche	P ₂ O ₅	K ₂ O
Cheval	solide	30	5	3	4
	liquide	10	15	0	10
Bovin	solide	1	7	4	22
	liquide	8	9	0	12
Mouton	solide	44	8	4	5
	liquide	13	12	4	12
Porc	solide	23	4	3	3
	liquide	4	5	1	6
Volaille		25	14	11	5

Le régime alimentaire des animaux peut avoir une influence profonde :

- 40 à 50 % de la matière organique et de l'azote ingérés se retrouvent dans les excréments ;
- 60 à 80 % du P₂O₅ et du K₂O s'y retrouvent aussi ;
- si les aliments contiennent une forte proportion de matières non digestibles (protéines peu digestibles, par exemple), celles-ci se retrouvent dans les excréments ;
- si les aliments ont une déficience en un quelconque des éléments minéraux, le fumier qui en résultera aura la même déficience et ne pourra donc servir à améliorer l'état de fertilité du sol à ce point de vue.

Composition du fumier de bovins. En moyenne :

- 1 tonne de fumier frais donne 100 kg d'humus ;
- 10 à 20 % de l'azote sont sous forme rapidement assimilable par la plante.

• **Utilisation du fumier.** Les apports d'amendements humigènes devraient se faire régulièrement, idéalement tous les ans. Dans la pratique, ils sont effectués tous les trois à six ans. En général, l'apport de fumier est réservé aux terres destinées aux cultures sarclées : betteraves, pomme de terre, maïs, crucifères, tournesol, plutôt qu'aux céréales.

Le plus souvent, les apports de fumier sont de l'ordre d'au moins 10 t/ha (quantité minimale apte à être épandue de manière régulière) à 60 t/ha (quantité maximale pouvant être réellement utilisée par

les cultures sans pertes diverses). Il est recommandé d'incorporer au sol de suite après l'épandage de manière à éviter les pertes (volatilisation de NH₃, décomposi-

Tableau 16.4. Composition moyenne du fumier de bovins contenant de 20 à 25 % de matière sèche.

Éléments	Teneurs par tonne de matière fraîche
Azote	4,0 kg
P ₂ O ₅	2,5 kg
K ₂ O	5,5 kg
CaO	5,0 kg
MgO	2,0 kg
S	0,5 kg
Mn	40 g
Bo	4 g
Cu	2 g

tion à l'air libre avec pertes de CO_2 au détriment de la formation d'humus). Il faut incorporer le fumier au sol plutôt que l'enfouir profondément ; en anaérobie, le fumier ne se décompose pas, ne se minéralise pas en aliments utiles à la plante et constitue une sorte de "discontinuité" dans l'horizon exploré par les racines, avec des risques d'intoxication et d'asphyxie pour la plante.

3.3.2. Le purin

On appelle "purin" l'ensemble des liquides s'écoulant des litières ou des fumières. C'est un produit très fermentescible, qui doit être rapidement mis à l'abri et conservé dans une fosse étanche, à l'abri de l'air, sous peine de voir se perdre une partie de l'azote qu'il contient (urée \rightarrow aérobie \rightarrow NH_3 qui se volatilise).

Sa composition est très variable ; en moyenne, 1 m^3 contient 1,5 kg à 2,5 kg d'azote ; 0,25 à 0,50 kg de P_2O_5 ; 4 à 6 kg de K_2O ; un peu de matière organique en suspension et des hormones qui exerceraient une action stimulante sur la croissance racinaire.

La pauvreté en phosphore peut être compensée par l'addition de superphosphate en étable ou à la fosse, qui permet en outre de fixer l'ammoniac NH_3 .

Le purin est plus un "engrais" qu'un amendement humigène (pas de matière organique apte à donner de l'humus) ; il est essentiellement utilisé :

- en application sur prairie ;
- en mélange à l'eau d'irrigation de certaines cultures (1 part de purin pour 10 à 20 parts d'eau) ;
- en application sur cultures, avec des enfouisseurs (sinon pertes par volatilisation).

3.3.3. Le lisier

On appelle "lisier" le mélange de déjections liquides et solides et d'eau, avec un minimum de litière (stabulation sans litière).

Un bovin adulte produit 1,3 à 1,8 m^3 de lisier par mois.

La composition des lisiers est variable et est approximativement la suivante :

- bovins : MS = 9 % ; 3 kg de N, 2 kg de P_2O_5 et 5 kg de K_2O par tonne de lisier frais ;
- porcins : MS = 11 % ; 6 kg de N, 4 kg de P_2O_5 et 6 kg de K_2O par tonne de lisier frais.

L'utilisation du lisier est très semblable à celle du purin ; son application nécessite des épandeurs de grandes largeurs (10-20 m). Il y a des problèmes de surproduction de lisier en certaines régions, avec difficultés d'évacuation (concentration de l'élevage industriel).

3.3.4. Les résidus de récolte

Ce sont les déchets organiques laissés sur le sol après l'enlèvement d'une récolte (feuilles, tiges, racines, etc.). On en distingue deux types : les résidus pailleux et les non pailleux, dont les valeurs indicatives sont données dans le tableau 16.5.

Certaines cultures laissent donc des résidus capables de compenser en moyenne les pertes d'humus consécutives à la minéralisation (voir 3.2).

Tableau 16.5. Valeurs des résidus de récolte.

Résidus	MS en kg/ha	Humus formé en kg/ha/an
Pailleux* :		
Blé-chaumes	3 - 4	450 à 600
Blé-paille	4 - 6	600 à 900
Orge-chaumes	2 - 3	300 à 450
Mais-tiges	8 - 10	1 200 à 1 500
Colza-tiges	≈ 8	≈ 1 500
Non pailleux :		
Verts de betteraves	4 - 6	600 à 800
Fanes de pommes de terre	1	moins de 100
Crucifère enfouie jeune	3	100
Luzerne deux ans	8 - 10	800 à 1 000
Prairie temporaire trois ans	15 à 18	750 à 900
Vieille prairie (+ de 10 ans)		10 à 20 t

* L'application d'azote minéral peut faire varier ces valeurs.

Les résidus pailleux permettent, s'ils ne sont pas utilisés comme alimentation animale ou litière (fumier), de restituer au sol de grandes quantités d'humus à conditions de réduire leur C/N par apport d'un peu d'azote, afin de :

- éviter leur effet dépressif sur la culture suivante par mobilisation de l'azote pour l'humification des pailles ;
- augmenter la quantité totale d'humus formé.

A cet effet, on réalise les opérations suivantes :

- hacher les pailles ;
- épandre 6 à 12 kg d'azote par tonne de paille (engrais liquide ou éventuellement par apport de lisier ou purin par exemple) ;
- incorporer le tout au sol.

3.3.5. Les engrais verts

On appelle "engrais verts" des cultures de plantes à croissance rapide destinées à être enfouies pour améliorer les propriétés physiques et chimiques du sol et l'enrichir en humus. On leur reconnaît plusieurs rôles :

- amélioration de la structure du sol par leur enracinement et protection de cette structure contre la dépréciation due aux eaux de précipitations ;
- contribution à la maturation des plantes :
 - par diminution du lessivage des éléments nutritifs solubles (azote nitrique par exemple) ;
 - par libération de matières minérales par décomposition ;
 - par remontée et restitution dans la zone superficielle de K_2O et P_2O_5 puisés dans les couches profondes ;
- éventuellement, en cas de besoin, production fourragère de secours.

En fait, ces cultures sont de très faibles productrices d'humus, mais la matière organique fraîche produite est très efficace pour l'amélioration de la fertilité chimique du sol et pour l'accroissement de son activité microbiologique.

Une culture d'engrais vert évapotranspire environ 150 à 200 mm d'eau de plus qu'un sol nu en conditions moyennes. Dans certaines régions, la culture suivante peut être gênée dans son développement par manque d'eau. Il y a donc lieu d'être prudent dans l'installation de ces cultures là où l'eau peut être un facteur limitant des rendements.

3.3.6. La prairie

Il est difficile d'évaluer la quantité d'humus produite par une prairie. Pour une prairie temporaire (3 ans), cette quantité est de 750 à 900 kg ; pour des prairies établies depuis plus longtemps, la valeur humus est d'au moins 1 000 kg par hectare, mais peut être beaucoup plus élevée (2 500 kg par hectare).

La prairie peut être simplement labourée ; il faut alors éviter le "placage" de l'herbe au fond de la raie.

3.3.7. Les composts

Le compostage est le traitement de nombreuses matières végétales ou animales en vue de faire démarrer en milieu normalement anaérobie une fermentation aérobie en atmosphère confinée dont l'effet sera la prolifération de micro-organismes avec réorganisation de matières minérales dont l'azote nitrique et ammoniacal.

- De nombreuses matières peuvent être compostées :
 - des déchets végétaux : fumiers, pailles, résidus de récoltes, foin, broussailles ;
 - des déchets d'industries : résidus de scieries, écorces, marcs, pulpes diverses, ... ;
 - des résidus urbains, gadoues de ville, ordures ménagères triées, ... ;
 - des résidus d'origine animale, riches en matières minérales qui peuvent être ajoutés à des matières végétales riches en carbone.
- Le compostage se fait en deux phases :
 - une phase d'imprégnation, d'imbibition par l'eau, avec un tassement ; les conditions sont aérobies ;
 - une phase de fermentation aérobie, ou compostage proprement dit, réalisée par l'ouverture du tas à composter, parfois broyage des matières et éventuellement addition de certaines substances activatrices (minéraux, calcium, phosphore, cultures de bactéries, ...) et parfois d'eau pour éviter un dessèchement trop important.
- Les conditions nécessaires à la réussite d'un compost sont les conditions favorables à une bonne humification ; ce sont :
 - la présence de matières carbonées et azotées : la décomposition est optimale pour des C/N de 30 à 50 ;
 - l'eau qui doit être présente pendant tout le compostage mais jamais en excès afin d'éviter l'anaérobie ;
 - l'air dont la présence doit maintenir l'aérobie, mais l'atmosphère doit rester "confinée" ;
 - des ferments qui peuvent être apportés par de la terre, par un ancien compost, par du fumier ou par des préparations commerciales d'activateurs microbiens ;
 - une base faible afin de favoriser la formation d'acides humiques flocculés à grosses molécules et de maintenir un pH optimum pour les bactéries ; on utilise généralement des carbonates (calcaires, dolomie, etc.) ;
 - de la terre pour provoquer une formation de complexe argilo-humique et éventuellement d'apporter des ferments bactériens nécessaires ;
 - un abri contre le soleil, les pluies excessives et les variations brutales de température ; cet abri peut être une couverture de paille, de déchets végétaux, de terre ou une toiture.

Tableau 16.6. Composition de quelques composts.

Compost	C/N	N % de la matière sèche	P	K
Broussailles	18	1,5	0,46	0,89
Ménager + jardin	17	0,38	0,7	1,5
Lemaire-Boucher (fumier)	14	1,34	1,5	2,3
Compost L.B	12	2,57	1,6	4,6
Fumier	15	1,31	1,1	1,5

4. LA FERTILISATION AZOTÉE

4.1. Rôles agronomiques de l'azote

L'élément azote est le facteur principal de la croissance des plantes et du rendement des cultures. Il favorise la croissance végétative, accentue la coloration verte liée à l'abondance de la chlorophylle, augmente la densité foliaire des couverts végétaux. Il tend à prolonger la durée du fonctionnement des organes verts, à retarder la sénescence et la maturation ; il contribue souvent à un affaiblissement des résistances mécaniques de la plante (verse des céréales) et à leur conférer une plus grande sensibilité à certaines maladies cryptogamiques.

4.2. Comportement de l'azote dans les sols

Dans les sols, l'azote se trouve présent sous trois formes principales : les formes organique, ammoniacale et nitrique.

- **L'azote organique, forme de réserve azotée du sol.** La matière organique des sols, présente le plus souvent pour environ 1 à 4 % de la masse du sol sec (environ 4 000 tonnes de terre par hectare sur une profondeur de 30 cm) contient en moyenne près de 5 % d'azote. Ceci correspond à environ 2 000 à 8 000 kg d'azote par hectare de sol agricole, azote présent sous forme organique non utilisable directement par la plante cultivée mais qui, par minéralisation, se transformera en formes minérales ammoniacale et nitrique. Le rythme de ces minéralisations varie suivant la nature de la matière organique et de l'humus présent dans le sol, suivant le climat (température et humidité du sol), suivant les conditions physico-chimiques qui influencent la vie microbienne elle-même responsable de la minéralisation. En moyenne, on peut compter des rythmes de minéralisation de l'ordre de 1 à 10 % de la masse totale de la matière organique dosée dans le sol, donc des libérations annuelles de l'ordre de 20 à 800 kg d'azote minéral par ha et par an, le plus souvent de 40 à 240 kg N.

- **L'azote ammoniacal.** Il s'agit d'une forme minérale, souvent transitoire, soluble dans l'eau, utilisable par la plante et bien retenue par le pouvoir absorbant du sol. Provenant de la minéralisation de la matière organique ou d'un apport d'engrais organique ou ammoniacal, l'ion NH_4^+ est transformé rapidement en azote nitrique NO_3^- . Les teneurs en azote ammoniacal dans le sol sont souvent assez faibles sauf dans les

couches profondes peu aérées ou dans les sols froids lorsque l'activité microbienne est ralentie ou inhibée.

- **L'azote nitrique.** Il s'agit de la forme minérale la plus oxydée ; très soluble dans l'eau, elle est facilement absorbée par la plante et mal retenue par le complexe absorbant du sol, donc mobile avec l'eau du sol.

L'azote nitrique va ainsi pouvoir subir un lessivage, un entraînement en profondeur, dans les périodes de drainage des eaux ; c'est surtout le cas en période hivernale avec forte pluviométrie et faible évapotranspiration. A l'opposé, en périodes sèches, l'azote nitrique est susceptible de remonter par capillarité jusqu'à la surface ou dans les couches superficielles du sol.

4.3. Comportement de l'azote en relation avec la nutrition des plantes

La plante absorbe préférentiellement l'ion NO_3^- , et ce de manière mal contrôlée. Si l'ion NO_3^- est présent en grande quantité dans la solution du sol, l'absorption par la plante peut être excessive par rapport à ses besoins réels, avec les conséquences négatives citées plus haut (fragilité des tissus, retard de végétation, ...). En cas d'absorption très excessive, il peut même s'avérer que les processus de réduction vers les formes hydroxylamine et acides aminés ne puissent se réaliser et que des formes oxydées – nitrates ou nitrites – s'accumulent dans la plante avec des risques d'intoxication pour le consommateur animal ou humain.

4.4. Complexité de la fertilisation azotée

Ces différents éléments rendent évidente la complexité de la fertilisation azotée. Si les besoins de la plante peuvent être connus, ce qui n'est pas toujours simple, il faut alors pouvoir estimer les quantités et le rythme de libération d'azote minéral à partir de la matière organique, afin de pouvoir déduire les quantités qui devront être apportées par les engrais minéraux et le calendrier de ces apports.

En matière d'alimentation azotée, le sol ne joue pas un rôle "régulateur" aussi marqué que celui qu'il joue pour la plupart des autres éléments. Ceci signifie que tout manque d'azote minéral dans le sol lors d'une période de besoins manifestés par la plante va se traduire par une perte de croissance et généralement de potentiel de rendement. A l'inverse, toute présence excessive a pour conséquences une absorption trop importante par la plante, avec des effets néfastes sur le rendement ensuite, un accroissement des risques de perte de l'élément, soit par lessivage (sous forme de NO_3) soit par volatilisation vers l'atmosphère (sous forme de NH_3 ou NO_2).

La détermination correcte des besoins en fertilisants passe donc par plusieurs étapes.

- **Évaluation des besoins totaux en azote.** Les besoins en azote des cultures seront fonction de leur potentiel de rendement : il est donc important d'en avoir une idée relativement précise de manière à ne pas surfertiliser les cultures à faible potentiel (par exemple des cultures risquant de souffrir de manque d'eau) ou à ne pas sous-fertiliser les cultures à haut potentiel capable de s'exprimer uniquement en présence d'une alimentation azotée suffisante.

Par exemple, les besoins totaux d'une céréale ayant un rendement de 4 t/ha sont de l'ordre de 120 kg N, alors que pour un rendement de 9 t ils sont d'environ 250 kg N.

• **Évaluation des fournitures par le sol.** Le sol peut fournir :

- les restes de fumure azotée non utilisés par la culture précédente ;
- l'azote provenant de la décomposition des matières organiques fraîches (résidus de culture de type paille, fanes de légumineuses, fumiers, composts, ...)
- l'azote provenant de la minéralisation des matières organiques humifiées.

• **Évaluation des possibilités de récupération de l'azote par le système racinaire.** L'azote minéral présent dans le sol peut être distribué à différentes profondeurs, en particulier du fait du lessivage. Il pourra être récupéré par la plante en fonction de la croissance en profondeur du système racinaire.

• **La fumure azotée minérale.** Elle est déterminée, pour chaque phase du cycle de développement de la culture, par comparaison entre les besoins, d'une part, et les disponibilités accessibles, d'autre part. Sur le plan pratique la fumure azotée sera ainsi souvent apportée en différentes doses, ou fractions, appliquées au cours des étapes successives de la croissance d'une culture.

4.5. Les engrais azotés

L'ensemble des engrais minéraux azotés est préparé à partir de deux produits de base, synthétisés en usine : l'ammoniac et l'acide nitrique.

La synthèse de l'ammoniac consiste à mettre en présence et forcer à réagir l'azote (N_2) de l'air et l'hydrogène (H_2), originaire de H_2O et de CH_4 ou de matières semblables (hydrocarbures). L'opération de synthèse doit être précédée d'une phase de préparation des deux gaz, N_2 et H_2 , consommatrice d'énergie fossile (hydrocarbures). La synthèse elle-même ne peut être réalisée que sous des conditions de pressions et de températures élevées. Globalement il faut environ deux litres de fuel par kg d'azote fixé sous forme de NH_3 .

Le NH_3 ainsi synthétisé pourra soit servir directement d'engrais fluide gazeux, soit être utilisé pour la préparation d'engrais ammoniacaux ou d'acide nitrique.

Les **engrais ammoniacaux** sont :

- les solutions ammoniacales, titrant de 20 à 40 % d'azote ;
- le chlorure ammonique (NH_4Cl) ;
- le sulfate ammonique ($(NH_4)_2SO_4$) ;
- les phosphates d'ammoniaque, le phosphate ammonique $NH_4H_2PO_4$ titrant 12% de N et 50 % de P_2O_5 et le phosphate diammonique $(NH_4)_2HPO_4$.

L'acide nitrique peut être préparé par oxydation de l'ammoniac ou encore d'une autre manière : on force à réagir, par émission d'un arc électrique, l'azote (N_2) et l'oxygène (O_2) de l'air. Ce procédé est intéressant lorsqu'on dispose d'énergie électrique peu coûteuse (énergie hydro-électrique).

L'acide nitrique servira de base à la préparation des **engrais nitriques**, principalement :

- le nitrate de calcium (ou de chaux), $Ca(NO_3)_2$, titre 16 % N ;
- le nitrate de sodium (ou de soude), $NaNO_3$, titre 16 à 18 % N ;
- le nitrate de potassium, KNO_3 , titre 14 % N, 46 % K_2O .

L'acide nitrique et l'ammoniac peuvent donner ensemble les engrais appelés ammonitrates, contenant essentiellement NH_4NO_3 , le nitrate ammonique, sel explosif, inflammable et hygroscopique, auquel on a ajouté une plus ou moins grande proportion de matières de charge capable de remédier à ces propriétés négatives. Ainsi, on trouve des ammonitrates à faible dosage (moins de 22 % de N), à moyen dosage (autour de 26 % de N) et à haut dosage (33 à 35 % de N).

Enfin parmi les principaux engrais azotés, il faut citer l'urée, $\text{NH}_2 - \text{CO} - \text{NH}_2$, titrant 46 % N et fabriquée à partir d'ammoniaque et de CO_2 .

De plus, il est possible de préparer, en particulier à partir de l'urée, des molécules organiques plus complexes contenant de l'azote et qui constituent des "engrais organiques azotés de synthèse", à partir desquels la libération d'azote sous des formes assimilables (NO_3^- ou NH_4^+) se fait généralement de manière lente et progressive.

5. FERTILISATION PHOSPHATÉE ET POTASSIQUE

5.1. Rôles et comportement du phosphore

La teneur des végétaux en P_2O_5 est de 0,5 à 1 % de la matière sèche. Sur le plan agricole, le phosphore est pour la plante un facteur de croissance, comme l'azote ; son action est importante dans les stades jeunes et se marquent en particulier sur le développement du système racinaire. Le phosphore est un facteur de précocité, opposé en cela à l'azote ; il raccourcit la durée du cycle végétatif et accélère la maturation. Il accroît la résistance au froid, aux maladies, au stress hydrique. De plus, c'est un facteur de qualité par l'augmentation des teneurs en phosphore des aliments qui détermine en partie leur intérêt pour l'animal et pour l'homme.

Dans le sol, de grandes quantités de phosphore peuvent être présentes, mais en général, seulement une faible partie d'entre elles sont sous des formes assimilables par la plante.

Les plantes prélèvent dans la solution du sol sous forme d'ions H_2PO_4^- , accessoirement sous forme HPO_4^{2-} .

Compte tenu du fait que le phosphore est relativement peu mobile dans le sol, la fourniture des ions nutritifs doit être assurée à proximité immédiate des racines actives. Ainsi, dans certains cas, la localisation d'engrais phosphatés solubles à proximité immédiate des jeunes plantes peut s'avérer intéressante.

5.2. Les engrais phosphatés

Le titre des engrais phosphatés est exprimé en leur teneur en équivalents de P_2O_5 qu'ils contiendraient. Pour passer de la teneur en P_2O_5 à celle en P, on divise par 2,3 (ou on multiplie par 0,44).

Les sources d'engrais phosphatés sont essentiellement constituées par les gisements de phosphates localisés en différentes régions du globe (Afrique du Nord, Sénégal, Floride,...).

Ces minerais, le plus souvent de l'apatite, contiennent le P sous la forme $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (phosphate tricalcique), sel insoluble dans l'eau et soluble seulement dans les acides forts. Des traitements industriels, mettant en œuvre, le plus souvent, les acides minéraux industriels (HCl , H_2SO_4 , HNO_3 et H_3PO_4) vont avoir pour objectif de rendre plus soluble la combinaison contenant le phosphore, en provoquant la formation de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, ou phosphate monocalcique, sel soluble dans l'eau, ou au moins de CaHPO_4 , phosphate bicalcique, soluble dans les acides faibles.

Ainsi, la valeur d'un engrais phosphaté minéral sera fonction :

- de son **titre en phosphore**, exprimé par sa teneur en P_2O_5 ;
- de sa **solubilité**, donc de la forme sous laquelle le P est contenu dans l'engrais. On distingue, par ordre décroissant de solubilité :
 - les superphosphates : engrais qui contiennent le P sous la forme soluble dans l'eau $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$; ils titrent entre 18 % P_2O_5 (super-simple) et 44 % P_2O_5 ; les phosphates monoammoniques (11-50-0) et diammoniques (18-50-0) ;
 - les phosphates bicalciques, contenant P sous la forme CaHPO_4 soluble dans les acides faibles ;
 - les phosphates tricalciques, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ insolubles dans l'eau, peu solubles dans les acides faibles et solubles seulement dans les acides forts ;
- de sa **présentation physique** (qualité des granules, leur calibre et résistance à la friabilité, engrais liquide, ...).

5.3. Rôles et comportement du potassium

Le potassium entre environ pour 3 % dans la constitution de la matière sèche des plantes. Très mobile dans la plante, il migre des organes âgés vers les plus jeunes. Il intervient principalement dans la synthèse des hydrates de carbone, leur migration et leur stockage. Sur le plan agricole, c'est un facteur de résistance au stress hydrique, au froid, au gel, aux maladies cryptogamiques.

Dans le sol, le potassium se trouve souvent en grande quantité dans la roche mère, dans les argiles où il n'est que peu utilisable par les plantes. Le potassium utilisable se trouve en surface sur les particules d'argile et d'humus, d'où il peut passer dans la solution du sol et servir de nutriment pour la plante.

Ainsi les méthodes d'analyse auront pour objectif de déterminer les teneurs en K_2O échangeables, c'est-à-dire réellement disponibles pour les plantes.

5.4. Les engrais potassiques

Les sels de potassium existent en larges quantités, soit à la surface du globe, cristallisables à partir des eaux saumâtres où ils sont en solution avec d'autres sels (lacs salés, mers intérieures) ou surtout en gisements salins présents dans de nombreuses régions.

La richesse en potassium des engrais potassiques s'exprime par leur teneur en K_2O . On passe de la teneur en K_2O à celle en K par un coefficient de 1,2.

Les formes existantes ou préparées industriellement sont le KCl ou chlorure de potassium (entre 60 % K_2O et 40 % K_2O suivant la pureté en KCl, celui-ci étant souvent accompagné de NaCl, le K_2SO_4 ou sulfate de potassium (50 % K_2O), le

KNO_3 ou nitrate de potassium (13 % N, 45 % K_2O), les mélanges et les sels complexes de K, Mg et Na principalement avec les ions chlorures et sulfates.

La valeur d'un engrais potassique est fonction :

- de sa teneur en potassium exprimée par son titre en K_2O ;
- de l'ion accompagnant le potassium :
 - le chlore du KCl est peu apprécié en agriculture : certaines plantes ne le supportent pas ; d'une manière générale, il contribue à accroître la salinité, à inhiber la germination et la croissance ;
 - l'ion sulfate est plus apprécié : utile à l'alimentation de la plante en soufre, exigé en fortes quantités par certaines cultures il ne s'accumule pas de manière aussi importante dans le sol que le Cl^- ;
 - l'ion nitrate est évidemment apprécié par l'azote qu'il contient sous forme directement assimilable ;
- des autres sels éventuellement présents : le NaCl est défavorable, le MgSO_4 est utile dans l'alimentation en S et en magnésium ;
- de la qualité de la formulation ou présentation physique.

5.5. Principes des fertilisations phosphatées et potassiques

Pour ces deux éléments, la fertilisation raisonnée repose sur la connaissance, au moins approximative, des teneurs des sols en P_2O_5 et en K_2O assimilables. Ces teneurs peuvent être déterminées par prélèvement de sol et analyses, en prenant soin d'utiliser les méthodes d'analyses adaptées à la nature des sols, en particulier, leur texture et la présence de calcaire. En fonction des résultats d'analyse, les sols pourront être considérés comme bien pourvus ou pauvres dans les éléments considérés.

Dans le cas où les sols sont bien pourvus, la fertilisation consistera en une **fumure d'entretien** du niveau de fertilité P ou K constaté. Il suffira alors de tenir compte des quantités exportées par les récoltes et perdues par les insolubilisations ou le lessivage, de les comparer aux restitutions, entre autres, contenues dans les matières organiques apportées au sol et d'en déduire, par différence, les quantités qui doivent être apportées par les engrais minéraux. Ces calculs peuvent être effectués pour chaque culture, et la fumure apportée au début de chaque saison culturale.

Dans le cas où le sol est pauvre dans l'élément considéré, une **fumure de redressement** devra être effectuée. Elle aura pour objectif d'accroître, de manière très progressive, les teneurs des sols en éléments déficients. Notons qu'il existe des situations dans lesquelles cet objectif ne peut être atteint et où seule une fertilisation apportant régulièrement des quantités faibles de l'élément sous une forme assimilable s'avère justifiée.

6. SCHÉMA GÉNÉRAL DE RAISONNEMENT DE LA FERTILISATION

La fertilisation raisonnée passe prioritairement par l'amélioration ou l'entretien des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. En particulier l'utilisation des amendements minéraux, là où ils s'avèrent nécessaires, et celle des amendements organiques, indispensables dans presque toutes les situations, sont les bases

de toute fertilisation. Ce n'est que dans ces conditions que l'utilisation des engrais minéraux, considérés comme des sources complémentaires d'éléments nutritifs, donnera les meilleurs résultats et trouvera sa pleine justification.

BIBLIOGRAPHIE

- Bockman O. Chr., Kaarstad O., Lie O. H., Richards I. (1990), *Agriculture and fertilizers. Fertilizers in perspective*, Agricultural Group, Norsk Hydro a.s, Oslo, Norvège.
- Finck A. (1982), *Fertilizers and fertilization : Introduction and Practical Guide to Crop Fertilization*, Verlag Chemie, Weinheim Deerfield Beach, Florida, Basel.
- Gros A. (1967), *Engrais : guide pratique de la fertilisation*, La Maison Rustique, Paris, 4^e édition.
- International Fertilizer Industry Association (1992), *IFA Word Fertilizer Use Manual*, Paris, 632 p.
- Mengel K. and Kirkby E.A. (1987), *Principles of plant nutrition*, 4^e édition, International Potash Institute, Bern, Suisse.

Chapitre 17

PROTECTION DES CULTURES

Jean Semal¹, Mohamed Besri², Philippe Lepoivre¹

1. Faculté des sciences agronomiques, Gembloux, Belgique
2. Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc

Sommaire

1. Les facteurs d'altération des cultures

- 1.1. Les causes d'altération
- 1.2. Les symptômes et leur étiologie
- 1.3. Les dégâts et les pertes
- 1.4. La protection des plantes en relation avec le contexte socio-économique

2. Méthodes de lutte contre les facteurs altérogènes

- 2.1. Les bases épidémiologiques de la lutte contre les ennemis des cultures
- 2.2. Méthodes de lutte contre les facteurs altérogènes
- 2.3. La lutte culturale
- 2.4. La lutte biologique
- 2.5. La lutte génétique
- 2.6. La lutte chimique
- 2.7. La lutte physique
- 2.8. La lutte intégrée
- 2.9. La quarantaine et les règlements phytosanitaires
- 2.10. La protection des produits stockés

3. Les problèmes actuels en protection des cultures

- 3.1. La permanence des problèmes phytosanitaires
- 3.2. Les progrès à réaliser en protection des cultures
- 3.3. Les perspectives des nouvelles technologies

Bibliographie

PROTECTION DES CULTURES

1. LES FACTEURS D'ALTÉRATION DES CULTURES

Les cultures sont menacées en permanence par des **facteurs altérogènes** susceptibles de déprécier la valeur des productions en quantité et en qualité. Les altérations peuvent concerner (1) les cultures sur pied aux différentes phases de leur développement, (2) les produits de la récolte (grains, fruits, légumes, tubercules, bois, etc.), pendant leur transport ou leur conservation et (3) le potentiel de production par érosion, salinisation, acidification, sécheresse, accumulation de germes ou de ravageurs, altération des cultures pérennes.

1.1. Les causes d'altération

1.1.1. Maladies non parasitaires

Nombre d'altérations résultant d'une inadéquation des conditions écologiques *sensu lato* sont dites non parasitaires, les causes correspondantes étant de nature **abiotique** (tableau 17.1). Les maladies non parasitaires sont non infectieuses et non transmissibles.

Tableau 17.1. Principales causes des maladies non parasitaires

Facteurs climatiques <ul style="list-style-type: none">• Excès thermiques : températures trop basses ou trop élevées• Excès hydriques : sécheresse, inondations• Conditions météorologiques : vent, orage, grêle, etc.
Facteurs édaphiques <ul style="list-style-type: none">• Nutrition minérale : carences, déséquilibres ioniques• Réaction du sol : acidité, alcalinité• Salinisation• Érosion de la couche arable
Facteurs de pollution <ul style="list-style-type: none">• Pollution de l'air : SO₂, ozone, etc.• Pollution de l'eau : pesticides, etc.• Pollution du sol : nitrates, pesticides, métaux lourds, etc.

1.1.2. Maladies parasitaires et ravageurs

Il existe une grande diversité de maladies **parasitaires** causées par l'action d'agents pathogènes (virus, bactéries, mycoplasmes, champignons, phanérogames, tableau 17.2) qui se développent aux dépens d'un végétal vivant. Ces parasites sont généralement **infectieux** (ils envahissent l'hôte et s'y multiplient) et **contagieux** (ils se transmettent d'une plante infectée à une plante saine).

Tableau 17.2. Classification des ennemis des cultures

Règne		Groupe	Ravageurs ou parasites
Animal	Invertébrés	Némathelminthes	Nématodes
		Mollusques	Gastéropodes (escargots, limaces, ...)
		Arthropodes	Insectes, acariens
	Vertébrés	Oiseaux	Moineaux, étourneaux
		Mammifères	Meriones, surmulot, rat noir
Végétal	Phanérogames	Dicotylédones	Cuscutacées : <i>Cuscuta</i>
Convolvulacées			
Orobanchacées <i>Orobanche</i>			
Scrophulariacées <i>Striga</i>			
Loranthacées : <i>Arceuthobium</i> , <i>Phoradendron</i> <i>Viscum</i>			
Microbien	Eucaryotes	Champignons	Archimycètes
			Phycomycètes
	Ascomycètes		
	Basidiomycètes		
	Deutéromycètes		
		Agonomycètes	
		Protozoaires	<i>Phytomonas</i>
	Procaryotes	Bactéries	<i>Pseudomonas</i> , <i>Xanthomonas</i> , ...
		Mollicutes	Mycoplasmes, spiroplasmes
Macromo- lécules infectieuses	Virus	particules allongées ou particules isométriques	Virus de la mosaïque du tabac, Virus Y de la pomme de terre, ...
	Viroïdes		Virus de la mosaïque du concombre Exocortis des <i>Citrus</i> , Sommet buissonnant de la tomate (TBSV), ...

Les micro-organismes qui se développent en utilisant comme base alimentaire la matière organique morte sont qualifiés de saprophytes.

Les **ravageurs** regroupent l'ensemble des espèces animales causant des dégâts aux cultures (racines, feuilles, tiges, fruits) ou aux produits récoltés ou stockés. Le groupe de ravageurs le plus important est représenté par les **insectes phytophages**, arthropodes à six pattes qui consomment la matière végétale lorsqu'ils sont à l'état larvaire (exemple : chenilles) ou à l'état adulte. On y rencontre principalement les **orthoptères** (sauterelles), les **homoptères** (pucerons, cicadelles, aleurodes), les **hémiptères** (punaises), les **coléoptères**, les **lépidoptères** (papillons), les **diptères** (mouches) et les **hyménoptères**.

Outre les dégâts qu'ils causent en consommant des tissus végétaux ou en altérant les fonctions des plantes, certains insectes (principalement de type piqueur) peuvent provoquer des altérations indirectes en tant que vecteurs d'agents pathogènes (virus, mycoplasmes, bactéries, champignons).

Les **acariens** sont de petits arthropodes phytophages possédant typiquement 4 paires de pattes, qui s'alimentent en piquant le feuillage (araignées rouges externes) ou plus rarement en se développant à l'intérieur des tissus végétaux.

Les **nématodes** sont des vers microscopiques principalement présents dans les sols et qui se nourrissent généralement en piquant les racines. Quelques espèces de nématodes se développent à l'intérieur des tiges ou des feuilles de végétaux, tandis que d'autres sont vecteurs de virus.

1.2. Les symptômes et leur étiologie

Une culture résulte de l'introduction de **génotypes** particuliers de végétaux (cultivars ou variétés) dans un environnement déterminé. Les altérations s'y manifestent au niveau du **phénotype** ; pour l'agriculteur, l'horticulteur ou le sylviculteur, leur importance sera perçue essentiellement en fonction des objectifs économiques poursuivis (consommation locale, commercialisation, exportation). Les anomalies du phénotype par rapport à la norme attendue portent le nom de **symptômes**. Les altérations du produit de la culture ou du potentiel de production sont généralement appelées **dégâts** (en anglais : *damage*), tandis que le déficit économique ou social résultant des dégâts, exprimé en quantité du produit ou en valeur financière, porte le nom de **perte** (en anglais : *loss*).

La protection des végétaux exige une connaissance approfondie, d'une part, de la plante-hôte, de son environnement et des modalités de sa culture, et d'autre part des agents altérogènes ainsi que des conditions de leur interaction avec les plantes cultivées. Pour pouvoir mettre en œuvre des moyens de lutte adéquats contre les altérations, il faut identifier la cause exacte des symptômes observés, ce qui constitue le **diagnostic**. La science étudiant les causes des affections porte le nom d'**étiologie** ; elle constitue la base de la réflexion et de l'action en protection des végétaux.

Un même symptôme peut être induit par des causes très diverses. C'est ainsi que les **jaunissements** peuvent être dus à des facteurs non parasitaires (excès d'eau, carence en fer, absence de lumière, résidus d'herbicides) ou parasitaires (virus, viroïdes, mycoplasmes, champignons vasculaires, etc.). Les **balais de sorcière** peuvent être causés par des bactéries, des champignons, des mycoplasmes, des virus, des insectes, des agents toxiques, des facteurs climatiques. Un **flétrissement** peut être dû au manque d'eau dans le substrat, à l'altération des racines ou du collet (champignon ou insecte), à la perturbation du fonctionnement du système conducteur (champignon vasculaire ou bactérie), à une évaporation excessive (excès thermique).

D'autre part, une même cause peut provoquer des symptômes très différents selon la variété cultivée, le stade de développement de la culture, le moment où la cause agit, les conditions biotiques ou abiotiques du milieu, ou l'époque d'observation. Certaines affections présentent des symptômes typiques qui permettent d'identifier immédiatement la cause qui les provoque (charbons des céréales, oïdium, rouilles, insectes adultes). Cependant, dans de nombreux cas, la détermination d'une maladie ou d'un ravageur devra s'appuyer sur l'analyse des circonstances de temps et de lieu qui entourent l'apparition et le développement des symptômes ainsi que sur l'utilisation d'analyses particulières (microscopie, sérologie, mises en culture de l'agent pathogène, élevages d'insectes, etc.).

Une fois posé le diagnostic, la lutte contre les facteurs adverses des cultures se ba-

sera sur la réduction de l'impact qualitatif ou quantitatif des agents altérogènes (germes, ravageurs), sur la prévention de leur transport jusqu'au niveau des plantes et sur l'adaptation des conditions écologiques de l'environnement. Il conviendra de prendre en considération le génotype (caractères de **résistance** éventuels), le stade de développement de la plante-hôte (sensibilité particulière des semis, des jeunes plantules, des fleurs, des fruits), ainsi que les modalités d'extension spatiale et temporelle du facteur causal au sein d'une population de plantes saines (**épidémiologie**). On en déduira des moyens de lutte **préventifs** ou **curatifs** en vue de freiner ou d'arrêter l'évolution épidémique d'une maladie ou d'un ravageur.

S'insérant dans l'ensemble des processus de production agricole, la protection des végétaux présente un important volet *économique* (appréciation des dégâts, quantification des pertes encourues, financement des moyens de lutte), des aspects relatifs à la *santé publique* (effet des méthodes de lutte sur la qualité des produits, résidus toxiques) et un impact sur *le maintien soutenu du potentiel de production* et sur *la protection de l'environnement*.

1.3. Les dégâts et les pertes

1.3.1. Relations entre symptômes, dégâts et pertes

La relation entre symptômes, dégâts et pertes est généralement complexe, et le plus souvent, ne peut être exprimée par une fonction mathématique simple. Dès lors, l'information objective en matière de dégâts et de pertes est souvent fragmentaire et imprécise.

Parmi les paramètres à considérer, mentionnons le caractère plus ou moins *spectaculaire* des symptômes et le *stade de développement de la culture* où ils sont observés. Il faut également tenir compte des phénomènes de compensation qui font que, jusqu'à un certain point, la suppression d'une partie de l'appareil de production ne diminue pas la valeur du produit (fruits moins nombreux mais plus gros, diminution de la densité des céréales compensée par une plus forte production individuelle des plantes, etc.). Au contraire, certaines contaminations par des parasites et ravageurs peu visibles à un moment donné peuvent avoir ultérieurement des effets dommageables importants. Le type de production (cultures commerciales, cultures de subsistance, potagers ou vergers d'appoint) doit également être pris en considération dans l'appréciation des pertes encourues, les exigences du commerce étant différentes de celles de l'autoconsommation.

Enfin, la présence de substances toxiques en surface peut également dévaloriser des produits dont la qualité serait excellente par ailleurs : **mycotoxines** (produites par différents *Fusarium* notamment sur les céréales), **aflatoxines** (substances cancérigènes produites par *Aspergillus flavus* chez l'arachide, le maïs, etc.), **résidus** éventuels de pesticides (surtout pour les légumes et fruits consommés à l'état frais), etc.

1.3.2. L'appréciation des dégâts et des pertes

Pour évaluer les pertes potentielles, on compare une *situation de fait* (niveau de production en présence de maladie) à une *situation idéale* (niveau de production en absence de maladie). Cette évaluation est souvent difficile à apprécier, faute de témoins de référence valables constitués de plantes "saines" dont on puisse mesurer la production potentielle dans les différents lieux et aux différentes époques.

L'appréciation des pertes par rapport à une production potentielle théorique peut aussi se faire en réalisant, à échelle limitée, des *essais de protection totale* (indépendamment de leur rentabilité économique ou de leur impact sur l'environnement). On estime de la sorte le niveau maximal que peut atteindre une production végétale en l'absence de toute cause nuisible. Les résultats doivent cependant être interprétés avec prudence, étant donné les risques d'interactions d'un traitement donné avec divers facteurs de production (effets indirects des pesticides via la physiologie de la plante, effet insecticide des fongicides, effet fongicide des insecticides, etc.).

Il n'est pas possible d'étendre la protection totale à l'ensemble des cultures, tant pour des raisons de non-rentabilité économique qu'à cause des dangers qui en résulteraient sur le plan écologique. C'est pourquoi l'un des premiers soucis du défenseur des végétaux doit être d'établir des **seuils de tolérance**, au-dessous desquels le niveau des nuisances ou des pertes peut être toléré et au-dessus desquels il est au contraire indiqué d'intervenir de manière appropriée en vue de les réduire.

On estime qu'au plan mondial, 40 % de la production végétale potentielle sont soustraits à l'utilisation par l'homme, le niveau précis des pertes encourues variant avec la plante, le type de culture et l'état plus ou moins développé des techniques de production et de conservation des produits.

1.3.3. Les différents types de perte

Au stade de la cueillette au sein d'une végétation spontanée tropicale ou subtropicale (fruits sauvages, caoutchouc de la forêt amazonienne, parcours de troupeaux), la "perte" résulte souvent d'effets écologiques liés à la surexploitation (déforestation, désertification) et se traduit par un déficit global pour l'ensemble de l'écosystème. Au fur et à mesure que se complexifie l'exploitation des systèmes de production agricoles, horticoles ou sylvicoles, il y a croissance des investissements en travail et en matériel (ex. : horticulture intensive) et la perte se traduit essentiellement par un "déficit" de type économique ou social.

La nature et l'importance des pertes causées par les facteurs altérogènes varient avec la plante, les agents en cause, la localité, l'environnement, les méthodes de lutte pratiquées et avec la combinaison de tous ces facteurs. Les pertes peuvent être directes (pertes supportées par l'agriculteur) ou indirectes (pertes supportées par l'environnement ou/et les opérateurs économiques intervenant en aval de la production, tableau 17.3).

Les **pertes directes primaires** désignent, dans une culture en place, le déficit économique lié soit à la diminution partielle ou totale de la production (aspect quantitatif des dégâts), soit aux altérations qualitatives affectant les produits récoltés et entraînant une diminution de leur valeur commerciale (fruits tachés, produits contaminés par les mycotoxines).

L'évaluation du déficit en revenu lié à la présence des agents pathogènes doit également prendre en compte les dépenses supplémentaires que l'agriculteur doit engager pour mettre en œuvre les moyens de lutte. Les agents altérogènes limitent la durée de commercialisation des produits, obligeant ainsi l'agriculteur à les vendre pendant une période où ceux-ci sont abondants et bon marché. L'agriculteur peut être amené également à remplacer la culture atteinte par une autre, ou à remplacer une variété sensible mais performante, par une autre variété résistante mais de moins bonne qualité.

Tableau 17.3. Classification des pertes de produits agricoles dues à des agents altérogènes.

Pertes directes ¹		Pertes indirectes ²
Primaires	Secondaires	
<ul style="list-style-type: none"> • Rendement (quantité) • Qualité des produits • Dépenses supplémentaires pour accomplir les opérations de lutte <ul style="list-style-type: none"> – achat de produits et de matériel – récolte – triage – conditionnement – conservation – replantation • Pertes de revenus dues aux causes suivantes : <ul style="list-style-type: none"> – vente précipitée – utilisation de variétés moins performantes mais résistantes – remplacement de la culture 	<ul style="list-style-type: none"> • Contamination des <ul style="list-style-type: none"> – équipements agricoles – semences – plants • Augmentation du taux d'inoculum dans le sol • Défoliation précoce des plantes 	<ul style="list-style-type: none"> Exportateurs Importateurs Grossistes détaillants Gouvernement Environnement

1. Pertes primaires : pertes de la production en cours, supportées par l'agriculteur

Pertes secondaires : pertes des productions à venir, supportées par l'agriculteur

2. Pertes indirectes : pertes supportées par la communauté

Les **pertes directes secondaires** désignent le déficit économique supporté par l'agriculteur et relatives non pas à la production en cours, mais aux cultures à venir. Ces pertes résultent notamment des équipements agricoles contaminés et des semences ou plants produits en pépinières infestées, lesquels disséminent les agents pathogènes, avec des répercussions négatives sur le rendement des cultures ultérieures ainsi que sur la qualité des futurs produits récoltés. Dans le cas de plantes pérennes, la défoliation des arbres, par exemple, aura un effet négatif sur les productions futures.

1.4. La protection des plantes en relation avec le contexte socio-économique

Les plantes étant à la base de la transformation de l'énergie solaire en énergie biologique, il en résulte que tout ce qui touche à la production des végétaux constitue un des pôles essentiels de l'activité humaine et se répercute sur l'ensemble de la biosphère.

L'agriculture rationnelle *sensu lato* vise à obtenir de la nature un maximum (d'autres diront un optimum) de produits utiles, économiquement ou socialement rentables, tout en maintenant la pérennité de la capacité de production de l'écosystème.

L'importance des productions végétales dans les économies nationales est étroitement liée à la place que tient l'agriculture dans le revenu des États. En Allemagne par exemple, la valeur de la production agricole constitue moins de 5 % du produit

national. Par contre, elle représente plus de 80 % du revenu de certains pays africains. L'économie allemande peut être affectée par une réduction du revenu agricole, mais les conséquences ne seront pas comparables à celles d'une baisse de production ou d'un effondrement des prix de l'arachide au Sénégal, du coton au Tchad, du café en Ethiopie, du cacao en Côte-d'Ivoire ou au Ghana, ces produits constituant la principale source de devises des pays concernés.

Dans certaines zones, pour des raisons sociales ou économiques, des quotas de production sont achetés à des prix garantis, supérieurs à ceux du marché mondial, tandis que le surplus est écoulé à des prix non garantis. Les barrières douanières et la manipulation des stocks permettent également d'influencer les prix à la hausse ou à la baisse. C'est le cas notamment du café, dont les prix mondiaux sont affectés à la fois par des facteurs naturels (gel au Brésil, extension de la rouille en Amérique du Sud) et par des mouvements spéculatifs sur les marchés.

Enfin, il faut tenir compte de ce qu'une partie de l'activité agricole ne vise pas au rendement immédiat de la production marchande, mais se rapporte à des bénéfices à long terme (boisements) ou poursuit des objectifs socio-économiques d'intérêt collectif (poumons verts, lutte contre l'érosion et la désertification). Dès lors, les modalités de protection contre les agents altérogènes s'appliqueront de façon spécifique au contexte socio-économique et au type de culture : cultures de subsistance ou de rente, cultures industrielles, cultures extensives ou intensives, cultures tropicales ou subtropicales, cultures annuelles ou pérennes, cultures sous abri ou en plein air, conservation des produits.

Eu égard aux difficultés d'augmenter les surfaces cultivées dans les pays en développement, tant pour des raisons économiques qu'écologiques, *l'intensification des cultures et la limitation des pertes* de tous ordres constituent actuellement les moyens essentiels de résoudre les problèmes de la sous-alimentation. Dans les pays en développement, les besoins alimentaires sont tels qu'il est indispensable d'intensifier la production agricole. Il convient cependant d'éviter de transformer brutalement des cultures de subsistance diversifiées en monocultures, qui risqueraient d'être sujettes à des dégâts catastrophiques de parasites ou de ravageurs, sans que l'on dispose des moyens techniques ou financiers pour combattre ceux-ci.

La "révolution verte", basée notamment sur l'emploi de nouvelles variétés, sur l'utilisation d'engrais, l'irrigation, ainsi que la lutte contre les plantes adventices, les maladies et les déprédateurs, a permis effectivement d'augmenter sensiblement les rendements dans certains pays. Cette intensification pose cependant des problèmes économiques et sociaux (nécessité d'investissements importants, technicité accrue pour la gestion du sol, de l'eau et des intrants, accroissement du chômage paysan) ou agronomiques (sensibilité accrue aux parasites et ravageurs, moins bonne protection des sols).

Des mesures simples, telles que la **sélection sanitaire** (choix du matériel végétal sain utilisé pour débiter la culture) ou l'**assainissement des substrats de culture**, peuvent donner des accroissements de rendement spectaculaires. C'est le cas pour la pomme de terre, le manioc, la patate douce et diverses cultures à propagation végétative. Le **traitement des semences** représente également une méthode peu coûteuse et particulièrement rentable de lutte contre les parasites et les ravageurs.

2. MÉTHODES DE LUTTE CONTRE LES FACTEURS ALTÉROGÈNES

2.1. Les bases épidémiologiques de la lutte contre les ennemis des cultures

Toute lutte raisonnée contre les facteurs altérogènes des végétaux repose sur une connaissance approfondie des agents en cause, des cultures concernées et des paramètres de leur environnement biotique et abiotique.

Les parasites et les ravageurs se développent dans le cadre de cycles biologiques pour lesquels on distingue habituellement (1) une phase de conservation pendant les intercultures (par exemple au cours d'une saison sèche), (2) une succession de phases de dispersion et d'infection.

Un cycle correspond à une génération de l'agent pathogène ou du ravageur. Le nombre de cycles par saison de culture conditionne la dynamique de l'agent altérogène. La durée des cycles biologiques varie considérablement selon la nature des pathogènes et ravageurs : quelques heures pour les virus, quelques jours pour les bactéries, quelques semaines pour les acariens, nématodes, champignons et certains insectes, quelques mois pour beaucoup d'insectes et pour les rongeurs, quelques années dans des cas exceptionnels.

La comparaison de ces cinétiques avec celles qui régissent le développement des plantes-hôtes amène à distinguer les cas où le parasite ou le ravageur présentent *plusieurs cycles* successifs au cours d'une saison de culture et les cas où l'agent altérogène présente *un seul cycle* par saison culturale.

Les agents pathogènes ayant un seul cycle (= une seule génération) par saison de culture sont appelés **monocycliques**. *Verticillium dahliae*, par exemple, responsable de la verticilliose vasculaire de nombreuses plantes, est un parasite monocyclique qui se conserve d'une saison à une autre dans le sol sous forme de microsclérotos formés dans les restes de végétaux atteints. En début de saison, ces sclérotos représentant l'inoculum primaire germent sous l'influence des exsudats racinaires des nouvelles plantes, permettant ainsi à l'agent pathogène de pénétrer à l'intérieur des racines. En cours de culture, *V. dahliae* ne produit donc pas d'inoculum secondaire capable de disséminer la maladie. Cette situation s'applique également à plusieurs autres champignons du sol, comme *Fusarium oxysporum*, ainsi qu'aux champignons provoquant les charbons des céréales.

Les parasites **polycycliques** présentent plusieurs générations par saison culturale. Lorsque les conditions de l'environnement leur sont favorables, ils se multiplient continuellement, en cours de culture, assurant la dissémination de l'agent et le développement de nouveaux sites de contamination qui concourent à l'extension des dégâts. C'est le cas par exemple de *Phytophthora infestans* qui cause le mildiou de la pomme de terre, ou des pucerons dont les générations se succèdent rapidement. Les agents pathogènes polycycliques possèdent le plus souvent une dispersion aérienne.

Dans le cas d'agents monocycliques, la sévérité de l'altération en fin de culture dépendra directement du potentiel altérogène existant en début de saison (inoculum ou population de ravageurs initiale). Par contre, les agents polycycliques développent des cycles de parasites ou de ravageurs provoquant des altérations croissant de

manière exponentielle. La stratégie de lutte adoptée pour supprimer ou ralentir le développement des altérations va dépendre du type de maladies ou de ravageurs en cause. La lutte visera en priorité à réduire l'inoculum initial ou la population de départ dans le cas des agents monocycliques, et à réduire la constitution et la dispersion des inoculums et populations secondaires dans le cas d'agents polycycliques.

2.2. Méthodes de lutte contre les facteurs altérogènes

La lutte contre les parasites et ravageurs des plantes cultivées vise à assurer un bon état sanitaire des cultures ou des produits végétaux, en recherchant les points vulnérables du cycle des parasites ou ravageurs en vue d'en réduire l'impact. A cet effet, on appliquera un ensemble de règles reposant sur des **mesures d'ordre légal ou réglementaire** (quarantaine, certificats phytosanitaires), sur des **actions de contrôle et de surveillance**, sur une **prophylaxie** fondée sur l'élimination des sources d'agents altérogènes, et sur l'utilisation de **méthodes de lutte physique, chimique, culturelle et biologique**.

Les échanges d'information, de formation et de documentation à l'échelle internationale ou régionale représentent un facteur important sur le plan phytosanitaire. L'enseignement à tous les niveaux, ainsi que la formation des personnels œuvrant dans les instituts de recherche, dans les services de vulgarisation et dans le secteur privé sont essentiels à cet égard.

2.3. La lutte culturelle

L'agriculture constitue un domaine d'activité hautement interactif : les changements affectant un paramètre déterminé se répercutent directement ou indirectement sur les autres composantes du système. Ainsi, les affections des plantes cultivées sont étroitement liées aux pratiques culturelles qui visent à accroître la production plutôt qu'à contrôler les maladies ou les ravageurs; une situation peut présenter des conséquences dommageables sur le plan phytosanitaire (tableau 17.4).

Tableau 17.4. Les pratiques culturelles et leurs effets sur les maladies des plantes.

<p>Prévenir l'introduction des germes pathogènes et élimination de ceux qui seraient présents</p> <ul style="list-style-type: none"> • Matériel de propagation sain (semences, boutures) • Désinfection des outils de travail (sécateurs) • Taille sanitaire des cultures pérennes • Destruction des résidus de cultures contaminées par l'enfouissement, le feu ou le compostage • Destruction des germes pathogènes par inondation contrôlée des terres (lutte contre les fusarioses vasculaires) • Rotations adéquates en relation avec les capacités de survie de l'agent pathogène
<p>Réduction du transport de l'inoculum</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bon drainage • Implantation de brise-vent (lutte contre les insectes vecteurs de virus) • Techniques d'irrigation évitant la dispersion de l'inoculum (goutte à goutte)
<p>Améliorer la résistance aux agents pathogènes</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fertilisation équilibrée (azote, phosphore) • Densité adéquate de la plantation (microclimat favorable)

Les modes de production agricoles utilisés dans les pays tropicaux sont très divers, allant de l'agriculture de subsistance plus ou moins traditionnelle jusqu'aux productions marchandes intensives utilisant les technologies les plus avancées.

Les systèmes agricoles **peu intensifs** se caractérisent par des facteurs de tamponnement écologique qui limitent l'impact des maladies : parcelles cultivées de petite taille, hétérogénéité génétique des plantes cultivées, variétés localement bien adaptées, amendements organiques, préparation limitée du sol et pratique éventuelle de la jachère. Pour les cultures de subsistance, les techniques culturales sont souvent le fruit d'une expérience traditionnelle. Les espèces et variétés utilisées sont bien adaptées aux conditions locales et possèdent une résistance suffisante vis-à-vis de leurs ennemis et des aléas climatiques. Les rendements de telles cultures sont généralement peu élevés, mais stables.

L'association de plusieurs cultures vivrières différentes (maïs-sorgho, niébé-céréales, coton-arachide) sur une même surface, constitue une pratique courante qui contribue à diminuer les populations d'insectes ravageurs, ainsi que l'impact des maladies et des mauvaises herbes. Ces cultures associées peuvent favoriser le développement d'ennemis naturels des insectes ravageurs, créer une action répulsive ou "anti-appétante" d'une espèce végétale donnée à l'égard des ravageurs d'une autre culture, etc. L'inondation du terrain peut aussi diminuer le développement de certaines maladies (bactériose et trachéomycose du cotonnier). Le plus souvent, cette situation évolue progressivement vers une phase d'intensification, liée au développement des possibilités de stockage et de commercialisation des produits agricoles ou des intrants, à l'accroissement des moyens de transport ainsi qu'à l'extension de l'encadrement technique.

Pour les parcelles cultivées en permanence, la **rotation** (succession de cultures différentes sur une même surface) constitue une bonne prévention contre certaines maladies des racines, contre des insectes du sol et contre les nématodes. Notons cependant que certaines cultures traditionnelles particulièrement bien adaptées peuvent être maintenues sans discontinuer pendant des décennies (exemple du riz).

L'élimination des mauvaises herbes, ainsi que des plantes ou déchets hébergeant des germes pathogènes et des insectes nuisibles, constitue un élément de lutte non négligeable. Les pratiques culturales, les dates de plantations, les densités de semis, les conditions de travail du sol peuvent contrecarrer le développement d'insectes et de champignons nuisibles. L'utilisation de composts à base d'écorces, ainsi que la solarisation du sol par application d'un film en matière plastique, permettent de lutter contre des champignons et nématodes parasites présents dans les substrats.

En **culture intensive**, les producteurs se montrent généralement réceptifs aux nouvelles techniques susceptibles d'accroître la productivité et la rentabilité de leurs cultures. Les nouveautés y sont rapidement diffusées par les services officiels de vulgarisation, par l'action des associations professionnelles ou avec l'appui des firmes privées. En culture intensive, les pratiques culturales visent à accroître la production plutôt qu'à contrôler les maladies ou les ravageurs, même au risque de conséquences dommageables sur la plan phytosanitaire. De la sorte, certaines pratiques destinées à pousser les rendements augmentent l'impact des facteurs altérogènes. Par exemple, l'irrigation par aspersion ou à la raie favorise l'émission des germes, leur transport et leur germination.

Chez le caféier, l'allongement des périodes de production, le recouvrement des cul-

tures successives, la conduite multicaulinaire, l'extension des traitements "tonifiants" à base de cuivre, ainsi que l'enlèvement des arbres d'ombrage ont accru considérablement l'impact des champignons causant l'antracnose et la rouille.

L'intensification des cultures postule l'occupation permanente du sol ainsi qu'une homogénéité génétique des plantes cultivées, le choix des variétés étant basé sur leur rendement et sur leur adaptation à la mécanisation. Elle exige une utilisation abondante d'eau, d'engrais chimiques et d'autres intrants. Sur le plan phytosanitaire, des traitements inadaptés appliqués à grande échelle peuvent induire une instabilité biologique qui aggrave l'impact des maladies et des ravageurs, par élimination des antagonistes et des hyperparasites.

La mise en culture de terrains vierges en vue d'intensifier les productions agricoles et horticoles donne en général d'excellents résultats pendant les 3-4 premières années. Ultérieurement, on observe un développement important de nématodes, de virus, de champignons ou de bactéries pathogènes des racines ou du système conducteur.

Certaines tentatives d'intensification des cultures (le caféier en Malaisie, l'ananas en Bolivie, le millet en Afrique occidentale) ont été stoppées par le développement des maladies. Dès lors, des efforts supplémentaires sont requis pour mettre en œuvre des mesures de contrôle adéquats, l'idéal étant de planifier l'extension ou l'intensification des cultures en assurant le suivi des dangers potentiels sur le plan des maladies et des ravageurs.

2.4. La lutte biologique

La connaissance approfondie de la biologie des parasites et des ravageurs, ainsi que des conditions qui contrecarrent leur multiplication tout en favorisant celles de leurs ennemis naturels, permet d'obtenir une limitation naturelle ou artificielle des agents nuisibles.

Dans le cadre de la gestion des ressources de la biosphère, la lutte biologique se fonde sur l'introduction de nouveaux ennemis naturels des agents pathogènes et des ravageurs (hyperparasites), ainsi que sur une conduite des cultures et une maîtrise de l'environnement qui favorisent les ennemis naturels indigènes aux dépens des ravageurs. Dans ce contexte, la lutte chimique éventuelle doit veiller à respecter au mieux les ennemis naturels des agents nuisibles.

2.4.1. Lutte biologique contre les ravageurs

Les applications pratiques de la lutte biologique ont été le plus développées dans le domaine entomologique. Des résultats spectaculaires ont été obtenus à cet égard contre des lépidoptères du cotonnier en réalisant des lâchers massifs d'adultes de *Trichogramma* sp. qui parasitent les œufs de ces ravageurs. Des chenilles sont combattues au moyen de la bactérie *Bacillus thuringiensis*. On lutte à l'aide de champignons parasites contre des nématodes. Le champignon *Beauveria bassiana* attaque le ravageur du maïs *Ostrinia nubilalis*, tandis que des virus sont utilisés contre le *Spodoptera littoralis* du cotonnier. Le lâcher d'insectes mâles stériles, le traitement avec des hormones juvéniles sont également utilisés ou en voie de l'être.

Au début des années 70, deux nouveaux ravageurs très dommageables pour le manioc

ont été introduits en Afrique : la cochenille *Phenacoccus manihoti* et l'acarien vert du manioc *Mononychellus tanajoa*. En l'absence d'ennemis naturels de ces insectes dans les zones concernées et, vu l'impossibilité d'utiliser des méthodes de lutte chimique coûteuses pour une culture de subsistance, on s'est orienté vers la lutte biologique.

Depuis 1983, l'Institut international d'agronomie tropicale d'Ibadan (Nigéria) a développé un programme de lutte biologique contre ces nouveaux ravageurs du manioc, qui a abouti en 1988 à la création d'un Centre de lutte biologique pour l'Afrique à Cotonou (Bénin). Dans le cadre de ce programme, *Edinocaris lopezi*, un ennemi naturel de la cochenille du manioc, a été introduit et répandu dans 19 pays sur 2 millions de kilomètres carrés avec d'excellents résultats. Ce programme a exigé l'établissement d'un réseau de formation de spécialistes d'élevage de *E. lopezi*, de transport et de distribution de l'hyperparasite (y compris par voie aérienne dans les zones d'accès difficile). Grâce à cette infrastructure, l'invasion récente (1987) de l'Afrique par *Rastrococcus invadeus*, une nouvelle cochenille attaquant le manguiers et d'autres espèces fruitières, a pu être combattue en 3 ans grâce à l'introduction de son ennemi naturel *Gyramisoïdea tebygi*.

La maladie du "greening" des agrumes causée par une microbactérie transmise par des psylles a pu être jugulée à l'île de la Réunion par l'introduction d'un microhyménoptère parasite des psylles vecteurs. Des réseaux de lutte biologique se mettent également en place pour lutter contre les ravageurs du maïs, du riz (notamment à Madagascar), des agrumes, des légumineuses, etc. Signalons à cet égard l'Institut international de contrôle biologique à Nairobi au Kenya.

La lutte chimique traditionnelle contre les nématodes parasites est également complétée depuis quelques années par des procédés de lutte biologique faisant intervenir des champignons nématophages. Ces champignons, dont le mycélium forme des organes de capture spécialisés (boucles, anneaux, boutons), sont capables d'immobiliser et de parasiter les nématodes (individus actifs ou œufs) et de réduire significativement le nombre de nématodes phytophages. Certaines espèces, comme *Arthrobotrys irregularis*, sont dès à présent commercialisées.

2.4.2. Lutte biologique contre les agents de maladie

Dans le domaine de la phytopathologie, les applications pratiques de la lutte biologique se basent essentiellement sur la prémunition contre les virus, sur la compétition, l'antagonisme et le parasitisme, entre bactéries, entre champignons, ou entre bactéries et champignons (tableau 17.5).

En ce qui concerne les virus, la lutte biologique s'appuie sur des processus biochimiques et se fonde sur le phénomène de la **prémunition** (ou **protection croisée**), consistant à inoculer les plantes avec des souches virales non pathogènes pour les protéger contre des souches apparentées. C'est ainsi que les cultures de tomate peuvent être protégées contre le virus de la mosaïque, les agrumes contre le virus de la tristeza et les papayers contre le virus des taches annulaires du papayer.

En ce qui concerne les micro-organismes phytopathogènes, la lutte biologique consiste à introduire des agents protecteurs dans un écosystème, ou à favoriser la microflore bénéfique existante par la mise en œuvre de techniques culturales appropriées.

L'utilisation de bactéries comme agent de lutte biologique s'est développée notamment pour lutter contre *Agrobacterium tumefaciens*, agent des tumeurs du collet,

Tableau 17.5. Modalités et agents utilisés dans la lutte biologique.

<p>La destruction ou l'inactivation de l'inoculum</p> <ul style="list-style-type: none"> • Utilisation d'antagonistes (<i>Trichoderma</i> sp.) • Solarisation (lutte contre les adventices, nématodes, champignons du sol) • Sols suppressifs • Composts
<p>Réduction de la virulence de l'agent pathogène</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hypovirulence exclusive (chancre à <i>Endothia</i> chez le châtaignier)
<p>Interférence avec le processus d'infection</p> <ul style="list-style-type: none"> • Protection du matériel de plantation (<i>Agrobacterium radiobacter</i>) • Mycorhization des végétaux (protection contre les champignons ou les nématodes) • Protection des plaies de taille et des souches chez les arbres par agents de lutte biologique (<i>Trichoderma</i>) • Protection biologique des fruits et des fleurs (lutte contre <i>Botrytis cinerea</i> par des agents compétiteurs, des <i>Trichoderma</i>)
<p>Prémunition et résistance induite</p> <ul style="list-style-type: none"> • Prémunition en virologie (virus de la tristezza)

par préinoculation avec la souche 84 d'*A. radiobacter*, productrice d'une toxine (bactériocine K 84) vis-à-vis de laquelle *A. tumefaciens* est sensible. Cette souche s'emploie préventivement par trempage des semences, boutures ou jeunes semis avant repiquage. Elle est sans danger, se conserve aisément et persiste sur l'hôte pendant toute sa vie. Depuis plusieurs années, elle est appliquée dans maints pays sur de nombreuses plantes : *Prunus*, *Malus*, *Vitis*, *Rosa*, etc. Néanmoins, quelques échecs liés à l'apparition de souches d'*A. tumefaciens* résistantes à la bactériocine ou de souches recombinées d'*A. radiobacter* devenues pathogènes ont été signalés.

Pour lutter contre le feu bactérien des rosacées, dû à *Erwinia amylovora*, l'inoculation préalable des plantes avec des souches de saprophytes de *E. herbicola* a donné des résultats comparables à ceux obtenus avec la streptomycine. Des effets globaux de protection sont obtenus au niveau de la rhizosphère en préinoculant les plantes avec certaines souches de *Pseudomonas* fluorescents, qui secrètent des substances capables de chélater le fer III. Elles inhibent de la sorte les micro-organismes phytopathogènes en maintenant le fer, élément indispensable, sous une forme qui leur est inaccessible. Par ailleurs, certains effets phytotoniques sont obtenus par prétraitement des racines avec des cultures bactériennes (*Bacillus* sp., *Pseudomonas* sp.) qui favorisent la croissance des végétaux.

L'utilisation de champignons saprophytes comme agent de lutte biologique s'est développée sur une grande échelle. Chez les arbres, les plaies de taille peuvent être protégées du développement de champignons parasites par traitement avec différentes souches fongiques, notamment les *Trichoderma*. Dans les sols, il existe de nombreuses interactions entre les composants de la microflore saprophyte et phytopathogène.

Les associations mycorhiziennes peuvent protéger les racines de l'invasion par certains parasites. En produisant des antibiotiques ou en recouvrant les racines d'un manteau continu, les ectomycorhizes permettent aux plantes d'esquiver les attaques de *Pythium*, *Phytophthora*, *Fusarium*, etc.

L'existence de **sols suppressifs** a été rapportée dans de nombreux pays. Par exemple au Maroc, la plupart des palmeraies sont atteintes par le "bayoud" du pal-

mier dattier (dû à *Fusarium oxysporum* f. sp. *albedinis*), sauf la palmeraie de Mar-rakech. Il a été démontré que les sols de cette palmeraie sont suppressifs : l'introduction de l'inoculum de l'agent du bayoud dans ces sols ne conduit pas à l'extériorisation des symptômes de la maladie. Dans certains cas, la "résistance" des sols aux fusarioses vasculaires est due à des *Fusarium* saprophytes et plus particulièrement à des souches de *F. oxysporum* et de *F. solani*. La résistance aux fusarioses vasculaires a été transmise avec succès d'un sol suppressif à un sol non suppressif pour les cultures d'œillet, de melon, de tomate, etc. Pour l'œillet par exemple, l'incorporation de 10 à 20 % (en volume) de terre suppressive à un substrat, confère à ce dernier une protection stable contre *F. oxysporum* f. sp. *dianthi*.

En l'absence de rotation, il a été observé que la sévérité du piétin-verse des céréales, causé par *Ophiobolus graminis*, s'accroît d'abord avec le retour de la céréale sur elle-même, puis diminue ensuite grâce à une protection par des souches hypovirulentes d'*O. graminis*. Le phénomène d'hypovirulence existe également chez les *Rhizoctonia* et chez différents champignons attaquant les arbres.

La protection croisée a été observée également dans le cas de certaines maladies cryptogamiques. L'introduction, dans les vaisseaux des plantes, de spores de champignons appartenant à un genre ou à une espèce différente de l'agent pathogène, peut les protéger contre des fusarioses et les verticillioses vasculaires.

2.4.3. Lutte biologique contre les plantes adventices

La **malherbologie** est un autre secteur où peut s'appliquer la lutte biologique. La première tentative de contrôle biologique de plantes adventices est mentionnée en 1863, quand un ravageur spécifique (*Dactylopius ceylonicus*) d'une cactée dommageable (*Opuntia vulgaris*) fut introduit en Inde. A côté de l'utilisation d'arthropodes, le recours aux agents pathogènes constitue une autre stratégie de contrôle biologique des adventices qui prend une importance croissante. Un des exemples les mieux connus est l'introduction et la dissémination spontanée en Australie d'une rouille (*Puccinia chondrillina*), originaire du Bassin méditerranéen et parasite de l'espèce adventice *Chondrilla juncea*, responsable de pertes importantes dans les cultures de blé.

2.5. La lutte génétique

L'objectif de l'amélioration des plantes en matière de protection des cultures vise à sélectionner des génotypes de végétaux qui présentent, avec le facteur altérogène considéré, un rapport d'incompatibilité plus ou moins marqué (concept de **résistance**) ou qui fournissent une production adéquate des cultures, nonobstant l'impact d'un facteur altérogène déterminé (concept de **tolérance**). Les variétés tolérantes présentent cependant l'inconvénient d'entretenir dans l'environnement des sources de parasites ou de ravageurs.

L'utilisation de plantes génétiquement résistantes ou tolérantes constitue la méthode de lutte la moins astreignante pour l'agriculteur et la moins polluante pour l'environnement. Elle requiert cependant la mise en œuvre, par le sélectionneur, d'un travail particulièrement long et délicat, nécessitant des recherches en laboratoire, puis des essais au champ. Le processus de sélection se clôture par des essais comparatifs multilocaux permettant une éventuelle reconnaissance légale de la variété en vue de son introduction, de sa commercialisation et de son utilisation à plus ou moins grande échelle dans la pratique agricole, horticole ou sylvicole.

Tableau 17.6. Particularités et nomenclature des relations hôtes-parasites.

Relation différentielle biotype × cultivar	Relation non différentielle biotype × cultivar
Biotypes différant par leur virulence vis-à-vis d'un cultivar	Biotypes différant par leur agressivité vis-à-vis d'un cultivar
Résistance verticale ou spécifique	Résistance horizontale ou générale
Résistance totale (hypersensibilité)	Résistance partielle (infection lente)
Résistance mono ou oligogénique	Résistance polygénique
Gènes majeurs de résistance	Gènes mineurs de résistance

Deux catégories principales de résistance vis-à-vis des bactéries, des champignons et des virus ont été identifiées : la résistance verticale et la résistance horizontale (tableau 17.6).

La **résistance verticale** est *spécifique* : la variété concernée du végétal résiste totalement ou partiellement à certaines souches du parasite mais est sensible à d'autres : il y a **interaction différentielle**. Tout biotype du parasite qui est capable de surmonter un facteur de résistance verticale est dit **virulent** à l'égard du cultivar correspondant.

La **résistance horizontale**, par contre, est *générale* : un cultivar déterminé de l'hôte possède une résistance partielle vis-à-vis de tous les biotypes d'un agent pathogène déterminé (interaction **non différentielle**). Le niveau de résistance horizontale vis-à-vis d'une souche déterminée de l'agent pathogène peut varier selon les cultivars (vis-à-vis desquels le parasite présentera des **agressivités** différentes) et en fonction des paramètres de l'environnement (température, humidité).

En règle générale, les caractères de résistance spécifique (verticale) sont **monogéniques** ou **oligogéniques** (déterminés par un seul gène ou par un nombre réduit de gènes) et **instables** tandis que la résistance générale (horizontale) est le plus souvent **polygénique** et présente une **stabilité** dans le temps. Il y a cependant des exceptions, certaines résistances horizontales pouvant être monogéniques (par exemple, s'il s'agit d'une insensibilité de la variété considérée à une toxine sécrétée par le parasite) et certains types de résistance verticale pouvant être polygéniques.

Les facteurs de résistance verticale exercent une pression sélective vis-à-vis des biotypes du parasite. Lorsqu'une variété porteuse de tels facteurs de résistance est introduite dans la pratique, l'effet bénéfique obtenu est généralement spectaculaire pendant les premières années ; toutefois l'extension de la nouvelle variété sur de grandes surfaces accroît la probabilité de sélection d'un biotype virulent, ce qui aboutit généralement à un effacement plus ou moins rapide de la résistance. Eu égard à leur facilité d'utilisation dans les hybridations, on a privilégié les résistances verticales mais leur instabilité exige l'obtention régulièrement renouvelée de nouvelles variétés améliorées. Ce travail est réalisé dans des stations bien pourvues en spécialistes et en moyens, ce qui limite l'utilisation de la résistance verticale aux cultures de rente.

Par contre, les facteurs de résistance horizontale, qui sont généralement durables car n'exerçant pas de pression sélective vis-à-vis des différents biotypes d'un parasite déterminé, ont connu un regain d'intérêt et constituent le moyen le plus adé-

quat d'assurer une production régulière chez les plantes vivrières, grâce à une résistance moyenne stable.

Dans les cultures traditionnelles de subsistance, où l'hétérogénéité génétique des plantes cultivées est élevée, l'introduction d'un nouveau parasite aboutit souvent à la sélection naturelle rapide de génotypes à bonne résistance horizontale. Ce fut le cas notamment en 1940, lors de l'introduction de la rouille du maïs *Puccinia polysora* en Afrique. Le maïs importé d'Amérique était présent sur le continent africain depuis quatre cents ans en l'absence de *P. polysora*. L'introduction de ce champignon en Afrique causa d'abord des dégâts très importants. Toutefois, avant même que les stations d'amélioration aient pu obtenir des cultivars de maïs à résistance verticale contre *P. polysora* (résistance appelée à s'écrouler immédiatement dans la pratique), le problème était résolu quasi automatiquement grâce à la sélection masale conduite par les agronomes et les agriculteurs, au sein du matériel génétique diversifié existant dans les champs paysans. Une situation analogue fut rencontrée en Éthiopie lors de l'introduction de souches de l'agent de l'antracnose, *Colletotrichum coffeanum*, attaquant les baies vertes du caféier. Ici également, la sélection parmi les nombreux génotypes différents présents dans les cultures traditionnelles a permis d'obtenir rapidement des types résistants de caféier. De telles modalités de sélection ne sont réalisables que dans un contexte de diversité génétique suffisante et ne seraient pas possibles dans des cultures à forte homogénéité génétique.

2.6. La lutte chimique

En culture intensive, il y a lieu de compléter les moyens de lutte biologique par des méthodes chimiques, en intégrant celles-ci avec les composantes de la lutte culturale dans un système intégré de protection phytosanitaire (tableau 17.7). On distinguera les viricides, les bactéricides, les fongicides, les insecticides, les acaricides, les nématicides, les rodenticides et les molluscides, selon les agents concernés.

Pour qu'une lutte chimique corresponde à une bonne pratique agricole, il faut qu'elle garantisse à la fois :

- l'efficacité et la sélectivité des interventions ainsi que la rentabilité des traitements ;
- l'absence de résidus indésirables sur les produits agricoles récoltés ;
- l'absence d'effets secondaires nuisibles vis-à-vis l'environnement.

Tableau 17.7. Schéma général des méthodes de lutte chimique.

Virus	Traitements contre les vecteurs (insectes, acariens, champignons, nématodes)
Bactéries	Bactéricides, bactériostatiques
Champignons	Fongicides { multisites { oligo- ou unisites
	Fongistatiques { inducteurs de résistance { antipénétrants (anticutinase)
Insectes	Insecticides Phéromones de confusion, phéromones d'agrégation Répulsifs, attractifs
Acariens	Acaricides
Nématodes	Nématicides
Rongeurs	Rodenticides, répulsifs
Mollusques	Molluscides

Les matières actives sont sélectionnées et formulées par les industries phytopharmaceutiques sur base de leur efficacité et de leur sélectivité à l'égard des plantes cultivées (absence de phytotoxicité). Un produit phytopharmaceutique n'est admis à l'emploi que s'il est agréé pour des usages et des modalités d'application définis qui garantissent, en cas d'utilisation correcte, l'absence de résidus indésirables sur les produits végétaux récoltés. Son utilisation implique dès lors des actions de formation, d'information et de vulgarisation au niveau des agriculteurs ainsi que des structures administratives et techniques. La persistance des produits phytosanitaires et de leurs métabolites dans le milieu naturel, ainsi que le risque qu'ils peuvent représenter dans les chaînes alimentaires sont à prendre sérieusement en considération. Pour les produits phytosanitaires récents, on visera à réduire les doses et à accélérer la métabolisation, ce qui contribue à diminuer les risques qu'ils représentent pour le consommateur et les écosystèmes.

La plupart des fongicides agissent par toxicité directe à l'égard des champignons pathogènes en interférant avec la respiration ou avec certains composants des membranes (inhibition de la synthèse d'ergostérol). D'autres inhibent la synthèse des parois, des protéines ou des acides ribonucléiques, ou encore empêchent le déroulement normal de la mitose (antimitotiques).

Certains composés assurent une protection phytosanitaire à des doses non fongicides en induisant la résistance de l'hôte ou en inactivant des composés du parasite indispensables au déroulement normal de la pathogénèse. L'une de ces molécules, l'éthyl-phosphonate d'aluminium, a, dès à présent, conquis un vaste marché dans la lutte contre certains mildious ; elle présente l'avantage de ne pas favoriser la sélection de souches résistantes des champignons pathogènes lors de son emploi répété dans les cultures.

Dans le domaine des insecticides, outre les molécules agissant sur l'insecte nuisible par toxicité directe (poisons du système nerveux, inhibiteurs de synthèse de la chitine), la lutte chimique utilise également des substances de synthèse reproduisant l'effet d'hormones en bloquant le développement au stade larvaire et en empêchant le passage à l'état adulte. Des analogues de phéromones sexuelles, empêchant l'accouplement en induisant la "confusion" des mâles, sont également utilisés, tandis que des lâchers de mâles stériles de certains ravageurs réduisent les potentialités de reproduction de l'espèce, ces mâles stériles s'accouplant avec des femelles qui n'auront pas de descendance.

Certains traitements chimiques, agissant par toxicité directe, deviennent progressivement moins efficaces lorsqu'ils sont répétés suite à la sélection de parasites ou de ravageurs résistants. On a constaté successivement le développement de résistance aux insecticides chlorés, puis aux organophosphorés (qui par ailleurs favorisent la pullulation des acariens), puis aux carbamates et on connaît déjà des résistances aux pyréthriinoïdes, qui sont les insecticides les plus récents. Les fongicides systémiques induisent également des résistances par sélection de mutants.

Pour éviter ou retarder la résistance de parasites ou de ravageurs vis-à-vis d'un traitement chimique, que ce soit dans les cultures ou chez les denrées entreposées, on peut alterner les modalités de lutte ainsi que les matières actives, ou utiliser des mélanges de produits à mode d'action différents.

Les formulations et les modes d'application contribuent aussi à assurer la spécificité des traitements chimiques. Par exemple, des insecticides systémiques appli-

qués sous forme de microgranulés dans la raie de semis ou par enrobage de semences, agissent sur les ravageurs de la culture sans pour autant atteindre les insectes auxiliaires bénéfiques. De même, les systèmes de libération lente des matières actives, ainsi que diverses formes d'appâts, permettent d'assurer une spécificité d'action des produits.

L'usage inconsidéré d'insecticides a conduit à des échecs économiques en culture de cotonnier en Amérique du Sud et en culture de pomme de terre au Pérou, avec développement de résistance chez les insectes nuisibles, multiplication de nouveaux ravageurs et pollution de l'environnement. Dans le cadre de programmes de lutte intégrée, il convient de ramener les traitements chimiques à une utilisation économique justifiée.

Les traitements phytosanitaires rentables reposent sur des interventions préventives ou curatives effectuées lorsque les situations le justifient, les *traitements systématiques de pure assurance étant à proscrire*.

2.7. La lutte physique

Les agents physiques utilisés pour lutter contre les maladies des plantes sont la température (élevée ou basse) et les différents types de radiations.

- **Traitement à la chaleur.** Le traitement à la chaleur (**thermothérapie**) utilise l'eau chaude ou l'air chaud pour le traitement des substrats, la désinfection des organes de propagation, la production de plants indemnes de virus et pour la désinfection des produits végétaux avant leur conservation. La température et la durée du traitement doivent être appropriées au but poursuivi : vapeur d'eau à 100 °C pour stériliser les sols, vapeur aérée à 60-70 °C pour la pasteurisation des substrats (création d'un vide biologique), air chaud à 80 °C pour le traitement des graines sèches, air chaud ou eau chaude à 45-50 °C pour traiter les organes herbacés contre les bactéries, les mycoplasmes et les champignons, traitement de longue durée à 37-38 °C pour éradiquer les virus des pousses de croissance.

La **solarisation**, utilisant l'énergie solaire pour désinfecter les sols, est actuellement largement utilisés dans les pays chauds et ensoleillés. Cette technique consiste à recouvrir le sol préalablement humidifié avec un film de polyéthylène transparent durant la période la plus chaude de l'année. Il en résulte une augmentation de la température du sol assurant une certaine destruction directe des parasites, mauvaises herbes et nématodes dans les couches superficielles et favorisant le développement d'une microflore dans les couches situées jusqu'au delà d'un mètre de profondeur en conférant aux sols ainsi traités un caractère suppressif, notamment grâce au développement de champignons appartenant au genre *Trichoderma* qui occupent le vide biologique créé par l'accroissement de température. Des effets de solarisation peuvent également être obtenus en cultures protégées (serres, tunnels plastique, etc.). La solarisation est actuellement utilisée dans de nombreux pays méditerranéens pour lutter contre les fusarioses, les verticillioses, sclérotinioses, agents de fontes de semis, le chancre à *Didymella* de la tomate, etc.

- **La réfrigération.** La réfrigération est probablement la méthode de lutte la plus utilisée pour contrôler les maladies de conservation. Les températures basses, légèrement au-dessus du point de congélation de l'organe végétal, ne tuent pas les agents pathogènes présents à la surface ou dans les hôtes, mais inhibent ou retardent la croissance et les activités de ces parasites.

• **Les radiations.** Les radiations électromagnétiques (UV, rayons X, rayons γ) et particulaires (β) ont été expérimentées pour lutter contre les maladies de conservation de nombreux fruits et légumes. Cependant, jusqu'à présent, cette technique n'est pas encore entrée dans la pratique courante, sauf pour quelques cas particuliers (fraises, condiments, crustacés) faisant l'objet d'autorisations spécifiques.

2.8. La lutte intégrée

Les interventions contre les parasites et ravageurs doivent s'effectuer dans le contexte d'une **lutte intégrée** qui prenne en compte la dynamique des populations d'organismes nuisibles dans les cultures et le milieu naturel. Il s'agit de coordonner au mieux tous les moyens d'intervention disponibles, de façon à maintenir les populations d'organismes nuisibles en dessous du seuil économique dommageable.

La lutte doit être adaptée aux problèmes régionaux à résoudre, aux conditions du milieu physique (connaissance des sols, de la bioclimatologie, etc.), du milieu biologique (végétation, microflore) et du milieu humain dans ses aspects sociologiques et économiques. Elle intéresse directement les agriculteurs, mais aussi le personnel d'encadrement des services officiels de l'agriculture et des réseaux de conseillers technico-commerciaux.

La lutte intégrée fait intervenir les moyens biologiques et chimiques, en donnant la priorité aux approches biologiques qui constituent souvent la solution la plus respectueuse de l'environnement, la moins coûteuse, et qui évite les problèmes liés aux résidus de pesticides.

En Afrique au sud du Sahara, les cultures de rapport (cotonnier, caféier, cacaoyer, théier, palmier à huile, *Citrus*, etc.) reçoivent habituellement des soins phytosanitaires sous forme de traitements chimiques tandis que pour les cultures vivrières (très généralement, des cultures de subsistance), les traitements chimiques de protection (insecticides, désinfectants de semences) ne jouent qu'un rôle mineur, et les méthodes culturales et génétiques de lutte s'avèrent être prioritaires. Par ailleurs, ces pays ne disposent généralement pas de l'infrastructure légale permettant le contrôle strict des traitements phytosanitaires.

2.9. La quarantaine et les règlements phytosanitaires

La défense des végétaux contre leurs ennemis constitue une question d'intérêt général, qui requiert une organisation phytosanitaire ayant pour rôle de surveiller l'état des cultures et d'appliquer des mesures douanières destinées à *empêcher l'introduction*, dans un pays ou une zone géographique déterminée, *de parasites ou de ravageurs nouveaux*. Les services officiels délivrent des certificats d'exportation des produits vers l'étranger, après inspection des plantes ou produits végétaux (parfois même des cultures d'où elles proviennent). La mise en œuvre de ces mesures est réalisée sous l'égide des services nationaux de la Protection des végétaux et d'organisations intergouvernementales travaillant en collaboration avec la FAO. Elle repose sur l'application de mesures légales de contrôle sanitaire aux frontières pour les végétaux ou parties de végétaux destinés à la mise en culture, à la consommation et aux travaux scientifiques, afin d'éviter toute introduction de parasites ou ravageurs nouveaux. Par manque de contrôle, des ennemis dangereux ont été intro-

duits récemment en Afrique : la cochenille du manioc, le bostryche du maïs et du manioc, l'acarien vert du manioc, la rouille de l'arachide (*Puccinia arachidis*).

Les **certificats phytosanitaires** sont émis par une autorité disposant d'un personnel qualifié, de sorte qu'ils puissent être acceptés en confiance par d'autres pays. Ces certificats garantissent que le produit a été inspecté soigneusement et qu'il a été découvert libre de toute maladie ou ravageurs couverts par les lois de quarantaine, ainsi que pratiquement indemne d'autres agents pathogènes. A l'intérieur d'un pays déterminé, toutes les plantes ou parties de plantes vivantes (plants, boutures, greffons, etc.) destinés à la vente doivent provenir d'établissements soumis au contrôle obligatoire d'un service agréé, et une pépinière ne peut théoriquement fonctionner que si elle est agréée par le service de la Protection des végétaux. De même, le transport des plants est soumis à un permis de circulation délivré par les inspecteurs de la Protection des végétaux.

Bien qu'une culture déterminée puisse demeurer séparée, dans le temps et dans l'espace, d'une cause de dégât potentiel (par exemple introduction d'une plante sans ses parasites ou ravageurs dans une zone géographique nouvelle), la rapidité et l'intensité croissante des échanges internationaux, de même que l'extension des zones cultivées au cours des dernières décennies, ont réduit considérablement l'impact de l'**isolement géographique**.

Si un agent pathogène est introduit accidentellement dans une zone géographique donnée, les services officiels peuvent être amenés à pratiquer l'**éradication**. Dans certains cas exceptionnels, cette méthode a été couronnée de succès. C'est ainsi qu'en 1927, la Floride a réussi à éliminer entièrement de son territoire une bactérie parasite des *Citrus* (*Xanthomonas citri*), qui avait été introduite accidentellement en 1911. Ce résultat ne fut acquis que par un effort considérable et au prix de la destruction d'une bonne partie des cultures existantes (20 millions d'arbres). La Floride demeura ensuite indemne de cette affection pendant 45 ans, grâce à des mesures de protection très sévères. Cependant, de nouvelles souches de la bactérie furent observées en Floride en 1983 et une seconde tentative d'éradication est actuellement en cours.

Dans la plupart des cas cependant, l'éradication s'avère impossible et l'homme est amené à vivre en permanence au contact des agents altérogènes. Par exemple, l'agent de la rouille du caféier (*Hemileia vastatrix*) a été introduit d'Afrique en Amérique du Sud en 1970, soit 250 ans après l'introduction de la culture caféière aux Antilles en 1723. Le café était demeuré depuis lors indemne de la rouille dans l'ensemble de l'Amérique du Sud. Cette rouille atteignit la côte occidentale de l'Afrique en 1966, au niveau de l'Angola et, en 1970, un spécialiste du cacao découvrit par hasard, au Brésil, des feuilles de caféier couvertes de pustules du champignon. Les mesures d'éradication prises en hâte s'avèrent inefficaces tandis que la lutte contre la progression du parasite vers l'Amérique centrale était rendue difficile par l'instabilité politique régnant dans ces régions. Aujourd'hui, la rouille a colonisé toutes les caféières d'Amérique latine, ce qui modifie considérablement les conditions de production du café dans l'ensemble du Nouveau Monde.

De nombreuses tentatives d'éradication n'ont pas pu arrêter la progression du bayoud du palmier-dattier en Afrique du Nord, pas plus que celle du feu bactérien du pommier et du poirier ainsi que, du virus de la sharka sur arbres fruitiers à noyaux en Europe.

2.10. La protection des produits stockés

Les conditions tropicales sont particulièrement favorables au développement des champignons, bactéries, insectes, acariens et rongeurs qui, par leur prolifération, provoquent l'altération des produits végétaux. Il est donc important à cet égard d'amener les denrées stockées au degré de séchage qui assurera leur autoprotection contre les moisissures et les insectes.

Le stockage s'effectue au niveau des villages, des coopératives ou des ports assurant l'importation et l'exportation des produits. Les conditions traditionnelles de stockage (greniers en bois plus ou moins fermés) occasionnent de nombreuses pertes. Des améliorations sont obtenues par l'utilisation de récipients métalliques ou de jarres cimentées étanches, ce qui empêche l'introduction des ravageurs et permet, si nécessaire, la mise en œuvre de certaines techniques de protection, utilisant des poudres, des fumigants, ou des additifs naturels (extraits de plantes tropicales).

Si des moyens chimiques d'intervention s'avèrent nécessaires, leur application sera étudiée de façon à respecter les règles de bonne conduite et à limiter les résidus. On précisera les doses à utiliser ainsi que la persistance d'efficacité des produits au sein des denrées traitées et on adaptera les modalités de traitement aux conditions locales de stockage.

3. LES PROBLÈMES ACTUELS EN PROTECTION DES CULTURES

3.1. La permanence des problèmes phytosanitaires

Malgré la mise en œuvre de moyens de lutte de plus en plus raffinés, les maladies des plantes et les ravageurs continuent à provoquer d'importants dégâts aux cultures et aux récoltes. Dès lors, en cette fin de xx^e siècle, un traité d'agronomie tropicale se doit de faire le point à propos des problèmes, des méthodes et des perspectives en matière de phytoprotection.

Deux facteurs d'aggravation des altérations des cultures en régions tropicales se sont développés à l'époque contemporaine : l'homogénéité génétique des plantes cultivées et la diversification des flores parasitaires et des faunes de ravageurs.

L'homogénéité génétique croissante des cultures résulte tout naturellement de ce que les producteurs choisissent les variétés les plus productrices, les plus appréciées, ou les mieux adaptées à des conditions particulières. La présence de réseaux commerciaux très actifs permet de répandre rapidement ces nouvelles variétés sur de vastes surfaces. Ce processus sélectionne en permanence des parasites et des ravageurs adaptés aux nouveaux génotypes cultivés. Dans bien des cas, l'introduction de gènes de résistance crée elle-même les conditions favorisant l'extension des biotypes parasitaires aptes à attaquer les nouvelles variétés. Parmi les cas chroniques en la matière, on peut citer les rouilles des céréales ou le mildiou de la pomme de terre, chez lesquels la spécialisation du pathogène n'a d'autre limite que l'ingéniosité des chercheurs à créer des variétés possédant des nouveaux facteurs de résistance, qui s'écroulent les uns après les autres.

De plus en plus, la protection des végétaux devra s'appuyer sur une vision planétaire des problèmes pour faire face aux nouvelles affections, pour affiner une prise de conscience évolutive des problèmes et pour diffuser les nouvelles techniques de lutte tant pour les cultures de rente que pour les cultures de subsistance.

Dans les régions tropicales et subtropicales, les impératifs de rentabilité croîtront avec l'intensification des productions, exigeant un investissement croissant dans le secteur des services de vulgarisation et le développement des transferts d'information au sein de "réseaux". Les monocultures vont augmenter en importance, de sorte que la production de semences ou de cultivars améliorés, ainsi que le développement de nouvelles espèces et variétés végétales (y compris celles issues du secteur des nouvelles technologies) vont connaître des extensions nouvelles. La lutte intégrée, utilisant des agents de contrôle chimiques et biologiques tout en minimisant les risques de leur emploi pour l'homme et l'environnement, s'imposera de plus en plus.

Toutefois, certains paramètres limitants (manque d'eau pour l'irrigation, dégradation et érosion des sols, déficit énergétique) vont conduire à optimiser le rendement économique à long terme, plutôt que de tabler sur des rendements maximaux à court terme. Ceci devrait permettre de développer des agro-écosystèmes plus équilibrés, assurant le maintien soutenu de la production végétale.

3.2. Les progrès à réaliser en protection des cultures

- **Quantifier les effets des agents altérogènes sur le rendement des cultures.** La plupart des cultures ont des rendements qui sont de loin inférieurs à leurs potentialités, notamment à cause des effets des maladies et ravageurs. Il est important dès lors de pouvoir apprécier correctement les seuils de dégâts tolérables, afin de définir des traitements qui soient à la fois pratiques, réalistes et dont les effets soient durables.

- **Mettre au point des méthodes de diagnostic et de détection rapides, peu coûteuses et fiables.** Tant pour ce qui est du domaine pratique que pour la recherche, il est indispensable d'améliorer les méthodes de diagnostic et de détection des agents pathogènes, des ravageurs, ainsi que des différentes composantes de la microflore, notamment pour contrôler l'état sanitaire des organes utilisés pour la plantation (semences, boutures, greffes, tubercules, etc.).

La mise au point de nouvelles méthodes simples, efficaces et peu coûteuses de diagnostic de routine est nécessaire pour permettre aux conseillers agricoles de terrain d'identifier les organismes nuisibles et de définir les stratégies de lutte appropriées.

- **Développer les analyses quantitatives des épidémies.** Il convient d'améliorer les méthodes quantitatives de caractérisation et de prévision des épidémies, afin de mieux évaluer l'effet des agents altérogènes et d'apprécier plus correctement l'impact des maladies et des ravageurs sur les productions végétales.

- **Faire progresser l'étude des interactions entre facteurs non biotiques et biotiques.** De nombreux paramètres de l'environnement (sols compacts, déséquilibres nutritifs, asphyxie radiculaire, déficit en eau, salinité, température trop haute ou trop basse, polluants divers), tout en ayant des effets propres, exercent également un impact indirect en agissant sur la microflore ou en produisant des plantes sen-

sibles aux maladies, de sorte que la sélection pour la tolérance aux facteurs abiotiques (notamment sécheresse et salinité) s'impose à un double titre.

- **Améliorer la durée d'efficacité des résistances génétiques.** Pour les cultures de rente, on développera des méthodes permettant d'identifier et de sélectionner des traits de résistance stables vis-à-vis de multiples agents pathogènes.

En ce qui concerne les cultures vivrières de subsistance, on veillera à conserver au maximum la diversité génétique des variétés locales adaptées et on basera l'introduction de nouveaux cultivars sur des tests comparatifs dont l'étendue et la durée seront suffisantes.

- **Améliorer la lutte chimique.** Les nouveaux produits de traitements phytosanitaires devraient avoir des spectres d'action élargis, être sans danger pour l'homme et l'environnement, être efficaces à faible dose, être systémiques et posséder des modes d'actions incontournables par les parasites et les ravageurs. Un exemple en la matière est fourni par l'éthyl-phosphite d'aluminium.

- **Développer la lutte biologique.** Pour les cultures de subsistance, ainsi que pour certains ravageurs et parasites des cultures de rente, il faudra développer une meilleure connaissance des possibilités de lutte biologique et mettre en place des réseaux de production et de distribution des agents de lutte biologique.

- **Éviter les maladies de conservation.** Les problèmes liés aux maladies de conservation revêtent une importance toute particulière en régions chaudes. Il faudra sélectionner des génotypes de végétaux dont les produits soient de bonne conservation, améliorer les techniques permettant d'éviter le développement des agents pathogènes et des ravageurs et détecter précocement les lots atteints afin d'en faire un usage approprié.

3.3. Les perspectives des nouvelles technologies

De nouvelles technologies sont actuellement disponibles et peuvent être utilisées dans le diagnostic et dans la lutte contre les maladies et ravageurs des plantes.

Les *techniques de diagnostic* dans le domaine de la protection des végétaux *sont en constante évolution en vue d'identifier les maladies et ravageurs des cultures et de préciser leur étiologie*. Le diagnostic est une démarche extrêmement complexe pluridisciplinaire reposant sur des connaissances approfondies basées sur une longue expérience. Si l'expertise existe généralement dans des domaines spécialisés (maladies cryptogamiques, virales, etc.), elle est plus rare en ce qui concerne les aspects généraux de la phytoprotection. Les échantillons végétaux ou animaux à diagnostiquer doivent donc souvent être envoyés à des experts pour identification, ce qui entraîne un retard dans l'application des méthodes de lutte. De plus, dans de nombreux laboratoires, les travaux d'expertise sont en compétition avec les activités de recherche. La pratique actuelle du diagnostic évolue et, grâce à l'informatique, l'identification pourra être mise à la disposition des utilisateurs via des logiciels assurant une aide à la prise de décision (**systèmes experts**). Ces programmes informatiques, visant à valoriser les connaissances dans un domaine limité, sont déjà utilisés pour le diagnostic médical dans certains pays. Facilement consultables, ils pourraient rendre le diagnostic et l'expertise indépendants du lieu et du temps. Leur construction demande l'intervention d'experts (compétents en intelligence artificielle, en logiciels et en phytoprotection), mais leur utilisation peut être mise à la

portée du technicien ou de l'agriculteur. L'élaboration et la mise en circulation des systèmes experts rendra d'importants services aux pays manquant de cadres et d'infrastructures spécialisées.

Le diagnostic par les méthodes **immunologiques** a connu un développement important et rapide. La méthode ELISA (*Enzyme Linked Immuno Sorbent Assay*) a trouvé de nombreuses applications par suite de sa qualité, de sa simplicité et de sa fidélité. Elle présente une haute spécificité, grâce à l'emploi d'anticorps monoclonaux produits *in vitro*, et sa sensibilité est 1 000 fois plus élevée que celle des méthodes sérologiques classiques. Ces qualités lui ont permis d'être adoptée comme technique de contrôle de routine par de nombreux laboratoires de pays développés et en voie de développement. Des coffrets de diagnostic sont déjà commercialisés pour la détection des maladies à virus des arbres fruitiers à noyau, des agrumes, de la vigne, de la pomme de terre et sont actuellement en cours d'adaptation pour les maladies bactériennes et cryptogamiques.

La technique d'électrophorèse en gel de polyacrylamide (PAGE), ainsi que la mise en évidence des acides nucléiques d'organismes, de virus, ou de viroïdes pathogènes, par utilisation de sondes moléculaires (ADN), pourront également devenir des tests de routine dans un proche avenir. Grâce à ces méthodes, le résultat du diagnostic peut être obtenu rapidement, au lieu de demander plusieurs semaines ou plusieurs mois, comme c'est souvent le cas dans l'indexage par les techniques biologiques.

Les **biotechnologies** jouent un rôle essentiel dans plusieurs domaines et sont actuellement appliquées en protection des végétaux, particulièrement dans la production et la multiplication de variétés résistantes ou de clones sains.

L'utilisation de variétés résistantes constitue la méthode de lutte la plus simple, la plus efficace et la plus économique, à condition que ces variétés soient bien adaptées aux exigences du producteur, du consommateur et du biotope. L'obtention de variétés résistantes requiert toutefois un travail de recherche long et difficile.

Les techniques classiques d'amélioration des plantes reposent sur le croisement des espèces et des variétés, suivi de la sélection de génotypes résistants. Ces méthodes rencontrent des difficultés, telles que les barrières biologiques d'incompatibilité empêchant la reproduction sexuée entre espèces et individus. Les méthodes de culture *in vitro* et de transfert d'informations génétiques par voie non sexuelle, ouvrent actuellement des possibilités nouvelles pour l'amélioration des plantes par les méthodes des biotechnologies. Les variants ou mutants obtenus en culture de tissus, les plantes monoparentales haploïdes issues de cellules sexuelles mâles ou femelles, les plantes provenant de croisements interspécifiques dont le développement embryonnaire a été rendu possible par culture *in vitro*, la fusion somatique de cellules ou de chloroplastes, et les plantes transformées par génie génétique constituent autant de sources nouvelles pour l'exploitation de la variabilité et pour la sélection de génotypes possédant des propriétés particulières.

Les techniques de culture *in vitro* sont actuellement appliquées avec succès pour la micropropagation de plusieurs espèces de plantes cultivées dans les régions chaudes : palmier à huile, palmier dattier, agrumes, caféier, pomme de terre, etc. Ces techniques visent à produire des pieds-mères indemnes de virus, à obtenir rapidement de grandes quantités de plantes homogènes pour reconstituer des peuplements détruits par un agent altérogène (cas du palmier dattier en Afrique du Nord ravagé par le bayoud causé par *Fusarium oxysporum* f. sp. *albedenis*). La culture *in vitro* permet également

d'introduire et de sélectionner des facteurs de résistance à de nombreux agents biologiques (parasites, ravageurs) ou abiotiques (salinité, sécheresse).

Dans les programmes de sélection classique vis-à-vis des maladies, l'améliorateur est confronté à de multiples difficultés, telles que la production d'infections régulières et l'évitement d'interférences avec d'autres agents pathogènes. L'application, sur plantules ou sur organes en culture *in vitro*, de molécules dont le rôle dans une maladie a été établi, peut permettre de trier précocement des types résistants. Les fusions intra- ou inter-spécifiques de protoplastes, la mutagenèse induite, l'utilisation de cellules haploïdes et le transfert de matériel génétique permettent l'obtention de plantes possédant des caractères nouveaux. Le criblage biochimique *in vitro*, après manipulation génétique, peut être appliqué au niveau cellulaire sur une vaste population en un temps très court.

BIBLIOGRAPHIE

- Agrios G. (1988), *Plant Pathology*, Academic Press, New York, 803 p.
- Anonyme (1976), *La Défense des cultures en Afrique du Nord*, German Agency for Technical Cooperation, Eschborn, 256 p.
- Anonyme, *PANS Manual*, Centre for Overseas Pest Research, London.
- n °1 (1977), *Pest control in bananas*, 3^e éd., 126 p.
- n °2 (1973), *Pest control in groundnuts*, 197 p.
- n °3 (1976), *Pest control in rice*, 295 p.
- n °4 (1978), *Pest control in tropical root crops*, 235 p.
- (1981), *Pest control in tropical grain legumes*, 206 p.
- Anonyme (1984), *FAO's strategy for improved plant protection*, SPAN, 27, 14-15.
- Anonyme (1990), *Guide pratique de défense des cultures*, Association de coordination technique agricole, Paris, 557 p.
- Anonyme (1990), *Fruits (spécial bananes)*, Institut de recherches sur les fruits et agrumes (IRFA), 130 p.
- Autrique A. (1981), *Les principaux ennemis des cultures de la régions des grands lacs d'Afrique centrale*, Administration générale de la coopération au développement (AGCD), Bruxelles, 144 p.
- Bovey R. (1979), *La Défense des plantes cultivées*, Payot, Lausanne, 864 p.
- Collingwood E.F., Bourdouxhe L. et Defrancq M. (1981), *Les principaux ennemis des cultures maraîchères au Sénégal*, Administration générale de la coopération au développement (AGCD), Bruxelles, 95 p.
- Capdepon M. (1983), "La lutte contre les phanérogames parasites", *Annales des Sciences naturelles, Botanique*, Paris, 5, 1627.
- Corbaz R. (1990), *Principes de pathologie et de lutte contre les maladies des plantes*, coll. "Biologie", Presses polytechniques et universitaires romandes, 286 p.
- Cornuet P. (1987), *Éléments de virologie végétale*, INRA, Paris, 205 p.
- Fiala I. et Fèvre F. (1992), *Dictionnaire des agents pathogènes des plantes cultivées*, INRA, Paris, 136 p.
- FAO (1985), *Code international de conduite pour la distribution et l'utilisation des pesticides*, FAO, Rome, 17 p.
- Fry W.E. (1982), *Principles of plant disease management*, Academic Press, New York, 378 p.
- Gaie W. et Flemal J. (1988), *La culture du caféier d'Arabie au Burundi*, Administration générale de la coopération au développement (AGCD), Bruxelles, 198 p.

- Gunn D.L. et Stevens J.G.R. (1976), *Pesticides and human welfare*, Oxford University Press, 278 p.
- Hill D.S. (1975), *Agricultural insect pests of the tropics and their control*, 2^e éd. Cambridge University Press, 746 p.
- Hill D.S. (1987), *Agricultural insect pests of the temperate regions and their control*, Cambridge University Press, 659 p.
- Kranz J. (1990), *Epidemics and plant diseases*, Springer-Verlag, Berlin, 268 p.
- Levitt J. (1980), *Responses of plants to environmental stress*, Vol 2 : *Water, radiation, salt and other stress*, Academic Press, New York, 624 p.
- Messian C.-M. (1981), *Les Variétés résistantes. Méthodes de lutte contre les maladies et ennemis des plantes*, INRA, Paris, 374 p.
- Messian C. M., Blancard D., Rouxel F. et Lafon R. (1991), *Les Maladies des plantes maraîchères*, INRA, Paris, 552 p.
- Mount M. et Lacy G. (1982), *Phytopathogenic prokaryotes*, Academic Press, New York, Vol 1, 541 p. et Vol 2, 506 p.
- Palti J. (1981), *Cultural practices and infectious crops diseases*, Spinger Verlag, Berlin, 243 p.
- Palti J. et Ausher R. (1986), *Advisory work in crop pest disease management*, Springer-Verlag, Berlin, 284 p.
- Sasson A. (1986), *Quelles biotechnologies pour les pays en développement ? Bio-futur-Unesco*, Paris, 200 p.
- Semal J. (ed.) (1989), *Traité de Pathologie végétale*, Presses agronomiques de Gembloux, 621 p.
- Wolfe M. et Caten C. (1987), *Populations of plant pathogens. Their dynamics and genetics*, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 280 p.
- Yaninek J.S. et Herren H.R. (eds.) (1989), *Biological control : a sustainable solution to crop pest problems in Africa*, International Institute of Tropical Agriculture, Ibadan, Nigeria, 210 p.

Chapitre 18

CONTRÔLE DES MAUVAISES HERBES

A. Peeters* et J.-F. Salembier**

*Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgique

**Centre de recherches agronomiques de Gembloux, Belgique

Sommaire

1. Importance du désherbage

- 1.1. Définition de la notion de “mauvaise herbe”
- 1.2. Origine et évolution des mauvaises herbes
- 1.3. Effets de la présence des mauvaises herbes

2. Bases agronomiques du désherbage

- 2.1. Moyens de dissémination des mauvaises herbes
- 2.2. Pérennité et formes biologiques des adventives
- 2.3. Écologie des adventices
- 2.4. Importance de la reconnaissance des espèces d’adventices

3. La lutte contre les mauvaises herbes par les techniques culturales

- 3.1. Prévention contre l’introduction de graines exogènes
- 3.2. Autres méthodes phytotechniques

4. Le désherbage chimique et le mode d’action des herbicides

- 4.1. Les raisons du désherbage chimique
- 4.2. Définition et classification des herbicides
- 4.3. La sélectivité des traitements herbicides
- 4.4. La résistance aux herbicides
- 4.5. Mode d’absorption des herbicides
- 4.6. Comportement des herbicides dans le sol
- 4.7. Comportement des herbicides dans les plantes
- 4.8. Les propriétés d’un herbicide et les types de matières actives
- 4.9. Évolution de la phytopharmacie et propriétés des nouveaux herbicides

Bibliographie

CONTRÔLE DES MAUVAISES HERBES

1. IMPORTANCE DU DÉSHERBAGE

1.1. Définition de la notion de “mauvaise herbe”

La notion de “mauvaise herbe” n’est pas absolue. Dans la nature, il n’y a bien sûr ni “bonnes”, ni “mauvaises” herbes. La notion de “mauvaise herbe” est donc purement anthropocentrique et, de plus, elle n’existe que dans un contexte spatio-temporel déterminé. C’est ainsi que même des plantes cultivées peuvent devenir des mauvaises herbes. C’est le cas par exemple du colza dont des quantités importantes de graines tombent sur le sol à la moisson. Ces graines peuvent germer lors d’une culture ultérieure de céréales ou de betteraves et ces plantes “spontanées” de colza peuvent concurrencer ainsi dangereusement ces cultures. C’est le cas aussi des repousses de pommes de terre ou des betteraves “sauvages” en culture de betterave.

Par contre, en région méditerranéenne, les mauvaises herbes sont appréciées par les éleveurs pour l’appoint fourrager qu’elles procurent. De même, dans les prairies d’Europe de l’Ouest, certaines plantes qui étaient autrefois considérées comme des mauvaises herbes, sont reconnues intéressantes aujourd’hui pour augmenter les quantités d’herbe ingérées par les animaux et équilibrer la composition minérale des fourrages.

Il n’en reste pas moins vrai qu’une mauvaise herbe est généralement considérée comme une plante indésirable dans une culture pour les raisons qui sont développées ci-dessous. Toutefois, le but du désherbage n’est pas l’éradication complète d’une plante mais bien de supprimer les ennuis qu’elle occasionne, et ce bien sûr, non seulement d’une façon économique mais encore d’une manière écologiquement justifiée (Stryckers, 1979). Il faut reconnaître qu’un faible pourcentage de mauvaises herbes ou la présence d’espèces peu compétitives peut avoir un effet favorable aussi bien pour la culture que pour le sol (matière organique, vie du sol, piège à nitrates, érosion). Cet aspect bénéfique de la présence de certaines mauvaises herbes bascule cependant facilement au désavantage de la culture.

Il peut être nécessaire de faire la distinction entre plantes adventices et mauvaises herbes. Une adventice, au sens strict, est en effet une plante qui se trouve dans un milieu qui n’est pas le sien. Elle peut avoir été introduite involontairement par l’homme ou être apparue spontanément dans un biotope cultivé. Elle devient une mauvaise herbe lorsqu’elle occasionne un préjudice, c’est-à-dire une baisse de rendement de la culture.

On peut cependant, par facilité, parler indifféremment de mauvaises herbes, de plantes adventices ou d’adventices, de plantes commensales ou de commensales. Les adventices des cultures de céréales sont souvent appelées plantes messicoles .

1.2. Origine et évolution des mauvaises herbes

Le génotype des plantes qui se sont introduites dans les cultures est riche de potentialités. Ces plantes qui vivaient avant l'apparition de l'*Homo sapiens* dans des milieux divers : dunes, aulnaies, clairières pâturées par les ongulés sauvages, repaires des herbivores, bords des rivières, etc., ont produit des écotypes adaptés aux conditions nouvelles qu'ils trouvaient dans les cultures.

Depuis le Néolithique et jusqu'à nos jours, suite à l'extension des cultures, des semences d'adventices ont été transportées loin de leur zone d'origine. De nouveaux écotypes adaptés aux conditions climatiques y sont apparus. Ce phénomène a été démontré pour les genres *Spergula*, *Amaranthus*, *Chenopodium* (Montégut s.d.). C'est certainement le cas aussi pour les graminées d'origine tropicale ou subtropicale qui ont accompagné le maïs dans sa progression vers le nord de l'Europe : *Digitaria*, *Echinochloa*, *Setaria*.

Ces dernières années, les herbicides ont bien entendu opéré un premier tri entre les espèces, en éliminant les plus sensibles, mais ils ont de plus induit des variétés résistantes au sein d'une même espèce. Cela a été mis en évidence chez des *Amaranthus* sp., des *Chenopodium* sp. et *Solanum nigrum* L. notamment qui présentent des écotypes résistants à l'atrazine dans les cultures de maïs. Gasquez (1991) inventorie pas moins de 45 espèces qui ont présenté au moins une fois des écotypes résistants aux triazines. Des phénomènes de résistance ou de moindre sensibilité aux herbicides se sont manifestés pour une série d'autres espèces et pour de nombreux autres produits, citons la trifluraline (*Eleusine indica* (L.) Gaertn.), des sulfonyles (*Lactuca serriola* L., *Kochia scoparia* (L.) Schrad.), l'isoproturon et le chlorotoluron (*Alopecurus myosuroides* Huds.), le diclofop méthyl (*Lolium rigidum* Gaudin, *Avena fatua* L.) et le paraquat (*Hordeum glaucum* Steud., *Conyza canadensis* (L.) Cronq.) (Gasquez 1991).

1.3. Effets de la présence des mauvaises herbes

Les mauvaises herbes réduisent la croissance et le développement des plantes cultivées par des phénomènes de concurrence pour l'eau, l'air (CO₂), la lumière et les éléments nutritifs. Elles peuvent également dans certains cas émettre des substances phytotoxiques.

Ce phénomène de compétition peut être illustré par l'exemple de la culture de blé d'hiver, où la présence du vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides*) diminue le rendement dans les proportions suivantes (synthèse de 60 essais, Strykers 1979) :

Nombre de plantes de vulpin par m ²	25	50	75	100	125
% de diminution du rendement du blé	5,8	11,6	17,4	23,2	29,0

- **Besoins en eau.** L'eau a bien entendu un rôle essentiel notamment pour le transport des éléments nutritifs. Les populations de mauvaises herbes consomment cette eau pour leur croissance, au même titre que la plante cultivée. La présence des mauvaises herbes entraîne donc un plus rapide épuisement de la réserve en eau utile du sol. Ce phénomène limite déjà en lui-même la croissance et ce d'autant plus que la période est sèche (été, régions arides).

- **Besoins en CO₂.** La compétition pour le CO₂ dans un couvert végétal a été démontrée de différentes manières, notamment en injectant du CO₂ dans ce couvert et

en observant l'effet sur la croissance. En enrichissant l'atmosphère en CO₂, le taux net d'assimilation (NAR) augmente, ce qui prouve que l'élément est limitant (Egli et al., 1970). Par ailleurs, la concentration en CO₂ dans le couvert n'est pas homogène par temps calme (Wright & Lemon, 1966). Le couvert présente des zones de moindre concentration. La présence de plantes adventices mélangées à la plante cultivée réduit donc manifestement l'accès de la culture à des concentrations suffisantes en CO₂ et limite de ce fait son rendement.

- **Besoins en lumière.** La compétition pour la lumière est une réalité qui affecte non seulement les relations interspécifiques entre espèces cultivées et mauvaises herbes, mais aussi entre les individus d'une même espèce et entre les organes foliaires au sein d'un même individu. Cette compétition a pour conséquence de réduire la quantité de lumière accessible à chaque individu et ce, dès la germination, si la densité des graines est forte, mais en tout état de cause, assez rapidement après, dès que les feuilles se superposent. Pour chaque individu cela se traduit par une vitesse de croissance de la culture (CGR) réduite, ce qui peut s'exprimer encore par une vitesse de croissance relative (RGR) ou un taux net d'assimilation (NAR) plus faibles.

- **Besoins en éléments nutritifs.** Les mauvaises herbes affectent négativement la nutrition minérale des plantes cultivées. Elles entrent en concurrence avec elles pour l'azote et les autres éléments minéraux. Les adventices appartenant aux dicotylédones sont d'ailleurs souvent plus riches en éléments minéraux que les céréales qu'elles accompagnent. Leurs capacités d'échanges cationiques racinaires (CECR) plus élevées que celles des monocotylédones leur permet d'absorber plus facilement le calcium et le magnésium. De plus, le système racinaire pivotant de certaines adventices (*Brassicaceae*, *Rumex* sp. par exemple) leur permet d'explorer des couches de sol peu exploitées par la plante cultivée.

- **Émission de phytotoxines.** L'émission de phytotoxines par des adventices a été évoquée à plusieurs reprises. Il est cependant très difficile d'établir des évidences dans ce domaine. Néanmoins, il a pu être démontré que certaines espèces comme le chiendent (*Elymus repens* (L.) Gould), utilisent des substances allélopathiques dans leur conquête de l'espace. Le chiendent émet une substance téléttoxique, l'agropyrene, qui réduit la croissance des plantes croissant à proximité. En cas de fortes concentrations de chiendent, ces phénomènes d'**allélopathie** viennent s'ajouter aux mécanismes traditionnels de concurrence entre espèces pour limiter le rendement de la plante cultivée.

Les mauvaises herbes ont également une incidence économique par des effets indirects.

- **Toxicité.** Elles peuvent être toxiques pour le bétail ou l'homme qui consomment la récolte. La nielle des blés (*Agrostemma githago* L.), plante adventice des cultures de céréales, peut occasionner des irritations des muqueuses et des troubles gastriques lorsque ses graines sont mélangées à de la farine consommée par l'homme. Ces graines contiennent en effet de l'agrostemine, un saponoside triterpénique (Faliu, 1981).

Dans les cultures de petits pois (*Pisum sativum* L.), les baies de morelle noire (*Solanum nigrum*), d'un diamètre comparable aux pois, sont parfois mises en conserve avec eux. Ces baies contiennent un glucoalcaloïde stéroïdique, de la solanine qui est très toxique (Faliu, 1981). Ces baies de morelles peuvent aussi se retrouver dans l'ensilage de maïs, la morelle est en effet très fréquente dans cette culture, certains

écotypes ont d'ailleurs développé une résistance à l'atrazine qui est l'herbicide le plus utilisé pour le désherbage du maïs.

• **Gêne mécanique à la récolte.** Les mauvaises herbes peuvent également compliquer la récolte, surtout si celle-ci est réalisée mécaniquement.

Le gaillet gratteron (*Galium aparine* L.) et les autres plantes volubiles peuvent occasionner la verse des céréales et gêner le travail des moissonneuses-batteuses. La verse par elle-même peut engendrer des pertes de rendement. .

• **Multiplication et dissémination des parasites et déprédateurs des espèces cultivées.** Les mauvaises herbes peuvent servir de refuge aux parasites et déprédateurs des espèces cultivées et y trouver un milieu de propagation.

Exemples :

- Ergot de seigle (*Claviceps purpurea* (Fr.) Tul.) sur *Elymus repens*, *Lolium* sp., *Dactylis glomerata* L., etc.
- Blanc des crucifères (*Albugo candida* (Pers. ex Chev.) Kuntze) sur *Capsella bursa-pastoris* (L.) Med.
- Rouille jaune des céréales (*Puccinia striiformis* Westend) sur graminées sauvages.
- Pucerons (*Aphis* sp.) sur diverses plantes sauvages, ces pucerons peuvent ensuite transmettre des maladies virales aux plantes cultivées (betteraves, céréales).
- Doryphore (*Leptinotarsa decemlineata* Say) sur *Solanum nigrum*.

• **Dépréciation de la récolte.** Les semences des adventices, lorsqu'elles sont mélangées aux semences de la plante cultivée, doivent être éliminées par triage, ce qui occasionne des frais supplémentaires. Les semences impures ont en effet une moindre valeur marchande. Ceci est vrai aussi bien pour des cultures semencières que pour des céréales par exemple. Les adventices des cultures fourragères (*Chenopodium album* L., *Rumex obtusifolius* L.) peuvent être très abondantes lors de l'année de l'implantation de ces cultures. Leur digestibilité et leur valeur alimentaire en général, sont bien inférieures à celles des fourrages semés.

2. BASES AGRONOMIQUES DU DÉSHERBAGE

2.1. Moyens de dissémination des mauvaises herbes

Il y a plusieurs façons de classer les mauvaises herbes en fonction de leurs modes de propagation ou de leur persistance. Certaines espèces se multiplient uniquement par graines, d'autres ont aussi un mode de propagation par voie végétative, ce mode de reproduction par voie végétative peut être d'ailleurs le moyen privilégié par lequel l'espèce se multiplie. De nombreuses espèces qui se propagent efficacement par rhizomes par exemple, produisent peu de graines. Elles possèdent alors deux stratégies de multiplication : la multiplication à courte distance est essentiellement végétative tandis que la dispersion de l'espèce sur de longues distances se fait par voie de graines. La reproduction sexuée représente aussi pour ces espèces le moyen de conserver la diversité de leur génome avec les avantages évolutifs et d'adaptation qui en découlent.

La figure 18.1 symbolise le cycle reproductif d'une espèce par voie sexuée avec ses différentes phases et ses différents compartiments.

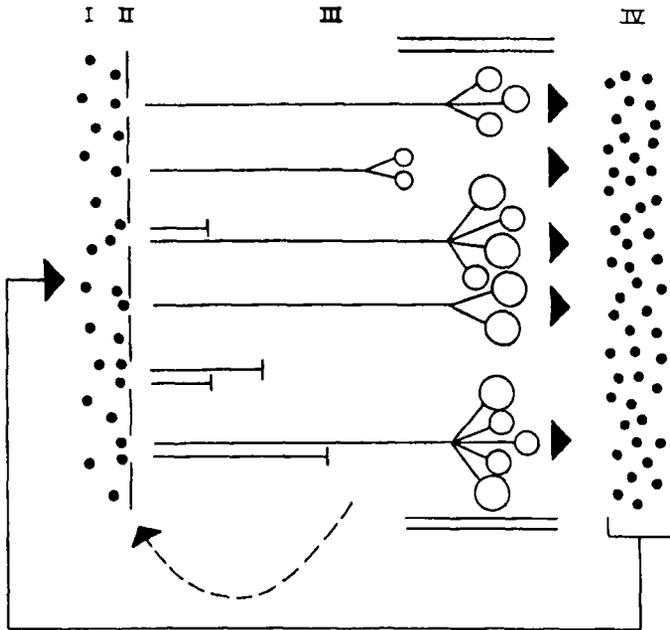


Figure 18.1. Cycle reproductif d'une adventice par voie sexuée, phases et compartiments.
 I. Banque de graines.
 II. Recrutement des semis (germination).
 III Phase de croissance de la biomasse et du nombre d'unités modulaires
 IV. Phase terminale de la production de graines (pluie de graines).
 Source Harper (1990)

2.1.1. Pluie de graines

La reproduction sexuée des mauvaises herbes engendre une pluie de graines plus ou moins importante selon les espèces (tableau 18.1). Cette pluie de graines couvre une surface plus ou moins éloignée de la plante-mère suivant les caractéristiques de la graine et les paramètres climatiques.

Tableau 18.1. Exemples de production de graines par unité de surface ou par plante

Espèce	Type de culture	Graines/m ²
Région méditerranéenne (d'après Cavers & Benoit (1989))		
<i>Amaranthus retroflexus</i> L	essais fertilisés	1 038 000
Région tempérée (d'après Cavers & Benoit (1989)) :		
<i>Elymus repens</i>	Culture intensive	> 634
<i>Alopecurus myosuroides</i>	Blé d'hiver	6 500
Espèce	Type de culture	Graines/plante
Région tempérée d'après Hanf (1982)		
<i>Matricaria recutita</i> L	Céréales	5 000
<i>Rumex obtusifolius</i>	Céréales, prairies	7 000
<i>Chenopodium album</i>	Cultures sarclées	3 000 à 20 000

Les membres de la famille des astéracées ont développé des graines particulièrement aptes à se déplacer sur de grandes distances. Ces graines sont munies d'un pappus qui sert à ralentir la chute de l'achène et peut même lui permettre de s'éle-

ver dans les airs en cas de courants ascendants. Des graines de *Tussilago farfara* L. ont été observées en déplacement, flottant dans l'air, à la vitesse de 60-80 m/heure (Bakker, 1960). Ces graines peuvent ainsi parcourir jusqu'à 6 km.

Certaines graines sont éjectées de la capsule de la plante-mère et projetées ainsi à une certaine distance de celle-ci, c'est le cas par exemple de plusieurs espèces d'*Impatiens* sp. et de *Oxalis fontana* Bunge. D'autres semences sont disséminées par les animaux. Elles peuvent être munies d'appendices crochus qui, leur permet de s'accrocher à la toison de certaines espèces (*Arctium* sp.) ou de coller aux pattes de palmipèdes ou d'autres oiseaux d'eau dans le cas de mauvaises herbes aquatiques (*Lemna* sp.).

Des graines de mauvaises herbes peuvent aussi être propagées involontairement par l'homme. Les semences de la plante cultivée elle-même contiennent fréquemment des graines de mauvaises herbes. Les semences de graminées fourragères peuvent contenir des graines de *Rumex obtusifolius* ou d'*Elymus repens*. Les semences de céréales peuvent être mélangées à des graines de *Galium aparine* ou de *Raphanus raphanistrum* L. par exemple. Certaines graines d'adventices ne sont pas détruites lors du passage dans le système digestif des animaux d'élevage. Elles se retrouvent ensuite dans les fumiers et les lisiers et sont épandues avec ceux-ci sur les terres de culture. Des semences d'adventices peuvent également être présentes dans les pailles des céréales et viennent donc s'ajouter au stock semencier présent dans les fumiers. Certains composts insuffisamment fermentés (température de compostage inférieure à 55-60 °C) peuvent également être une source importante d'infestation. Les eaux d'irrigation peuvent aussi transporter à grandes distances les semences des mauvaises herbes croissant à proximité des canaux d'irrigation.

Une fois tombées sur le sol, les graines de mauvaises herbes peuvent encore se déplacer sur des distances importantes en roulant à la surface du sol, poussées par le vent. Ce processus peut être non négligeable dans le cas de certaines espèces de graminées.

2.1.2. Dormance

Lorsqu'une graine touche le sol après une dispersion à partir du pied-mère sur une plus ou moins longue distance, elle n'est pas nécessairement capable de germer immédiatement. De nombreuses graines sont "dormantes", elles présentent un métabolisme ralenti, leur germination est différée même si les conditions d'humidité, de température et d'oxygénation sont favorables. Cette dormance peut être essentiellement de trois types (Harper, 1990) :

- dormance innée : incapacité de germination due à certaines propriétés de l'embryon, ou de l'endosperme associé, ou des structures maternelles (dormance embryonnaire ou tégumentaire) ;
- dormance induite : dormance acquise suite à des expériences vécues par la graine dans l'environnement où elle s'est trouvée après son mûrissement ;
- dormance forcée : incapacité de germer due à des contraintes environnementales (sécheresse, basse température, manque d'oxygène).

La **dormance innée** peut être due à un développement incomplet de l'embryon. C'est le cas de *Heracleum sphondylium* L. où l'embryon continue à se développer au dépens des réserves extra-embryonnaires plusieurs mois après la dispersion de la graine (Harper, 1990).

Ce type de dormance peut être sous la dépendance de déclencheurs biochimiques.

2.1.3. Banque de graines

Il subsiste en permanence dans un sol cultivé des graines de différentes espèces et de différents âges. Certaines de ces graines sont vivantes et capables de germer immédiatement, d'autres sont vivantes mais en dormance, d'autres enfin sont intactes en apparence mais mortes. Les deux premières catégories définissent le stock semencier, encore appelé la banque de graines du sol.

La banque de graines représente un stock énorme d'individus présents dans le sol. Le stock est alimenté chaque année par la pluie de graines. Il est réduit dans le même temps par la prédation et la mortalité physiologique. La plupart des graines viables sont dormantes et ne sont capables de germer que suite à des stimuli de nature diverse. Lorsque les conditions sont favorables, ces graines "actives" germent et donnent naissance à des plantules dont un certain nombre réalimenteront la pluie de graines (figure 18.3).

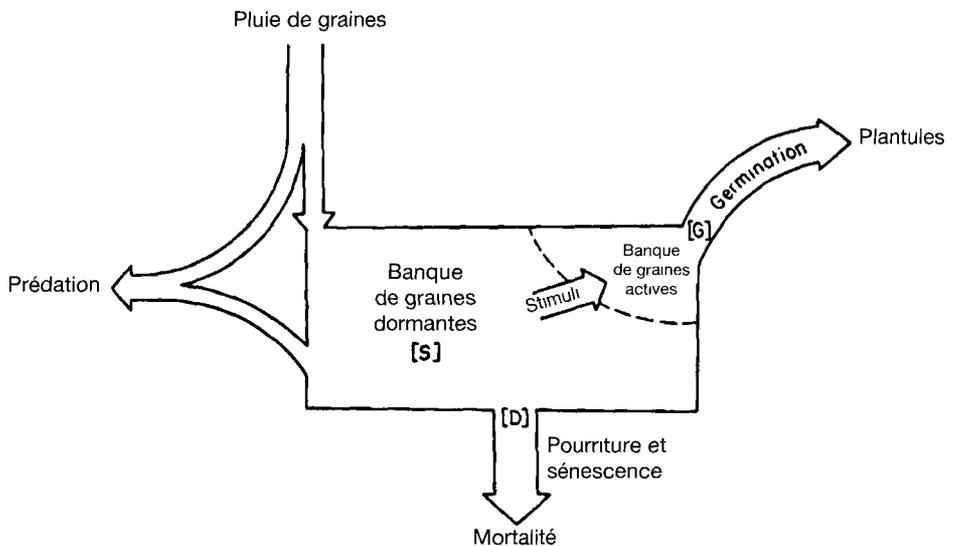


Figure 18.3. Diagramme de flux représentant la dynamique de la population de graines dans le sol.

Source : d'après Harper, 1990.

Le potentiel d'infestation, toutes espèces comprises, est considérable. En région tempérée, il est souvent compris entre 2 000 et 50 000 graines au m², soit 20 à 500 millions de graines à l'hectare. Hanf (1982) parle même d'un maximum de 500 000 graines au m². Ces chiffres sont à comparer avec les quantités de semences des espèces cultivées, soit 80 à 100 000 graines par ha pour le maïs, environ 2,5 à 4 millions de graines par ha pour le blé. En région tropicale, le stock semencier semble plus faible, sans doute à cause des longues périodes de jachère en milieu forestier ou de savane.

La répartition des graines d'adventices dans le profil cultural (0 à 20-25 cm de profondeur) est plus ou moins homogène. Cette répartition est cependant influencée par le système de travail du sol (figure 18.4) En dessous de la profondeur labourée, le nombre de graines chute brutalement. En prairie, la grande majorité des graines est située dans les 5 premiers centimètres du sol. En dessous de 15 cm, leur nombre est quasiment nul.

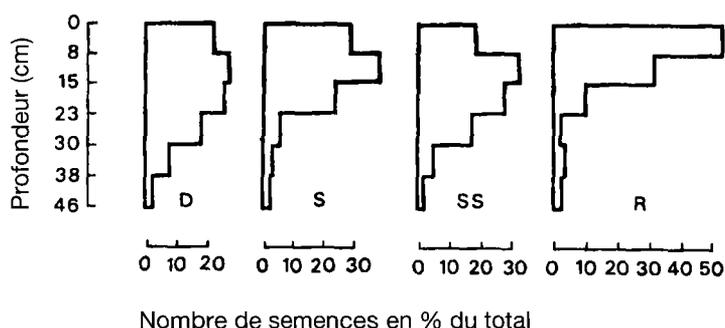


Figure 18.4. Distribution en profondeur de semences viables d'adventices après 9 ans de différents traitements de travail du sol. D : labour profond (36-41 cm) , S : labour superficiel (15-18 cm) ; SS : labour superficiel + sous-solage (41-46 cm) ; R : rotavator (15-18 cm).

Source : Cavers & Benoit (1989).

En plus du phénomène de prédation des graines d'adventices par divers animaux et des attaques par des pathogènes, surtout des champignons, les graines d'adventices perdent leur viabilité par vieillissement après 3 à 10 ans, comme d'ailleurs la plupart des graines des plantes cultivées ou non. Des longévités de l'ordre du demi-siècle ont cependant été citées pour des graines de renouée des oiseaux (*Polygonum aviculare* L.), la fumeterre (*Fumaria officinalis* L.), le laitron maraîcher (*Sonchus oleraceus* L.) et le mouron des oiseaux (*Stellaria media*) (Montégut s.d.). Le retournement des vieilles prairies (30 ans) installées sur des sols autrefois cultivés fait réapparaître des adventices d'anciennes cultures. Montégut (s.d.) signale une longévité de 17 siècles pour la spargoute des champs (*Spergula arvensis* L.) et le chénopode blanc (*Chenopodium album*). Ces valeurs sont cependant exceptionnelles.

Sans apports nouveaux, le stock semencier diminue de façon exponentielle, ce qui veut dire qu'un pourcentage constant est perdu chaque année. Ce taux de disparition varie selon les espèces (Cavers & Benoit 1989). Dans une terre normalement travaillée, il diminuerait d'environ 30 à 50 % par an. L'oxygénation du sol diminue la viabilité des graines parce qu'elle affaiblit leurs activités enzymatiques. Plus un sol est travaillé, plus la longévité des graines est faible. Par contre, le défaut d'oxygénation, le manque de lumière et l'enfouissement sont des facteurs qui augmentent la longévité.

2.1.4. Germination

Les plantes adventices, comme toutes les autres espèces végétales, requièrent des conditions bien précises en ce qui concerne la lumière, la température, l'humidité et la teneur en oxygène du sol.

La lumière est un facteur qui influence fortement la germination de la plupart des espèces d'adventices. Cette sensibilité à la lumière est sous la dépendance du système des phytochromes. D'une manière générale, on observe que les graines fines ont tendance à être photosensibles positivement alors que les grosses graines sont plutôt négativement photosensibles.

La température agit également puissamment sur la germination puisque, pour chaque espèce, il est possible de définir un minimum, un maximum et un optimum de température pour la germination. En région tempérée, certaines espèces germent à des températures assez basses, leur optimum est compris entre 2 et 13 °C, ces es-

pèces peuvent être qualifiées de **microthermiques**. D'autres ont des besoins en chaleur élevés pour leur germination, leur optimum est compris entre 25 et 40 °C, elles sont qualifiées de **macrothermiques**. D'autres encore ont un optimum très large, elles sont assez indifférentes à la température, leur optimum est compris entre 0 et 35 °C, elles germent donc à peu près durant toute l'année. Elles sont qualifiées d'**eurythermiques**. Entre ces trois grandes catégories, tous les intermédiaires sont possibles. Par ailleurs, la germination de certaines espèces est favorisée par des alternances thermiques, il s'agit surtout de graminées. Il est également important de signaler qu'au sein d'une même espèce, des écotypes peuvent avoir des exigences différentes vis-à-vis de ce facteur.

Du point de vue de l'humidité, la germination est évidemment idéale, pour la plupart des espèces, entre le point de flétrissement et la capacité au champ. Cependant, certaines adventices parviennent à germer au-delà de ces deux extrêmes. *Chenopodium album* est un des derniers à germer lorsque l'humidité du sol atteint le point de flétrissement. Par contre, *Polygonum persicaria* L. germe fréquemment en sol inondé. La pluie a également comme effet de lessiver les inhibiteurs tégumentaires mais elle ramène aussi en surface des semences fines qui exigent ou préfèrent précisément de la lumière à la germination (Montégut s.d.).

La germination étant un processus d'oxydation, il nécessite évidemment de l'oxygène. Cependant, pour ce facteur aussi, la sensibilité des espèces est très différente et certaines espèces germent encore à des teneurs très basses. C'est le cas par exemple d'*Alopecurus myosuroides*, de *Matricaria* sp. et de *Veronica* sp. (Montégut s.d.).

Tous ces facteurs écologiques n'agissent pas séparément sur une graine, mais, au contraire, ce sont leurs interactions qui influencent *in fine* la germination. C'est ce qui explique que les germinations des adventices s'observent au champ à des époques bien déterminées c'est-à-dire à des périodes où la graine a pu être soumise à des conditions qui constituent un compromis vis-à-vis de toutes ses exigences. Il est en effet possible de distinguer des espèces à germination automnale (*Scleranthus annuus* L., *Alopecurus myosuroides*, *Galium aparine*), hivernale (*Papaver rhoeas* L., *Apera spica-venti* (L.) Beauv.), printanière (*Aethusa cynapium* L., *Polygonum aviculare*), estivale (*Solanum nigrum*, *Amaranthus* sp., *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv.) ou à germination étalée sur toute l'année (*Stellaria media*, *Poa annua* L.).

2.1.5. Multiplication végétative

La reproduction végétative est réalisée suivant les espèces de plusieurs façons, soit au-dessus de la surface du sol par des stolons ou des bulbilles, soit en dessous de la surface du sol par des rhizomes, des tubercules, des bulbes ou des éclats de souches.

- **Stolons.** Les stolons sont des tiges qui rampent à la surface du sol et qui peuvent s'enraciner à chaque nœud. Dans des conditions optimales, certaines espèces qui possèdent ce système stolonifère peuvent ainsi progresser de plusieurs mètres par an. Si ces stolons sont sectionnés, chaque morceau peut reconstituer une plante indépendante pourvu qu'il possède un nœud et un fragment d'entre-nœud. Les stolons ne sont pas seulement des moyens de dissémination pour l'espèce, ils assurent aussi un rôle de réservoir d'énergie et d'éléments nutritifs pour l'individu qui les possède.

Exemples : *Ranunculus repens* L., *Potentilla reptans* L., *Paspalum paspalodes* (Michx) Scribner.

- **Rhizomes.** Les rhizomes sont des tiges souterraines transformées. Les rhizomes

forment très souvent un maillage serré qui s'étale à quelques centimètres sous la surface du sol. Ces rhizomes sont en général plus courts que les stolons mais leur densité est généralement plus grande. Chez le chiendent (*Elymus repens*), les rhizomes d'une population dense n'ont que 5 à 15 cm de longueur en moyenne (Palmer, 1958). Ils cheminent à une profondeur moyenne de 5 à 7 cm dans les sols compacts, de 10 à 15 cm dans les sols plus légers (Palmer, 1962 ; Hakansson, 1969). Chaque nœud est susceptible de reconstituer un individu indépendant en produisant des racines et des tiges verticales.

Le bourgeon apical présente cependant un phénomène de dominance sur les bourgeons transversaux. Cette dominance est d'autant moins nette que le milieu dans lequel se développe la plante lui est favorable. L'amélioration de l'approvisionnement en eau et en azote, en particulier, favorisent la ramification des rhizomes.

Autres exemples : *Imperata cylindrica* (L.) Beauv. (climat tropical), *Tussilago farfara* et *Cirsium arvense* (L.) Scop. (climat tempéré).

- **Tubercules.** Les tubercules sont également des tiges souterraines mais elles sont enflées et accumulent de grandes quantités d'éléments nutritifs. Ce mode de reproduction est moins fréquent que les deux précédents. Ces tubercules peuvent être disposés en chapelets et se séparent aisément les uns des autres, assurant ainsi la dispersion spatiale de l'espèce lors des travaux du sol.

Exemple : *Stachys palustris* L., *Mentha arvensis* L., *Arrhenatherum elatius* subsp. *bulbosum* (Willd.) Schübler et Martens.

- **Bulbes, bulbilles.** Un bulbe est une tige souterraine très courte munie d'un ou plusieurs bourgeons. Ces bourgeons sont recouverts de feuilles modifiées (écailles) qui sont le plus souvent charnues. Dans quelques rares cas, c'est l'axe de la tige lui-même qui est tubérisé (De Langhe et al., 1983). Chaque écaille munie d'un bourgeon latéral est capable de reproduire la plante entière. Cette fragmentation du bulbe peut se produire lors de travaux du sol (labour, hersage).

Exemple : *Allium polyanthum* Sch. & Sch., *Colchicum autumnale* L.

Chez certaines espèces, des bulbilles se forment sur des parties aériennes de la plante. Chez *Allium vineale* L., ces bulbilles se forment dans l'inflorescence et constituent un moyen très efficace de dispersion de l'individu.

- **Souches.** Quelques espèces, possédant pour la plupart une racine pivotante, sont capables de se multiplier par éclats de souche. Chaque fragment de racine sectionné peut reproduire un individu.

Exemple : *Rumex obtusifolius*, *Taraxacum* sp.

2.2. Pérennité et formes biologiques des adventices

Les adventices peuvent être classées en trois catégories selon leur pérennité :

- La grande majorité des adventices sont des **annuelles**. Elles germent et donnent des fruits la même année. On les rencontre surtout dans les céréales, les plantes sarclées et en maraîchage. Ce sont des **thérophytes**, elles ne subsistent d'une année à l'autre que par leurs graines. Certaines espèces parmi les thérophytes suivent le cycle des céréales d'hiver. Elles germent à l'automne et terminent leur cycle en été

de l'année suivante. Leur biologie se rapproche alors des bisannuelles. En tout état de cause, elles disséminent toutes leurs graines avant la récolte de la plante cultivée.

- Les **bisannuelles** ont un cycle de développement qui s'étend sur deux ans. Elles ont besoin de froid pour induire leur phase florale (vernalisation). Elles peuvent cependant se comporter comme des annuelles dans les cultures en germant en automne et en fleurissant au printemps suivant.

- Les **pérennes** ont, outre leurs graines, d'autres moyens de propagation. Quand leurs bourgeons pérennants sont localisés sous la surface du sol pendant la mauvaise saison, ces espèces sont des **géophytes**. Leurs bourgeons végétatifs subsistent d'une année à l'autre malgré les labours successifs. Lorsque leurs bourgeons pérennants sont situés au niveau du sol, ce sont des **hémicryptophytes**. On rencontre cette dernière catégorie surtout dans les vignes et les vergers.

2.3. Écologie des adventices

Les mauvaises herbes ont toutes des exigences écologiques bien définies. On a vu ci-dessus que la plupart des espèces sont liées à un type de culture. Citons quelques espèces caractéristiques de certains types de culture.

- Dans les régions tempérées, nous avons :
 - céréales : gaillet grateron (*Galium aparine*), coquelicots (*Papaver* sp.), cirse des champs (*Cirsium arvense*), vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides*), folle avoine (*Avena fatua*), jouet du vent (*Apera spica-venti*).
 - betterave : chénopodes (*Chenopodium* sp.), arroches (*Atriplex* sp.), renouées (*Polygonum* sp.), petite ciguë (*Aethusa cynapium*), mouron des oiseaux (*Stellaria media*), matricaire camomille (*Matricaria recutita*).
 - maïs : crête de coq (*Echinochloa crus-galli*), chénopodes (*Chenopodium* sp.), arroches (*Atriplex* sp.), renouées (*Polygonum* sp.), morelle noire, (*Solanum nigrum*).

- Dans les régions tropicales, nous trouvons dans la culture du riz : *Echinochloa crus-galli*, *E. colona* (L.) Link, *Leersia hexandra* Swartz, *Oryza perennis* Moench, *Panicum* sp., *Cyperus* sp., *Kyllingia* sp.

Elles ont aussi des exigences spécifiques vis-à-vis des caractéristiques du sol c'est-à-dire de sa texture, de sa structure, du pH, de l'humidité, de la teneur en azote et, d'une manière générale, en éléments nutritifs. L'altitude influence aussi la répartition de certaines espèces.

2.4. Importance de la reconnaissance des espèces d'adventices

La reconnaissance des adventices est primordiale pour différentes raisons.

- L'usage des herbicides exige la reconnaissance des adventices car il y a une spécificité plus ou moins grande dans l'action de ces produits. C'est ainsi que certaines espèces d'un même genre sont sensibles au 2,4-D alors que d'autres sont résistantes. Exemple :

– espèces sensibles (<i>Fumaria parviflora</i> Lam., <i>Fumaria capreolata</i> L., <i>Fumaria densiflora</i> DC.)	– espèce résistante (<i>Fumaria officinalis</i> L.)
--	---

Il est donc primordial de reconnaître les adventices mais plus encore de les reconnaître au stade plantule lorsqu'elles n'ont que des cotylédons ou 2-3 feuilles car c'est à ce moment que de nombreux herbicides sont efficaces.

- Les méthodes de lutte phytotechniques sont étroitement liées à la biologie de la plante à combattre. Celle-ci peut être très différente entre espèces appartenant à un même genre. Exemple :

- *Ranunculus repens* se répand par stolons ;
- *Ranunculus acris* L. a une racine pivotante ;
- *Ranunculus bulbosus* L. a un bulbe ;
- *Ranunculus sardous* Crantz et *arvensis* L. se multiplient par graines.

On peut par exemple espérer lutter efficacement contre de jeunes plantes annuelles avec un engin à dents alors que le passage de cet engin ne fera qu'aggraver l'infestation d'une plante à stolons ou à rhizomes.

- Les adventices peuvent être utilisées comme plantes indicatrices de la qualité du milieu, par exemple pour la fertilité du sol. Cela présente surtout un intérêt en région tropicale.

- Les adventices peuvent avoir un intérêt fourrager dans la période de jachère qui suit une culture. Il convient dès lors de ne pas les détruire après la récolte de la culture.

- Certaines espèces doivent être détruites à cause du grand risque de multiplication de micro-organismes pathogènes pour la plante cultivée. L'adventice et la plante cultivée appartiennent alors souvent au même genre ou à la même famille.

3. LA LUTTE CONTRE LES MAUVAISES HERBES PAR LES TECHNIQUES CULTURALES

3.1. Prévention contre l'introduction des graines exogènes

La première précaution à prendre avant de chercher à réduire la banque de graines du sol, c'est de veiller à ne pas introduire de nouvelles graines d'adventices qui viendraient s'ajouter à celles déjà présentes dans le sol. Ces graines exogènes peuvent avoir plusieurs origines :

- les semences de la plante cultivée. Il faut veiller à utiliser des semences pures ;
- les fumiers et lisiers. Certaines graines d'adventices ne sont pas détruites lors de leur transit dans le système digestif des animaux. Des semences d'adventices peuvent également être présentes dans les pailles des céréales. Cependant, lorsque la température du fumier dépasse 55 à 60 °C, on peut considérer que la totalité des semences est détruite ;
- les composts. Certains composts insuffisamment fermentés ($T < 55-60$ °C) peuvent être une source importante d'infestation. Les boues d'épuration peuvent également contenir dans certains cas des quantités importantes de semences ;
- le vent. Les semences fines des plantes qui poussent au bord des champs peuvent être transportées par le vent dans les cultures. C'est le cas essentiellement des graines à aigrettes des astéracées. Le fauchage du bord des champs permet donc de

diminuer leur multiplication. Les haies, en constituant des obstacles physiques, peuvent avoir le même effet ;

– l'eau d'irrigation. En effet, celle-ci peut transporter des quantités importantes de semences d'adventices, notamment de celles qui fructifient à proximité des canaux d'irrigation.

3.2. Autres méthodes phytotechniques

D'autres méthodes phytotechniques permettent de lutter contre les adventices.

- La **rotation des cultures** ou les alternances de périodes de culture et de **jachère** sont parmi les moyens les plus efficaces pour réduire la banque de graines. Les végétations d'adventices étant différentes pour chaque type de cultures, la rotation culturale évite leur multiplication annuelle. Les graines enfouies dans le sol n'ont pas l'occasion de s'exprimer pendant un certain nombre d'années après leur production. Elles vieillissent, le nombre de graines viables diminue, le potentiel d'infestation est donc réduit.

Exemple : Dans la rotation suivante, le chénopode blanc (*Chenopodium album*), une adventice de la betterave, n'a l'occasion de produire des graines qu'un an sur cinq : Prairie temporaire - Prairie temporaire - Betterave - Blé - Escourgeon.

Dans un système de culture avec jachère, comme cela est pratiqué dans de nombreuses régions du globe (voir chapitre 20), la jachère a également un effet bénéfique sur le potentiel d'infestation. Une intensification des cultures par diminution de la période accordée à la jachère, entraîne par contre une augmentation du nombre de graines d'adventices dans le sol (figure 18.5).

- Le **travail du sol** est également un moyen puissant de réduire les populations d'adventices d'un sol. Un labour traditionnel, réalisé à une profondeur de 20-25 cm, est très efficace, surtout si on le compare à l'action d'une fraise par exemple. Par contre, les différences entre types de labour ne sont généralement pas significatives.

Le tableau 18.2 montre l'effet positif du labour sur le nombre total de semences dans le profil par rapport à un système sans labour. Dans ce dernier système, il apparaît également que les semences sont concentrées dans les horizons superficiels alors que c'est le contraire dans le système avec labour. De plus, dans les parcelles labourées, les graines sont davantage incluses dans des gros agrégats où les conditions environnementales sont favorables à un maintien de la dormance.

- Un **déchaumage précoce** permet de préparer un lit de germination pour les graines de céréales tombées sur le sol à la moisson et pour des graines de mauvaises herbes présentes dans les horizons superficiels du sol. Les plantules apparues grâce à cette technique sont détruites quelque temps après lors d'une autre façon culturale.

- Un **labour d'hiver** suivi de la préparation d'un lit de germination au printemps (**faux-semis**) permet d'assurer une levée d'adventices. Celles-ci sont détruites par une façon culturale un peu avant le semis.

- Un **labour profond** permet d'enfouir des organes souterrains qui meurent alors en s'épuisant à émettre des repousses vers la surface du sol.

Tableau 18.2. Répartition du nombre de semences d'adventices en fonction de la profondeur et du type d'agrégats après 2 modes de travail du sol.

Taille des agrégats (cm)	Profondeur du sol (cm)	Régime de labour	
		labour à 20 cm	sans labour
> 7,49	0-5	2	70
	5-10	6	2
	10-20	11	2
5,00-7,49	0-5	4	48
	5-10	4	8
	10-20	9	-
< 0,31	0-5	3	118
	5-10	4	12
	10-20	8	8

Source : Cavers & Benoit (1989)

- Une **fumure correcte** peut supprimer certaines espèces. L'abondance des espèces acidophiles est par exemple diminuée par chaulage. Il ne faut cependant pas exagérer l'effet à court terme de cette technique. Par contre, des fortes fumures azotées peuvent avoir un effet très favorisant pour certaines adventices, notamment pour *Rumex obtusifolius* dans les cultures fourragères.
- La vapeur d'eau peut être utilisée en horticulture sous verre pour stériliser les sols.
- Des becs brûleurs alimentés par du gaz propane ou butane peuvent agir comme des herbicides de contact en détruisant les organes aériens des adventives. Dans le cas de jeunes plantules, cette technique peut être efficace et envisageable en horticulture notamment. Elle est cependant coûteuse.
- Les **couvertures du sol par du plastique** empêchent évidemment les plantules d'adventices de se développer. Cette technique est parfois utilisée en maraîchage et en culture de maïs. Dans ce dernier cas, cette couverture a surtout pour objet de réchauffer le sol plus rapidement mais elle a néanmoins un effet sur le développement des adventices.
- La **fauche** ou l'**électrocussion** peut être envisagée pour lutter contre des tiges dressées et parsemées dans le champ, par exemple les tiges florifères des betteraves sauvages.
- Le **sarclage des interlignes** est certainement une des techniques les plus efficaces pour contrôler les mauvaises herbes après l'installation de la culture. Cette technique est surtout pratiquée en culture dite "sarclée" (pomme de terre, betterave, maïs), mais elle peut aussi se justifier pour des céréales, notamment pour le riz, mais aussi pour des céréales non irriguées. Une grande diversité d'outils est envisageable pour appliquer cette technique, il s'agit surtout de dents, mais aussi d'outils plus larges et, éventuellement, de brosses rotatives.
- L'**extirpation de rhizomes** ramène ceux-ci en surface. Ils peuvent ensuite être séchés, rassemblés en andains et brûlés. L'extirpation des rhizomes de chiendent (*Elymus repens*) était autrefois très pratiquée.

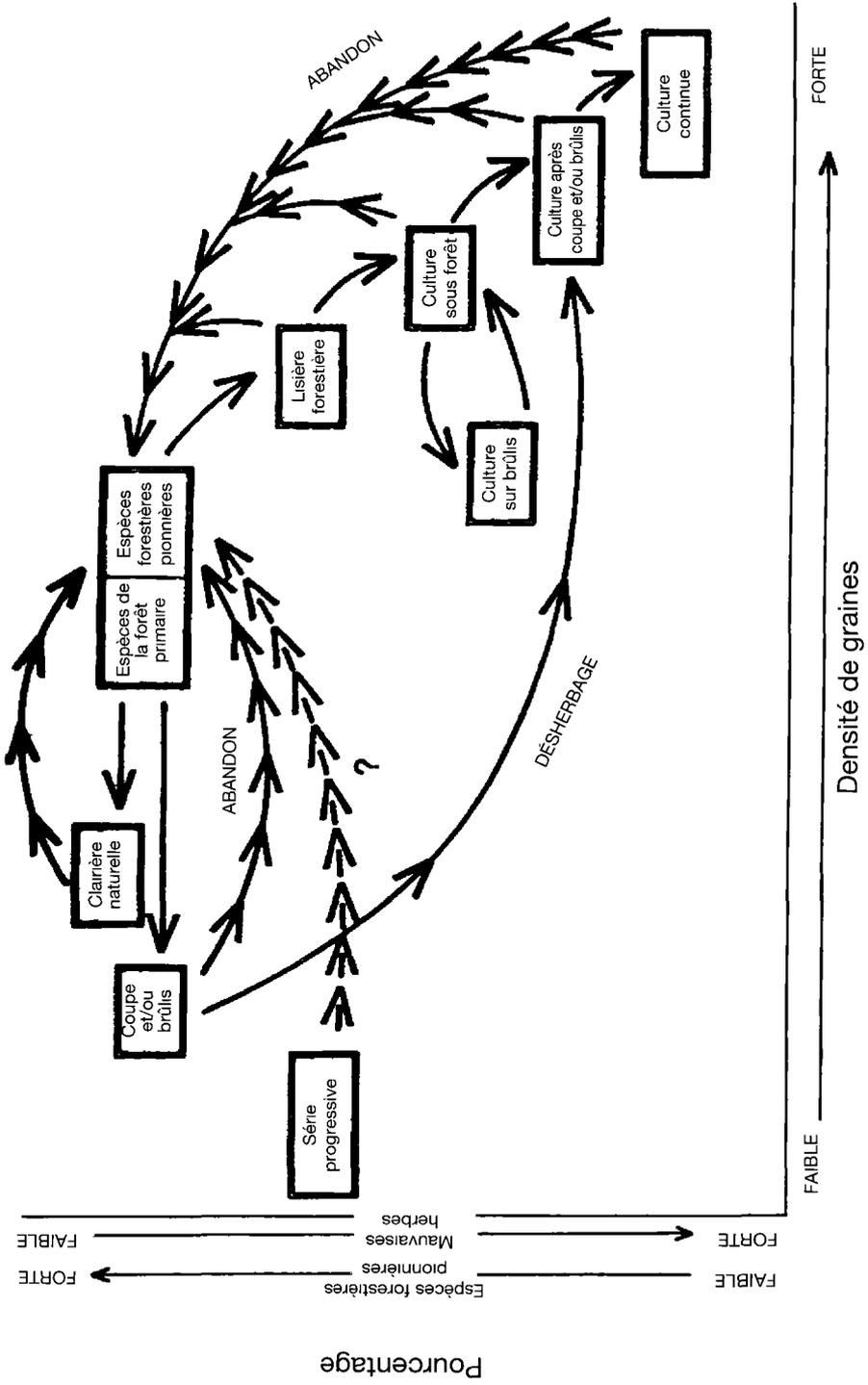


Figure 18.5. Changement dans la banque de graines d'un sol tropical après déforestation et variation de la pression de culture. Source : Gatwood (1989).

En conclusion, il faut d'abord envisager la lutte contre les plantes adventices par des méthodes non chimiques. Le recours aux herbicides, dont le rôle est évidemment essentiel, ne devrait se faire que lorsque les autres possibilités de lutte phytotechnique ont été épuisées et ceci, bien entendu, dans un contexte économique défini.

4. LE DÉSHERBAGE CHIMIQUE ET LE MODE D'ACTION DES HERBICIDES

4.1. Les raisons du désherbage chimique

Parmi l'ensemble des problèmes phytosanitaires, celui de la lutte contre les mauvaises herbes est le plus préoccupant car il se pose de façon constante et régulière, quel que soit le niveau de technicité atteint pour les cultures, qu'il s'agisse de cultures extensives ou de cultures plus intensives. Les maladies des plantes, les insectes et autres animaux nuisibles ne se développent dangereusement que d'une manière plus fluctuante étant beaucoup plus dépendants des facteurs extérieurs et notamment du climat.

Le désherbage chimique est lié à l'intensification de l'agriculture ; il s'est intégré, au fil du temps et des découvertes de la chimie, à cette intensification qu'il a lui-même contribué à accélérer. La lutte chimique contre les mauvaises herbes est ainsi devenue un facteur de production indispensable de l'agriculture moderne intensive, influençant la productivité des cultures et la productivité du travail de l'homme. L'impact du désherbage sur la productivité des cultures se résume souvent à la seule prise en considération de l'augmentation des rendements de la culture traitée parce qu'elle est une donnée tangible et chiffrée et qu'elle concrétise l'influence globale de toutes les nuisances causées par les mauvaises herbes. Ce facteur n'interviendrait cependant que pour 45 à 50 % dans les motivations de l'emploi d'herbicides.

D'autres facteurs plus difficilement chiffrables entrent en considération et influencent plus particulièrement la qualité des produits récoltés. La lutte chimique apporte notamment une meilleure correspondance aux exigences technologiques des industries de transformation et une amélioration de la qualité intrinsèque des produits récoltés.

De plus, les effets d'un traitement herbicide ne doivent pas être jugés dans la seule culture où l'application est effectuée, mais également sur l'ensemble de la rotation considérée. Il est parfois nécessaire d'effectuer une application sur une culture où cette opération ne se justifie pas nécessairement d'un point de vue économique dans le but de détruire des adventices qui seraient fortement préjudiciables à la culture suivante qui, elle, ne supporterait pas le traitement en question. D'autre part, un traitement herbicide peut avoir une action nettoyante dépassant le simple terme de la culture dans laquelle il est effectué.

Force est de reconnaître que les désherbants chimiques permettent une destruction des mauvaises herbes beaucoup plus efficace que les méthodes anciennes, et, qu'avec les engrais et les variétés végétales améliorées, ils ont fortement contribué à l'obtention des hauts rendements actuels, et qu'ils jouent un rôle important dans la lutte contre la hausse des prix et la rareté de la main-d'œuvre. Il n'est pas exagéré de dire que la mécanisation intégrale des cultures de céréale, de betterave à sucre et de pomme de terre aurait été impossible sans l'aide des herbicides.

• **Économie et rentabilité du désherbage chimique.** L'emploi des herbicides, comme celui de tout produit phytosanitaire, doit être rationnel et rentable. En théorie, dans le cas de la lutte contre les adventices, la fonction de production exprimant la relation entre la production et les facteurs de production devrait présenter son maximum, c'est-à-dire le rendement le plus élevé obtenu à la suite d'un traitement, lorsque l'infestation tolérable en mauvaises herbes est atteinte. Les rendements resteraient inférieurs à ce maximum tant que l'infestation par les adventices restera préjudiciable (dose trop faible d'herbicide, traitement mal effectué). De même, les rendements diminueraient lorsque le coefficient de sécurité du produit est dépassé (phytotoxicité).

Deux remarques importantes s'imposent, qui sont autant de mises en garde :

- est imprudent, le désherbage traditionnel fait par routine, ainsi que le désherbage irrationnel visant au perfectionnisme : à la destruction totale (100 %) des adventices, dans un but esthétique ;
- est à déconseiller, l'utilisation systématique de doses plus élevées que celles préconisées en vue de s'assurer d'un résultat parfait.

En pratique, on peut affirmer qu'un désherbage économiquement rentable se doit d'être avant tout techniquement valable. Au-delà de la simple notion de rentabilité d'un traitement, il est utile de tenter l'approche de la rentabilité optimale. A l'inverse, on pourrait dire que l'optimum économique du désherbage requiert la connaissance du seuil de nuisibilité des adventices, de manière à préciser le seuil de rentabilité du traitement.

• **Le seuil de nuisibilité des adventices.** Beaucoup d'études ont été entreprises à ce sujet, mais ce seuil de nuisance reste difficile à préciser. La compétition exercée par les adventices est fonction :

- de la culture dans laquelle elles prolifèrent ;
- de l'adventice elle-même : espèce, densité (nombre, poids, degré de couverture), conditions de croissance ;
- de l'époque de l'infestation et de son extension au cours des stades de développement de la culture.

En d'autres termes, l'importance des pertes de rendement dépend de la densité de population, de l'espèce d'adventice et de la date d'infestation par les mauvaises herbes, ainsi que la compétitivité de la culture. En général, cependant, la phase critique de l'infestation des mauvaises herbes, pendant laquelle celles-ci induisent des pertes de rendement importantes, se situe dans les premiers stades du développement de la culture. D'autre part, la concurrence n'est que rarement exercée par une seule espèce d'adventices, mais bien par une association végétale, une population d'adventices dominantes.

Dans la réalité, les seuils de nuisibilité des adventices sont difficiles à préciser ; ils n'ont de valeur précise qu'à une échelle réduite, celle de l'exploitation agricole ou même de la culture, du champ à désherber. A l'heure actuelle encore, le choix des herbicides n'est que rarement guidé par une bonne connaissance des corrélations entre flore adventice et facteurs d'environnement. C'est donc une connaissance accrue de tous les mécanismes biologiques (dormance, germination, évolution) qui pourra permettre de mieux connaître et de prévoir les infestations de mauvaises herbes dans les cultures et, par là même, de mieux lutter contre elles grâce à une meilleure connaissance des problèmes techniques posés par le désherbage, qui améliore la rentabilité des traitements ainsi effectués à bon escient. Ce sont ces cri-

tères techniques qui conditionnent le choix judicieux du produit et l'usage rationnel qui en sera fait.

4.2. Définition et classification des herbicides

Définition : le mot herbicide signifie littéralement qui “détruit les mauvaises herbes”. L'adjectif peut donc s'appliquer à toute technique mécanique, manuelle ou culturale, qui élimine des plantes là où elles sont indésirables. Le nom commun herbicide, ou produit herbicide, s'applique plus particulièrement aux produits phytosanitaires qui possèdent la propriété d'éliminer les adventices. Dans la terminologie anglaise, le mot herbicide coexiste avec le substantif “*weed killer*”.

Pendant, dans l'évolution des herbicides, l'idée de tuer, de détruire des mauvaises herbes s'estompe au profit d'une notion plus “douce” où des substances à propriétés herbicides agissant sur certains sites dans le métabolisme des plantes sont employées pour réduire les effets nocifs, les nuisances des mauvaises herbes sans pour cela forcément les détruire totalement et brutalement. Le terme d'herbicide sera néanmoins encore le plus couramment utilisé dans le langage des techniciens en raison de sa facilité, de sa polyvalence. Celui de désherbant a une consonance plus littéraire.

Selon le but poursuivi, les herbicides peuvent prendre des dénominations plus précises.

- **Défoliants** : provoquent la défoliation, c'est-à-dire la destruction du feuillage et par voie de conséquence, la destruction de toute une végétation. Le terme est malheureusement lié maintenant à l'emploi qui en a été fait dans des usages fort éloignés des pratiques agricoles. Le mot se voit ainsi banni du langage agricole où subsistent les deux termes suivants.

- **Défanants** : destinés littéralement à la destruction des fanes de pommes de terre et par extension à la destruction ou à la dessiccation d'une masse verte en fin de végétation (dessiccants), pour faciliter la récolte mécanique sans en altérer le produit sur colza, lin, pois, etc.

- **Débroussaillants** : lorsqu'il s'agit de lutter contre l'envahissement par une végétation ligneuse, plus arbustive, vivace, de masse plus importante comme les ronces, les orties, etc.

Schématiquement, le désherbage chimique se scinde en 2 grandes catégories :

- **Le désherbage total** vise à la destruction de toute la végétation, sans distinction. Le résultat obtenu peut être de plus ou moins longue durée ; celle-ci va dépendre des conditions climatiques, du type de sol et bien sûr des propriétés de persistance d'action de l'herbicide utilisé dans ces conditions. On peut avoir recours à 2 types de produits :

- ceux qui nettoient, c'est-à-dire capables de détruire une végétation existante, assez développée ; l'emploi de ces nettoyants équivaut à un sarclage chimique, certains ne possèdent d'ailleurs aucune action persistante dans le sol.

- ceux qui tiennent propres, c'est-à-dire qui n'ont pas ou guère d'effet sur une flore présente, développée mais qui en revanche, préviennent par leur action dans le sol toute levée nouvelle et réenvahissement par la végétation.

Il est évidemment possible de combiner les propriétés complémentaires de produits de ces 2 catégories pour obtenir un effet herbicide complet et durable.

• **Le désherbage sélectif** cherche à éliminer certaines plantes (les adventices) tout en préservant d'autres (les plantes cultivées).

Dans la terminologie utilisée, le mot efficacité sera donc réservé à l'action, à l'effet herbicide du produit sur les plantes mauvaises herbes à détruire. Par opposition, la sélectivité d'un produit exprime son innocuité vis-à-vis d'une plante cultivée.

Un herbicide se définit donc essentiellement par le rapport entre la dose à partir de laquelle une phytotoxicité est induite (diminution significative des rendements) et la dose nécessaire à une bonne efficacité. Il importe surtout de souligner que ce coefficient propre à chaque produit varie cependant pour un même produit en fonction des diverses cultures sur lesquelles il sera utilisé ; mais également en fonction des conditions climatiques, du type de sol et de sa teneur en humus, de l'espèce et du stade de développement des adventices à détruire. Ce rapport qui donne la marge ou coefficient de sécurité dans l'utilisation agronomique du produit doit être le plus large possible.

4.3. La sélectivité des traitements herbicides

Les mécanismes qui déterminent la sélectivité ou la phytotoxicité d'un herbicide sont multiples ; lorsque après un traitement herbicide des plantes subsistent, le non-effet ou le manque d'effet peut être attribué à plusieurs raisons :

- l'herbicide n'a pas atteint la plante ;
- l'herbicide a touché la plante mais n'y a pas pénétré ;
- l'herbicide a pénétré dans la plante mais n'y a pas été suffisamment transporté ;
- l'herbicide absorbé par la plante et véhiculé dans celle-ci a été dététoxiqué ou métabolisé et n'a pas atteint son site ou a vu celui-ci modifié.

La sélectivité dite de "position" réside dans le fait que l'herbicide ne peut atteindre les organes de la plante par où il doit pénétrer ; les organes d'absorption ne se trouvent pas dans la zone d'action de l'herbicide :

- la culture est semée, plantée ou repiquée profondément ou encore développe des racines qui s'enfoncent rapidement alors que l'herbicide demeure à la surface du sol ;
- le feuillage de la culture est protégé par un écran lors d'un traitement dirigé ;
- les plantes cultivées ont une grande taille par rapport aux adventices à détruire et le traitement peut être localisé : arbres fruitiers, vignes, etc.

La sélectivité est dite "anatomique" si l'herbicide atteint la plante mais n'y pénètre pas, ou pas suffisamment, en raison des caractères anatomiques de la plante qui sont liés à l'espèce mais varient aussi dans une même espèce en fonction de l'âge de la plante, des conditions de sa croissance.

La sélectivité est dite "physiologique" si l'herbicide, ayant pénétré dans la plante, n'y exerce pas ou guère d'effets phytotoxiques, soit parce qu'il est dététoxiqué, métabolisé ou immobilisé à un stade de son absorption ou de sa translocation, soit encore parce qu'il n'atteint pas le site de son action phytocide ou que la plante ne possède pas ce site d'action.

Selon leur domaine d'activité herbicide, les produits peuvent être classés en :

- herbicides antidicotylées (ou antidicotylédones),
 - herbicides antigraminées (ou antimonocotylées ou antimonocotylédones),
- selon qu'ils détruisent les unes ou les autres plantes appartenant à ces classes botaniques. Les limites ne sont cependant pas bien nettes, c'est ainsi qu'un herbicide est dit antigraminée mais montrera un effet sur certaines dicotylées.

D'autre part, une adventice ne présentera pas toujours la même sensibilité à l'herbicide : celle-ci varie en fonction des facteurs climatiques et culturels du milieu, de son âge, etc. Les herbicides modernes (du fait de leur mode d'action plus précis sur un site bien déterminé du métabolisme d'une plante) possèdent, pour la plupart, une plus grande spécificité que les produits plus anciens.

Sur le plan de l'efficacité sur les mauvaises herbes, le même raisonnement que pour la sélectivité peut être tenu pour analyser le résultat ; si l'herbicide n'atteint pas la plante, il peut s'agir tout d'abord d'un désherbage mal effectué : mauvais choix du produit, dose mal adaptée, influence de facteurs agroclimatiques défavorables. Si la mauvaise herbe n'est pas détruite en raison de ces caractères anatomiques ou physiologiques, elle sera classée comme tolérante ou peu ou pas sensible à l'herbicide en question. Une adventice sera qualifiée de résistante, si son insensibilité à l'herbicide a été acquise (par mutation) alors que l'espèce à laquelle elle appartient est normalement détruite par cet herbicide.

4.4. La résistance aux herbicides

Au sein d'une même espèce végétale, tous les individus ne vont pas présenter le même comportement vis-à-vis d'un herbicide. Ceci est surtout vrai dans une population d'adventices annuelles où un individu est la concrétisation d'une des multiples possibilités de combinaison génétique résultant d'une production de graines (reproduction sexuée) abondante et fréquente (une à parfois plusieurs fois par an). Lorsque les facteurs du milieu, notamment la monoculture, l'emploi répété d'un même herbicide sur la même parcelle, augmentent la pression de sélection, il apparaît, après un certain temps dans la population traitée, des individus qui par mutation ont acquis une résistance à l'herbicide. Cette résistance acquise par la plante lui confère généralement une insensibilité quasi complète ou du moins largement supérieure à celle de tous les mécanismes de détoxification.

Plusieurs cas de résistances acquises peuvent exister en regard des mécanismes d'action phytotoxiques, citons :

- la mutation de la cible ; le site d'action de la substance herbicide est changé à la suite d'une mutation ;
- l'augmentation de la capacité de détoxification de l'herbicide ;
- l'acquisition d'un mécanisme de blocage du produit durant son transport, avant qu'il n'atteigne son site d'action.

Dans tous les cas, la résistance d'une plante requiert plusieurs étapes :

- l'apparition des plantes résistantes qui peut se faire soit par l'apparition brutale de la mutation modifiant la cible, soit par augmentation lente et progressive de la capacité de détoxifier la molécule. La résistance apparaît donc soit par la sélection d'individus résistants ayant muté et présents dans la population adventice régulièrement traitée avec l'herbicide, soit par sélection au fil des années d'individus "pré-disposés" à acquérir la résistance ;

– le maintien et l'évolution de la population de plantes résistantes. Pour que la résistance s'installe, il est nécessaire que les individus résistants possèdent toutes les caractéristiques leur permettant une survie et une prolifération dans les conditions de la culture ou de la rotation : adaptation aux facteurs du milieu, à la pression de sélection, etc. De plus, il est indispensable qu'il y ait transmission des caractères acquis et que la descendance d'une plante résistante soit elle aussi résistante.

La vitesse de développement d'une population résistante dépend de l'espèce d'adventices, de la variabilité génétique, du nombre de générations par an, du mode de transmission génétique et du mode de fécondation, de la rotation des cultures et de la pression de sélection exercée par le produit. La pression est la plus forte avec un produit employé seul, et de façon répétée avec un produit très actif ou appliqué à forte dose, avec un produit à longue persistance ou encore avec une molécule à site d'action principal très précis. La pression sera également plus forte si la mauvaise herbe est sensible à la matière active.

4.5. Mode d'absorption des herbicides

Les herbicides se distinguent également selon leur voie de pénétration dans la plante.

- Les herbicides **racinaires** ou radiculaires pénètrent dans la plante par la voie racinaire, c'est-à-dire par des racines fonctionnelles. L'herbicide qui est absorbé par les racines l'est avec la solution aqueuse du sol dans laquelle il doit être solubilisé. La concentration en herbicide de cette solution du sol absorbée par la racine conditionne l'effet biologique (efficacité et sélectivité du produit). La majorité des herbicides possèdent une solubilité dans l'eau faible à très faible. Les herbicides radiculaires ont donc besoin d'une pluviosité suffisante pour agir sur les adventices ; par contre, une quantité d'eau trop abondante pourrait diminuer leur sélectivité.

- D'autres herbicides pénètrent par les tissus jeunes non ou peu différenciés : **coléoptiles, gemmules, bourgeons**. C'est une voie de pénétration dont profite bon nombre de substances en raison de la perméabilité, de la fragilité des tissus en contact avec le produit. Ce contact s'effectue généralement en phase liquide, via la solution aqueuse du sol plus ou moins chargée d'herbicides en solution, mais également pour certains produits volatils en phase gazeuse par échanges entre les tissus et l'air du sol durant toute la période où les jeunes plantules (germes, radicules, coléoptiles, bourgeons) traversent la couche de sol contenant le produit. Ces herbicides volatils doivent être incorporés mécaniquement dans la couche superficielle du sol.

- Les herbicides **foliaires** pénètrent dans la plante par les parties aériennes, essentiellement le feuillage, mais accessoirement, aussi les tiges ou rameaux peu lignifiés et contenant de la chlorophylle.

Ces herbicides se divisent en 2 grands groupes bien distincts :

- les herbicides foliaires de **contact** qui exercent leur activité à l'endroit où ils sont appliqués sans être ou très peu véhiculés dans la plante ; généralement, leur effet se marque assez rapidement par des nécroses des tissus touchés ;

- les herbicides foliaires de translocation à action interne, dits encore **herbicides systémiques**. Ces produits qui sont les herbicides à absorption foliaire proprement dite sont absorbés par les parties aériennes sur lesquelles ils sont appliqués et sont

transportés dans d'autres parties de la plante où ils vont exercer leur action. Les effets sont en général plus lents car résultant d'un transport par la sève élaborée à travers le phloème.

Il est cependant difficile de cataloguer un produit en fonction de son mode d'action et de pénétration, car certains herbicides vont utiliser plusieurs voies de pénétration et possèdent divers modes d'action phytotoxique. Un produit foliaire peut s'accompagner d'un effet via le sol ; un produit racinaire peut montrer un certain effet foliaire, etc. Il serait donc plus judicieux pour la pratique de parler d'herbicides à action racinaire prépondérante, à action foliaire prépondérante, à action méristématique ou à action sur jeunes plantules.

Les herbicides du sol (*soils herbicides*) regrouperont tous les herbicides (appelés parfois aussi herbicides résiduels) ayant une action par le sol et qui montrent une persistance conséquente ; seront rangés au côté des racinaires, tous les produits pénétrant et agissant par les tissus jeunes, dès la germination de la plante (parfois aussi improprement dénommés herbicides de contact du sol), ainsi que tous les produits agissant au stade jeune plantule de l'adventice et pénétrant par les racelles, tigelles, coléoptiles, etc.

4.6. Comportement des herbicides dans le sol

Un grand nombre d'herbicides agissent par le sol et y sont appliqués directement, voire même parfois incorporés. L'efficacité du produit et sa sélectivité dépendent des propriétés de la molécule herbicide et des propriétés du sol. Ces 2 aspects sont à prendre en considération non seulement sous l'angle agronomique mais aussi dans l'optique de la protection de l'environnement, notamment des eaux de surface et des nappes phréatiques. En conséquence, l'étude du comportement des herbicides dans le sol ne peut se limiter à celle des herbicides du sol mais doit inclure celle des herbicides foliaires qui peuvent également, en partie du moins, se retrouver au niveau du sol.

4.6.1. Le sol et ses propriétés

Le sol est un milieu hétérogène où sont présentes les 3 phases : solide, eau, air en proportions diverses. Le comportement de l'herbicide va dépendre de sa répartition entre ces phases et notamment dans l'eau du fait de sa solubilité et dans l'air à cause de sa volatilité. La phase solide du sol est essentiellement constituée d'éléments minéraux et organiques. Les argiles sont des colloïdes qui peuvent flocculer, se disperser et fixer de grandes quantités d'eau ; ils sont capables d'adsorber des ions (surtout des cations) et des molécules neutres. Les oxydes de fer et d'alumine ont également la propriété d'adsorber des anions et des molécules neutres.

Parmi les matières organiques vivantes ou non vivantes, seules les substances humiques intéressent le désherbage en raison de leurs propriétés colloïdales : grande capacité d'adsorption ionique et moléculaire, forte rétention d'eau, formation de complexes et floculation.

4.6.2. La molécule herbicide et ses propriétés

Les molécules herbicides possèdent des propriétés chimiques et physico-chimiques variables qui influencent leur comportement dans le sol. La plupart des herbicides sont peu ou très peu solubles dans l'eau. La solubilité dans l'eau d'un produit

conditionne en grande partie sa mobilité dans le sol, son efficacité et sa sélectivité ; la faible solubilité est donc un facteur de sécurité.

La tension (pression) de vapeur des herbicides est également variable. La plupart ne sont pas volatils mais certains le sont au point de devoir être utilisés dans des conditions particulières (en incorporation dans le sol). Chimiquement les molécules herbicides sont généralement très stables. Elles ont une forte propension à être adsorbées sur les colloïdes du sol ; la polarité de la molécule et son aptitude à passer sous forme ionique (ionisation) doivent entrer en ligne de compte.

4.6.3. La rémanence des herbicides

La rémanence et la persistance dans le sol des herbicides vont dépendre des phénomènes d'immobilisation et de transport comme des phénomènes de dégradation auxquels ils sont soumis.

• **Les phénomènes de transport.** L'entraînement des herbicides dans l'atmosphère résulte d'une mauvaise application, soit d'une mauvaise incorporation dans le sol d'un produit volatil, soit d'un brouillard de pulvérisation qui dérive hors du champ traité. Le ruissellement ou le déplacement latéral de l'herbicide ne se produira que si certaines conditions extrêmes sont rencontrées : forte déclivité du terrain traité, pluviosité importante après le traitement.

Le lessivage (*leaching*) est théoriquement le point le plus préoccupant car il suppose une pollution possible des nappes phréatiques. Dans la pratique, la plupart des herbicides, en raison de leur grande facilité à être adsorbés, sont peu entraînés en profondeur et demeurent dans les premiers 5 cm du sol traité.

Cependant, certaines matières actives peuvent se retrouver à un niveau inférieur car plus solubles elles sont entraînées par les pluies, ou plus persistantes sont brassées dans la couche arable lors des travaux culturaux. En condition normale et en bonne pratique agricole, les herbicides ne sont guère entraînés dans les couches profondes du sol où ils ne subiraient plus de biodégradation ni dans les eaux profondes qu'ils pollueraient.

• **Les phénomènes d'immobilisation.** Parmi tous les phénomènes responsables du comportement des herbicides dans le sol, ceux d'adsorption et de désorption sont les plus importants car ils affectent toutes les interactions qui existent entre l'herbicide et les constituants du sol. L'adsorption influence également la dégradation, le transport et l'activité phytocide de l'herbicide.

Alors que l'absorption caractérise la pénétration de molécules ou d'ions à l'intérieur d'un substrat, l'adsorption définit les phénomènes de liaisons qui ont lieu à la surface de 2 phases :

- une phase solide constituée dans le sol par des particules colloïdales d'argile ou de matière organique (humine, acides humiques) ;
- une phase liquide où les molécules herbicides sont en suspension ou en solution dans l'eau du sol ; c'est le cas le plus fréquent, mais certains herbicides peuvent se trouver à l'état gazeux et être ainsi adsorbés directement.

La désorption est le phénomène inverse et consiste en la libération de molécules préalablement adsorbées ; cette désorption n'est jamais complète, les isothermes de désorption ne se confondent pas avec ceux de l'adsorption.

La quantité d'herbicide fixée par adsorption dépend des caractéristiques du sol, de sa teneur en argile et en humus (colloïdes adsorbants), des caractères physico-chimiques de ces adsorbants, de sa teneur en eau, de la concentration en herbicide, de la composition de la solution du sol, notamment de la présence d'autres molécules organiques et d'ions minéraux, du pH, de la température, etc.

L'adsorption conditionne la quantité d'herbicide en solution disponible pour le végétal, elle limite l'absorption et diminue ainsi l'efficacité ; la dose d'herbicide doit être adaptée en fonction de la teneur du sol en argile et en humus. Par contre, l'adsorption empêche le lessivage des produits et diminue les risques de pollution par entraînement.

• **La disparition des herbicides.** La disparition des herbicides dans le sol est la conséquence de phénomènes de dégradation abiotique comme la volatilité, la photodécomposition ou l'hydrolyse, et surtout des phénomènes de dégradation microbienne. Les organismes de la microflore du sol sont les agents principaux de la disparition des herbicides. Plusieurs facteurs conditionnent la décomposition des herbicides par des micro-organismes. Le pH, surtout les extrêmes, influe sur l'activité microbienne mais également sur la dégradation abiotique des produits (imidazolinones, sulfonurées). La teneur en eau du sol modifie les types de micro-organisme et leur activité ; les très faibles ou trop fortes humidités sont défavorables à la métabolisation microbienne. La température est un facteur très important. Il est apparu qu'en conditions hivernales douces et humides, la métabolisation des herbicides était nettement plus rapide que lorsque les conditions étaient rigoureuses et sèches.

4.7. Comportement des herbicides dans les plantes

Pour exercer son action phytocide dans une plante, un herbicide doit tout d'abord y pénétrer ; cette première étape est indispensable pour tous les produits. L'herbicide doit ensuite être transporté plus ou moins loin dans la plante jusqu'à son site d'action. Cette opération n'est pas requise pour certains produits, à action de contact, qui agissent là où ils sont appliqués, sans être transloqués ou pratiquement pas. Le terme de "pénétrant" n'est pas utilisé dans le domaine des herbicides comme il l'est pour les fongicides. Le point final de l'absorption d'un herbicide par une plante est son action sur un ou plusieurs mécanismes du métabolisme de celle-ci. L'herbicide intervient dans un processus biochimique de la plante et le perturbe. Actuellement, beaucoup de molécules nouvelles ont un site d'action précis, ce qui leur confère souvent une plus grande sélectivité et une forte spécificité mais qui est un facteur favorable à l'apparition des résistances.

La pénétration des herbicides agissant par le sol est décrite avec le comportement des herbicides dans le sol. Dans le cas des herbicides appliqués sur une végétation, plus particulièrement le feuillage dans le cas des herbicides, la quantité de produit qui peut pénétrer dans la plante est fonction de deux éléments :

- de la quantité d'herbicide qui est retenue sur la surface foliaire ;
- de la part qui pénètre réellement à l'intérieur de la plante ;

4.7.1. La rétention des herbicides sur les surfaces foliaires

La quantité d'herbicide retenue sur la surface d'une feuille dépend de trois paramètres et de leurs interactions entre eux.

- De la feuille elle-même :
 - de son port, plus ou moins dressé ou étalé (fort dressé dans le cas des graminées),
 - de l'importance de sa surface,
 - de sa mouillabilité dépendant, selon l'espèce de plante, de la nature et de la morphologie des cires épicuticulaires,
 - de l'âge de la plante (cotylédon, feuille jeune ou vieille),
 - de sa pilosité,
 - de sa face (face inférieure avec cuticule moins épaisse, sans cire, sans poil).
- Des conditions climatiques, température et humidité qui :
 - conditionnent la mouillabilité de la feuille, de la cuticule,
 - favorisent le séchage plus ou moins rapide des gouttelettes de bouillie de pulvérisation sur la feuille,
 - provoquent le lessivage du produit déposé sur la feuille.
- Du produit et de sa mouillabilité, de la dimension des gouttelettes, du pH de la bouillie, de sa faculté à se fixer sur la cuticule chargée négativement, de la concentration en herbicide et surtout de l'angle de contact des gouttelettes.

4.7.2. La pénétration foliaire des herbicides

La pénétration proprement dite d'herbicides dans la feuille suit deux étapes : la pénétration à travers la cuticule et la pénétration dans les cellules épidermiques sous-jacentes.

- **La pénétration cuticulaire.** La cuticule végétale est une formation inerte et hydrofuge jouant un rôle de barrière de protection et de limitation des échanges de la feuille vis-à-vis du monde extérieur. La cuticule est constituée (en partant de l'extérieur) par des cires épicuticulaires, très hydrophobes dont le dépôt varie en fonction des conditions du milieu ; elles sont importantes dans le cas de forte intensité lumineuse, de faible humidité de l'air, de mauvaise alimentation en eau et par températures extrêmes. La cuticule proprement dite se compose d'une couche lamellée de cires et de cutine (polymère d'acides gras) lipophile. En dessous, la couche la plus profonde et la plus épaisse contient, en plus des cires et de la cutine, de la cellulose (hydrophyle) et des pectines (hydrophyle).

La pénétration cuticulaire pourra se faire par la voie lipidique pour les substances lipophiles et par la voie aqueuse ouverte aux produits hydrophiles. La pénétration à travers la cuticule dépendra donc de la nature et de l'épaisseur de cette cuticule qui varie elle-même en fonction de l'espèce végétale, de l'âge de la feuille, de la partie touchée (cotylédon ou face inférieure) et des conditions qui ont prévalu lors de la croissance de la plante.

Les conditions climatiques au moment du traitement sont prépondérantes :

- l'humidité de l'air est favorable à la pénétration, tandis que la sécheresse, les vents de nord et d'est sont néfastes ;
 - par "temps poussant" c'est-à-dire par temps chaud avec forte humidité de l'air, la pénétration à travers la cuticule est accélérée car la cutine et la cellulose se gonflent par fixation d'eau, les cires s'écartent, permettant le passage de la bouillie de pulvérisation. Les températures élevées sont favorables mais dessèchent la bouillie.
- Le produit herbicide lui-même (certains sont lipophiles, d'autres hydrophiles), les adjuvants (de formulation ou additifs dans la bouillie de pulvérisation), la concentration de la bouillie en herbicides et en adjuvants, la pression osmotique et le pH de cette bouillie influencent aussi directement la pénétration.

• **La pénétration dans les cellules épidermiques.** Après le passage de la cuticule, l'herbicide est absorbé par les cellules, diffuse dans la paroi cellulaire et franchit la membrane cytoplasmique.

La pénétration dans les cellules épidermiques peut être considérée comme l'étape finale de la pénétration d'un herbicide de contact ou la première étape du transport s'il s'agit d'un herbicide systémique. Pour un herbicide de contact ou pour un herbicide qui n'est pas véhiculé des feuilles vers les autres parties de la plante – c'est le cas des radiculaires comme les urées, triazines, uraciles – le transport se limite à cette diffusion locale avec nécroses des parties touchées ou du bout de la feuille.

Les stomates ont été longtemps considérés comme des voies de pénétration privilégiées en raison de leur aptitude aux échanges avec l'extérieur. Il semblerait en réalité que le pore (ostiole) soit une voie de pénétration peu importante en raison notamment des tensions superficielles qui y règnent, mais que les cellules compagnes de par leur plus grande perméabilité permettent le passage de solutions herbicides.

4.7.3. La translocation des herbicides

Un herbicide systémique, quel que soit son mode de pénétration (racinaire, foliaire...) doit être transporté plus ou moins loin dans la plante, dans un organe autre que celui sur lequel il a été appliqué ou par lequel il a pénétré. Un transport correct est donc indispensable à la bonne efficacité de l'herbicide : la qualité du transport conditionne la dose à utiliser et le résultat final. Cependant, les règles qui régissent le transport ne permettent guère à l'homme d'interférer sur cette migration des produits ; tout au plus, pourra-t-il profiter des conditions climatiques favorables (temps poussant, forte évapotranspiration) à la bonne circulation des produits dans les différentes voies de transport. Ces voies fonctionnelles de transport des herbicides, dits de translocation, sont :

- la voie **apoplastique** c'est-à-dire "extracellulaire". L'apoplaste comprend l'ensemble des parois cellulaires, les vaisseaux (xylème) qui forment un ensemble continu par lequel sont transportées la sève brute, l'eau et les substances dissoutes, y compris l'herbicide. C'est la migration ascendante ;
- la voie **symplastique** est la voie intracellulaire. elle comprend le cytoplasme des cellules et le phloème où les herbicides peuvent être redistribués dans l'ensemble de la plante par migration descendante ou ascendante.

Ces deux voies peuvent être empruntées par certains herbicides qui à un moment donné choisissent une voie transitoire : un herbicide apoplastique peut ainsi, pendant un temps limité, pénétrer à l'intérieur de la cellule. Les voies fonctionnelles de transport et les mécanismes qui régissent le transport des produits dans la plante sont détaillés dans le chapitre 9.

4.7.4. Les mécanismes d'action phytotoxique

Les mécanismes susceptibles de provoquer une action phytocide dans une plante ainsi que les sites d'action où ceux-ci peuvent s'exercer sont nombreux et variés. En effet, toute modification ou perturbation d'un processus métabolique peut provoquer des effets herbicides, si celle-ci concerne une fonction essentielle, l'effet peut être létal. Cependant, une perturbation peut être suffisante sans être mortelle pour la plante, un effet régulateur, limitant ou bloquant la croissance ou le développement d'une adventice peut correspondre à l'effet recherché. Les symptômes plus

ou moins visibles d'une perturbation dans la plante sont une indication pour l'identification du site d'action d'un herbicide. Les recherches en génétique, en biochimie, en biotechnologie, les progrès dans la manipulation génétique ont fait progresser la connaissance des sites et mécanismes d'action des substances herbicides.

Les principaux mécanismes d'action des herbicides sont brièvement rappelés ci-après, mais il faut savoir que bien des molécules herbicides ont plusieurs sites d'action et possèdent plusieurs mécanismes d'intoxication des plantes. La plupart des herbicides, et tous les herbicides modernes, présentent une grande sécurité pour l'homme et les animaux à sang chaud du fait qu'ils possèdent des mécanismes et des sites d'action propres aux plantes (photosynthèse, synthèse des acides aminés) et qui par conséquent n'intéressent guère les mammifères.

- Les inhibiteurs de photosynthèse. Un grand nombre d'herbicides (dérivés de l'urée, de l'atrazine) ont comme mode d'action phytotoxique principale la réduction de l'activité photosynthétique des plantes. Ils interviennent dans la réaction de Hill en empêchant les transferts d'électrons au niveau du photosystème II (PS II).
- Les inhibiteurs de la synthèse des acides aminés, de l'acétolactate synthétase (pour les sulfonylurées et les imidazolinones), de la glutamine synthétase (sulfosate), de l'EPSP synthétase (glyphosate).
- Les inhibiteurs de la synthèse des carotènes (aminotriazole, fluorochloridone, di-flufénican) entraînent une inhibition de la synthèse des chloroplastes et une destruction des chlorophylles.
- Les inhibiteurs de la division cellulaire agissent principalement sur les régions méristématiques ; ce sont des inhibiteurs de la mitose (antimitotique) : par action sur les microtubules au moment de la formation du fuseau (dinitroanilines, carbamates, carbétamide, propyzamide).
- Les inhibiteurs de l'élongation cellulaire inhibent la synthèse de l'acide gibbérelle, des acides gras (thiocarbamates).
- Les herbicides auxiniques ou phytohormones de synthèse prennent la place de l'auxine vraie dans la plante, y créent des troubles et des malformations.
- Les inhibiteurs de la respiration, les "découplants", empêchent que l'énergie produite au cours des réactions d'oxydo-réduction cellulaire (mitochondrie) soit mise en réserve sous forme d'ATP (hydroxybenzonnitriles, colorants nitrés).

4.8. Les propriétés d'un herbicide et les types de matières actives

Les propriétés d'un herbicide sont essentiellement celles de la **matière active**. La matière active (m.a. ou a.i. : *active ingredient* dans la terminologie anglaise et internationale) est la molécule responsable de l'activité herbicide. Identifiée à sa découverte et durant les premiers temps de son développement par un numéro de code, elle se définit par un nom commun admis internationalement qui souvent indique son appartenance à une famille chimique. Toute molécule possède une formule de structure, formule chimique, un poids moléculaire et des propriétés toxicologiques, chimiques, physico-chimiques et bien sûr biologiques propres.

Les propriétés toxicologiques d'une molécule constituent, à l'heure actuelle, un maillon essentiel dans l'étude d'un pesticide. La sécurité tant en toxicité aiguë (DL 50) que chronique (effet cancérigène, tératogène, ...) est la condition *sine qua non*, indispensable pour le développement futur de la molécule quel que soit son intérêt agronomique.

Les propriétés chimiques et physico-chimiques d'une molécule intéressent surtout le formulateur. Ce sont essentiellement la stabilité à l'hydrolyse, à la chaleur, dans les solvants, la solubilité dans l'eau et les solvants organiques, le point de fusion, la tension de vapeur.

Les propriétés biologiques (spectre d'efficacité herbicide, sélectivité vis-à-vis des plantes cultivées) sont précisées par le biologiste. Cependant, la volatilité, la sensibilité à la lumière, la solubilité dans l'eau, en raison de leur impact sur l'efficacité biologique, concernent également l'agronome.

La m.a. se présente sous un aspect physique (cristaux, paillettes, pâtes, liquides plus ou moins fluides, ...) ne permettant pas son emploi tel quel. Ce sont des produits techniques qui doivent être **formulés**, c'est-à-dire présentés sous une forme qui permet son utilisation au moyen des appareils d'application. Les herbicides sont surtout appliqués par pulvérisation et dans certains usages plus restreints en granulés ou en microgranulés.

Pour être pulvérisés, les herbicides seront présentés en concentrés à diluer dans l'eau. Si une m.a. est soluble dans l'eau, elle peut être formulée en solide : granulés solubles (SG), en poudre soluble (SP) ou sous forme liquide en solution aqueuse ou concentré liquide (SL). Lorsque la m.a. est insoluble dans l'eau, il faut soit la dissoudre dans un solvant organique, elle se présentera alors en concentré émulsionnable (EC), ou encore à transposer en une forme soluble (ex. forme acide transformée en sel). Elle peut aussi être formulée en produit liquide, dans lequel la m.a. demeure sous forme solide ; ce sont les suspensions concentrées (SP) ou flow. En formulation solide, elle se présente en poudre mouillable (WP) ou en granulés à disperser dans l'eau (WG).

La formulation d'un herbicide est la résultante d'un ensemble de procédés qui consistent à présenter une matière active pesticide sous une forme telle qu'elle développe, dans un traitement donné, un maximum d'efficacité tout en restant dans les limites économiques admissibles et en réduisant les risques de pollution de l'environnement et d'intoxication des utilisateurs. Actuellement, une attention particulière est portée sur la toxicité des formulations. La tendance dans l'avenir sera à l'élimination des solvants présentant des risques d'irritations, d'inflammabilité. Il est en effet difficilement admissible qu'une m.a. non toxique soit présentée sous une formulation dangereuse à l'utilisation à cause du solvant. Jadis, le souci du formulateur était de présenter un produit stable, sécurisant pour le transport, le stockage, la manipulation. Depuis quelques années, le souci d'une formulation mieux adaptée à la biologie s'est développé surtout pour les substances à appliquer sur un substrat végétal comme les herbicides de postémergence. Des adjuvants furent mis au point pour améliorer la dispersion des gouttelettes, la mouillabilité, la rétention sur le feuillage et la pénétration foliaire. Des formulations particulières ont vu le jour : la micro-encapsulation ainsi que l'adjonction à la m.a. de phytoprotecteur (*safener*), substance qui améliore la sélectivité de la molécule herbicide vis-à-vis de certaines plantes sensibles cultivées.

Les m.a. herbicides proviennent :

– de la chimie minérale. Ce sont les herbicides dits minéraux, bien que certains d’entre eux soient fabriqués par synthèse : l’acide sulfurique, les borates, les arsenites, le sulfate de cuivre ne sont plus guère utilisés. Le sulfate de fer est utilisé pour combattre les mousses. Le chlorate de soude (NaCl_3) est encore abondamment utilisé comme herbicide total (1,5 à 2,5 kg/are) (de préférence sur sol humide) et pour la dévitalisation des souches. La voie de pénétration la plus importante est la racine, il est alors transporté avec la sève brute dans toute la plante, vers les organes les plus aptes à concentrer les sels. Ce sont d’abord les feuilles (les vieilles feuilles avant les jeunes) puis les autres organes qui marqueront les symptômes. La persistance dans le sol est assez longue ;

– de la distillation du pétrole. Certains types d’huiles minérales dérivées de la distillation du pétrole brut ont été utilisées comme herbicides. D’autres sont employées comme adjuvants pour améliorer l’effet des herbicides foliaires ;

– de la chimie organique de synthèse. La toute grande majorité des herbicides utilisés appartiennent à cette catégorie et forment un grand nombre de familles chimiques aux propriétés chimiques, physiques et biologiques fort variées.

Les principales matières actives herbicides sont présentées dans le tableau 18.3. Ne sont décrites de manière un peu plus détaillée ci-après que les phytohormones de synthèse et les antigraminées spécifiques, qui sont des herbicides très utilisés.

Tableau 18.3. Les principaux types d’herbicides et leurs activités.

Types d’herbicides	Activités
<ul style="list-style-type: none"> • Nitrophénols colorants nitrés ou colorants organiques -DNOC, DNBP, DNP 	Nécroses des cellules et tissus situés au point d’application puis destruction
<ul style="list-style-type: none"> • Phytohormones de synthèse : dérivés des acides phénosyaliphatiques et autres “hormones” de synthèse (voir détails dans le texte) 	Herbicides actifs contre les dicotylédones annuelles et vivaces. Essentiellement désherbage des céréales et des herbages. Les dérivés trichlor sont plus efficaces à l’égard des ligneux
<ul style="list-style-type: none"> • Dérivés benzonitriles et hydroxybenzonitriles <ul style="list-style-type: none"> – dichlobénil et chlorthiamide – ioxynil, bromoxynil et bromophénoxime 	Inhibition de la respiration des plantes, et du premier stade de la fonction chlorophyllienne
<ul style="list-style-type: none"> • Carbonates substitués <ul style="list-style-type: none"> – prophame et chlorprophame (CIPC) – chlorbuphame (BIPC) – barbane et asulame 	Antigraminées, avec pour certains produits une bonne activité vis-à-vis des dicotylées annuelles et parfois vivaces (rumex, fougères)
<ul style="list-style-type: none"> • Thiolcarbonates <ul style="list-style-type: none"> – diallate, triallate, cycloâte, EPTC et vernolate 	Principalement, destruction des coléoptiles des graminées et pour certains produits tuent les bourgeons souterrains qui se développent sur les rhizomes des vivaces
<ul style="list-style-type: none"> • Amides ou anilides substituées <ul style="list-style-type: none"> – alâchlore, métolachlore, métazachlore, propachlore, acétolchlore 	Inhibition de la division cellulaire et de la synthèse des lipides, des protéines et des gibbérellines. Produits actifs sur graminées de type des millets (panics, sétaires digitaires) et principalement sur maïs aussi, sélectifs du soja, arachide, coton
<ul style="list-style-type: none"> • Dinitroanilines <ul style="list-style-type: none"> – trifluraline, benfluraline, nitriline, butraline, bendiméthaline, oryzaline et âclonifen 	Déréglement de la croissance

Types d'herbicides	Activités
<ul style="list-style-type: none"> • Dérivés de l'urée ou urées substituées • Dérivés de la triazine symétrique <ul style="list-style-type: none"> – méthosytiazines – chlortiazines (simazine, atrazine, cyanazines, terbutyazine) – méthylthiotriazines (prométryne, terbutryne) – azido-diamino -s- triazines (aziprotryne) • Dérivés de la triazine non symétrique (Triazinones) <ul style="list-style-type: none"> – métribuzine – métamitone Triazoles <ul style="list-style-type: none"> – amitrol • Diazines <ul style="list-style-type: none"> – uraciles (bromacil, terbacil, lénacil) – pyridazines (chloridazon ou pyrazon) • Dipyridiles (composées d'ammonium quaternaire) <ul style="list-style-type: none"> – les plus intéressants diquat et paraquat – le difenzoquat • Diphényl-éthers <ul style="list-style-type: none"> – bifénox (efficace en post-émergence) – nitroféne, fluorodiféne, acifluorféne • Glyphosate, gluphosinate et sulfosate foliaire, • Imidazolinones <ul style="list-style-type: none"> – imazaméthabenz • Sulfonylorées <ul style="list-style-type: none"> – chloresulfuron méthyl – thiamethuron méthyl, thifensulfuron, etc • Antigraminées spécifiques <ul style="list-style-type: none"> – cyclohexanediones, – propanoates, esters dérivés de l'acide propionique, et autres composés (voir texte) 	<p>Pénétration essentiellement par les racines , provoquent la chlorose et inhibent la photosynthèse</p> <p>Destruction rapide des jeunes mauvaises herbes annuelles et les vivaces (si dose élevé) Inhibition de la photosynthèse</p> <p>La métribuzine est très sélective vis-à-vis des solanacées (pomme de terre, tomate) et vis-à-vis des dicotylées et des graminées annuelles La métamitronne est très sélective vis-à-vis de la betterave Inhibition de la biosynthèse de la chlorophylle</p> <p>Action herbicide principalement sur les racines Destruction des dicotylées et des monocotylées annuelles et vivaces.</p> <p>Très grande sélectivité de la betterave à l'égard de ce produit Bonne action herbicide contre de nombreuses dicotylées annuelles</p> <p>Destruction des chloroplastes lorsque la photosynthèse est active – Destruction des folles avoines sélectivement dans les cultures d'orge</p> <p>Action sur la photosynthèse et la respiration destruction des parties aériennes</p> <p>Herbicides totaux, systémiques à absorption particulièrement efficaces dans la destruction des graminées vivaces</p> <p>Inhibiteurs de synthèse des acides aminés – Lutte contre les graminées et quelques dicotylées des céréales</p> <p>Inhibiteurs de la biosynthèse des acides aminés essentiels Ils sont actifs sur bon nombre de dicotylés, notamment les composés et les crucifères Remarquable qualités herbicides sur dicotylées vivaces comme Rumex sp</p> <p>Plusieurs familles d'herbicides à action spécifique sur les graminées à l'exclusion pour la plupart de tout effet sur les dicotylées Se présentent comme des herbicides auxiliaires</p>

• **Les phytohormones de synthèse**

Les dérivés des acides phénoxyaliphatiques. Ces produits, n'existant jamais naturellement dans les plantes, ne sont donc pas des phytohormones, et c'est donc im-

proprement qu'ils sont appelés : auxines herbicides, auxines de synthèse ou herbicides à base de phytohormones. Les phytohormones de synthèse peuvent être absorbées par les racines et par les feuilles. Lorsqu'elles sont absorbées par les racines, elles sont transportées avec la sève brute par les faisceaux ligneux (xylème) jusqu'aux feuilles. Lorsqu'elles sont absorbées par les feuilles, elles sont transportées d'abord de cellule à cellule ; cette progression est très lente. Elles sont ensuite transportées par les tubes criblés du liber (ou phloème) dans la même direction que la sève élaborée ; soit vers les organes de réserve, si l'application a lieu au moment de l'accumulation des matières de réserve de la plante, soit vers les points végétatifs durant la période de croissance active.

Ces auxines de synthèse bloquent entièrement le système de circulation polarisée de l'auxine vraie, l'acide indol-acétique, annulant ainsi les effets propres de celle-ci. C'est donc probablement en prenant la place de l'auxine vraie, que les auxines de synthèse provoquent différents troubles chez la plante (blocage de la photosynthèse, exagération de la respiration, apparition de malformations morphologiques, désorganisation des processus de la différenciation, etc.) et y causent une mort lente.

La persistance dans le sol peut varier de 2 ou 3 semaines jusqu'à 3 ou 6 mois selon les produits.

Les dérivés phénoxyaliphatiques comptent trois familles :

- les dérivés phénoxyacétiques (MCPA, 2,4-D, 2,4,5-T) ;
- les dérivés phénoxybutyriques (mécoprop (MCP), dichlorprop (2,4-DP), féoprop (2,4,5-TP) ;
- les dérivés 2-phénoxypropioniques (MCPB, 2,4-DB, 2,4,5-TB).

Ce sont des herbicides actifs contre les dicotylédones annuelles et vivaces et pratiquement inactifs à l'égard des monocotylédones.

Les dérivés méthyl-chlor et dichlor sont principalement utilisés pour le désherbage sélectif des céréales et des herbages. Leur domaine d'activité est très voisin ; des différences existent cependant. Les dérivés trichlor sont plus efficaces à l'égard des plantes ligneuses et surtout utilisées pour le débroussaillage et le dégagement chimique des plantations de résineux.

Autres "phytohormones de synthèse". Trois autres groupes d'herbicides présentent des produits auxiniques proches des dérivés phénoxyaliphatiques. Il s'agit :

- des dérivés de l'acide benzoïque comprenant le 2,3,6-TBA, le dicamba et l'amiben ;
- des dérivés de l'acide picolonique comprenant le piclorame et le clopyralid (3,6-DP) ;
- du dérivé de l'acide pyridinyloxyacétique : le fluroxypyr, le triclopyr et la benazoline ;
- des dérivés de l'acide fluorène-carboxylique ou morphactines : le flurénol et le chlorflurénol.

• **Les antigraminées spécifiques.** Ce groupe comprend plusieurs familles d'herbicides dont la caractéristique principale est l'action spécifique sur les graminées à l'exclusion pour la plupart de tout effet sur les dicotylédones. Ces produits sont absorbés par les feuilles et dans une moindre mesure par les racines ; la pénétration foliaire est la plus efficace et la plus rapide. Les produits absorbés sont très vite transportés vers les méristèmes apicaux des graminées qui sont rapidement détruits. Les jeunes feuilles des graminées sont chlorosées puis nécrosées et meurent, tandis que les feuilles plus âgées subsistent plus longtemps. Ils présentent dans la plante des antagonismes avec les herbicides auxiniques. Ces produits sont des inhibiteurs

de l'acétyl-coenzyme A carboxylase ; l'enzyme des graminées est sensible tandis que celle des dicotylédones ne l'est pas ou peu.

Ce sont les :

- cyclohexanediones : alloxydime, sethoxydime, cycloxydime, cloproxydime, tralcoxydime ;
- les propanoates, esters dérivés de l'acide propionique : benzoyl-N-fenylpropionique (-prop.) : benzoylprop-éthyl, flamprop-méthyl, flamprop-isopropyl, flamprop-M-isopropyl ;
- diclofop-méthyl, fluazifop-butyl, fluazifop-P-butyl, haloxyfop-ethoxyethyl, haloxyfop-R-méthyl, isoxapyrifop ;
- quinzalofop-ethyl, quinzalofop-ethyl-D, propaquizafop ;
- fenoxaprop-ethyl, fenoxaprop-ethyl (+ fenchlorazol-ethyl), fenoxaprop-P-ethyl, fenoxaprop-P-ethyl (+ fenachlorazol-ethyl)

4.9. Évolution de la phytopharmacie et propriétés des nouveaux herbicides

Les caractéristiques principales des nouveaux herbicides vont à la rencontre des préoccupations d'une phytopharmacie moderne, plus sécurisante pour l'utilisateur, le consommateur et l'environnement.

- Les nouvelles matières actives sont efficaces et s'utilisent à des doses faibles voire même très faibles, de l'ordre de quelques grammes ou de quelques dizaines de grammes à l'hectare. Ces doses très faibles d'emploi sont en quelque sorte première réponse à "l'emploi massif de pesticides" dont on s'est plu à faire croire qu'il en est la caractéristique principale. Mais ceci répond à des nécessités de notre monde actuel.

Sur le plan de la fabrication et de la formulation des produits, il devient de plus en plus difficile dans certaines régions urbanisées d'implanter une usine chimique et surtout une usine chimique produisant des pesticides. L'installation de ces usines dans des pays moins urbanisés mais aussi moins industrialisés ne va pas sans poser des problèmes certains. La fabrication et le conditionnement de faibles quantités de produits va pouvoir se réaliser dans des unités beaucoup plus petites, de chimie fine, à la dimension d'un laboratoire.

Sur le plan du transport de ces nouveaux produits, ce sont des quantités nettement plus faibles qui vont circuler sur les voies de communication, sur les routes et autoroutes notamment, réduisant le risque en cas d'accident.

Les faibles quantités de produits utilisées dans l'avenir permettront de diminuer les coûts de fabrication, de conditionnement et de transport mais réduiront également les risques pour l'environnement. D'autant plus que les propriétés toxicologiques et biologiques des nouvelles molécules vont elles aussi évoluer vers une plus grande sécurité. Mais il importe que la formulation des produits suive cette voie.

- Les formulations vont dans l'avenir se présenter sous des formes plus compatibles avec la sécurité des utilisateurs et la facilité d'emploi des produits. Il n'est pas pensable en effet que des produits soient commercialisés en formulations présentant des risques et des dangers sur le plan toxicologique alors que les matières actives évoluent vers plus de sécurité.

En ce sens la suppression des solvants organiques dont beaucoup sont volatils, inflammables, irritants... va se généraliser. La production de granulés dispersables (WG) de suspensions concentrées (SC) avec les qualités qu'ils présentent et rappelées ci-avant va s'accroître.

- Pour éviter la pollution des sols et des eaux, une plus grande "labilité" des produits va être requise, ce sont des molécules biodégradables c'est-à-dire entièrement et rapidement métabolisées par la faune microbienne du sol qui seront recherchées.

La "disparition" rapide et complète des produits dans le sol est une exigence qui va obliger à réaliser les traitements au moment optimal compte tenu de la biologie de la mauvaise herbe mais qui risque d'entraîner une succession de ces traitements car une efficacité durable ne pourra pas toujours être maintenue en raison de la faible persistance du produit.

- Les molécules nouvelles sont et seront plus "ciblées" c'est-à-dire que leur mécanisme d'action à l'intérieur de la plante à contrôler sera plus précis. Ceci est la conséquence, semble-t-il, d'une meilleure connaissance de la biologie, de la biologie cellulaire surtout et résulte de la conjonction des progrès réalisés en biotechnologie, études et manipulations génétiques avec ceux de la phytothérapie.

- Il résulte de ces progrès une plus grande "spécificité" des nouvelles molécules c'est-à-dire qu'elles combattront plus sélectivement telles mauvaises herbes en n'en préservant d'autres dont l'élimination n'est pas nécessaire. Mais en conséquence de cela, des mélanges, associations ou combinaisons de produits seront de plus en plus nécessaires pour résoudre tous les problèmes rencontrés en pratique agricole ou horticole.

- La plus grande sélectivité des produits vis-à-vis des cultures est une suite logique également dans la découverte de molécules plus "ciblées" et plus "spécifiques". Elle devrait permettre une meilleure qualité des traitements si l'utilisateur demeure raisonnable dans l'emploi des produits aussi "sûrs et sélectifs".

L'obtention et la production de plantes cultivées résistantes à des herbicides est aussi une perspective nouvelle, permettant de mieux profiter des spectres des produits, parfois anciens donc peu coûteux, et de désherber en conditions de sélectivité plus perfectionnées, mais d'autres problèmes sont soulevés qui doivent être résolus non seulement sur le plan biologique mais également au point de vue légal et déontologique.

De toute façon, l'avenir de la phytothérapie ne peut se dessiner que dans la perspective d'une plus forte attention et d'une meilleure sauvegarde de l'utilisateur, du consommateur et de l'environnement.

Toutes les réponses devront être apportées aux questions soulevées et toutes les garanties fournies tant sur le plan légal (c'est-à-dire des autorisations, des agréments) que sur le plan scientifique par les recherches menées dans le domaine des résidus dans le sol, les eaux et les denrées consommées.

BIBLIOGRAPHIE

La première partie de cette bibliographie concerne les paragraphes 1 à 3 du chapitre.

- Bakker D. (1960), "A comparative live-history study of *Cirsium arvense* (L) Scop. and *Tussilago farfara* L., the most troublesome weeds in the newly reclaimed polders of the former Zuiderzee", in *The biology of weeds*, J.L. Harper (ed.), Symp. Br. Ecol. Soc. 1 : 205-22.
- Black J.N. (1967), "Light-controlled germination of seeds", in *Dormancy and Survival*, H.W. Woolhouse (ed.), Symp. Soc. Exp. Biol., 23 : 193-217.
- Cavers B.C. and Benoit D.L. (1989), "Seed banks in arable land", in *Ecology of soil seed banks*, M.A. Leck, V.T. Parker and R.L. Simpson (ed.), Academic Press, 309-328.
- Deuse J. et Lafabre E.M (1979), *Le désherbage des cultures sous les tropiques*, Maisonneuve et Larose, Paris, 312 p.
- De Langhe J.E., Delvosalle L., Duvigneaud J., Lambinon J. et Vanden Berghen C. (1983), *Nouvelle flore de la Belgique, du Grand Duché de Luxembourg, du Nord de la France et des régions voisines*, Patrimoine du Jardin botanique national de Belgique, 1016 p.
- Egli D.B., Pendleton J.W. and Peters D.B. (1970), "Photosynthetic rate of three soyabean communities as related to carbon dioxide levels and solar radiation", *Agronomy Journal*, 62 : 411-414.
- Faliu L. (1981), *Botanique appliquée*, École nationale vétérinaire de Toulouse, notes de cours, 351 p.
- Garwood N.C. (1989), "Tropical soil seed banks : a review", in *Ecology of soil seed banks*, M.A. Leck, V.T. Parker and R.L. Simpson (ed.), Academic Press, 149-209.
- Gasquez J. (1991), "La résistance aux herbicides chez les angiospermes", in *Les herbicides*, R. Scala (ed.), INRA, 265-280.
- Hakansson S. (1969), "Experiments with *Agropyron repens* (L) Beauv. Rhizome orientation and life length of broken rhizomes in the soil, and reproductive capacity of different underground shoot parts", *Lantbrukshögskolans Annaler*, 35 : 869-894.
- Hanf M. (1982), *Les adventices d'Europe, leurs plantules, leurs semences*, BASF : 496 p.
- Hansen K. (1911), *Weeds and their vitality*, Ugeskr. Landm, 56, 149.
- Harper J.L. (1959), *The biology of weeds*, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 256 p.
- Harper J.L. (1990), *Population biology of plants*, Academic Press, 892 p.
- Jauzein P. et Montegut J. (1983), *Graminées (Poaceae) nuisibles en agriculture*, SECN, 538 p.
- Lambert J., Toussaint B. et Hebberecht C. (1978), *Potentiel de production des prairies temporaires en fonction des conditions écologiques*, Laboratoire d'écologie des prairies, Communication n°22, 8 p.
- Montegut J. (1983), *Pérennes et vivaces nuisibles en agriculture*, SECN, 479 p.
- Montegut J. (s.d.), *Biologie des semences et écologie de la germination des mauvaises herbes*, Syllabus de cours ENSH Versailles, 26 p.
- Montegut J. (s.d.), *Mauvaises herbes des vignes et des vergers*, Syllabus de cours ENSH Versailles, 42 p.
- Palmer J.H. (1958), "Studies on the behaviour of the rhizome of *Agropyron repens* (L) Beauv. 1 : The seasonal development and growth of the parent and the rhizome", *New Phytol.*, 57 : 145-159.

- Palmer J.H. (1962), "Studies on the behaviour of the rhizome of *Agropyron repens* (L) Beauv. 2 : Effect of soil factors on the orientation of the rhizome", *Physiologia Plant.*, **15** : 445-451.
- Stryckers (1979), "Problèmes actuels relatifs aux plantes adventices", *Revue de l'Agriculture*, **2** (32) : 383-400.
- Wright J.L. and Lemon E.R. (1966), "Photosynthesis under field conditions. 9. Vertical distribution of photosynthesis within a corn crop", *Agronomy Journal*, **58** : 265-268.

La partie consacrée à la lutte chimique (paragraphe 4) a été rédigée en grande partie à partir des ouvrages suivants qu'il est conseillé de consulter pour une information plus complète.

- Detroux L. (1975), *Les herbicides et leur emploi*, 3^e édition, Duculot, 1975.
- Detroux L. (1980), *Les herbicides. Nature, actions et fonctionnement*, notes de cours.
- Detroux L. (1985), "De la protection des cultures à la protection des consommateurs", *Annales de Gembloux*, n°1, 61 à 74.
- Fraselle J., *Notes du cours de phytopharmacie*, Faculté des sciences agronomiques, Gembloux.
- Galoux M. (1989), "Les formulations de produits phytopharmaceutiques", in *Futur et protection phytosanitaire des céréales*, Faculté des sciences agronomiques, Gembloux.
- Henriet J. (1988), "Fabrication des pesticides et contrôle des formulations des produits phytopharmaceutiques", Certificat d'études spéciales en phytopharmacie et phytiairie, année académique 1987, FSA, Gembloux.
- Salembier J-F., Notes du cours de Phytopharmacie Spéciale, document ronéoté.
- Scalla R. (1991), *Les Herbicides, mode d'action et principes d'utilisation*, INRA.

Chapitre 19

LA CONSERVATION DES DENRÉES : CAS DES CÉRÉALES

E.H. Bartali¹, E. Persoons², Ch. Verstraeten³

¹ Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc

² Faculté des sciences agronomiques de l'université catholique de Louvain,
Louvain-La-Neuve, Belgique

³ Faculté des sciences agronomiques de Gembloux, Belgique

Sommaire

1. Introduction

2. Les bases de la conservation

- 2.1. La vie des grains
- 2.2. Les agents d'altérations biotiques

3. Échanges air-produit

- 3.1. Équilibres air-produit
- 3.2. Chaleur spécifique d'une céréale en $\text{kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$
- 3.3. Caractéristiques de l'air
- 3.4. Le diagramme enthalpique (h, x) de l'air humide

4. Mode de conservation

- 4.1. Séchage
- 4.2. Ventilation
- 4.3. La lutte contre les insectes

5. Structures de stockage

- 5.1. Techniques traditionnelles
- 5.2. Les techniques modernes de stockage

6. Particularités des climats chauds

- 6.1. Les hautes températures
- 6.2. La forte humidité de l'air

7. Conclusion

Bibliographie

LA CONSERVATION DES DENRÉES : CAS DES CÉRÉALES

1. INTRODUCTION

En cette fin de xx^e siècle, des famines apparaissent encore régulièrement. Beaucoup d'efforts sont entrepris pour lutter contre ce fléau, mais portent essentiellement sur l'augmentation de la production de denrées vivrières, et oublient l'amélioration du stockage des produits afin de garantir des conservations efficaces. Il est, par exemple, courant de constater des pertes entre récolte et consommation dépassant 30 %.

Ces pertes de produits sont dues à des modifications chimiques, à des développements de micro-organismes, à des développements d'insectes, à des interventions de rongeurs, à des mauvaises manutentions affectant la qualité, à des conditions néfastes de stockage et à un maintien du produit à des températures extrêmes ou à des taux d'humidité trop élevés.

Ces détériorations se manifestent par des pertes de poids et/ou de qualité nutritive et donc entraînent des diminutions de valeur commerciale. De ce fait, la maîtrise par l'agronome des techniques de conservation des denrées revêt une importance considérable, au même titre que les autres techniques traitées dans les chapitres précédents.

A quoi sont dues les pertes post-récolte et comment les éviter, tel est le thème de ce chapitre dans lequel nous passerons successivement en revue : les bases de la conservation, les échanges air-produit, les modes de conservation, les structures de stockage.

2. LES BASES DE LA CONSERVATION

2.1. La vie des grains

2.1.1. Humidité du produit

L'humidité d'un produit s'exprime soit en humidité sur poids sec, soit en humidité sur poids humide, soit en teneur de matière sèche. Avant de définir ces mesures, précisons les valeurs en présence.

Un produit à une certaine humidité est composé de produit sec et d'eau. Par définition, on admet que le produit est sec lorsqu'il est séché dans une étuve à 105 °C jusqu'à poids constant. On peut écrire que :

$$P_h = P_s + E$$

avec : P_h le poids de matière humide ;
 P_s le poids de matière sèche ;
 E la quantité d'eau dans le produit, comprise entre la matière humide et la matière séchée à l'étuve à 105 °C.

- h_{PS} = humidité sur poids sec

$$h_{PS} = \frac{E}{P_s} \times 100 = \frac{E}{P_h - E} \times 100 \quad \text{en \%}$$

- h_{PH} = humidité sur poids humide

$$h_{PH} = \frac{E}{P_h} = \frac{E}{P_s + E} \times 100 \quad \text{en \%}$$

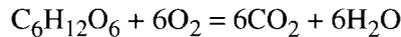
- M_s = teneur en matière sèche

$$M_s = \frac{P_s}{P_h} \quad \text{en \%}$$

Dans le commerce et la pratique agricole, l'humidité d'un produit est exprimée en humidité sur poids humide. Par contre, lors du traitement théorique du séchage il est plus aisé de parler en termes d'humidité sur poids sec.

2.1.2. Respiration des grains

Un grain respire, vit, brûle de l'O₂ en dégageant du CO₂ et de l'eau :



Les sucres ainsi formés brûlent en dégageant 2 865 kJ par mole ou encore 16 000 kJ par kg de sucre brûlé.

Cette respiration, donc le poids de CO₂ dégagé, croît avec h_{PH} et la température du grain (t_g).

A cette vie normale, se superpose le développement des micro-organismes (moisissures, levures, bactéries) et d'insectes et acariens d'autant plus marqué que h_{PH} et t_g sont grands ; ils vivent aux dépens du grain et sont cause d'un dégagement supplémentaire de CO₂ et de H₂O (Buré, 1952).

Ces "activations" par h_{PH} , t_g et les micro-organismes accroissent la production de CO₂, déterminent des pertes en poids, des échauffements et humidifications globales ou locales, donnant à la limite, du grain "échauffé", d'aspect rougeâtre, ayant une odeur de moisi, de faible pouvoir germinatif et dont la valeur boulangère diminue (pain de mauvaise qualité).

Par contre, si la vie du grain est ralentie, le dégagement de CO₂ est réduit, le grain peut conserver son pouvoir germinatif pendant de nombreuses années.

Le dégagement de CO₂ est donc une mesure de l'activité respiratoire. Lorsqu'on mesure l'évolution du dégagement de CO₂ en fonction de l'humidité du produit, on observe un développement brutal de l'activité à partir de 16-17 %. De même,

lorsqu'on mesure l'évolution du dégagement en fonction de la température, le dégagement est maximal vers 55 °C. Après 55 °C, il y a dégradation progressive du grain. Il ne faut donc pas dépasser cette température par séchage. Par sécurité, adopter 35 à 40 °C pour la semence, 45 °C pour les produits de meunerie.

Si on aère, le CO₂ dégagé croît, mais simultanément, si l'air est bien choisi, le séchage et le refroidissement se poursuivent, les mg de CO₂ produits diminuent.

Inversement, en silo étanche, donc en l'absence rapide d'O₂, ou dans une atmosphère confinée, la vie ralentit.

2.1.3. La stabilité d'un grain

Un grain en conservation est stable, si sa température t_g en °C et son humidité h_{PH} lui permettent de se conserver pendant un temps plus ou moins long, en gardant ses qualités germinatives et boulangères.

• **Les courbes de Nuret.** Les courbes de Nuret (figure 19.1) résultent d'observations et définissent 3 zones par rapport à des axes h_{PH} % et t_g en °C (Nuret, 1952) :

- la “zone de sécurité” ou de stabilité, le grain est d'autant plus stable qu'il est à gauche de la courbe, “limite de sécurité” ;
- la “zone d'alerte”, le grain est “instable” au point de vue conservation ;
- la “zone de danger immédiat”, le grain est en voie d'altération rapide, il faut le traiter rapidement et le ramener dans la zone de sécurité.

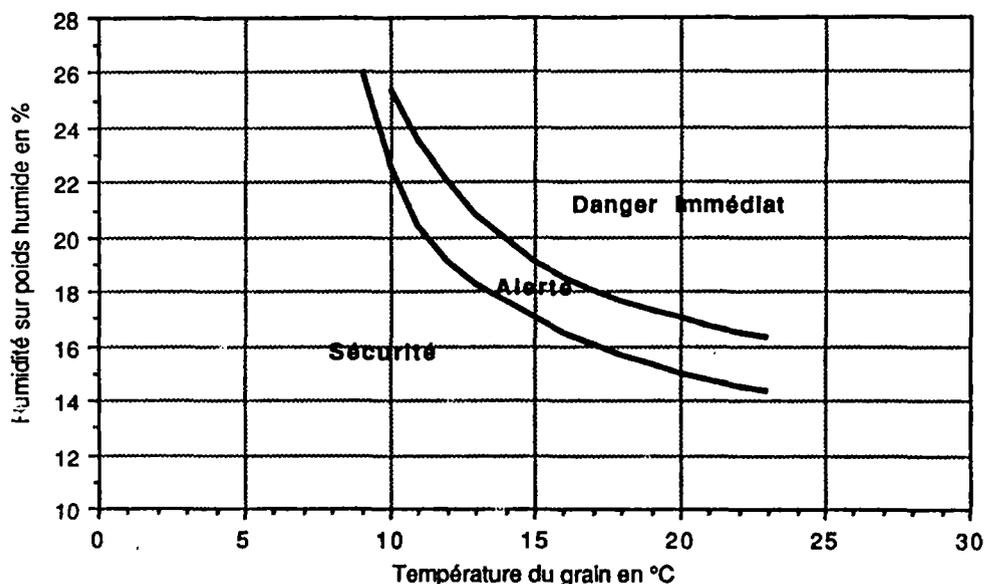


Figure 19.1. Courbes de Nuret pour le froment.

Source : Nuret, 1952

• **Les courbes de la FAO.** D'autres courbes de conservation proposées par la FAO sont données ci-après (figure 19.2).

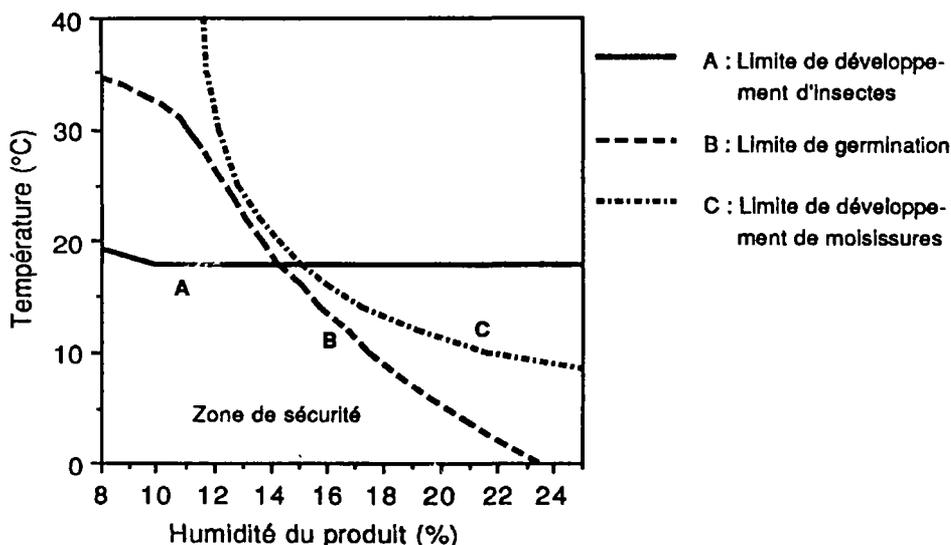


Figure 19.2. Valeurs de température et d'humidité garantissant une bonne conservation (courbes de la FAO.)

2.1.4. Températures maximales de séchage

- Grain à destination d'alimentation animale 75 °C
- Grain à destination d'alimentation humaine 55 °C
- Grain pour la meunerie 60 °C
- Grain pour la brasserie 45 °C
- Riz pour alimentation humaine 45 °C
- Haricots pour alimentation humaine 35 °C

2.2. Les agents d'altérations biotiques

La bonne conservation des grains emmagasinés peut être contrariée par des agressions d'ordre biotique ou abiotique. Nous traiterons ici des principaux agents biologiques d'altération des grains parmi lesquels les insectes, économiquement les plus dommageables.

2.2.1. Les déprédateurs entomologiques

Les principaux insectes nuisibles aux grains emmagasinés appartiennent en grande majorité à l'ordre des coléoptères et des lépidoptères. Longstaff (1981) discute en détail des dégâts causés par le genre *Sitophilus granarius* (L.), de la famille des Curculionidae, ordre des coléoptères. Dans cet ordre, on trouve aussi les familles Tenebrionidae, Silvanidae, Cucujidae, Bostrychidae, Dermestidae, Trogositidae, Bruchidae. Dans l'ordre des lépidoptères, on rencontre les familles Pyralidae, Gelechiidae, Tineidae.

Bien qu'ils exigent pour leur développement des conditions de température, d'humidité et de substrats appropriées, la plupart d'entre eux sont cosmopolites et se sont répandus dans le monde entier suite aux conditions modernes des communications internationales et du commerce des céréales.

2.2.2. Les autres déprédateurs

Outre les ravageurs entomologiques responsables de dégâts souvent considérables dans les réserves alimentaires, d'autres agents biologiques sont susceptibles d'oc-

casionner des pertes conséquentes, suite à une consommation directe des denrées ou à une altération qualitative les rendant inconsommables.

- **Les rongeurs.** Mis à part quelques espèces tropicales vivant dans les cultures mais parfois présentes dans les lieux de stockage, les principaux rongeurs s'attaquant aux denrées entreposées sont le surmulot (*Rattus norvegicus* B.), le rat noir (*Rattus rattus* L.) et la souris grise (*Mus musculus* L.).

Même si le grain n'est que partiellement consommé, la présence d'urine, d'excréments et de poison dans les grains non dévorés les souillent et les rendent impropres à la consommation humaine. On aurait tort de sous-estimer le danger potentiel que représentent ces rongeurs (surtout les rats) pour la santé humaine, particulièrement dans les pays en voie de développement. Ces animaux sont en effet porteurs d'agents pathogènes divers capables de transmettre la peste, le typhus, la rage, des spirochétoses hépatiques, la trichine ou encore la fièvre de Lhassa.

La lutte contre ces vertébrés implique d'abord l'adoption de mesures préventives. L'utilisation de rodenticides au cours de campagnes de dératisation périodiques s'avère souvent nécessaire pour limiter le développement des populations présentes et les maintenir à un niveau tolérable.

- **Les oiseaux.** Surtout en régions tropicales, les oiseaux granivores sont responsables de pertes parfois importantes. Les espèces les plus communes sont les moineaux, les "mange-mil", les "gendarmes", les étourneaux, les pigeons, les tourterelles (Appert, 1985). Ces oiseaux sont nuisibles surtout par la quantité de grains qu'ils prélèvent pour leur nourriture mais également par leurs fientes, leurs plumes ou les matériaux divers transportés pour la fabrication des nids. Leur présence peut être gênante dans les cas de stockage à l'air libre.

- **Les acariens.** Les acariens rencontrés dans les denrées stockées sont des arachnides de quelques dixièmes de millimètres qui, rassemblés sous forme d'agrégats, prennent l'apparence d'une "poussière vivante" (Fleurat-Lessard, 1978). Les céréales envahies par les acariens acquièrent une odeur caractéristique plus ou moins prononcée suivant le degré de l'infestation.

Ces animaux se tiennent souvent dans les grains, en dessous de l'enveloppe tégumentaire recouvrant le germe. Ils passent inaperçus jusqu'au moment où leur population est devenue telle qu'ils sont forcés d'émigrer, offrant cet aspect de poussière mouvante. Les graines attaquées peuvent perdre leur faculté germinative suite à la destruction du germe.

N'étant pas détruits intégralement par la mouture des grains, les acariens sont encore source d'autres nuis. En meunerie, les acariens (et surtout leurs œufs) passent par les mailles des soies des bluteries ; les conduits peuvent en être ainsi envahis. Ils se multiplient alors, en certains points, notamment aux endroits mal aérés, dans les canaux rendus humides par un défaut dans l'aspiration et finissent par infester toute l'installation.

Les acariens que l'on rencontre dans les céréales ont deux types de comportement alimentaire :

- saprophytes : ils se nourrissent de grains, de germes, de débris, de moisissures ou de déchets. Ce sont les plus nombreux (nous citerons *Acarus siro* L. et *Tyrophagus putrescentiae* Schrank) ;

– prédateurs ou parasites : ils attaquent les précédents ou s'en prennent aux œufs ou aux larves d'insectes. Ils ne peuvent se développer qu'en présence d'une proie ou d'un hôte (c'est le cas de *Cheyletus eruditus* Schrank et de *Pediculoïdes ventricosus* Newport).

Une caractéristique commune des acariens des stocks est leur grande sensibilité aux variations de température et d'hygrométrie. Selon Fleurat-Lessard (1978), la plupart des espèces ont un optimum de développement pour une humidité relative comprise entre 80 % et 90 % mais présentent néanmoins des formes de résistance à la chaleur, au froid et à la sécheresse (stades hypope). On rencontrera donc les acariens souvent en association avec les moisissures.

Signalons enfin que la poussière d'acariens morts peut causer des allergies. Les monogastriques sont particulièrement sensibles à une alimentation souillée.

• **La microflore.** De nombreux genres de bactéries, moisissures et levures peuplent naturellement les grains durant l'entreposage. Si les bactéries et les levures n'ont généralement qu'une incidence très faible sur la conservation, les moisissures sont de loin les micro-organismes les plus redoutables. Après inventaire de la mycoflore présente sur la plupart des graines et grains stockés, il apparaît que les moisissures des genres *Aspergillus* et *Penicillium* sont parmi les espèces les plus largement rencontrées.

La présence de champignons devient problématique quand les conditions de température et d'humidité au cours du stockage sont favorables à leur développement. Une teneur en humidité de l'air de 65 % et plus, ainsi que la présence de grains humides, mal séchés ou mouillés est suffisante pour enclencher ce développement. La présence d'insectes en grand nombre dans tout stock de grains s'accompagne rapidement d'une altération fongique favorisée par l'élévation de l'humidité ambiante résultant du métabolisme respiratoire des insectes.

Certaines moisissures ont aussi la propriété d'élaborer des métabolites toxiques, les mycotoxines, pouvant entraîner des intoxications alimentaires graves pour l'homme ou le bétail. Les plus connues d'entre elles sont les aflatoxines synthétisées par *Aspergillus flavus*, champignon présent sur de nombreux substrats mais tout particulièrement sur les graines oléagineuses et leurs tourteaux. L'emploi de fongicides exempts de toxicité pour le grain et pour l'homme n'est pas encore entré dans la pratique pour lutter contre ces moisissures. Seul le **séchage des grains** avant ou durant le stockage peut empêcher le développement de cette microflore.

3. ÉCHANGES AIR-PRODUIT

3.1. Équilibres air-produit

Un grain se met en équilibre d'humidité avec l'air dans lequel il baigne. Cette prise d'humidité est représentée par une courbe. La figure 19.3 représente cet équilibre pour du froment. Ainsi pour une humidité relative $\varphi = 65 \%$, l'équilibre h_{PH} est de 14 %.

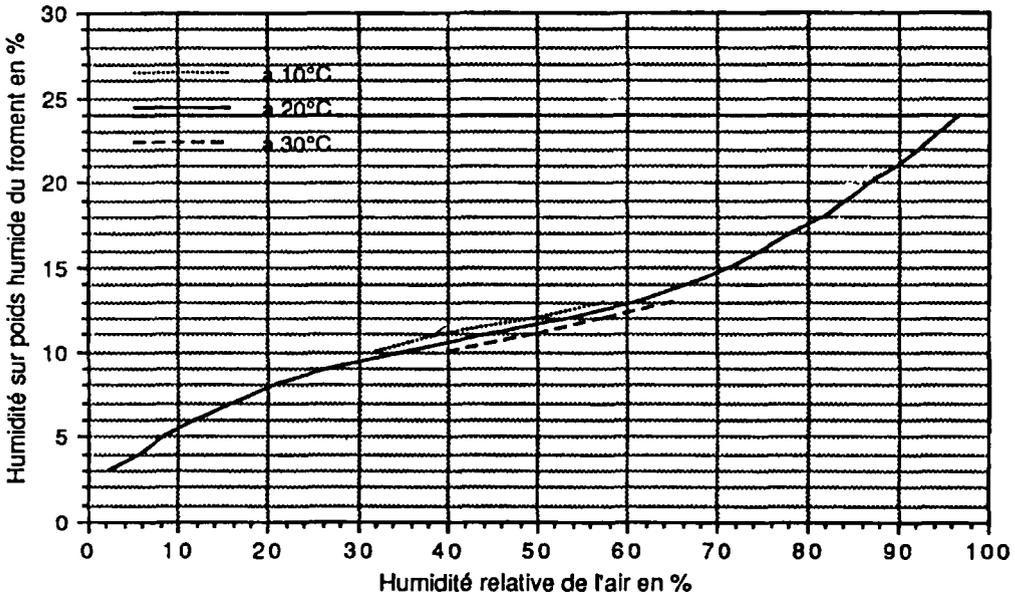


Figure 19.3. Courbe d'équilibre entre l'humidité de l'air et celle du grain de froment

3.2. Chaleur spécifique d'une céréale

La chaleur spécifique d'une céréale sèche (cps) est de 1,55 à 1,67 kJ/kg.°C. La chaleur spécifique d'une céréale humide se calcule comme suit, avec cps eau 4,18 kJ/kg.°C,

$$\text{cps gr à } h_{\text{PH}} \text{ en \%} = (1,55 \text{ à } 1,67) \left(\frac{100 - h_{\text{PH}}}{100} \right) + 4,18 \times \frac{h_{\text{PH}}}{100}$$

Ainsi, si $h_{\text{PH}} = 20 \%$

$$\begin{aligned} \text{cps gr} &= 1,67 \times 0,80 + 4,18 \times 0,20 \\ &= 1,34 + 0,84 \\ &= 2,18 \text{ kJ/kg.}^\circ\text{C} \text{ du grain humide à } 20 \%. \end{aligned}$$

3.3. Caractéristiques de l'air

L'air sec est un mélange de gaz dont la composition est approximativement :

$$\text{O}_2 = 0,210 ; \text{N}_2 = 0,781 ; \text{A} = 0,009.$$

La **masse volumique** δ en kg par m³ se calcule aisément à partir de la loi des gaz parfaits de Boyle-Mariotte :

$$\delta = \frac{P}{RT}$$

avec P en Pa,

$R = 287,1$ en kJ/kg.°C

T en K.

On prend généralement 1,2 kg/m³.

La **chaleur spécifique** pour une pression de 1 bar est :

$$c_p = 1,0067 + 0,00008 t \text{ en kJ/kg}\cdot^\circ\text{C soit } c_p = 1,009 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C entre 0 et } 50^\circ\text{C}.$$

L'air qui nous intéresse dans les problèmes de conditionnement contient de la vapeur d'eau. C'est d'ailleurs en emportant l'eau sous forme de vapeur que l'air est séchant. D'où l'importance de bien saisir les lois qui régissent le comportement de la vapeur d'eau dans l'air.

Si P_a kg d'air sec est mélangé à P_v kg de vapeur d'eau, la concentration en masse appelée **humidité absolue** x est donnée par :

$$x = \frac{P_v}{P_a}$$

Cette manière présente l'avantage de traiter les problèmes sur la base d'une quantité constante qui est la quantité d'air sec.

La deuxième caractéristique est l'**humidité relative** φ avec :

$$\varphi = \frac{p_v}{p'_v}$$

où : p_v est la pression partielle de la vapeur d'eau dans le mélange.

p'_v est la pression de saturation de la vapeur d'eau à la même température.

Si p est la pression totale du mélange, la relation entre x et φ est donnée par :

$$x = 0,622 \left(\frac{p_v}{p - \varphi p'_v} \right)$$

3.4. Le diagramme enthalpique (h, x) de l'air humide

Dans la résolution des problèmes de conditionnement, on utilise toujours le diagramme de l'air humide appelé aussi de Mollier. Ce diagramme permet essentiellement d'associer quatre caractéristiques de l'air humide. A savoir :

- la température,
- l'humidité absolue x ,
- l'humidité relative φ ,
- l'enthalpie h représentant l'état énergétique du mélange.

4. MODE DE CONSERVATION

4.1. Séchage

En séchage de produits agricoles en couches épaisses (2 à 4 m), différents principes doivent être compris avec précision afin de permettre une conduite efficace de l'installation.

4.1.1. Existence d'un front de séchage

Lors d'essais de séchage, on constate que le produit ne sèche pas uniformément sur la hauteur du séchoir. Après un certain temps de séchage, on distingue dans le séchoir, trois zones (figure 19.4) : une zone où le produit est sec, en dessous, une zone où le produit est humide, au-dessus, une zone de transition où le produit sèche, c'est le front de séchage.

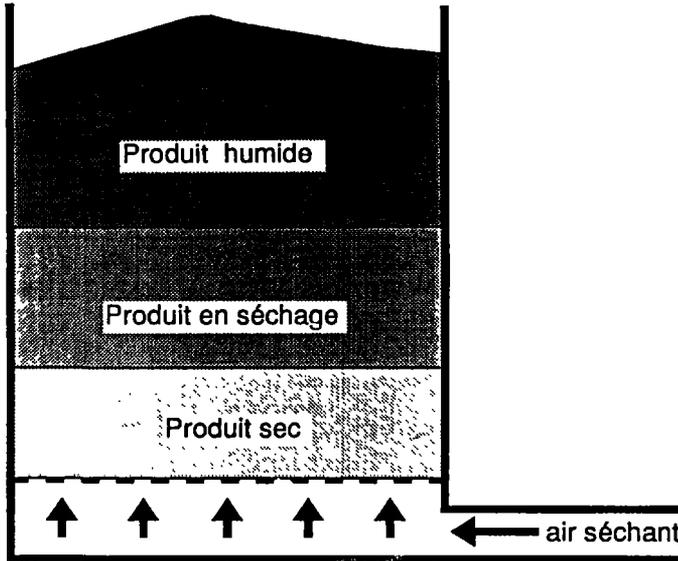


Figure 19.4. Front de séchage dans un silo subissant une ventilation d'air séchant.

4.1.2. Vitesse de déplacement du front de séchage

Cette vitesse de déplacement est fonction des caractéristiques d'un séchage, à savoir :

- Pour l'air :
 - température "t" en °C
 - humidité relative "φ"
 - vitesse frontale "v" en m/sec, telle que :

$$v = \frac{Q}{\omega}$$

où : Q est le débit d'air en m^3/sec ,
 ω est la section de passage en m^2 .

- Pour le produit :
 - l'humidité du produit avant séchage ; en fait, on fera intervenir la différence entre l'humidité avant et après séchage. Expérimentalement, il a été établi que la vitesse de déplacement du front de séchage V en cm/heure répond à l'équation empirique suivante :

$$V = 6,8t^{0,4}\varphi^{-0,8}\Delta H^{-0,45}v$$

où : V est la vitesse de déplacement du front de séchage en cm/h,
 t est la température de l'air séchant en °C,
 φ est l'humidité relative de l'air séchant,
 ΔH est la différence entre l'humidité du produit avant et après séchage exprimé en % sur poids sec,
 v est la vitesse frontale de l'air en m/sec.

En pratique, les caractéristiques de l'air séchant au cours d'un séchage ne restent pas constantes, l'introduction de la valeur moyenne des caractéristiques de l'air donne une approximation suffisante de la vitesse de déplacement.

4.1.3. Trajectoire du point figuratif de l'air séchant dans le diagramme (h, x)

Soit un séchage qui se passe dans les conditions suivantes :

- air séchant à $t = 25^\circ\text{C}$ et $\varphi = 0,50$
- air en équilibre avec le produit à sécher $t = 25^\circ\text{C}$ et $\varphi_{\text{équi}} = 0,95$

• **Trajectoire rectiligne (fausse).** Si l'on effectue des mesures en début de séchage sur une telle cellule, on constate que :

- l'air sort du produit à $t_1 = 25^\circ\text{C}$ et $\varphi_1 = 0,95$
- à l'entrée, on a $t_2 = 25^\circ\text{C}$ et $\varphi_2 = 0,50$

On serait tenté de considérer que l'air traverse le diagramme (h, x) en ligne droite. D'où lors du calcul d'un bilan on prendrait les caractéristiques de x_1 et x_2 telle que :

$$\begin{aligned}x_1 &= 0,010 \text{ 2 kg eau/kg air sec} \\x_2 &= 0,018 \text{ 8 kg eau/kg air sec}\end{aligned}$$

Ce bilan serait fortement faussé.

• **Trajectoire à enthalpie constante (bonne).** En fait, la théorie et la pratique montrent que le séchage se fait à enthalpie constante. En effet, l'eau du produit a besoin d'énergie pour se transformer en vapeur. L'énergie d'évaporation est puisée dans l'air séchant et, comme l'air part avec l'eau évaporée, son enthalpie ne change pas.

Lors de la ventilation d'air dans une cellule de stockage deux phénomènes vont en fait se produire :

- un **front de température** qui va modifier la température du produit sans en modifier l'humidité. Dans cette transformation, la température du produit va tendre vers la température humide de l'air séchant ou encore vers la même enthalpie que celle de l'air séchant. Ce front se déplace rapidement à des vitesses de l'ordre de plusieurs dizaines de centimètres à l'heure ;
- un **front de séchage** qui va modifier l'humidité du produit suivant cette isotherme humide ou encore suivant la même enthalpie que l'air entrant. Ce front se déplace lentement à des vitesses de l'ordre d'un centimètre à l'heure.

4.1.4. Bilan d'humidité

Le calcul du temps de séchage se fait par un bilan d'humidité qui s'écrit :

$$g_S(x_1 - x_2)3600H_S = P(h_{PS1} - h_{PS2})$$

avec : P = kg de produit sec à traiter,

h_{PS1} et h_{PS2} = humidité du produit avant et après séchage en humidité sur poids sec,

g_S = débit d'air séchant en kg d'air sec/seconde,

x_1 et x_2 = humidité absolue de l'air séchant à l'entrée et à la sortie du séchoir,

H_S = nombre d'heures de ventilation.

Le nombre d'heures de ventilation pour sécher le produit est donné par :

$$H_S = \frac{P(h_{PS1} - h_{PS2})}{g(x_1 - x_2)3\ 600} \text{ en heures}$$

4.1.5. Règles à retenir

- Dans le cas de séchage en couches épaisses, les caractéristiques de l'air dans les trois zones de séchage après sortie du front de température sont :
 - dans la zone de produit humide la température est nettement inférieure à la température de l'air séchant (3 à 4 °C au moins), c'est celle du point "n" ;
 - dans la zone en séchage, la température évolue entre t_n et celle du produit sec ;
 - dans la zone de produit sec, la température est égale à la température de l'air séchant.
- Le front de séchage se déplace à une vitesse de l'ordre de 1 cm/heure, pour une vitesse d'air de 10 cm/seconde.
- Sa hauteur est de l'ordre du mètre.
- Pour établir un bilan d'un séchoir, il faut prendre comme caractéristiques de l'air sortant celles du point "n" (et non celles du point "l").
- Enfin, vu l'existence d'un front de séchage, l'air à souffler dans un produit doit être fonction des caractéristiques du produit que l'on désire obtenir. Ainsi, en se référant aux courbes d'équilibres air-produit, si l'on désire obtenir du froment à 15 % d'humidité sur poids humide, rien ne sert de souffler de l'air plus sec que 0,65. En effet, on sèche trop fort la partie inférieure. Il a été montré que le front ne se déplace pas sensiblement plus vite.

4.2. Ventilation

Dans beaucoup de cas, on se contente de ventiler la céréale. c'est-à-dire de lui faire parcourir uniquement la trajectoire du front de température dans le diagramme h, x . Pour calculer le temps de ventilation, on procède comme pour le séchage mais en écrivant un bilan énergétique :

$$g_v(h_1 - h_2)3\ 600H_v = P(c_{p1} - c_{p2})$$

avec : P = kg de produit à traiter,

c_{p1} et c_{p2} = chaleur spécifique du produit avant ventilation (état 1) et en équilibre avec le point n ,

g_v = débit d'air de ventilation en kg d'air sec/seconde,

h_1 et h_2 = enthalpie de l'air à l'entrée et à la sortie du séchoir.

Dans ce calcul, l'hypothèse suivante est admise : l'air sortant d'état t_2 et h_2 est en équilibre avec le produit avant ventilation (ce qui est correct tant que le front de température ne sort pas du produit).

Notons qu'il est impératif d'arrêter la ventilation quand l'air sortant atteint les caractéristiques du point "n" sinon on risque de réhumidifier le produit à la base.

4.3. La lutte contre les insectes

La lutte contre les ravageurs des stocks, et surtout les insectes, étant indispensable, le choix des moyens se pose en termes d'efficacité du contrôle, de rentabilité, de sélectivité (conservation du pouvoir germinatif des graines traitées), mais aussi de sécurité, pour le responsable du stock d'abord, pour tous les consommateurs futurs de la denrée ensuite.

Les principes de la lutte chimique seront développés plus en détail ; mais nous évoquerons brièvement plusieurs autres méthodes de lutte qui existent pour la conservation des denrées, les unes faisant appel à ce que la technologie a de plus sophistiqué, les autres résultant de traditions ancestrales et culturelles. Aucune de ces méthodes ne devrait être ignorée ou négligée, dans l'esprit d'aboutir au niveau des denrées à un concept de lutte intégrée plutôt qu'à un recours systématique de la lutte chimique.

4.3.1. Lutte physique

Les moyens de lutte physique utilisables font appel aux chocs (contre des tôles "entoileters"), au froid, aux atmosphères inertes, aux lits fluidisés à haute température, aux radiations ionisantes ou aux ondes électro-magnétiques.

4.3.2. Lutte biologique

Peu de travaux ont été menés jusqu'ici dans ce domaine. Pourtant, Longstaff (1981) a dressé la liste de divers hyménoptères parasites de genres économiquement importants contre *Sitophilus*. La tolérance légale particulièrement basse des meuniers quant à la présence d'insectes, ou même des résidus de leur activité, limite cependant l'intérêt de la lutte biologique dans les denrées emmagasinées.

4.3.3. Lutte alternative

D'autres produits que les insecticides de synthèse peuvent être utilisés pour contrôler le développement d'insectes dans les lots de grains entreposés. Les plus connus étant sans conteste les huiles végétales et certains extraits de plantes, dont l'azadirachtine tirée des amandes du "neem" (*Azadirachta indica* A. Juss). L'activité des substances anti-appétantes tirées du neem (de ses feuilles, de ses amandes pilées et macérées dans l'huile, d'extraits divers ou même de l'azadirachtine purifiée) est également efficace (Schmutterer et al., 1982).

Le pouvoir protecteur de l'acide sorbique à l'égard de *S. oryzae* et de *T. confusum* est bien établi, mais le pouvoir germinatif des graines traitées est diminué significativement.

4.3.4. Base de la lutte chimique

La plupart des organismes stockeurs désinfectent leurs grains aussi bien pour limiter au maximum les risques d'attaques et les dégâts, que pour répondre aux exigences légales imposées par les pays importateurs (la plupart de ceux-ci imposant un traitement chimique des grains, certificat à l'appui). Ainsi, à Anvers les grains en transit destinés à l'URSS sont traités au malathion (à 3 g/tonne).

Deux situations sont à envisager :

- les grains stockés sont déjà infestés : il faut appliquer la lutte **curative**,
- la céréale entreposée est saine mais menacée d'une infestation : l'application d'un insecticide ou d'un mélange d'insecticides préviendra efficacement l'infestation (lutte **préventive**).

Deux grands types de matières actives existent : les **fumigants** et les **insecticides de contact**. Leur emploi résulte d'une philosophie de traitement différente selon le cas.

Les fumigants agissant à l'état gazeux et les molécules qui les composent étant simples et petites, ils ont la propriété remarquable de diffuser pratiquement partout. Ils pénètrent dans les masses de grains en vrac ou en sacs, dans les sacs et dans les grains eux-mêmes où ils tuent les larves et les œufs cachées (Multon, 1982). Ce sont les champions de la lutte curative. Si leur effet est immédiat, l'absence de rémanence du traitement expose toutefois le grain aux réinfestations.

Ces fumigants sont très toxiques pour l'homme et les animaux. Les seuls techniquement intéressants actuellement sont le bromure de méthyle et le phosphore d'aluminium. Ils ne peuvent être manipulés et utilisés que par un personnel spécialisé.

Les produits insecticides de contact disponibles aujourd'hui sont nombreux, mais peuvent être groupés en trois catégories. La première catégorie est utilisée essentiellement pour traiter au moment du transport des lots déjà infestés (lutte curative), la seconde pour une lutte préventive limitée, la troisième pour une lutte préventive à long terme mais aussi curative destinée aux stocks permanents (1 à 2 ans, comme par exemple les stocks d'intervention de la CEE). On distingue donc :

– les **produits de choc**, qui grâce à leur faible tension de vapeur, diffusent rapidement et tuent les insectes sur le moment sans être rémanents. Ce sont essentiellement les spécialités commerciales à base de dichlorvos (parfois les pyréthrinés naturelles éventuellement synergisées par le pipéronyl butoxide). Ces produits de choc sont utilisés pour les exportations et même dans le négoce intérieur car ils peuvent représenter un danger en masquant provisoirement un problème d'infestation ;

– les **produits de moyenne durée** assurent une sécurité de 3 mois environ aux stocks (ce qui est souvent suffisant pour le commerce). Les produits à base de malathion ou les mélanges de dichlorvos avec du malathion, du pyrimiphos-méthyl, ou du chlorpyriphos-méthyl, sont potentiellement intéressants, l'effet choc du dichlorvos étant combiné à la persistance d'efficacité d'un autre organo-phosphoré plus stable. En réalité, la sensibilité du malathion à l'humidité limite rapidement ses effets, mais ce mélange aurait également une certaine action sur les acariens des denrées. La bioresméthrine et les pyréthrinés naturelles se décomposant rapidement à l'air et à la lumière, leur rémanence est moyenne (1 à 2 mois pour la bioresméthrine) à très courte (1 à 2 jours pour les pyréthrinés) ce qui limite fortement leur intérêt ;

– les **produits à longue persistance d'action** : le pyrimiphos-méthyl, le chlorpyriphos-méthyl, la deltaméthrine, l'étrimpfos,... Ces insecticides de contact, organo-phosphorés et pyréthrinoïdes, ont en effet une persistance d'action suffisante pour obtenir, après traitement des denrées infestées aux doses indiquées, un certain effet curatif. Cependant, pour que l'effet curatif mentionné se marque, un délai non négligeable est nécessaire étant donné qu'aucun de ces produits repénétrant dans les grains n'affecte les formes cachées. Ils représentent cependant la seule alternative intéressante à l'utilisation des fumigants pour une lutte curative, à condition de pouvoir les appliquer de façon uniforme sur la denrée.

Généralement très stables dans le milieu des denrées entreposées, beaucoup plus persistants que les pyréthrinés naturelles, bien moins toxiques – aux doses d'application utilisées (1 à 2 g/tonne) – pour l'homme et les animaux à sang chaud que d'autres insecticides, les pyréthrinoïdes représentent une alternative très intéres-

sante pour lutter contre les insectes ravageurs des stocks, au moment où se pose le problème de l'apparition de souches d'insectes résistants aux organophosphorés (Champ et Dyte, 1976).

Mais le choix du ou des produit(s) ne dépend pas seulement de la persistance d'action espérée mais aussi du spectre d'action attendu et qui varie fortement d'une spécialité à l'autre. S'y ajoute aujourd'hui le problème des insectes des denrées résistants. L'idéal serait de combiner dans une seule formulation un organo-phosphoré avec un pyréthrianoïde (Schiffers et al., 1989).

5. STRUCTURES DE STOCKAGE

La préservation de la qualité des grains depuis leur récolte jusqu'à la période d'utilisation dépend largement de la maturité physiologique des grains après la récolte, de leur conditionnement et des conditions de stockage et de conservation. Dans ce qui suit nous présenterons les différentes structures de stockage des céréales, qui sont rencontrées à travers le monde, en considérant les techniques traditionnelles et les techniques modernes.

5.1. Techniques traditionnelles

5.1.1. Entrepôts souterrains

La technique de stockage des céréales dans des entrepôts souterrains est encore bien pratiquée dans plusieurs pays d'Afrique dont le Maroc (matmoras). Ce type de stockage présente beaucoup d'avantages mais il est parfois compromis par des pertes importantes qu'il peut occasionner.

Il s'agit d'un local souterrain, sous forme sphérotroconique, creusé généralement à l'entrée de la maison ou à proximité de l'exploitation. Pour le cas du Maroc ce système offre une capacité de stockage de plus de 10 millions de quintaux. Dans certaines régions du pays ce mode de stockage a cédé la place à d'autres techniques, notamment les sellas (silos en roseaux), les fûts et les pièces.

Le creusement se fait manuellement à l'aide d'une pioche, une pelle pour le dégagement du sol, un marteau et des barreaux de fer à pointe. Cette opération se fait généralement en été où le sol et le sous-sol deviennent secs. Le sous-sol doit être bien drainé, de nature marno-calcaire ou gréseuse pour permettre la stabilité de l'entrepôt.

La forme la plus courante est la forme tronconique qui s'élargit au fond. L'entrée, de forme circulaire, est limitée à moins de 60 cm de diamètre afin de faciliter l'obturation. La profondeur varie de 2,5 à 5 m selon la nature du terrain (solide ou meuble, humide ou sec). La capacité dépend de la quantité à stocker et aussi de la nature du terrain. La capacité courante est de 20 à 40 quintaux. Certains entrepôts peuvent atteindre une capacité allant jusqu'à 350 quintaux.

Le grain est conservé dans les matmoras en vrac. Le remplissage se fait par gravité à partir de l'entrée de la matmora. Le revêtement des surfaces internes à utiliser devrait

être sous forme de sacs de plastique (polyéthylène). Ces sacs sont introduits dans l'entrepôt avant remplissage et sont confectionnés manuellement. Les recherches menées au Maroc ont montré que le plastique conserve bien le grain et réduit les pertes en poids sec à près de 1 %, alors que les pertes atteignent 20 % dans le cas d'un revêtement paille. Afin d'éviter l'accumulation de l'eau de pluie à l'entrée d'une matmora, les agriculteurs construisent un cône en terre sur l'entrée pour évacuer l'eau de pluie.

Cette technique de stockage présente plusieurs avantages :

- **Température "basse" et constante.** Dans un entrepôt souterrain le produit se trouve à une température constante voisine de 20 °C, contre 30 °C à l'extérieur (Bartali et al., 1989), cette stabilité thermique permet d'éviter des migrations d'eau qui peuvent rendre la conservation des grains médiocre.
- **Stockage hermétique plus aisé.** Le produit est placé dans une atmosphère désoxygénée, ce qui réduit l'activité biologique par respiration. Ceci constitue un frein pour les agents déprédateurs grâce au taux élevé de gaz carbonique dans l'entrepôt.
- **Maintenance faible et durée de vie élevée.** Les entretiens de la structure sont réduits puisqu'elle n'est pas soumise aux agressions du climat. De tels entrepôts peuvent avoir une durée de vie de quelques dizaines d'années.
- **Utilisation des matériaux locaux.** Dans les structures de stockage souterrain, on fait uniquement appel aux matériaux locaux et au savoir faire local, ce qui permet d'éviter l'importation de technologie, dont le coût est de plus en plus élevé ceci rend cette technique de stockage relativement peu coûteuse.

5.1.2. Silo paysan en roseau

Le "*sella*" est un silo en roseau d'une forme plus ou moins cylindrique fabriqué localement avec des tailles très variables. Elle peut contenir aussi bien des produits céréaliers ou des légumineuses et parfois des olives. La capacité moyenne est de 15 à 20 quintaux. La *sella* est une structure aérée et permet une certaine ventilation naturelle du produit qu'on y entrepose.

La durée de vie de la *sella* varie selon les régions et selon la qualité du roseau avec lequel elle est fabriquée, la moyenne est d'environ 4 ans. Cette durée de vie peut atteindre 7 années si les manipulations sont faites avec soin. Ces soins consistent à éviter l'écrasement pendant le transport à vide ou lors du remplissage, à les recouvrir avec des enduits d'argile, les renforcer avec des fils de fer en cas de grandes charges et éviter les chocs.

Le stockage dans les *sellas* se fait en vrac ; elles sont remplies manuellement en y vidant le contenu des sacs. La durée de stockage dans les *sellas* est en moyenne de 10 mois et peut atteindre 2 années.

Parmi les inconvénients des *sellas* on peut citer :

- les infestations des produits pouvant induire des pertes considérables du fait des rongeurs, des insectes et de l'humidité,
- les problèmes de manutention réduisant en général la durée de vie des *sellas*,
- la *sella* une fois vide occupe toujours le même espace et peut poser plus d'ennuis si la pièce est utilisée pour d'autres activités. Son déplacement risque de provoquer des cassures des tronçons de roseaux.

Pour mener à bien le stockage dans les sellas, il convient de veiller aux améliorations suivantes :

- un enduit externe de bouse de vache et d'argile pour à la fois protéger les roseaux, diminuer les flux de chaleur à travers la paroi et repousser les insectes. On peut également tapisser le volume intérieur de sac de plastique qui protège le grain contre l'humidité,
- pour assurer une isolation au bas de la sella on dispose d'une couche de paille ou de feuilles de plastique,
- utilisation des produits chimiques au fond de la sella tels que le sel gemme, le soufre ou des végétaux.

En définitive, les sellas offrent de bonnes conditions de conservation des céréales avec un coût réduit. Cependant, des améliorations peuvent être apportées. D'une part, il y a l'étanchéité de la sella elle-même qui est à améliorer en utilisant un sac de plastique par exemple. D'autre part, il faut bien entretenir la pièce où la sella est placée, combler les fissures des murs et de la toiture et aussi éloigner les animaux.

5.1.3. Silo en matériaux locaux

Le silo en matériaux locaux est parmi les techniques les plus réussies en matière de stockage des céréales en Chine. C'est une technique simple qui réside dans l'emploi d'un mélange d'argile et de paille des céréales telles que le riz. Cette technique a pu assurer le stockage de plus d'un million de tonnes de céréales réparties dans près de 7 000 unités, de forme cylindrique. Les unités sont construites avec des diamètres allant de 4 à 10 m et des hauteurs de 2 à 8 m en général. Cependant des hauteurs et des diamètres plus grands peuvent être réalisés.

La structure du silo consiste en une cuve circulaire ayant des parois en argile-paille armées par des cordons de pailles disposés en cercles. La cuve est supportée par un pied en maçonnerie dont la hauteur peut permettre une vidange manuelle par pesanteur du produit ensilé. Une adaptation de la technique de construction de ces silos aux situations marocaines a été réalisée. Elle peut servir de modèle pour d'autres contextes géographiques.

Les avantages du silo en matériaux locaux résident dans les points suivants :

- coût réduit du quintal logé,
- matériaux de construction disponibles sur place,
- l'argile mélangée à la paille offre une excellente résistance à la fissuration,
- leur capacité est très élastique (50-150 tonnes),
- ils offrent une protection des grains stockés,
- manutention facilement mécanisable, le remplissage pouvant se faire par une vis élévatrice sans fin ou par un tapis roulant.

En résumé, l'installation d'un silo d'argile armée de paille nécessite des matériaux locaux suivants :

- paille, argile, sable, ciment, bambou,
- feuilles de palmier dattier,
- tapis de jonc et quelques barres d'acier pour le local de vidange.

Avec les différents avantages techniques qu'il offre (bonne isolation thermique, manutention mécanisable et une capacité élastique), le silo d'argile armée de paille s'avère très prometteur pour faire face aux problèmes de post-récolte, surtout au niveau de

l'exploitation où plusieurs charges peuvent être réduites ou même éliminées : emploi de la main-d'œuvre familiale et disponibilité des matériaux de construction sur place.

5.2. Les techniques modernes de stockage

Le stockage moderne des grains s'effectue dans des enceintes appelées "silo" de plus ou moins grandes dimensions où les grains sont stockés en vrac. Ces silos sont équipés d'un matériel très sophistiqué permettant une manutention rapide et un bon contrôle du stock. Les principaux types de matériaux utilisés dans la construction sont le métal et le béton armé. Ces deux matériaux présentent une certaine concurrence vis-à-vis du stockage des céréales. Le choix de l'un ou de l'autre tient compte aussi bien des considérations techniques qu'économiques.

5.2.1. Le stockage vertical en silo

Le métal et le béton armé constituent les principales parois utilisées dans la réalisation des silos. Il est clair que le type de parois influence aussi bien le coût de l'installation que les conditions de conservation à l'intérieur de la cellule. Le choix d'un type de paroi ou de l'autre dépend de plusieurs facteurs techniques et économiques spécifiques.

- **Les silos en béton armé.** Ils sont généralement de très grandes capacités, caractérisés par de fortes hauteurs de l'ordre de 50, 70 m et peuvent même atteindre des hauteurs de 100 m sans difficultés de réalisation (Reimbert, 1982). Ils se prêtent bien à l'utilisation comme silos portuaires du fait de leur bonne résistance à la corrosion. Ces silos peuvent être réalisés en béton armé traditionnel ou préfabriqué.

- **Les silos métalliques.** Selon la forme géométrique des cellules et la nature des parois métalliques, on distingue plusieurs types de silos :

- Les silos cylindriques en tôles ondulées. Ils sont réalisés entièrement en tôles ondulées, généralement galvanisées, et à ondes horizontales. Ces tôles sont cintrées et percées en usine. Elles sont assemblées entre elles et fixées aux montants verticaux par boulonnage. Ces derniers sont en tôles galvanisées profilées en U, et assurent la rigidité des tôles dans le sens vertical. Les montants verticaux équilibrent l'effort de frottement exercé par la matière ensilée sur les parois, et supportent le poids propre du silo (Reimbert, 1982). Il est préférable de placer les montants à l'extérieur de la cellule, car placés à l'intérieur, ils forment des creux avec les ondulations de la tôle qui retiennent les grains lors de la vidange. Les ondulations des tôles assurent une certaine rigidité et permettent, par suite, d'éviter les déformations lors des opérations de montage ou de manutention. Cependant, la stabilité à vide de ces silos doit être vérifiée. La tôle utilisée est en acier de 24 000 bars de limite d'élasticité, ayant une épaisseur qui varie de 75/100 à 35/10 de millimètre et une largeur de l'ordre de 0,9 à 1,15 m. La hauteur du silo peut atteindre 16 à 17 m avec des diamètres compris entre 2,60 et 15 m (Reimbert, 1982).

- Les silos polygonaux en tôles profilées. Ils sont réalisés par des éléments modulaires appelés panneaux, juxtaposés les uns aux autres et assemblés par boulonnage. Ces panneaux ont une largeur qui varie de 2,10 m à 2,50 m et une hauteur qui peut atteindre 16 m (Leloup, 1990). La forme polygonale offre la possibilité de coller plusieurs cellules les unes aux autres, donc de réduire l'emprise au sol, d'avoir des parois communes et par conséquent une réduction des coûts d'investissements.

- Les silos cylindriques en tôles lisses. La cellule cylindrique est construite avec

des viroles en tôles galvanisées, assemblées par boulonnage avec interposition d'un cordon d'étanchéité. La tôle a une épaisseur qui varie de 1 à 2,4 mm, avec des dimensions de 1 m × 1 m ou 1 m × 2 m (Reimbert, 1982). Les panneaux sont faciles à manipuler, lors du montage, du fait de leur faible poids unitaire. La tôle utilisée dans la construction étant lisse, elle n'entraîne aucune résistance lors de la vidange. En plus, les éléments constitutifs du silo sont en acier galvanisé, ce qui confère une bonne protection de l'installation contre la corrosion.

5.2.2. Stockage horizontal en vrac

C'est une technique permettant de stocker des céréales ou des légumineuses tout en adoptant des matériaux simples. Elle est largement utilisée dans l'Ouest de l'Australie. Sa vocation d'absorber de grandes capacités et avec des investissements modestes est très prometteuse pour un stockage de transition. La réalisation d'une telle structure offre plusieurs avantages :

- une construction ne demandant pas une technicité particulière, ce qui permet une installation rapide,
- les matériaux de construction sont toujours disponibles,
- avec sa flexibilité, il suffit de disposer du terrain pour la construction qui permet, en cas de surplus des produits, un stockage adéquat.

La préparation du site vise essentiellement à ce que le silo soit à l'abri de toute infiltration ou inondation par les écoulements qui peuvent avoir lieu.

Le site réservé pour ce genre de structure doit :

- avoir un sol compacté (en gravier),
- disposer d'une couche isolante, de bitume, pour éviter les remontés des eaux,
- être pourvu d'un système de drainage adéquat à l'intérieur du site, avec une pente permettant l'évacuation des eaux qui pénètrent (1/30),
- le pourtour du site doit également être nivelé et drainé.

Pour permettre un stockage adéquat, il est nécessaire d'avoir : un site surélevé de 20 cm du sol, assurant un drainage parfait des eaux de pluies ; une bonne étanchéité aux infiltrations et bien sûr une résistance aux sollicitations des grains en vrac. Le recours à d'autres techniques alternatives reste toujours possible mais doit être justifié sur le plan économique, tout en tenant compte des particularités de l'environnement.

6. PARTICULARITÉS DES CLIMATS CHAUDS

6.1. Les hautes températures

En climat tempéré, il est aisé de refroidir à 10 ou 15 °C un produit par ventilation de nuit par exemple. Ceci est tout à fait impossible en climat chaud, où il est parfois difficile de refroidir en dessous de 30 °C. Or, les courbes de conservation (FAO) montrent que si en climat tempéré une céréale se conserve sans problème à une humidité de 14-15 %, en climat chaud, il faut descendre à moins de 12 %. Or, il est tout aussi difficile de récolter à une humidité de 12 % en climat chaud que de récolter à 14 % en climat tempéré.

6.2. La forte humidité de l'air

A cette température élevée, est parfois associée en climat équatorial une humidité relative de l'air élevée. Celle-ci empêche même le séchage par des techniques classiques. Il faudra dans certaines circonstances utiliser des machines frigorifiques pour abaisser l'humidité absolue de l'air.

En effet, la machine frigorifique, dite aussi pompe à chaleur, peut être utilisée comme suit :

- le passage de l'air sur l'évaporateur de la machine frigorifique permet de refroidir l'air et de condenser de la vapeur d'eau, d'où abaissement de l'humidité absolue,
- le passage sur le condenseur permet le réchauffage, l'enthalpie perdue sur l'évaporateur étant récupérée sur le condenseur.

On retrouve ainsi à la sortie de la machine frigorifique de l'air à une température équivalente à la température ambiante mais à une humidité absolue plus faible due à une humidité relative plus faible. Il devient donc séchant.

Le faible coût énergétique est très intéressant. Il dépend cependant des coûts comparatifs des énergies (électricité et gas-oil).

7. CONCLUSION

Le grain est un être vivant qui doit être surveillé et traité pour garantir une bonne conservation.

L'association des courbes de prises d'humidité d'équilibre, des courbes de conservation et du diagramme de l'air humide permet de conditionner correctement par une ventilation ou un séchage, les produits à stocker.

Les structures de stockage sont nombreuses et diversifiées, allant des techniques traditionnelles (entrepôts souterrains, silo paysan en roseau, autres silos en matériaux locaux) jusqu'aux techniques modernes comme le stockage vertical en silo de béton armé ou en métal (silos cylindriques en tôles ondulées, silos polygonaux en tôles profilées, silos cylindriques en tôles lisses). Il existe aussi le stockage horizontal en vrac permettant de grandes capacités avec des investissements modestes. Le choix d'une technique donnée est souvent lié à des considérations économiques.

Les connaissances actuelles intégrées aux techniques d'acquisition et de traitement de mesures réalisées par microprocesseurs, PC et logiciels, sont des aides à la gestion indispensables pour préserver la qualité des produits récoltés et stockés.

BIBLIOGRAPHIE

- Appert J. (1985), *Le stockage des produits vivriers et semenciers*, Maisonneuve & Larose, Paris, 2 vol. 225 p.
- Bartali E.H. (1989), *Station expérimentale sur le stockage des céréales*, IAV, Rabat.

- Bartali E.H., Safie S., Persoons E. (1989), "Stockage des céréales dans des entrepôts souterrains", *Céréales en régions chaudes : conservation et transformation*, Aupelf-Uref, J. Libbey Eurotext, 27-38.
- Bure J. (1952), *La vie des grains*, compte rendu de la Journée préparatoire d'étude sur le séchage, Association générale des producteurs de blé et autres céréales, Paris, 15-45.
- Champ R.R., Dyte C.E. (1976), "Report of the FAO global survey of pesticide susceptibility of stored grain pests", *FAO Plant productions and protection*, série n°5, Food and Agricultural Organisation of the United Nations, Rome, 2974.
- Eloir P. (1989), *Conservation des céréales : aide à la décision*, mémoire de fin d'études, Université catholique de Louvain, Faculté des sciences agronomiques, Génie rural.
- Fleurat-Lessard F. (1978), *Description et biologie des acariens. Les insectes et acariens des céréales stockées*, AFNOR, Paris, p. 67-82.
- Gilliquet M., Verbrugge J.-C. (1989), "Le stockage enterré : réponse aux problèmes du tiers-monde", *Céréales en régions chaudes : conservation et transformation*, Aupelf-Uref, J. Libbey Eurotext, 39-46.
- Hall D.-W. (1970), *Handling and stockage of food grains in tropical and subtropical areas*, FAO, Rome.
- ITCF (1986), *Le séchage des grains*, ITCF, Paris.
- Joris S. (1990), *Campagne céréalière 1988 chez Interagri : pratique de la ventilation en cellules industrielles*, mémoire de fin d'études, Université catholique de Louvain, Faculté des Sciences agronomiques, Génie rural.
- Leloup S. (1990), "Conception pour stockage vertical, horizontal et en sacs, stockage en cellules étages", in *Compte rendu du Séminaire international de la CIGR* (Commission internationale du génie rural), Bartoli (ed.), 28-30 novembre 1990, 264-282.
- Longstaff B.C. (1981), "Biology of the grain pest species of the genus Sitophilus (Coleoptera Curculionidae) : a critical review", *Prot. Ecol.*, 2 : 83-130.
- Multon J.L. (1982), *Conservation et stockage des grains et graines et produits dérivés*, vol. 1 et 2, Techniques et Documentation, Lavoisier, Paris.
- Nuret (1952), *La ventilation du grain*, compte rendu de la Journée préparatoire d'étude sur le séchage, Association générale des producteurs de blé et autres céréales, Paris, 67-90.
- Persoons E. (1987), *Séchage, calcul d'un cas pratique*, Journée d'études sur la conservation des céréales à la ferme, Société de génie rural, Tihange.
- Persoons E., Amory R. (1990), *Comment conserver des céréales en climat chaud*, Journée d'études : les petits projets agro-industriels adaptés à l'Afrique, Semaine internationale de l'agriculture, Bruxelles.
- Reimbert M.A. (1982), *Silos, théorie et pratique. Calcul, fonctionnement et réalisation*, Eyrolles, Paris.
- Schiffers B., Haubruge E., Gabriel E., Rodriguez-Cobos C; et Ledoine J.M. (1989), Comparaison d'efficacité de cinq insecticides pyréthrinoïdes à l'égard de six insectes ravageurs des denrées entreposées, *Mededeligen van de Faculteit Landbouwwetenschappen Rijkuniversiteit Gent*, 54, 3b, p. 1095-1104.
- Schmutterer N., Ascher K., et Rembold H. (1982), Natural pesticides from the neem tree, Schmutterer N et Eschborn (eds.), Allemagne, p. 297.

Chapitre 20

LES SYSTÈMES DE CULTURE

P. Bergeret, J. Deniaud, G. Ducret, J.-L. Schafer

Projet Bafou, Centre universitaire de Dschang, Cameroun

Sommaire

1. Introduction

2. Le système de culture, produit de la théorie agronomique

- 2.1. Exemple choisi en zone équatoriale : l'étude des systèmes de culture associée de la chefferie de Bafou, Ouest-Cameroun
- 2.2. Exemple choisi en zone tempérée : les grandes cultures du Noyonnais dans le Nord de la France
- 2.3. Concepts et définitions relatifs au système de culture
- 2.4. Intérêt de l'analyse des systèmes de culture

3. Le système de culture, résultat de décisions prises à différents niveaux

- 3.1. Le système de culture fait partie de l'ensemble de l'exploitation agricole
- 3.2. Le système de culture est influencé par les relations entre les exploitations agricoles
- 3.3. Le système de culture est influencé par l'environnement économique
- 3.4. Le système de culture est influencé par la politique agricole

4. Critères d'évaluation des systèmes de culture

- 4.1. Productivité physique
- 4.2. Productivité monétaire
- 4.3. Productivité alimentaire
- 4.4. Maintien de la fertilité
- 4.5. La sécurité alimentaire

5. Démarche générale d'analyse des systèmes de culture

- 5.1. Constitution d'un référentiel régional
- 5.2. Choix d'un échantillon d'exploitations
- 5.3. Description des systèmes de production et des systèmes de culture
- 5.4. Analyse des systèmes de culture
- 5.5. Jugement des systèmes de culture

6. Conclusion

Bibliographie

LES SYSTÈMES DE CULTURE

1. INTRODUCTION

La façon la plus simple et la plus immédiate d'appréhender la notion de "système de culture" est la lecture d'un paysage rural. Si les conditions de milieu sont contrastées, les terroirs s'organisent généralement en fonction du relief. Si les conditions sont plus homogènes, les terroirs s'organisent souvent à partir de points ou de sites remarquables. Les deux exemples suivants illustrent cette observation.

• **Prenons le cas du plateau Bamiléké**, qui offre le classique paysage de collines dominant dans les Hautes-Terres de l'Ouest-Cameroun. On peut y rencontrer, en allant du sommet vers le bas des toposéquences :

– au sommet des collines, des **champs d'arachide** : champs temporaires, ouverts et non ombragés, portant des associations simplifiées à base d'espèces rustiques (arachide, igname amère *Dioscorea dumetorum*, haricot, patate douce, voandzou) ;

– de loin en loin, des micro-parcelles d'**eucalyptus** sur les sommets de collines cuirassés, impropres à tout autre usage ;

– proches des habitations, des **jardins de case** particulièrement soignés, comme partout en Afrique ;

– à mi-pente ou au bas des versants, des **champs vivriers de maïs/tubercules**, à base de maïs, d'aracées (macabo, taro) et de haricot associés à de nombreuses espèces secondaires ; champs enclos, souvent complantés d'arbres et de musacées ;

– au bas des pentes, sur les meilleurs sols colluviaux, des **caféières mixtes**, toujours ombragées, associant arbres d'ombrage, musacées, arabica et espèces vivrières annuelles ;

– des **raphiales** dans tous les fonds de vallées, cédant place par endroits à des **champs maraîchers** de bas-fond, verdoyants en saison sèche : cultures pures (chou, pomme de terre, tomate, poireau, *Solanum nigrum*...) alternant avec des associations vivrières plus classiques à base de maïs/légumineuses/tubercules

– en lisière des raphiales, de minuscules **champs de marigots**, cultivés à contre-saison, de petite surface mais intensifs : monocultures d'espèces réputées délicates ou simples champs vivriers ;

– enfin, à peu près partout mais surtout dans la partie concave des versants, des **haies vives** formées d'arbres et d'arbustes.

On comprend que, dans ce cas, prévaut surtout la qualité des sols.

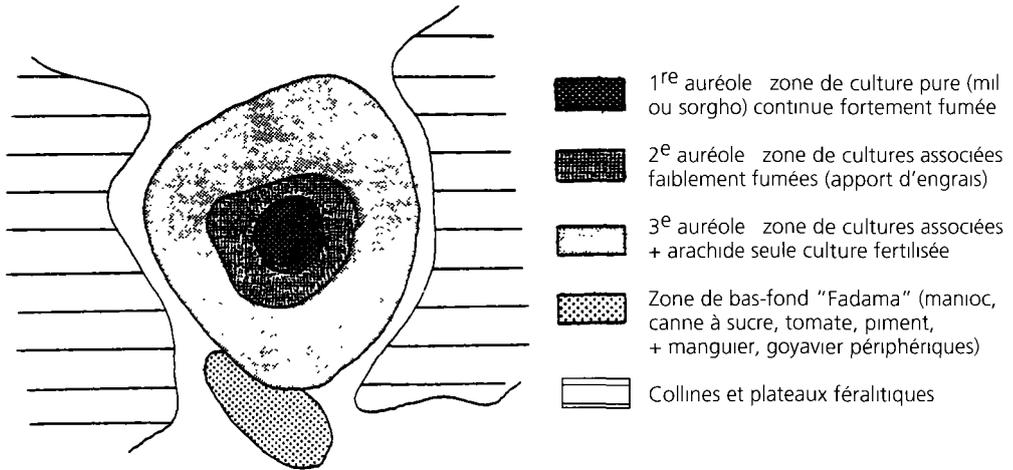


Figure 20.1. Schéma du territoire villageois de Sankomy (Maradi, Sud-Niger).

• **Prenons le cas du village de Maradi dans le Sud du Niger.** Comme cela est fréquent en zone sahélienne, l'espace rural est organisé autour du village, noyau central de toute activité dans un milieu où les conditions naturelles ne sont pas souvent favorables à l'installation humaine. Le village est construit sur un terrain plat, sans relief. Cependant, on peut remarquer un gradient dans la nature des cultures mises en place dans les champs. En allant du village vers l'extérieur, on distingue des auréoles concentriques formées par ces différentes cultures, comme schématisé dans la figure 20.1) :

- dans les champs tout près des habitations, les **champs de case**, on identifie principalement du mil ou du sorgho, toujours cultivés en culture pure. Le peuplement végétal y est en très bon état du fait d'une fumure organique soignée, constituée de déchets ménagers ;
- à la sortie du village, on trouve les **champs de cultures associées** (céréales/haricot/gombo...) dont l'état général du peuplement est déjà un peu moins bon du fait d'une moindre fumure organique compensée cependant par des engrais chimiques ;
- lorsque l'on s'éloigne encore du village apparaissent alors les **champs d'arachide** en association avec d'autres cultures mais où seule la culture d'arachide est fertilisée ;
- enfin, il existe une zone de bas-fond, le **marigot**, dans lequel sont cultivés des plantes plus sensibles à la sécheresse telles que le manioc, la canne à sucre, la tomate et des arbres fruitiers (manguiers, goyaviers).

Dans le cas présent, c'est essentiellement l'éloignement du village qui régit la qualité de la fertilisation et donc le choix (en fonction de leurs exigences) des cultures mises en place.

Ces deux premiers exemples montrent :

- d'une part, que d'une région à une autre on ne cultive pas les mêmes plantes ;
- d'autre part, qu'une lecture ordonnée du paysage au sein d'une même région permet également de mettre en évidence des zones agricoles différentes avec des cultures et des modes de travail différents.

Ceci constitue une première approche du concept de "système de culture".

2. LE SYSTÈME DE CULTURE, PRODUIT DE LA THÉORIE AGRONOMIQUE

L'approche systémique du milieu rural est un concept développé depuis fort longtemps. Dès 1844, de Gasparin avait en effet tenté de définir de façon globale ce qu'est un système de culture : "Le choix que fait l'homme des procédés par lesquels il emploie la nature avec plus ou moins d'intensité en différents sens, est ce que nous appelons système de culture, et l'on voit que cette définition comprend l'ensemble des opérations agricoles qui constituent une exploitation et la nature des moyens physiques et mécaniques que nous mettons en usage soit pour faire croître, soit pour récolter et utiliser les végétaux."

Depuis, ce concept a été repris et amélioré par de nombreuses équipes de recherche. Mais les idées de fond restent les mêmes. Nous avons vu que les paysages agricoles peuvent beaucoup varier simplement du fait de la diversité des plantes cultivées. Il est rare, en effet, qu'un paysan cultive une seule espèce végétale sur ses terres. En général, il en cultive plusieurs et les dispose dans ses champs suivant des règles bien précises. La nature des plantes et la façon dont elles sont cultivées servent de critères pour définir plusieurs systèmes de culture dans une exploitation agricole.

Retenons comme première définition simple d'un système de culture que c'est l'ensemble des espèces cultivées dans une parcelle et des méthodes techniques qui y sont mises en œuvre.

Les deux exemples qui suivent, choisis délibérément très différents, permettent d'illustrer ce concept.

2.1. Exemple choisi en zone équatoriale : l'étude des systèmes de culture associée de la chefferie Bafou, Ouest-Cameroun

2.1.1. Présentation succincte de la région

Bafou est une chefferie traditionnelle située dans la province de l'Ouest-Cameroun (figure 20.2), au sein du pays Bamiléké, vaste complexe de hauts plateaux (1 200 à 2 000 m) dont la richesse des sols – socle cristallin recouvert de coulées basaltiques dans la partie nord – alliée à un climat humide et doux, a provoqué, depuis le XVI^e siècle, une très forte occupation de l'espace qui s'est transformé en un espace agricole bocager très structuré et entièrement humanisé.

Bafou, qui sur 180 km² regroupe 45 000 habitants et 5 000 exploitations agricoles (densité de 252 hab/km²), est, compte tenu de la diversité des modes d'exploitation de son milieu naturel, un assez bon archétype du système agraire bamiléké ; sa richesse de situations et de dynamiques adaptatives en font un bon exemple pour une approche de la notion de système de culture associée.

Le **système agraire** de Bafou est essentiellement *centré autour de la culture du café arabica* introduit dans les années 30, associé à de nombreuses cultures vivrières. L'élevage familial de porcs et de petits ruminants en est une constante et deux éléments de diversification et d'intensification se développent : le maraîchage intensif, souvent irrigué, et l'élevage spécialisé de volailles.

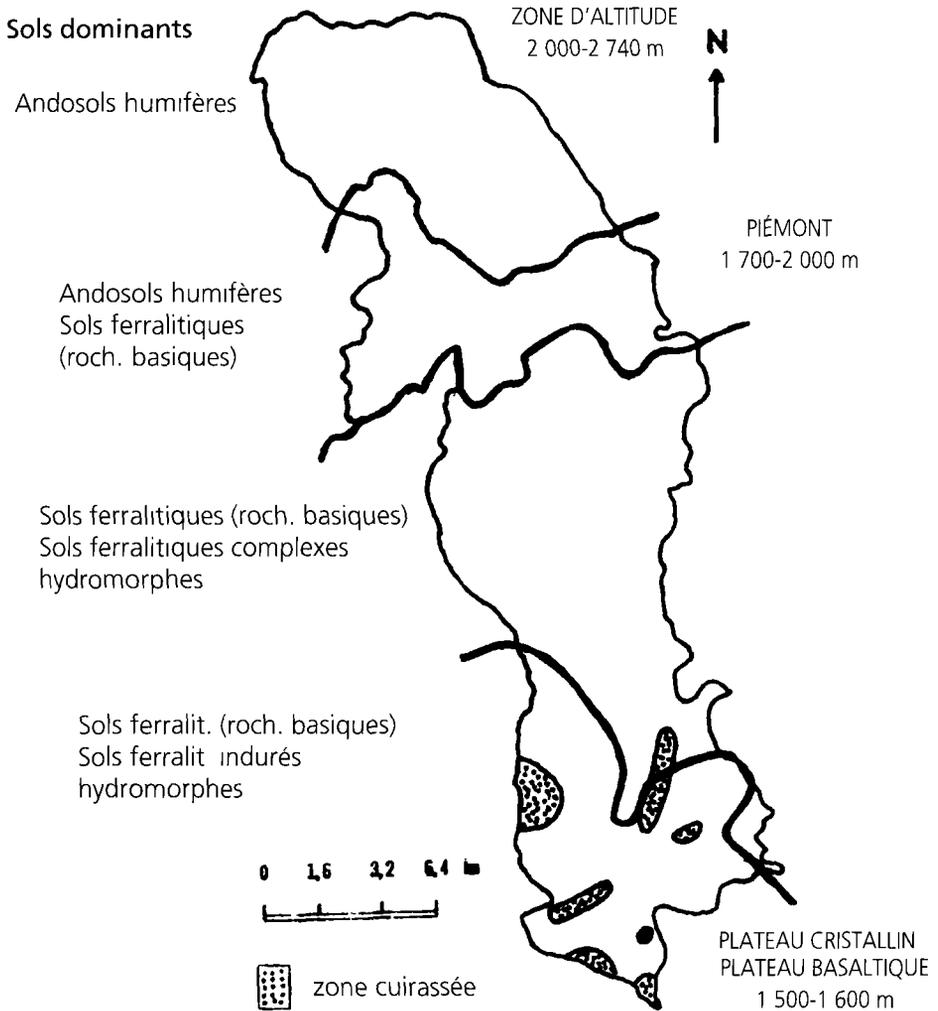


Figure 20.2. Cartes de localisation de la chefferie Bafou avec ses 4 zones agro-écologiques.

Le climat très favorable aux activités agricoles (1 900 mm de pluies, température moyenne de 20 °C) permet deux saisons de culture, la plus importante entre mi-mars et août et la 2^e entre août et novembre. La saison sèche qui s'installe en novembre jusqu'à la mi-mars marque le repos de la végétation.

2.1.2. Les principaux systèmes de culture de Bafou

Le voyageur circulant sur les crêtes est frappé par l'incroyable foisonnement de la végétation, donnant à l'espace un aspect presque forestier, sans véritable structuration apparente. Mais des enquêtes d'exploitations, des **transects**, permettent de déterminer à Bafou 5 grands systèmes de culture.

- *Les systèmes de culture associée qui sont la règle générale*

- **La caféière mixte** est le système de culture le plus complexe, associant sur plusieurs strates des espèces pérennes vivrières (fruitiers, musacées), une espèce pérenne de rente (café arabica) et des espèces vivrières annuelles de différentes tailles (maïs, haricot, aracées, courges, ignames, légumes feuilles). Le café et le maïs sont large-

ment fertilisés. La culture se fait quasiment en continu sans jachère notable, la seule pause étant constituée par l'intersaison (août-mars). Ces caféières se rencontrent au milieu et en bas de pente et près des habitations (jardins de case). Le café est vendu après dépulpage et les produits vivriers sont autoconsommés, les surplus vendus.

– **Le champ vivrier de maïs/tubercules** est le champ vivrier de base qui associe essentiellement des espèces annuelles vivrières où dominant le maïs et les tubercules (macabo, taro, pomme de terre) associés aux haricots, musacées, courges, ignames, choux, légumes feuilles. C'est un champ sans arachide, fertilisé chimiquement, à jachère courte qui, du fait des exigences des espèces présentes, réclame des sols assez fertiles. Il se rencontre un peu partout le long de la toposéquence. Les récoltes sont autoconsommées et les surplus vendus.

– **Le champ vivrier d'arachide**, à la différence du système précédent, comporte toujours de l'arachide en tête de rotation, associé au maïs/haricot, pomme de terre puis aracées, ignames et parfois musacées. C'est un système que l'on rencontre sur des sols dégradés ou peu fertiles car il intègre de nombreuses espèces rustiques et il comporte des jachères assez longues pouvant atteindre 3 ou 4 ans. C'est le système qui comporte le plus grand nombre de variantes quant aux rotations. La destination des récoltes est identique au système précédent.

• *Les systèmes de culture où une seule espèce domine largement par cycle*

– **La raphiale** : est constituée de peuplements purs de petits palmiers (*Raphia humilis* et *Raphia vinifera*), toujours situés dans les talwegs, en bordure des ruisseaux et conduits à la manière d'un peuplement forestier pour l'obtention de vin de raphia et de rachis foliaires (appelés bambous) très utilisés comme matériaux de base pour la confection de meubles, greniers, etc., ou comme bois de feu. Ces produits sont largement vendus et autoconsommés.

– **Les systèmes de culture maraîchers** : sont constitués de plusieurs sous-systèmes selon la fréquence et le degré d'intensification des cultures maraîchères dans la succession culturale, selon la période de culture (en saison des pluies ou en irrigué de contresaison) mais ils sont tous caractérisés par la présence à une période donnée d'un peuplement pur d'une espèce dite maraîchère (pomme de terre, chou, carotte, poireau, tomate) conduit selon les normes européennes et souvent abondamment fertilisé. Les récoltes sont vendues en priorité et autoconsommées minoritairement.

Au sein de chaque grand système de culture défini ci-dessus, il existe des **sous-types** essentiellement déterminés, et par ordre d'importance, par le *type de succession*, par la *durée* et le *rythme de la jachère*, et par la *variabilité dans la fréquence des espèces*. Les **itinéraires techniques** sont peu discriminants au sein d'un même système.

De même, la grande variabilité des situations culturelles et des espèces associées fait que l'on passe graduellement d'un système à l'autre et qu'on peut ainsi trouver un champ pouvant à la fois appartenir à la caféière mixte et au champ de maïs/tubercules ; c'est dire que toute classification est simplificatrice, comporte une part d'arbitraire et qu'il faut trouver un juste milieu entre un découpage trop grossier non représentatif de la réalité et une classification trop fine où l'on se perd dans les détails en masquant l'essentiel.

Il faut souligner le fait que tous les *systèmes vivriers associés sont conduits par les femmes* et que l'homme gère les caféiers, la raphiale et les cultures maraîchères qui sont sources d'importants revenus monétaires.

Le tableau 20.1 présente les principales caractéristiques des systèmes décrits en utilisant les éléments suivants :

- fréquence moyenne des espèces présentes,
- principales rotations,
- itinéraires techniques,
- résultats moyens obtenus.

La figure 20.3 montre, de façon schématique, l'extraordinaire variété des espèces et leur *disposition spatiale judicieuse* qui limite au mieux les phénomènes de compétition, rentabilise l'occupation de l'espace et valorise l'utilisation de la lumière, de l'eau et des éléments nutritifs du sol, dans une caféière mixte ombragée, système le plus complexe.

Afin de compléter cette étude des systèmes de culture de Bafou, nous prendrons un système de culture, *le champ d'arachide* – caractérisé entre autres par une grande diversité des successions culturales – pour décrire plus complètement les rotations qui constituent autant de variantes, de sous-systèmes (figure 20.4).

On peut ainsi décrire au moins 20 types de rotations concernant les cultures du 1^{er} cycle (mi-mars à août) auxquels viennent se rajouter des variantes incluant une culture pure de 2^e cycle (août à novembre) telle que soja, patate douce, pomme de terre, chou, haricot, morelle noire (*Solanum nigrum*).

Les itinéraires techniques varient peu et donc ne discriminent plus d'autres sous-types de ce système de culture où l'on remarque que l'arachide (ou le soja) est toujours en **tête de rotation** car elle n'est pas sensible à la "faim d'azote" très marquée sur ces terres pauvres après enfouissement de la jachère ; parfois la pomme de terre remplace l'arachide en tête car sa récolte laisse un sol meuble.

Le couple maïs/haricot (où seul le maïs est fertilisé) est très présent car c'est le binôme de base de l'agriculture vivrière de Bafou. L'igname rustique y est également très fréquent car il peut encore tirer parti des derniers reliquats laissés dans le sol avant la jachère. Les aracées (macabo + taro) et la patate douce ne sont plantées que sur les meilleurs sols car ces espèces sont exigeantes.

La décision de mise en jachère et de sa durée dépendent de l'évolution de la fertilité du sol au cours de la période de culture (constat des rendements et évolution de la flore adventice) mais parfois aussi de la surface de terre qui est disponible pour l'agricultrice (0,2 à 0,8 ha).

Notons également une pratique commune aux systèmes vivriers sans café qui est l'**écobuage** – combustion de matière végétale à feu couvert – et qui concerne une petite portion d'une parcelle (1/10^e) sur laquelle les récoltes seront importantes.

2.2. Exemple choisi en zone tempérée : les grandes cultures du Noyonnais dans le Nord de la France

Prenons maintenant un exemple totalement différent : celui d'un système de grande culture. Il s'agit de l'agriculture du Noyonnais, dans le Nord de la France, autour de la ville de Noyon. Spécialisée autrefois dans les productions céréalière et laitière, cette région s'est progressivement orientée vers la production de betterave sucrière. Ceci est dû essentiellement à l'ampleur progressivement atteinte par l'orga-

Tableau 20.1. Principales caractéristiques des systèmes de culture de Baïfou (projet Baïfou).

Éléments du système de culture	Systèmes avec cultures associées			Cultures non associées	
	Caféière mixte	Mais/tubercules	Champ d'arachide	Raphiale	Système maraîcher
Les 12 espèces les plus fréquentes (avec leur fréquence quand c'est possible)	Café musacées maïs haricot aracées ignames arbres courges arbuscules p. de terre arachide manioc	maïs aracées haricot p. de terre musacées courges ignames arbuscules arbres arachide café	arachide maïs haricot p. de terre aracées ignames arbuscules musacées courges arbres café manioc	<i>raphia humilis</i> ou <i>raphia vinifera</i>	chou vert pomme de terre carotte poireau chou rouge tomate laitue oignon ail céleri persil
Principales rotations	Culture permanente jachère d'un an tous les 4 à 5 ans sous le couvert permanent	Répétition des mêmes associations > 10 ans sans jachère Avec jachère 1 ou 2 ans au bout de 4-6 ans de culture	Nombreux types de rotations toujours avec jachère (voir texte)	Culture permanente de type forestier pendant des dizaines d'années Régénération naturelle	Sans irrigation Pt-C-M-Pt-C-J-J-I) Pt-C-C-H-M-J-I) Avec irrigation Pt-M-C-M-C-M-C-J-J M-Pt-C-M-Pt-C-M-C-J-J Pt-C-Ca-Pt-M-C-Ca-J-J Pt-Po-C-M-Pt-C-Po-J-J Pt-M-Po-C-Ca-Pt-C-J-J
Itinéraire technique type (ITK)	Taille café en janvier Nettoyage musacées Préparation du sol et billonnage en février Semis et plantation cultures annuelles à partir de mi-mars Fertilisation minérale café et maïs avril-mai (60 30 30 à 150 75 75) Sarclages mai, juin, août, oct Traitements phytosanitaires du café mai-juillet Récolte vigner juin-sept Récolte café oct-déc	Même ITK que pour les cultures vivrières associées de la caféière mixte maïs • Densité maïs plus importante • Fertilisation maïs minérale ou organique • Taille et espacement des billons variables car non déterminés par emplacement du café • Priorité dans les opérations culturales car champ le plus important pour l'alimentation de la famille • 2 ^e cycle possible	Même ITK que pour le champ de maïs/tuber maïs • Densité maïs plus faible • Arachide en tête de rotation et peu associée • Utilisation faible à nulle d'entrants • Eperage des champs sur cuivasse • Dernier ordre de priorité pour les opérations culturales car faible potentiel de récolte • 2 ^e cycle possible	Plante pérenne se reproduisant facilement par graines (semis) • Plantation à partir de petits plants • Récolte du vin en continu sur pied en début de floraison par entaille et récupération de la sève pendant 1 mois • Coupe des palmes et récupération du rachis qui est séché puis vendu ou utilisé	Cultures conduites selon les normes européennes • Cultures pures en lignes à plat ou sur petits billons • Fertilisation minérale constante élevée à très élevée • Fertilisation organique fréquente • Nombreux traitements phytosanitaires Irrigation à la raie ou par aspersion
Performances moyennes	ICM 10,10 CRE 1,90 CDE 3,22 kcal/ha 14,1 x 10 ³ protéines/ha 301 kg	ICM 7,60 CRE 1,65 CDE 2,16 kcal/ha 12,7 x 10 ³ protéines/ha 315 kg	ICM 7,90 CRE 1,51 CDE 2,70 kcal/ha 9,95 x 10 ³ protéines/ha 300 kg	Un pied peut produire de 30 L à 150 L de vin de raphia et environ 40 à 60 "bambous" (rachis foliaire)	Rendements moyens en système intensif (tommes/ha/cycle) chou vert 20-45, p. de terre 11-30, carotte 11-25, poireau 11-30, tomates 10-20, laitues 11-20

ICM* indice de culture mixte, caractérise la complexité de l'association CRE* coefficient de rendement équivalent (LER anglo-saxon), caractérise l'efficacité de l'association = somme des rendements relatifs CDE** coefficient de densité équivalente, caractérise l'intensivité de l'association = somme des densités relatives (* d'après IRR1 1974, ** d'après FORNAGE 1984) Ces résultats ont été obtenus d'une enquête portant sur un échantillon raisonné de 365 parcelles disséminées dans tout Baïfou

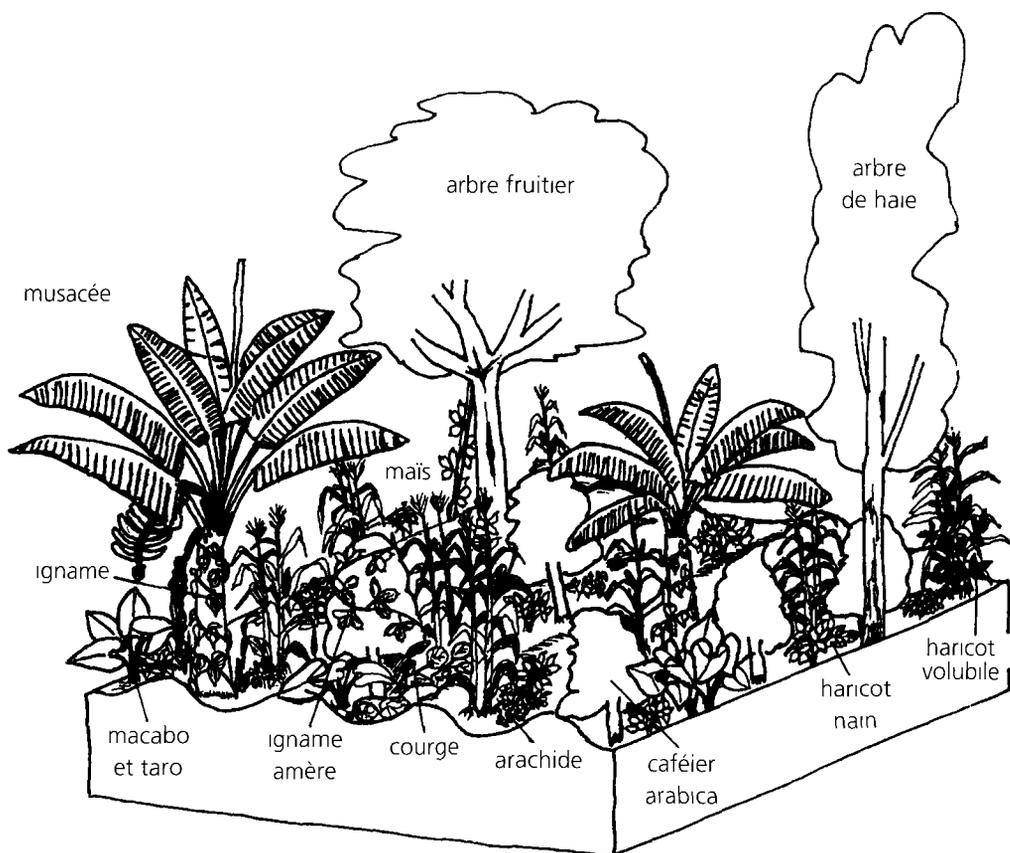


Figure 20.3. Diagramme représentatif du système de culture caféière mixte ombragée.

Source : J-L. Schafer

1. Rotations bisannuelles sans 2 ^e cycle :	A - J
2. Rotations tri- et pluriannuelles sans 2 ^e cycle :	
2 1 Avec seulement maïs haricot (et/ou soja)	A - M+H - J A - A - M+H - J 1 à 3 ans A - A - A - M+H - M+H - J 3 ans A - M+H - M+H - M+H - M+H - J 3 ans A - S - M+H - M+H - M+H - J 3 ans A+H - M+H - J A+M - M+H - J A+S - M+H - J A - M+H - A - J
2 2 Avec maïs, haricot et d'autres espèces	
2 2 1 Aracées (macabo et taro)	A - M+H+Ma+T - J A - M+H+Ma+T - M+H - J
2 2 2 Igname rustique (<i>Dioscorea dumetorum</i>)	A - I - J A - I - M+H - J A - I - M+H - A - J
2 2 3 Patate douce et igname rustique	A - Pd - M+H - I - J A - I - Pd - M+H - J 1 à 3 ans
2 2 4 Pomme de terre	Pt - A - M+H - J 1 à 3 ans
2 2 5 Légumineuses "arachido-mimétiques"	V - M+H - J S - M+H - J
Légende A arachide, H haricot, S soja, V voandzou, M maïs, Ma macabo, T taro, Pd patate douce, Pt pomme de terre, I igname, J jachère	

Figure 20.4. Diversité des successions culturales du système de culture "champ d'arachide".

Source : d'après Kleitz G (1988), *Les systèmes de culture en pays bamiléké (Ouest-Cameroun)*, exemple de la chefferie Bafou, mémoire de fin d'étude, CNEARC/ENSAA/CRIAD/Projet Bafou/CUDS, Montpellier

nisation socio-économique du secteur agricole. Plusieurs coopératives et industries agro-alimentaires (sucrieries, féculeries, conserveries, laiteries, etc.) assurent, en effet, localement l'écoulement des récoltes et induisent en conséquence l'orientation des exploitations agricoles.

Globalement, il existe trois types d'exploitations agricoles :

- celles qui ont conservé une activité de production laitière ;
- celles qui ont couplé production laitière et cultures de vente (principalement la betterave sucrière) ;
- celles qui ont totalement abandonné l'élevage pour se spécialiser dans les cultures de vente : betterave sucrière, blé, pomme de terre...

Nous nous limiterons aux systèmes betteraviers car la majorité des exploitations agricoles ont en effet intégré la betterave sucrière dans les successions de cultures sur plus de 50 % de leur surface agricole utile (SAU).

La culture de la betterave est une culture de vente à forte marge brute. Hormis les exploitations laitières, la betterave sucrière est donc toujours considérée comme la culture prioritaire, celle que l'on soigne le mieux pour obtenir les meilleurs rendements possibles en tonnes/ha et en teneur en sucre dans les racines. Pour cela, on observe une série de pratiques communes à tous les agriculteurs et qui sont liées aux exigences strictes de la betterave vis-à-vis du milieu.

Voyons comment s'articulent le choix des pratiques culturales et les objectifs visés.

• **Le choix du terrain.** La betterave est privilégiée quant à l'affectation du terrain. Elle est cultivée préférentiellement sur les terres argileuses ("terres à betterave"). Les terres blanches, battantes, et les terres sableuses, asséchantes, sont laissées aux autres cultures. Les sols hydromorphes sont réservés aux prairies et à la surface toujours en herbe (STH).

L'idée sous-jacente est qu'il faut limiter les risques d'échec. Or le choix des sols argileux répond à des besoins précis de la culture : comme la betterave est une culture de printemps il est important d'assurer une alimentation hydrique suffisante au cours des périodes sèches et les sols argileux sont les sols aux plus importantes réserves utiles en eau ; de plus, la betterave étant un tubercule, il est important de la cultiver en sol profond sans cailloux pour favoriser le développement racinaire et limiter les contraintes physiques à la récolte.

• **La détermination de la place de la betterave dans la succession des cultures.** Une quinzaine de rotations de cultures différentes ont été identifiées dans cette région (figure 20.5).

Un premier constat est que la betterave vient toujours en tête de rotation, ce qui illustre le fait que les agriculteurs raisonnent effectivement leur système de culture en fonction de la betterave (tout est organisé en fonction de la betterave).

BS - PdT - B
BS - B - PdT - B
BS - B - BS - B - PdT - B
BS - B
BS - B - B ou BS - B - E
BS - B - M - B ou BS - B - E - M - B
M - M
M - B ou M - E
M - B - E ou M - B - B
M - B - C - B ou M - B - E - C - B
M - B - Pt (2-3 ans) - B
B - B - E + cultures de printemps
Pt plusieurs années - B - B
STH
Légende . BS betterave à sucre , B blé , C colza , E escourgeon (orge d'hiver) M mais , PdT pomme de terre , Pt prairie temporaire , STH surface toujours en herbe

Figure 20.5. Rotation des cultures dans le bassin betteravier du Noyonnais.

En second lieu, remarquons également l'association étroite blé/betterave. Il existe en effet une synergie entre ces deux plantes. Comme la betterave est exploitée pour ses racines, le champ doit donc être travaillé en profondeur. De plus, la betterave est sensible aux adventices dès la levée. Le champ doit donc être sarclé fréquemment. Le blé, inversement, est une culture salissante mais son système racinaire n'est pas très développé et exploite surtout les couches superficielles du sol. Il est donc avantageux de coupler les deux cultures afin de faire bénéficier des pratiques culturales soignées de la betterave au blé et de laisser l'horizon du sol exploité par la betterave se reposer grâce à des emblavements successifs. Enfin, il est indispensable de se faire succéder des cultures différentes dans une même parcelle afin de limiter le développement de ravageurs dont la propagation peut être rapide en monoculture.

• **Le raisonnement de la fertilité organique du sol.** Toujours dans le souci d'obtenir les meilleurs rendements possibles, les agriculteurs soignent la fertilisation de la betterave et plus particulièrement la fertilisation organique afin d'alléger le sol pour en faciliter le travail et favoriser le développement des racines de betterave.

Dans les exploitations où subsiste l'élevage, le fumier est réservé prioritairement aux champs de betterave. Dans les autres exploitations, les agriculteurs s'efforcent d'enfouir les résidus de récolte. Quand cela est possible, ils se procurent des engrais organiques tels que des boues d'épuration des eaux urbaines.

• **L'organisation de l'entretien des champs.** Dans la plupart des cas, pour les autres étapes de l'itinéraire technique (hersage, semis, fertilisation minérale, sarclage, récolte), les agriculteurs les répètent chaque année de la même façon parce qu'elles sont le reflet d'un modèle préconisé par l'encadrement technique. En effet, une autre caractéristique de cette région est la densité des services d'encadrement technique, tels que le GVA (groupement de vulgarisation agricole) créé dans les années 60, qui assure le suivi des agriculteurs. L'agriculture de cette région, de ce fait, est devenue très rapidement une agriculture simplifiée : quelques cultures menées dans toutes les exploitations et une homogénéité dans la conduite de ces cultures.

Cependant, on observe tout de même des variations quant au travail du sol, aux niveaux de fertilisation et à l'intensité des traitements phytosanitaires.

• **Les variations de pratiques culturales.** Les variations que l'on peut observer sont l'expression d'un environnement socio-économique variable pour chaque exploitation agricole. En effet, au delà des optima techniques à réaliser pour atteindre les meilleurs rendements, les agriculteurs doivent faire face à des contraintes propres au système de production qu'ils ont choisi et à plus large échelle à des contraintes d'ordre politico-économique du système agraire dans lequel ils vivent.

Ainsi, dans un système associant agriculture et élevage, la fertilisation organique pourra être plus facilement assurée tandis que dans un système de productions végétales strictes, elle se raisonnera surtout en terme de coût de revient. Ainsi, les différents travaux du sol se raisonneront également en fonction des outils disponibles (sous-soleuse, herse articulée,...), de la main d'œuvre disponible et surtout de la nature du sol cultivé. Ainsi, la betterave pourra se rencontrer aussi sur de mauvais sols soit parce qu'il n'y a pas de bons sols sur l'exploitation, soit parce que l'agriculteur dirige ses efforts sur une autre spéculation.

Enfin, les quotas imposés en France pour limiter la surproduction de sucre ont engendré différents niveaux d'intensification de la culture de la betterave. Les quotas

sont calculés en fonction de la SAU. Certains agriculteurs ont donc choisi de garder les mêmes superficies en betterave mais de limiter les rendements. D'autres ont choisi d'intensifier encore la culture de la betterave mais sur des surfaces limitées, ce qui leur a permis de se tourner vers d'autres spéculations.

2.3. Concepts et définitions relatifs au système de culture

Les deux exemples des paragraphes précédents, qui illustrent les pratiques agricoles en zone équatoriale et en milieu tempéré, ont été choisis pour tenter de faire ressortir les principales règles qui déterminent le fonctionnement d'un système de culture. Jouve (1993a) donne d'autres exemples d'illustration de ce concept, qui sont tirés de l'agriculture au Sahel et en zone méditerranéenne.

2.3.1. Quelques définitions utiles

- **Système agraire** : "C'est l'ensemble des relations qui existent entre un territoire agricole et les hommes qui le mettent en valeur" (IRAT/DSA, 1982). "[...] Il se caractérise entre autres par le paysage rural, la politique menée, les moyens mis en œuvre et les résultats obtenus" (Sebillotte, 1990a).
- **Système de production** : "Ensemble structuré de moyens de production (force de travail, terre, équipement,...) combinés entre eux pour assurer une production végétale et/ou animale en vue de satisfaire les objectifs d'un agriculteur (ou d'un groupe d'agriculteurs). Les éléments qui constituent ce système sont : le paysan et sa famille, les moyens de production, les techniques employées, les productions elles-mêmes (leur nature et leur niveau)" (Jouve, 1986).
- **Système de culture** : Précisons tout d'abord que cette expression reste au singulier, on parle de système de culture et non de systèmes de cultures. Ce concept inclut la nature des plantes cultivées mais ne se limite pas à cela. Il ne vise pas non plus l'écosystème formé par un ensemble de parcelles cultivées de façon identique mais vise expressément la manière dont on cultive ces parcelles.

Un système de culture est donc l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique. Sebillotte (1990b) montre l'intérêt de ce concept en tant qu'outil opératoire pour les agronomes. Chaque système de culture se définit par : la nature des espèces végétales cultivées, leur ordre de succession, l'itinéraire technique appliqué à chacune de ces cultures, les résultats obtenus d'un point de vue productivité, rentabilité et reproductibilité.

- **Terroir** : C'est une zone du paysage qui se définit surtout par sa position par rapport au relief, par le micro-climat qui y règne et par les qualités agronomiques de son terrain (fertilité, hydromorphie, pierrosité,...).

Ces différents niveaux d'organisation en termes d'échelle d'étude, d'espace concerné et de système analysé sont schématisés dans la figure 20.6. Au niveau de la parcelle cultivée, il est aussi approprié de définir les termes suivants.

- **Monoculture/polyculture** : La monoculture consiste en la mise en place d'une seule culture sur toute la surface d'une exploitation agricole. Cela traduit la forte spécialisation du système de production. Dès qu'il existe 2 ou plus de 2 cultures, on parle de polyculture.

Échelle en ha	Espace concerné	Système analysé
1 000 000	Grande région	Système agraire
100 000	Petite région, "pays"	Système agraire
10 000		Système de production
1 000	Commune, village, finage, quartier, canton, communauté, terroirs	Système de production Système de culture
100	Exploitation agricole, concession, plantation	Système de production Système de culture
10	Champ, parcelle, peuplement végétal	Système de culture Analyse agronomique
0	Plante	Physiologie végétale

Figure 20.6. Organisation des différents niveaux d'analyse en milieu rural

• **Culture pure/culture associée** (à ne pas confondre avec la monoculture) : Pratiquer la culture pure consiste à ne cultiver qu'une seule espèce végétale par parcelle. Dès qu'il y a plusieurs espèces végétales sur une même parcelle, on parle de "culture associée" au singulier. "Cultures associées" au pluriel désigne les plantes qui sont cultivées ensemble dans la même parcelle.

Ainsi, en monoculture, il s'agit obligatoirement de culture pure (puisque'il n'y a qu'une seule espèce végétale en jeu), tandis qu'en polyculture on peut avoir des parcelles de culture pure et/ou des parcelles de culture associée.

Il existe différentes façons d'associer des cultures :

- **culture dérobée**, c'est une culture de cycle court mise en place entre deux cycles de cultures plus importantes dans la succession des cultures. Elle peut être mise en place avant que la première culture ne soit récoltée ;
- **culture intercalaire**, c'est une culture mise en place entre les rangs d'une autre culture. On observe souvent cela parmi les cultures pérennes.

• **Culture continue** : Cette pratique consiste à cultiver la même espèce sur la même parcelle pendant plusieurs années. Le cas extrême de la culture continue est la monoculture.

• **Grande culture** : On parle de système de production à grande culture lorsque plus de 50 % de la SAU sont occupés par une seule culture. En général, sous ce terme, sont regroupées des cultures telles que les céréales, les cultures fourragères (légumineuses, graminées), le colza et les plantes sarclées (pomme de terre, betterave, etc.).

• **Jachère** : C'est la mise au repos complet pendant une ou plusieurs années d'une parcelle habituellement cultivée. Dans certaines régions comme en Afrique du Nord, la jachère peut ne durer que quelques mois et faire l'objet d'un travail du sol, comme moyen de contrôle des mauvaises herbes, de stockage de l'eau et de lutte contre le parasitisme. Sebillotte (1985) fait une analyse approfondie des pratiques de la jachère et propose des éléments pour une théorie cohérente. Jouve (1993b) fait le point sur les usages et fonctions de la jachère dans les systèmes de production d'Afrique tropicale et du Maghreb.

• **Assolement** : C'est le résultat de la pratique (ou la pratique elle-même) qui consiste à diviser la SAU d'une exploitation en autant de parcelles qu'il y a de cultures à mettre en place.

• **Sole** : Une sole est l'ensemble des parcelles d'une exploitation portant le même type de cultures.

• **Succession de cultures** : C'est une pratique qui consiste à changer chaque année (ou toutes les n années) l'espèce cultivée dans une parcelle. Si la même culture revient de manière cyclique sur la même parcelle (toutes les n années), on parle de **rotation de cultures**. Le choix des cultures dans une succession sur une même parcelle est raisonnée en fonction de plusieurs facteurs qui sont :

- l'horizon du sol exploité par le système racinaire de chaque culture ;
- les besoins nutritionnels respectifs de chaque culture ;
- la sensibilité de chaque culture aux parasites ;
- le travail du sol nécessaire à la mise en place de chaque culture ;
- la date de semis et de récolte de chaque culture ;
- l'insertion de périodes de jachère dans la succession.

• **Tête de rotation** : C'est la première culture mise en place au cours d'une rotation de cultures sur une même parcelle. En général, il s'agit de la culture la plus exigeante (céréale, maïs, igname,...) ou de la culture prioritaire (betterave sucrière, pomme de terre,...) dans le choix des spéculations du système de production. Inversement, en fin de rotation, on choisit de mettre en place la culture la moins exigeante (manioc, patate douce,...).

Une rotation de cultures se raisonne, comme nous l'avons vu plus haut, en fonction des caractéristiques de chaque culture mais également en fonction des interactions qui existent entre ces cultures. Sebillotte (1974, 1978, 1980, 1986) définit les concepts opératoires suivants :

- **effet précédent**, pour une parcelle, c'est la variation d'état du milieu (caractéristiques biologiques, chimiques et physiques) entre le début et la fin de la culture considérée, sous l'influence combinée du peuplement végétal et des techniques qui lui sont appliquées, l'ensemble étant soumis aux influences climatiques. Ces variations du milieu agissent ensuite sur la culture nouvellement mise en place ;
- **effet cumulatif**, c'est la résultante sur plusieurs années des effets précédents ;
- **sensibilité du suivant**, elle se définit par l'ampleur des réactions de la culture présente (le suivant) à la diversité des états du milieu créés par la culture précédente, sous un climat donné et compte tenu des techniques culturales utilisées sur la culture présente.

• **Itinéraire technique** : Ce concept englobe deux notions : celle de techniques agricoles et celle d'itinéraire, donc d'une succession ordonnée de ces techniques.

“Un itinéraire technique est la combinaison logique et ordonnée de techniques qui permettent de contrôler le milieu et d'en tirer une production. C'est la suite chronologique de l'ensemble des actes techniques appliqués à un peuplement végétal. Chaque acte est en partie déterminé par les actes précédents et par la projection que fait l'agriculteur des actes qui suivront” (Sebillotte, 1978).

L'itinéraire technique définit donc la nature de toutes les opérations techniques appliquées à la parcelle :

- travail du sol : labour, sous-solage, hersage, billonnage ;
- semis : choix des variétés, disposition spatiale ;
- traitements phytosanitaires ;
- sarclage, binage, démariage ;
- fertilisation organique et minérale : choix des engrais et des fumures utilisés, modes d'application ;
- modalité de récolte.

Il définit aussi le calendrier de ces opérations et leur niveau d'application (profondeur de labour, densité de semis, doses d'engrais, ...).

L'amélioration d'un système de culture passe dans la plupart des cas par l'étude et la modification des étapes de l'itinéraire technique, colonne vertébrale de la production.

2.3.2. Exemple d'assolement à rotation décennale

D'une année sur l'autre, une rotation peut rester apparemment la même. Par exemple, la rotation fait s'enchaîner 6 années de luzerne à 4 années de céréales et cultures sarclées. Le principe de base, ici, est d'entretenir le niveau d'azote du sol grâce à l'alternance entre cultures consommatrices d'azote (céréales) et cultures enrichissant le sol en azote (légumineuses).

Cet assolement, adopté au xx^e siècle en Europe, a permis de diminuer considérablement les surfaces en jachère tout en augmentant les productions (Lizet et de Ravnigan, 1987).

2.3.3. Exemple d'évaluation de rotations de cultures

En guise de synthèse, considérons les résultats obtenus par l'Institut de recherche d'agronomie tropicale (IRAT) à l'issue de plusieurs années d'essais (tableau 20.2) Cet organisme a pu établir une grille de notation de différentes cultures tropicales en fonction de leurs qualités en tant que précédent ou suivant.

Cette grille permet de choisir une succession de cultures. Nous ne citerons qu'un exemple de rotation proposée. En zone à 600-800 mm de pluie en 100-125 jours, l'IRAT recommande deux successions :

ou
mil/arachide/mil/arachide
mil/mil ou sorgho/arachide ou niébé.

Il s'agit en fait d'une alternance de céréales et de légumineuses pour entretenir la fertilité du sol.

Tableau 20.2. Valeur de précédent et de suivant de différentes variétés tropicales.

Suivant	Précédents									
	Arachide	Coton	Mil	Mais	Sorgho	Riz	Haricot niébé	Igname	Jachère (3 ans)	Jachère (> 4 ans)
Arachide	1-2	3-4	4	4	3-4	2-3	2-3	2-3	2-3	2-4
Coton	3	2-3	3	4	2-3	3	3	3	3	2
Mil	3	4	2-3	3	2-3	3	3	2-3	2-3	1-3
Mais	3	4	2	2-4	0-2	2-3	3	1-3	1-3	1-2
Sorgho	4	4	2-3	2-3	0-2	1-2	3-4	3	3	2-3
Riz	3	4	2-3	1-2	1	1-2	4	2	2	1-2
Haricot	2	3	4	3	3	2-3	0-1	2-3	2-3	2-3
Igname	1-2	2	2	2	2-3	2-3	1-2	0-2	2-3	4

Légende 0 = précédent à éviter, 1 = mauvais précédent ; 2 = précédent médiocre mais acceptable, 3 = bon précédent ; 4 = très bon précédent

2.4. Intérêt de l'analyse des systèmes de culture

L'analyse des systèmes de culture a pour but de porter un diagnostic et de proposer des améliorations réalistes.

L'analyse-diagnostic des systèmes de culture (et d'ailleurs des systèmes de production) est rendue difficile par le caractère contingent des pratiques des agriculteurs. Si les systèmes de culture des pays du Nord sont relativement bien connus (et tendent d'ailleurs à s'homogénéiser), on manque sérieusement de données sur les agricultures des pays en développement, caractérisées par une extrême diversité des techniques utilisées, et par des logiques parfois difficiles à saisir.

D'autre part, des techniques apparemment semblables peuvent avoir des finalités différentes. La jachère, par exemple, peut être un temps de repos obligatoire pour reconstituer le stock d'éléments minéraux assimilables (cas des zones forestières équatoriales), mais peut être ailleurs une façon de lutter contre l'enherbement ou de limiter la prolifération de certains ravageurs des cultures.

L'agriculture est donc un art de localité. Chaque région demande une étude particulière, les résultats acquis dans une zone n'étant généralement pas transposables ailleurs.

Dans les pays en développement, l'analyse des systèmes de culture devrait être un préalable à toute opération de développement rural. Cette étape est souvent négligée ; la méconnaissance des systèmes de culture (et d'ailleurs aussi des systèmes de production), fort différents, dans leur logique, de l'option productiviste privilégiée par les experts de formation occidentale, est à la source de certains déboires.

• **Exemple n°1 : Production par hectare ou production par planteur** (Weber J., 1978) ? Dans les années 70, en vue de l'élaboration d'un projet de développement dans la zone cacaoyère du Cameroun, une société d'étude entreprit des observations en milieu villageois et mit en évidence une production moyenne de 350 kg/ha de cacao. L'objectif principal fut alors de doubler la production.

Or la cinquième année du projet, les résultats obtenus, calculés en divisant la production commercialisée par la surface plantée, ne dépassait pas 450 kg/ha, au lieu des 700 kg/ha attendus. Le projet fut alors jugé sur ce résultat, abandonné et remplacé par une nouvelle opération.

En fait, tout provenait des méthodes utilisées pour évaluer la production, qui s'éloignait par trop des pratiques réelles des planteurs. Le chiffre de 300 kg/ha avait été obtenu à partir de **carrés de densité** mis en place et récoltés par des observateurs. Se contenter de cette méthode suppose une hypothèse implicite : la récolte est effectuée dans sa totalité, ce qui renvoie au schéma selon lequel le producteur recherche une maximisation de son revenu par optimisation de ses moyens de production, et qu'il organise ses dépenses en fonction du revenu à attendre de sa plantation. Or, dans cette région du Sud-Cameroun, le raisonnement suivi par le planteur est très exactement inverse : la production n'est récoltée qu'à concurrence de la couverture des besoins monétaires anticipés. On ne récolte donc pas toutes les cabosses... Des enquêtes ultérieures montrèrent qu'on obtient une récolte moyenne de l'ordre de 225 kg/ha dans ces cacaoyères ayant effectivement un rendement naturel de 350 kg/ha.

Le cacaoyer a de plus beaucoup d'autres fonctions que de procurer un revenu monétaire maximal : il est souvent un "marqueur de terre" qui atteste de la propriété du sol (il est alors planté à des densités extrêmement faibles, aberrantes pour l'observateur pressé) ; mais il est surtout une "épargne sur pied" mobilisable en cas de besoins monétaires urgents : on récoltera alors la totalité de la production. En fait, en obtenant 450 kg/ha, le projet doublait bel et bien la production des planteurs et obtenait au moins la récolte totale de la production, résultat considérable.

• **Exemple n° 2 : L'échec des projets de productivité.** Lors de l'ère des "projets de productivité" qui fleurirent dans les États africains au lendemain de l'indépendance, on diffusa sur de larges zones des "paquets technologiques standard" constitués de thèmes techniques indissociables, peu adaptés à la diversité des situations écologiques, économiques et sociales et ignorant largement les logiques des systèmes de cultures dits "traditionnels".

Par exemple, le "paquet" diffusé dans un département du Niger, en zone sahélienne, était le suivant :

- thèmes principaux : utilisation de semences sélectionnées de mil, sorgho, arachide et niébé, traitement fongicide des semences, densités de semis "optimales", fertilisation minérale standard ;
- thèmes secondaires : date des semis, calendrier et nombre des sarco-binages, introduction de la culture attelée. Ces thèmes dépendent du succès des premiers.

Or lorsqu'on étudie les systèmes de culture sahélo-soudaniens, on constate que les thèmes jugés secondaires dans le paquet technique (date de semis et calendrier des sarco-binages) sont en fait essentiels pour ces systèmes car ils concernent l'amélioration de la gestion des eaux pluviales. On notera par ailleurs que leur coût est faible.

Parmi les variétés améliorées, le mil avait été sélectionné davantage pour sa réponse à l'engrais qu'en fonction de sa rusticité et de sa résistance à une sécheresse accidentelle : on a retenu une variété productive plutôt que procurant la sécurité. Par ailleurs, cette variété impose une fertilisation préalable et donc un quatrième thème technique, la densité de semis. En effet, la dose d'engrais n'est connue et n'a été testée qu'en station de recherche et que pour une certaine densité de semis.

La culture pure préconisée en fonction des doses d'engrais calculées en station se heurte à la pratique des cultures associées qui présentent aux yeux des producteurs des avantages déterminants : protection du sol contre l'érosion pluviale en début de saison humide, répartition du risque climatique sur plusieurs cultures résistant différemment (cycles décalés), amélioration du calendrier des sarco-binages (économie de temps), solution à la contrainte "terre" en maximisant l'occupation du sol. Il est également probable que l'association classique mil-niébé ou mil-arachide permet aux graminées de profiter de l'azote fixé par les légumineuses.

D'une manière générale, on remarquera que l'intensification brutale pose des problèmes aux sociétés pratiquant l'extensif comme assurance-sécheresse. Une enquête ultérieure dans la région a montré que seulement 2 % des exploitations pouvaient économiquement envisager d'adopter les 7 thèmes techniques de modernisation des systèmes de culture.

• **Exemple n°3 : "Ne dites pas à l'expert que je suis producteur de vivres, il me croit planteur d'arabica !"** Le principal objectif du PDRPO (Projet de développement rural de la province de l'Ouest-Cameroun, 1984/1990) était l'augmentation de la production de l'arabica. Le projet prévoyait 21 500 tonnes en 1990 mais la production n'a atteint que 10 000 tonnes.

Dans le volet "productivité de l'arabica", deux points clés : la régénération par replantation en variété "Java" et la fertilisation. Or :

- le "Java" a été mis au point en pays Bamoun, sous climat ensoleillé et chaud, en culture pure, bien fertilisé, en sol profond, sans ombrage. Sur le plateau Bamiléké, sous climat frais et moyennement ensoleillé, cultivé à 90 % en association, souvent sur sols superficiels, toujours avec ombrage, il donne de bien piètres résultats. La régénération des caféières avec cette variété n'a donc pas été un succès, et plafonne bien en dessous de la surface prévue ;
- les prévisions de taux de rentabilité des engrais ont été établies sur la base de référence en culture pure : 1 kg de café supplémentaire pour 2 kg d'éléments fertilisants, norme admise en Amérique Centrale. En observant les pratiques réelles, on s'aperçoit que la plus grande partie des engrais est explicitement destinée aux cultures vivrières et maraîchères, contrairement aux prévisions selon lesquelles chaque kilogramme d'engrais distribué serait répandu exclusivement sur le café... ;
- pour le volet "cultures vivrières" du projet, les bases de calcul sont les références obtenues en **station** et en **culture pure**, alors que les vivres sont presque totalement cultivés en association. De plus, le projet a ignoré à tort les systèmes de culture maraîchers d'altitude, particulièrement performants.

Une bonne partie du projet, du moins pour ce qui est du pays Bamiléké, reposait sur une conception de systèmes de culture fictifs, n'ayant que peu de rapport avec la réalité. Il n'est pas étonnant que les résultats n'aient pas été à la hauteur des espérances !...

3. LE SYSTÈME DE CULTURE, RÉSULTAT DE DÉCISIONS PRISES À DIFFÉRENTS NIVEAUX

Jusqu'à présent, nous avons vu que les caractéristiques des systèmes de culture (espèces cultivées, associations, successions, itinéraires techniques) obéissent à un certain nombre de règles imposées par les conditions du milieu naturel (types de

sol, climat, ravageurs) et par les qualités biologiques du matériel végétal utilisé (sensibilités, résistances aux parasites, type d'enracinement, besoins en éléments nutritifs, etc.). Le système de culture est donc mis en place et géré par l'agriculteur qui intègre ces différents facteurs et applique avec plus ou moins d'efficacité les règles générales énoncées ci-dessus.

Pour autant, on constate que les systèmes de culture présentent souvent des particularités que n'expliquent pas entièrement les facteurs purement agronomiques décrits au paragraphe 2 de ce chapitre. Ces particularités découlent du fait que dans la conduite des systèmes de culture, l'agriculteur tient compte de beaucoup d'éléments parfois fort complexes et de natures très diverses. Pour simplifier, on peut dire que l'agriculteur, dans la conduite des systèmes de culture *prend en considération les contraintes et les potentialités de l'ensemble de son exploitation agricole*.

En outre, il faut se souvenir que son exploitation n'est pas isolée mais appartient à une communauté rurale, à un village comportant d'autres exploitations. Et les *relations entre exploitations d'un village ont parfois une influence sur les systèmes de culture*.

Enfin, les agriculteurs écoulent leurs produits sur des marchés (nationaux ou internationaux) et *sont parfois amenés à gérer leur système de culture en fonction des caractéristiques de ces marchés*.

Envisageons ces différents niveaux l'un après l'autre.

3.1. Le système de culture fait partie de l'ensemble de l'exploitation agricole

Au niveau de son exploitation, l'agriculteur cherche à remplir trois grands objectifs qui sont, par ordre de priorité,

- répondre aux besoins de sa famille et, le cas échéant, à ceux du marché ;
- entretenir l'outil de production (maintenir la fertilité des terres, entretenir les bâtiments et les équipements) ;
- si possible, élargir l'outil de production (augmenter les surfaces cultivées, les troupeaux, le niveau d'équipement...).

Pour atteindre ces objectifs, l'agriculteur dispose de ressources qui sont malheureusement limitées. Ces ressources se répartissent en trois groupes : ses terres, sa force de travail et celle de sa famille, et son capital (l'argent dont il dispose, ses stocks, ses animaux, ses bâtiments et ses équipements).

L'agriculteur doit utiliser au mieux ces ressources (appelées **facteurs de production**) et les répartir judicieusement entre différentes activités. Il y a donc concurrence entre les différentes activités pour l'attribution des facteurs de production et il peut se faire que l'agriculteur ne fournisse pas à une ou plusieurs activités autant de facteurs de production qu'il le faudrait s'il voulait en respecter scrupuleusement les règles techniques. C'est tout simplement parce qu'il juge que les facteurs de production sont mieux employés dans une autre activité.

C'est ainsi qu'à Bafou, le semis du maïs (principale culture vivrière) est une période cruciale de l'activité agricole. Plus un maïs est semé tôt, (le plus tôt possible après le début des pluies, aux alentours du 15 mars), et plus il a de chances de donner un bon rendement.

Par ailleurs, le maïs cultivé en association avec le café est réputé moins productif que le maïs semé en dehors de la caféière (concurrence du café). Les agricultrices disposant de peu de force de travail par rapport aux surfaces à semer en maïs préféreront semer *d'abord* le maïs en dehors de la caféière et *après* le maïs associé au café. Ainsi, on peut observer à Bafou des dates de semis du maïs associé au café trop tardives par rapport à l'optimum agronomique. Ce fait est dû à la concurrence entre le maïs de la caféière et le maïs cultivé hors de la caféière pour l'attribution de la force de travail et bien évidemment les agricultrices privilégient la culture la plus productive.

Mais les relations entre les différentes activités d'une même exploitation ne se limitent pas à une concurrence pour l'attribution des facteurs de production. Il y a parfois aussi complémentarité !

C'est ainsi que dans les Landes (Sud-Ouest de la France), le système de culture traditionnel à base de maïs, établi sur des sols très pauvres, devait son existence à la présence sur les exploitations d'un élevage ovin extensif. De très vastes espaces de landes et de parcours étaient pâturés par les moutons (à raison de 10 ha par mouton) dont on utilisait les déjections pour fertiliser le maïs (à raison de 1 are par mouton). Cette concentration de fertilité de l'espace non cultivé vers l'espace cultivé était la principale fonction du troupeau ovin.

Les systèmes de culture cotonniers d'Afrique sahélienne, dans lesquels la préparation des sols se fait grâce à la traction animale, sont un autre exemple d'association entre agriculture et élevage au sein de l'exploitation.

3.2. Le système de culture est influencé par les relations entre les exploitations agricoles

Les relations d'ordre socio-économique entre individus ou exploitations d'une même communauté rurale peuvent avoir une influence sur la nature des systèmes de culture. C'est ainsi qu'à Bafou, l'organisation de la société veut que les terres, et notamment les terres non cultivées (ce qu'on appelle la **réserve foncière**), soient sous le contrôle du chef. Ce dernier a donc le pouvoir de les attribuer à qui lui semble bon (par exemple au plus offrant), même s'il s'agit de terres légalement réservées aux pâturages.

On assiste ainsi, au nord de Bafou, dans une zone de montagne en principe réservée aux pâturages et soumise au contrôle d'une commission préfectorale, à l'apparition d'un système de culture "minier". Profitant de leurs relations privilégiées avec le chef et certaines autorités administratives, quelques notables ont pu mettre en culture de vastes portions de la réserve foncière du nord de Bafou, en principe réservée à l'élevage. Ils y cultivent des produits maraîchers très lucratifs en exploitant la réserve de fertilité naturelle de ces sols volcaniques très riches. Aucune restitution de fertilité n'est apportée à cause de la précarité des conditions de culture, en principe illégales : on n'investit pas sur une terre en "tenure" précaire.

Nous sommes donc ici en présence d'un système de culture dont la reproductibilité n'est pas assurée et qui doit son existence à un type bien précis de relations sociales entre le chef, les notables et l'administration.

Lorsque les systèmes de culture reposent sur l'utilisation d'une ressource rare (cas

des zones rurales densément peuplées), alors, un ensemble de régulations sociales s'établissent, qui visent à répartir cette ressource de manière stable entre les membres de la communauté. Toute altération de ce système de régulation aura donc des conséquences directes sur le système de culture en cause.

C'est ainsi que le système de culture maraîcher que l'on trouve sur le piémont de Bafou repose sur l'irrigation en saison sèche. L'eau d'irrigation étant disponible en quantité limitée, un système de tour d'eau a été mis en place entre les quartiers. Chaque agriculteur est donc autorisé à irriguer ses champs maraîchers à son tour et pendant un temps strictement limité.

Toute infraction au tour d'eau a bien évidemment des conséquences néfastes (déficit hydrique) sur le système de culture de ceux qui en sont victimes et ne manque pas de provoquer d'âpres conflits.

3.3 Le système de culture est influencé par l'environnement économique

De nos jours, les systèmes de culture, même dans les pays pauvres sont de plus en plus orientés vers la vente. Au Cameroun, par exemple, et selon les régions, on estime que 25 à 40 % de la production vivrière est vendue.

Il est donc bien évident que les conditions dans lesquelles les récoltes peuvent être vendues (ce qu'on appelle les conditions du marché), et tout particulièrement les prix payés aux producteurs vont avoir une influence déterminante sur les décisions de production et donc sur la conduite des systèmes de culture.

Par exemple, au Gabon, on cultive de la pomme de terre bien que les conditions pédo-climatiques ne soient absolument pas favorables à cette plante (climat équatorial trop chaud et trop humide, forte pression de ravageurs et de parasites, etc.). Les rendements de cette culture sont donc faibles (de l'ordre de 8-10 t/ha), mais son prix très élevé sur les marchés urbains en font une spéculation rentable.

Ainsi, les contraintes et potentialités du marché influencent directement les systèmes de culture, que ce soit pour le choix des espèces ou des variétés cultivées ou pour les techniques de culture.

A Bafou, le rapport des prix au producteur entre le café et les produits vivriers ou maraîchers évolue de telle manière que la production caféière se trouve de plus en plus délaissée par les planteurs (le prix du café payé au planteur ayant baissé de 47 % en 1990).

Les prix ne sont pas les seuls paramètres du marché qui influencent les systèmes de culture. Par exemple, les exigences de la commercialisation pourront imposer le choix d'un cultivar résistant bien au transport (cas de la banane douce au Cameroun).

De même, on a vu sur l'exemple du Noyonnais que les agriculteurs appliquent des techniques culturales destinées à obtenir des betteraves contenant une teneur en sucre aussi élevée que possible (choix du type de sol, techniques de fertilisation, etc.). Ceci est dû aux exigences de l'industrie sucrière qui paye les betteraves qu'on lui fournit sur la base de leur teneur en sucre.

3.4. Le système de culture est influencé par la politique agricole

Les marchés agricoles ont la particularité d'être un lieu d'intervention privilégié pour l'État, surtout lorsqu'ils concernent des produits stratégiques.

L'État peut donner à certaines cultures ou à certaines pratiques culturelles un caractère obligatoire. Ainsi, au Rwanda, les systèmes de culture à base de café arabica sont l'objet d'une attention particulière de l'État. Ce dernier entend contrôler de près cette production qui constitue la plus importante source de devises pour le pays. Il est interdit d'associer des plantes vivrières au café (comme c'est le cas au Cameroun) et le paillage, source première de matières organiques, est obligatoire. Les pratiques culturelles y sont encadrées de très près par les agents de vulgarisation agricole.

Mais l'État peut intervenir moins directement dans la conduite des systèmes de culture. Par exemple, il peut choisir de subventionner certains intrants comme l'engrais afin d'en encourager l'utilisation. Cette subvention des engrais, en vigueur au Cameroun jusqu'à la fin de l'année 1991, alliée à la mise en place dans l'Ouest du pays d'un système de commercialisation de ces engrais par l'intermédiaire des coopératives agricoles explique au moins en partie le fait que cette région soit une des "championnes" de l'utilisation des engrais en Afrique.

L'État peut aussi subventionner le prix de certains produits agricoles eux-mêmes afin d'en soutenir la production. Par exemple, en Camargue (Sud de la France), le soutien par l'État des prix du riz a eu pour conséquence une régression des systèmes de culture basés sur la vigne au profit des systèmes de culture à base de riz.

Inversement, l'État peut obliger les agriculteurs à limiter certaines de leurs productions pour des raisons de saturation des marchés (cas des quotas sucriers déjà évoqués plus haut, dans l'exemple du Noyonnais).

4. CRITÈRES D'ÉVALUATION DES SYSTÈMES DE CULTURE

Un système de culture se juge à ses résultats (ou ses performances) dont l'appréciation dépend largement de la position de celui qui porte un jugement (producteur, agronome, agent de développement rural...) et de ses objectifs réels.

Par exemple, l'association cultures vivrières/café arabica est un mauvais système du point de vue de l'UCCAO (organisme officiel de collecte et de vente de l'arabica dans l'Ouest-Cameroun), point de vue tout à fait justifié vu la faiblesse des rendements du café dû à la concurrence des espèces vivrières. Mais pour le ménage agricole moyen de l'Ouest-Cameroun, c'est un système qui concilie sécurité alimentaire, rentrée d'argent à une période cruciale (rentrée scolaire), entretien de la caféière à moindre frais, possibilité d'obtention des engrais et de mise en gage pour un emprunt éventuel.

Plusieurs points de vue sont donc possibles (et ils peuvent d'ailleurs donner lieu à des typologies différentes des systèmes de culture) :

- productivité physique ou monétaire : du sol, du travail, du capital, des intrants (systèmes de culture intensifs ou extensifs) ;
- productivité alimentaire ;
- maintien de la fertilité : systèmes de culture viables ou miniers ;
- sécurité alimentaire ou financière : systèmes de culture à haut ou à faible risque ;
- prestige social : comme par exemple le désherbage “esthétique” où l’on supprime jusqu’à la moindre adventice, travail tout à fait superflu et injustifié du point de vue agronomique mais qui permet d’acquérir la considération du village ;
- possibilité de prélèvement par le groupe social dominant : cas fréquent des agricultures “capturées” de certains pays du Sud, où le système de culture est imposé au paysan, certains actes techniques étant parfois pris en charge par l’État (traitements phytosanitaires par exemple).

4.1. Productivité physique

• **Productivité du sol (quantité récoltée par unité de surface).** Ce ratio, appelé communément “rendement”, est souvent pris abusivement comme critère principal de jugement d’un système de culture (car il est relativement facile à mesurer), surtout dans les situation agronomiques où l’on privilégie une logique productiviste.

Ce critère est pertinent en situation de terre rare, lorsque le foncier est le facteur limitant. Il donne une bonne idée de la fertilité actuelle du sol, et permet de comparer entre elles les potentialités de divers milieux.

– Pour les **cultures associées**, le rendement est remplacé par le CRE (coefficient de rendement équivalent) ou le LER (*land equivalent ratio*) des anglophones. Le CRE est la somme des rendements relatifs de chaque composante de l’association.

Notons : R_a = le rendement observé de la culture A dans l’association
 R_a' = le rendement de cette culture pure dans les mêmes conditions (sol, climat, contraintes phytosanitaires)
 idem pour les cultures B, C, D, etc.

Le CRE est défini ainsi :

$$\text{CRE} = \frac{R_a}{R_a'} + \frac{R_b}{R_b'} + \frac{R_c}{R_c'} + \frac{R_d}{R_d'} + \text{etc.}$$

Le CRE mesure l’efficacité de l’association culturale. L’exemple suivant, pris en zone équatoriale, d’une association maïs/haricot/macabo/plantain permet de fixer les idées :

	Rendements en association	Rendements en culture pure
maïs	1 000 kg/ha	2 500 kg/ha
haricot	400 kg/ha	800 kg/ha
macabo	2 500 kg/ha	10 000 kg/ha
plantain	3 000 kg/ha	5 000 kg/ha
d’où	$\text{CRE} = \frac{1\,000}{2\,500} + \frac{400}{800} + \frac{2\,500}{10\,000} + \frac{3\,000}{5\,000} = 1,75 \text{ ou } 175 \%$	

Ici, le CRE supérieur à 1 signifie que l’association a une meilleure productivité qu’une simple juxtaposition de cultures pures (c’est souvent le cas en zone inter-

tropicale). Concrètement, il faudrait 1,75 hectares de cultures pures juxtaposées pour obtenir la même production que sur 1 hectare de culture associée.

- Pour les **cultures arbustives**, le rendement est souvent exprimé en poids de récolte par arbre (rendement par pied).
- Enfin, pour les **cultures annuelles**, il est bon de tenir compte de la durée d'occupation du sol et du nombre de cycles de cultures possibles en un an. Par exemple, le rendement d'une patate douce récoltée en 6 mois ne peut être comparé à celui d'un manioc qui occupera le sol pendant 18 mois.

Le rendement cumulé sur l'ensemble d'une rotation permet de comparer des rotations entre elles. Par exemple, en zone sahélienne, toutes choses égales par ailleurs, la rotation igname/maïs/arachide/sorgho/jachère est généralement meilleure que la rotation arachide/maïs/sorgho/igname/jachère car elle produit globalement plus de récoltes par unité de surface (l'igname est une meilleure tête de rotation que l'arachide, le maïs est un mauvais précédent pour le sorgho, etc.).

• **Productivité du travail (rendement du travail)**. C'est la quantité récoltée par unité de temps de travail (heure, journée, UTH, actif agricole, etc.). Ce critère est privilégié dans les systèmes extensifs (agriculture itinérante sur brûlis par exemple), qui sont en général plus performants de ce point de vue que les systèmes intensifs.

Par exemple, le système des rizières de marigot de la zone forestière équatoriale fournit 500 à 700 kg de riz par hectare, mais pour 25 à 30 journées de travail seulement, soit 17 à 28 kg de riz par journée de travail ; alors que les rizicultures de l'Asie des moussons ne donnent que 2 à 5 kg par journée de travail...

En Afrique, il est fréquent que les agriculteurs s'adaptent à la rareté du facteur travail en donnant la priorité à la productivité du travail : l'augmentation de production se fait par l'accroissement des surfaces cultivées et non par l'augmentation du rendement. *Les systèmes de culture africains sont donc consommateurs d'espace.*

• **Productivité des intrants (quantité de récolte par unité d'intrant)**. On exprime parfois la productivité d'un système de culture en quantité de récolte par rapport à l'intrant le plus rare utilisé :

- **rendement de la semence** = quantité récoltée par rapport à la quantité semée.
- **rendement des engrais** = quantité récoltée par quantité d'engrais épandue.

Dans les systèmes intensifs de cultures irriguées, il est courant d'exprimer la **productivité de l'eau** consommée.

• **Productivité énergétique (quantité d'énergie produite par unité consommée)**. Un autre critère d'évaluation consiste à calculer la productivité énergétique comme par exemple le nombre de calories produites par rapport aux calories consommées sous forme de travail, de carburant et de consommation intermédiaire (engrais, matériel...). Cette manière de voir a montré que les systèmes de culture dits "intensifs" des pays du Nord sont extrêmement voraces en énergie (rendement de 0,08 contre 5 à 10 pour les agricultures des pays du Sud).

4.2. Productivité monétaire

On peut calculer le **produit monétaire brut** ou la **marge brute** par unité de sur-

face, de travail, d'intrants ou de capital, ce qui permet de comparer entre eux des systèmes de cultures fort différents, pourvu que la commercialisation des récoltes soit possible. Ce calcul peut se faire même si une partie de la récolte est autoconsommée en utilisant les prix du marché local.

La **valorisation de la journée de travail** est toujours un critère intéressant à calculer. Par exemple, les rizières de marigot assurent un revenu de 1 700 à 2 800 F CFA par jour de travail alors que, dans la même région, la cacaoculture intensive rapporte au mieux 1 000 F CFA.

4.3. Productivité alimentaire

C'est la quantité de calories et de protéines alimentaires obtenues par unité de surface ou de temps de travail. On calcule ainsi le nombre de rations alimentaires, c'est-à-dire le nombre de personnes que l'on peut nourrir par unité de surface ou de travail.

Par exemple, les systèmes de culture de Bafou permettent en moyenne de nourrir 10 adultes par hectare et par an, ce qui est un niveau remarquable en agriculture manuelle.

Ce critère est tout à fait indiqué pour comparer entre eux des systèmes de culture vivriers. Lorsqu'on convertit des quantités de récoltes mesurées au champ en quantité d'aliments consommables, il ne faut pas oublier de calculer l'**indice de récolte** qui est la proportion de ce qui est consommable dans la totalité de la récolte.

Par exemple, dans une récolte de maïs en épis, il faut déduire le poids des spathes et des rafles pour avoir la récolte nette en grains (500 kg maïs/épi donnent 300 kg maïs/grain : l'indice de récolte est de 60 % environ).

4.4. Maintien de la fertilité

C'est peut-être le critère essentiel de différenciation des systèmes de culture, bien qu'il ne soit pas facile à estimer. Il indique la reproductibilité du système et donc son maintien à long terme. De ce point de vue, on oppose :

- les "**systèmes miniers**" où l'on épuise en quelques années un stock de fertilité qu'il aura fallu des siècles à constituer, sans se préoccuper de l'avenir ;
- les "**systèmes viables**" où l'on se soucie de transmettre un patrimoine de valeurs accrues à la génération suivante.

Le statut foncier et le mode de tenure ont une influence certaine sur cet aspect particulier des systèmes de culture.

• Exemples de systèmes miniers :

- l'essartage itinérant du bassin amazonien ;
- la monoculture céréalière du "Dust bowl" de l'Ouest des États-Unis ;
- le maraîchage d'altitude du Nord de la chefferie Bafou ;
- la céréaliculture irriguée par centre pivot en zone aride méditerranéenne.

• Exemples de systèmes viables :

- l'agriculture des Mafas dans les monts Mandara de l'Extrême-Nord du Cameroun ;
- les champs de case africains ;
- le système de polyculture-élevage du bassin Aquitain en France ;

– le système céréales/légumineuses fourragères auto-régénératrices en zone méditerranéenne de l’Australie du Sud-Ouest.

4.5. La sécurité alimentaire

La notion de risque en agriculture est malaisée à appréhender. Dans les régions à haut risque climatique (zones soudano-sahéliennes) les systèmes de culture sont conçus non pour optimiser la productivité physique et monétaire mais pour *limiter les risques de mauvaises récoltes*. On privilégie donc les espèces et variétés rustiques et des techniques particulières dont la logique n’est pas toujours facile à saisir.

Un exemple typique est l’emblavement de surfaces dont l’étendue dépasse manifestement les capacités de sarclage de l’exploitation. Mais ces champs sont répartis dans des terroirs différents ce qui a pour conséquence, en année normale, l’abandon aux mauvaises herbes des champs les plus éloignés. En année difficile, on peut espérer que l’un de ces champs éloignés donnera quelque chose et on y concentre l’effort du sarclage. L’extensif est ici consciemment une stratégie anti-risque.

L’association de cultures vivrières dans un même champ est aussi une façon de limiter le risque de “mauvaise année”. A l’autre extrême, la monoculture est, en principe, un optimum économique mais à hauts risques (pression parasitaire, reconstitution du stock humique, maintien du niveau des éléments minéraux du sol) qui demande une haute technicité pour pouvoir tout maîtriser.

5. DÉMARCHE GÉNÉRALE D’ANALYSE DES SYSTÈMES DE CULTURE

5.1. Constitution d’un référentiel régional

L’analyse des systèmes de culture demande d’abord de disposer de **références régionales** sur les rendements et les itinéraires techniques (successions culturales, densités de peuplement, ordre et dates des façons culturales, niveaux de fertilisation, etc.). Ces références servent de points de comparaison, afin de pouvoir situer les exploitations agricoles étudiées par rapport aux “normes” locales.

Par exemple, une récolte moyenne de 300 grammes de café marchand par pied d’arabica, qui est faible eu égard aux normes d’Amérique Centrale ou du Kenya, est excellente dans les Hautes-Terres de l’Ouest-Cameroun où le caféier est toujours conduit en association avec des cultures vivrières. (La possession d’un tel référentiel constitue d’ailleurs une bonne partie de l’expérience professionnelle d’un agronome...)

Dans les pays du Nord, la littérature technique (par exemple les publications des instituts techniques et des services agricoles régionaux) suffira généralement à la constitution de ce référentiel, qui peut d’ailleurs exister tout prêt sous forme de mémentos, de fiches techniques ou de support informatique à l’usage des conseillers agricoles et des producteurs.

Dans les pays en développement, l’insuffisance des données statistiques imposera presque toujours de procéder à des enquêtes régionales plus ou moins approfondies suivant les moyens et le temps disponible (on n’oubliera pas de distinguer les pra-

tiques réelles des agriculteurs et les normes optimales obtenues auprès des stations de recherche et fermes-modèles, qui sont toujours bien différentes).

5.2. Choix d'un échantillon d'exploitations

Un préalable nécessaire à l'étude des systèmes de culture est de constituer un échantillon représentatif des différents types d'exploitations agricoles de la région. Cet échantillon doit tenir compte des conditions du milieu naturel, du milieu socio-économique, de même que de quelques critères structurels de ces exploitations (âge du chef de famille, activités extra-agricoles, nombres de personnes à charge, niveau d'équipement...).

A ce stade, on ne cherche pas à traduire quantitativement la structure de la population, comme le ferait une enquête socio-économique, mais à distinguer les groupes représentant les différents comportements, les différentes stratégies des exploitations. Par exemple, les classes les moins nombreuses (toutes petites ou très grosses exploitations) sont souvent les plus sujettes à innover dans les systèmes de culture.

Les catégories ainsi obtenues peuvent être assimilées à des "**domaines de recommandation**", ensembles homogènes d'exploitations agricoles ayant des contraintes et des problèmes techniques analogues, et dont on peut supposer qu'elles seront justifiables des mêmes actions de développement.

5.3. Description des systèmes de production et des systèmes de culture

L'outil de travail principal est ici le questionnaire détaillé, semi-ouvert, s'adressant aux chefs d'exploitations agricoles et aux autres membres des exploitations agricoles de l'échantillon choisi. Le questionnaire vise à réunir quelques éléments du système de production mais surtout à décrire de façon détaillée les systèmes de culture présents :

- l'appareil de production (effectif familial, force de travail, foncier, cheptel, équipement), en prenant en compte l'aspect dynamique, les variations et l'évolution de l'appareil de production ;
- les systèmes d'élevage, et surtout leurs relations avec les systèmes de culture à travers le système fourrager ;
- le système de productions végétales, c'est-à-dire l'ensemble des systèmes de culture et de leurs interrelations.

Cette description doit comprendre au minimum les éléments suivants :

- l'**état parcellaire** : plan et tableau des parcelles culturales de l'exploitation, assorti de renseignements techniques (type de succession ou d'association, type et niveaux de fertilisation, autres techniques culturales appliquées, rendements...) ;
- les bilans d'utilisation des produits par l'exploitation (bilan vivrier, bilan fourrager) ;
- les fonctions des différents systèmes de culture, que l'on s'efforcera de mettre en évidence (vente, autosubsistance, production de fourrage, fonctions sociales...) ;
- l'inventaire sommaire des **calendriers culturaux** et **itinéraires techniques**.

5.4. Analyse des systèmes de culture

Le but de cette phase est de comprendre la logique de fonctionnement, les pratiques et les objectifs des exploitants.

L'outil de base est le plan et l'état parcellaire, qui, approfondi, permet :

- d'*identifier* les différentes successions ou associations culturales de l'exploitation ;
- d'*analyser* l'évolution de l'assolement et les choix stratégiques des exploitants, en liaison avec l'évolution de l'ensemble de l'exploitation ;
- d'*évaluer* les rendements et leur évolution sur plusieurs années.

L'analyse des itinéraires techniques est une phase essentielle : évaluation du niveau de technicité, du degré d'utilisation des intrants, possibilité de détecter contraintes et problèmes techniques.

Il s'agit d'une analyse comparée des pratiques : étude des variations dans l'espace et le temps, et entre exploitations, qui permet de comprendre la logique des décisions techniques. Les outils classiques de cette analyse sont :

- *le suivi et l'observation de parcelles* (qui se traduit concrètement par une "fiche parcellaire" individuelle) ;
- *les enquêtes agronomiques* à l'échelle de l'exploitation et de la parcelle culturale (à ce stade, des enquêtes complémentaires **thématiques** sont souvent nécessaires ; cette phase permettra d'ailleurs d'obtenir des normes chiffrées et d'affiner le référentiel régional).

Un objectif important est de *mettre en évidence les raisons de ces variations des pratiques*, en identifiant contraintes et possibilités, en considérant aussi le déterminisme interne de l'exploitation et son environnement social et économique. D'où l'importance du choix de l'échelle de l'unité d'étude (village ou quartier) : des règles collectives de fonctionnement et l'interdépendance entre exploitations peuvent expliquer bien des aspects des systèmes de culture.

On cherchera à établir des relations entre caractéristiques structurelles et fonctionnelles des exploitations, et à préciser les relations entre systèmes de gestion, systèmes d'élevage et systèmes de culture.

5.5. Jugement des systèmes de culture

Il sera souvent nécessaire de faire une sélection de thèmes d'étude en fonction de l'importance des problèmes (exemple : fertilisation minérale, gestion de la matière organique, problèmes phytosanitaires, contraintes de main-d'œuvre...).

• **Le diagnostic cultural** a pour but de détecter et de hiérarchiser les facteurs limitant les performances :

- *choix de situations culturales* au champ de façon à permettre des comparaisons (couples ne différant que par un ou quelques facteurs peu nombreux). Chaque situation culturale comportera une ou plusieurs stations d'observation, de quelques m² à quelques dizaines de m² ;
- *identification précise des opérations culturales* tout au long du cycle cultural (suivi de parcelles, fiche parcellaire), par observations et non plus par déclarations. Il faut au minimum une série d'observations après installation de la culture, une autre avant la récolte ;
- *schéma d'élaboration du rendement*, la constitution d'un modèle théorique d'élaboration du rendement de la culture, à l'échelle de la situation culturale, est un outil précieux d'analyse, qui repose sur trois principes :
 - = le rendement est le produit de plusieurs composantes,

- = chaque composante est sous la dépendance de facteurs et de conditions de milieu qui lui sont spécifiques, et du niveau des composantes élaborées dans la phase précédente,
- = les facteurs et les conditions du milieu sont tout ou partie déterminés par les techniques ;
- *identifier les conditions de milieu et facteurs techniques* liés à ces composantes et expliquant les irrégularités et baisses de rendement.

Cette phase conduit à un jugement du niveau des composantes par rapport aux références optimales pour la région.

- Formulation d'**hypothèses explicatives** et investigations sur la validité de ces hypothèses :
 - soit *par observations directes* (le **profil cultural** est ici un outil indispensable) ;
 - soit *par l'expérimentation en milieu paysan* (ou expérimentation en milieu non contrôlé mais qui constitue un complément indispensable de l'expérimentation en station), moyen privilégié permettant d'associer les producteurs à la recherche ;
 - soit *par analyses diverses*
 - = physiques : tests de stabilité structurale, porosité, compacité, pénétrométrie,
 - = chimiques : matière organique, éléments minéraux assimilables,
 - = contrôle de la nutrition minérale : analyses foliaires, vases de végétation,
 - = bilan hydrique, bilans minéraux ou organique à l'échelle de la parcelle (méthodes lourdes).
- Identification des techniques à améliorer et formulation de propositions concrètes et réalistes (tenant compte des possibilités, des stratégies et objectifs des exploitants).

Un système de culture n'est pas un système isolé : on devra toujours se soucier des répercussions possibles des innovations sur le système d'élevage et le système de production en général.

En règle générale, les innovations qui modifient peu le système de production et n'entraînent pas de coût supplémentaire excessif (ni numéraire, ni en travail) sont généralement facilement acceptées.

- *Présentation aux producteurs et encadreurs, débat.*

- *Diffusion* : par champs d'essai-démonstration, séances de formation. Création de groupes de producteurs du type GVA (groupement de vulgarisation agricole) ou CETA (centre d'études techniques agricoles).

A une telle démarche, il est toujours profitable de *s'assurer la participation des producteurs*. Il ne faut pas perdre de vue qu'en définitive, l'étude des systèmes de culture vise à répondre aux problèmes qui se posent aux agriculteurs – et non à ceux qui intéressent les chercheurs... Les restitutions aux agriculteurs, la négociation avec eux de chaque étape, la participation des producteurs aux observations, aux enquêtes, aux expérimentations – et pas seulement à leur réalisation, mais aussi, dans la mesure du possible, à leur conception – évite souvent des dérapages vers une "recherche pour la recherche", qui produira certes force publications et ouvrages, mais s'éloigne par trop des préoccupations des agriculteurs.

6. CONCLUSION

Le concept de système de culture est un outil qui permet de mieux comprendre le fonctionnement d'une culture à l'échelle de la parcelle et ainsi d'y intégrer certains facteurs déterminants de la production qui n'apparaissent pas à l'échelle de la plante. Ce concept est donc utilisé à deux niveaux :

- pour analyser des situations agricoles et émettre des diagnostics à l'échelle de la parcelle,
- pour construire de nouveaux programmes de culture répondant à des objectifs précis.

De nombreux facteurs non strictement agronomiques entrent en jeu et peuvent influencer la conduite des systèmes de culture, entraînant parfois un décalage entre l'optimum technique et ce que l'on peut observer dans la réalité.

Il faut bien se rappeler que cet état de choses n'est pas dû à l'"ignorance" des agriculteurs mais bien plus à un certain nombre de contraintes que nous avons cherché à identifier dans ce chapitre : contraintes au niveau de l'exploitation agricole prise dans son ensemble, au niveau du village ou de l'environnement économique global.

L'important est de bien repérer ces contraintes pour bien comprendre la rationalité des agriculteurs (car ceux-ci ont toujours de bonnes raisons de faire ce qu'ils font) et pour essayer de proposer des actions propres à améliorer leur situation.

Autrement dit, il existe de nombreuses manières d'évaluer un système de culture et il importe de bien choisir la (ou les) manière(s) qui convient(vent) le mieux au cas étudié. Les systèmes de culture ne sont qu'un niveau de l'échelle d'organisation d'une agriculture et il est souvent nécessaire de se pencher sur les autres niveaux (voir la figure 20.6). Le concept de système de culture est un outil qui permet de mieux comprendre le fonctionnement d'une culture à l'échelle de la parcelle, d'analyser des situations agricoles et d'émettre des diagnostics pour guider l'action. Il existe plusieurs critères pour évaluer l'efficacité des systèmes de culture, depuis la productivité physique des facteurs de production au maintien de la fertilité du milieu et de la sécurité alimentaire. L'analyse des systèmes de culture par les agronomes permet de proposer des améliorations réalistes des systèmes de production et d'éviter des erreurs coûteuses en matière de développement rural et de préservation de l'environnement.

BIBLIOGRAPHIE

- Bedu L., Martin C., Knepler M., Tallec M., Urbino A. (1987), *Appui pédagogique à l'analyse du milieu rural dans une perspective de développement*, coll. "Documents systèmes agraires" n°8, DSA/CIRAD-CNEARC, Montpellier, 191 p.
- Bergeret P., Ducret G., Grangeret I., Roux M.N., Schafer J.L. (1988), *Le système agraire de Bafou, chefferie du pays Bamiléké*, rapport de recherche, Projet Bafou/CUDS, Dschang, Cameroun, 82 p.
- Combe L., Picard D. (eds.) (1990), *Les systèmes de culture*, coll. "Un point sur...", INRA, Paris.
- Ducret G., Grangeret I. (1986), *Quelques aspects des systèmes de culture en pays Bamiléké*, rapport de recherche, Projet Bafou/CUDS, Dschang, Cameroun, 39 p.
- IRAT/DSA (1982), *La gazette des systèmes*, Montpellier.

- Jouve P. (1982), *Interêts et exigences méthodologiques d'une approche systémique de la production agricole*, communication aux "Journées sur la Recherche-Développement en milieu rural" à Montpellier les 8, 9, 10 novembre 1982, DSA/CIRAD, Montpellier, 13 p.
- Jouve P. (1986), "Quelques principes de construction de typologies d'exploitations agricoles suivant différentes situations agraires", communication au colloque "Diversification des modèles de développement rural", 17-18 avril 1986, MRT, Paris, *Les Cahiers de la Recherche-Développement*, 11, 48-56.
- Jouve P. (1993a), *Adaptation des systèmes de production à l'aridité au Maroc et au Sahel*, vol. I : *Synthèse des travaux*, thèse de Doctorat, Université Paul-Valéry, Montpellier III, 188 p.
- Jouve P. (1993b), "Usages et fonctions de la jachère dans les systèmes de production d'Afrique tropicale et du Maghreb", *Cahiers Agricultures*, 2 : 308-317.
- Kleitz G. (1988), *Les systèmes de culture en pays Bamiléké (Ouest-Cameroun), exemple de la chefferie Bafou*, mémoire de fin d'études, CNEARC/ENSAA/CIRAD/Projet Bafou/CUDS, Montpellier, 69 p.
- Larousse (1984), *Dictionnaire de l'agriculture*.
- Lizet B., de Ravignan F. (1987), *Comprendre un paysage/Guide pratique de recherche*, INRA, Paris.
- Pillot D. (1987), *Recherche/Développement et Farming system research/Concepts, approches et méthodes*, coll. "Travaux de recherche/développement", Réseau R/D.
- Sebillotte M. (1974), "Agronomie et agriculture. Essai d'analyse des tâches de l'agronome", *Cahiers ORSTOM, série Biologie*, 24, 3-25.
- Sebillotte M. (1976), Jachère, système de culture, système de production, méthodologies d'étude", Journées d'étude "Agronomie-Sciences humaines", 5-6 juillet 1976, INA, Paris
- Sebillotte M. (1978), "Itinéraires techniques et évolution de la pensée agronomique", *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 11 : 906-913.
- Sebillotte M. (1980), "Rôles de la prairie dans la succession culturale", *Fourrages*, 83 : 79-124.
- Sebillotte M. (1985), "La jachère, éléments pour une théorie", in *A travers champs, agronomes et géographes*, Montpellier, ORSTOM, coll. "Colloques et séminaires", 175-229.
- Sebillotte M. (éd.) (1989), *Fertilité et systèmes de production*, coll. "Ecologie et aménagement rural", INRA, Paris.
- Sebillotte M. (1990a), in *Modélisation systémique et système agraire*, Brossier, Vissac Lemoigne (eds.), INRA.
- Sebillotte M. (1990b), "Systèmes de culture. Un concept opératoire pour les agronomes", in *Les Systèmes de culture*, Combe L. et Picard D. (eds.), INRA, Paris, 165-196.
- Weber J. (1978), *Logiques paysannes et rationalité technique : illustrations camerounaise*, Actes du colloque de Ouagadougou "Maîtrise de l'espace agraire et Développement en Afrique".