

# La chimie en agriculture :

## les tensions et les défis pour l'agronomie

### 1 Agriculture et chimie : une longue et tumultueuse histoire

C'est au XIX<sup>e</sup> siècle qu'est née l'*agronomie scientifique*. Elle a conduit à la création et à la généralisation du modèle de l'agriculture dite intensive (*Figure 1*), telle que nous la connaissons aujourd'hui dans nos pays développés, tout particulièrement en Europe mais aussi dans les pays émergents, notamment les pays asiatiques. Un succès historique qui a permis une croissance fulgurante de la population mondiale et l'éradication des famines dans

certains pays ; mais succès parfois accompagné d'embûches, lesquelles contribuent en grande partie à la mise en cause actuelle de ce modèle dans les sociétés des pays développés, ce qui peut s'apparenter à une *crise de l'agriculture intensive*, que nous sommes en train de vivre.

Plus que jamais, il existe une attente forte de la part des consommateurs et des pouvoirs publics à l'égard des agronomes, qui ont la lourde responsabilité de répondre aux enjeux du développement durable planétaire, par la conception d'une nouvelle

Figure 1

L'agriculture intensive est née au XIX<sup>e</sup> siècle.





Figure 2

Les scientifiques (chimistes et biologistes), des acteurs clés dans l'agronomie moderne.

Figure 3

Les plantes ont besoin d'eau, d'éléments nutritifs, de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) apporté par l'air et d'énergie solaire nécessaire à la synthèse chlorophyllienne. Quand on a découvert qu'elles se nourrissent de nitrates, ammonium, phosphate, potassium, oligo-éléments... on s'est mis à développer l'agronomie scientifique.



agriculture qui prenne en compte les besoins alimentaires et les contraintes environnementales très pressants de ce début du  $\text{xxi}^{\text{e}}$  siècle. C'est une préoccupation au cœur de laquelle se trouve depuis longtemps la chimie, un acteur important de l'agronomie scientifique (Figure 2). Or, les relations actuelles entre agriculture, chimie et société sont loin d'être simples.

Quels sont les principaux défis des agronomes et des chimistes face à des attentes fortes, nombreuses et parfois contradictoires ?

## 2 La chimie agricole et la révolution verte

### 2.1. L'agronomie scientifique, fille de la chimie

#### 2.1.1. Découverte des fondements de l'alimentation des plantes

L'agronomie est une fille de la chimie qui est née au  $\text{xix}^{\text{e}}$  siècle avec la découverte des fondements de l'alimentation minérale des plantes. Avant cette époque, on ne savait pas de quoi elles s'alimentaient, même si l'on savait bien que l'ajout de matières organiques telles que le fumier était favorable à leur croissance, mais sans en connaître l'explication. Puis l'on s'est aperçu que les plantes se nourrissent de molécules minérales d'azote, sous forme de nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) et d'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), de phosphore et de divers autres éléments (Figure 3). Dès lors que l'on a compris cela, on a recherché ces éléments dans le sol, on a voulu comprendre sous quelles formes ils s'y trouvaient, quelles dispo-

nibilités pour la plante ils pouvaient avoir, et quels flux cela pouvait induire du sol vers la plante.

#### 2.1.2. Maîtriser la fertilité et optimiser les plantes

Cette nouvelle connaissance des plantes a ouvert la voie au développement de la chimie du sol et a conduit aux principes de la **maîtrise de la fertilité** qui ont été acquis au début du  $\text{xx}^{\text{e}}$  siècle, dès lors que l'industrie chimique a été capable de produire des engrais (Figure 4) en quantité abondante et à des prix accessibles, pour améliorer la qualité nutritive de surfaces de terres de plus en plus grandes. Il s'est instauré une collaboration très étroite entre les chimistes – qui ont notamment mis au point la synthèse de l'ammoniac<sup>1</sup> – et les agronomes – qui ont appris à utiliser ces éléments fertilisants, distribués aux plantes de plus en plus précisément en fonction de leurs besoins. Les aboutissements techniques les plus élaborés en sont l'irrigation localisée fertilisante ou la culture sur solution pratiquée en serre.

De leur côté, et c'est l'une de leurs contributions majeures, les agronomes ont apporté une amélioration génétique des plantes, qui résistent mieux aux agresseurs et

1. Traditionnellement, l'ammoniac  $\text{NH}_3$  était obtenu par distillation du purin (déchet issu de l'élevage d'animaux domestiques et pouvant être utilisé comme fertilisant azoté) et du fumier. Sa production industrielle s'effectue essentiellement par synthèse directe à partir d'hydrogène et d'azote (procédé Haber-Bosch).



Figure 4

Fumier et cendres ont été remplacés par les engrais industriels pour fertiliser les sols. À grande échelle, ils sont épandus par irrigation ou par avion.

Figure 5

Les plantes sélectionnées sont plus résistantes et valorisent au mieux les potentialités climatiques des milieux.

aux conditions climatiques des lieux où on les cultive (Figure 5).

### 2.1.3. Lutter contre les bioagresseurs

L'autre contribution majeure de la chimie, apparue durant la deuxième moitié du <sup>xx</sup>e siècle avec l'essor de la chimie de synthèse, est la lutte contre les bioagresseurs des plantes. Il s'agit de l'ensemble des organismes ravageurs (insectes), pathogènes (champignons), ou des concurrents des plantes, c'est-à-dire les mauvaises herbes<sup>2</sup>. Une série de molécules **phytosanitaires** – herbicides, fongicides, insecticides – de plus en plus performantes et efficaces sont progressivement distribuées sur le marché depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, permettant aux agriculteurs d'être dotés de moyens puissants de lutte contre les épidémies qui menacent leurs cultures.

2. En botanique, les mauvaises herbes sont désignées par le terme adventices.

## 2.2. Vers l'agriculture intensive

### 2.2.1. Optimiser les surfaces agricoles

Grâce à l'apport des engrais et des produits phytosanitaires industriels, les agriculteurs des pays développés ont pu maîtriser progressivement les contraintes liées au sol (contraintes « édaphiques »), ainsi que les contraintes liées aux bioagresseurs (contraintes « biotiques »).

D'un point de vue pratique, il a dès lors été possible de





Figure 6

Champ de blé, champ de colza... la spécialisation des cultures est une caractéristique de l'agriculture intensive.

s'affranchir peu à peu des rotations, à savoir l'alternance de cultures différentes, pratiquée autrefois pour nettoyer le sol des mauvaises herbes (labours), empêcher le développement des pathogènes et ravageurs des plantes tels que les vers nématodes, ou encore maintenir la fertilité du sol en reconstituant ses réserves minérales. On a eu effectivement recourt à la fixation symbiotique des légumineuses telles que les haricots, fèves, luzernes, trèfles ou pois. Cela consistait à laisser des micro-organismes symbiotiques du genre *Rhizobium* se fixer sur les racines de ces plantes hôtes, pour produire à partir de l'azote atmosphérique des molécules azotées qui alimentent les plants (en échange de quoi les

légumineuses leur apportent des sucres issus de la photosynthèse (Voir la *Figure 15*).

Tout ceci a progressivement laissé place à des **spécialisations de l'agriculture**. Cette spécialisation s'étend au niveau régional : la France possède des régions de culture très majoritairement dominées par les « grandes cultures » : céréales, colza, maïs (*Figure 6*). Elle affecte la plupart des exploitations, dont le nombre d'espèces cultivées n'a cessé de se réduire. Cette spécialisation permet des économies d'échelle en équipement et en technicité. Une autre conséquence notable de ce changement de pratique agricole est un **découplage entre la production végétale et l'élevage** (*Figure 7*).

Figure 7

L'élevage est aussi concerné par l'intensification de l'agriculture.



L'ensemble de ces bouleversements a abouti à ce que l'on appelle aujourd'hui l'**agriculture intensive**, avec un accroissement sans précédent de la productivité physique, c'est-à-dire des rendements

agricoles. À titre d'exemple, le rendement du blé en France a quadruplé depuis les années 1950. Un bilan dans notre pays est présenté dans l'*Encart : « Retour sur 50 ans d'agriculture intensive en France »*.

## RETOUR SUR 50 ANS D'AGRICULTURE INTENSIVE EN FRANCE

### L'apport des engrais

Autrefois, le sol était fertilisé de façon empirique, par ajout de fumier (en général des excréments d'animaux mélangés à de la paille) qui apporte de l'**azote**, par ajout d'os pour le **phosphate**, ou encore de cendres pour le **potassium**.

L'avènement de l'industrie chimique, charbonnière et pétrolière au <sup>xx</sup>e siècle a permis d'accéder à de grandes quantités de formes chimiques purifiées d'engrais, qui ont été largement utilisées en France notamment. Leur composition de base est généralement constituée du trio « NPK », pour azote/phosphate/potassium, l'azote étant l'élément le plus important.

Quel est le bilan de l'apport des engrais azotés dans les grandes cultures en France, notamment pour les céréales et le colza ? La **Figure 8** donne une image de la relation possible entre la consommation d'engrais azoté en France et la productivité des cultures de céréales et de colza, depuis 1960. Un parallélisme y apparaît de manière flagrante. On note cependant un certain détachement à partir des années 1990, qui pourrait être rapproché de la baisse du soutien européen au prix des denrées agricoles. Cela implique, de façon économiquement justifiée, un moindre recourt aux engrais.

On observe que cela n'affecte pas pour autant les rendements, ce qui montre qu'il peut y avoir eu parfois des consommations inutiles d'engrais, éventuellement mal pondérées en fonction des rendements que l'on peut espérer obtenir.

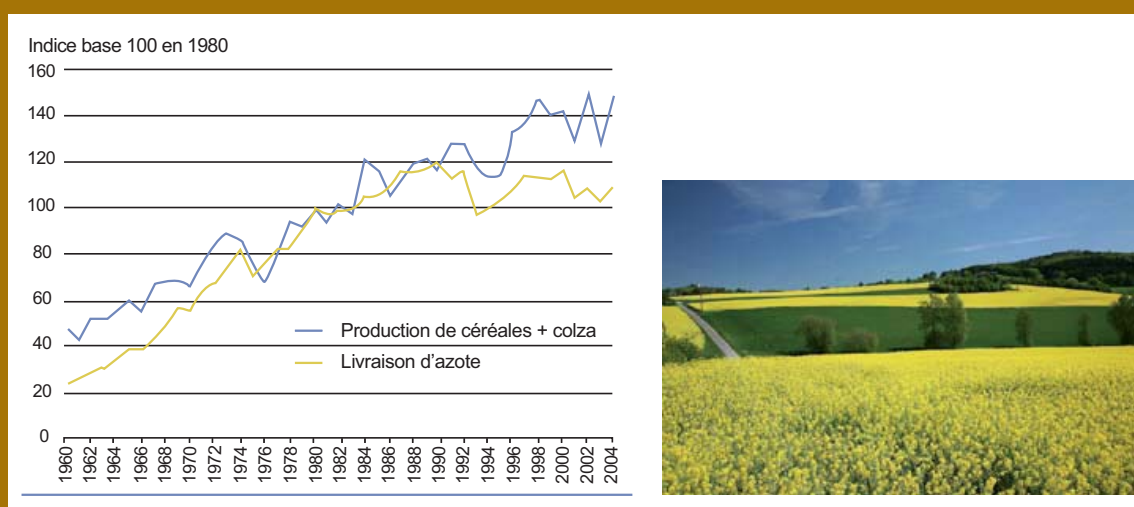


Figure 8

Quel est l'impact des engrais azotés sur la productivité des grandes cultures (céréales, colza) en France ?  
Source : Ministère de l'agriculture et de la pêche (Scees - Agreste) - Union des industries de la fertilisation (Unifa).

### L'apport des produits phytosanitaires : les pesticides

Cela fait des millénaires que l'on cherche à protéger les plantes cultivées, en luttant chimiquement contre les organismes nuisibles. Du soufre était déjà utilisé en Grèce antique (1000 ans avant J.-C.), de même que l'arsenic était recommandé en tant qu'insecticide par le naturaliste romain Pline l'Ancien. Des produits à base de plomb étaient même utilisés au <sup>xvi</sup><sup>e</sup> siècle en Chine et en Europe, tandis que les propriétés insecticides du tabac étaient reconnues dès 1690.

Depuis l'essor de la chimie organique et minérale au <sup>xix</sup><sup>e</sup> siècle, les agriculteurs ont pu accéder à de nombreux pesticides à base de cuivre, tels que des fongicides à base de sulfate de cuivre  $\text{CuSO}_4$  (la bouillie bordelaise est un mélange de sulfate de cuivre et de chaux, qui permet de lutter contre les invasions fongiques de la vigne et de la pomme de terre). À partir des années 1940, l'usage du DDT (dichlorodiphényltrichloroéthane) s'est répandu et a ouvert la voie au développement de nombreux autres organochlorés utilisés en tant qu'insecticides. S'en est suivi le développement des organophosphorés après la Seconde Guerre mondiale, puis des herbicides de la famille des urées (linuron, diuron), des ammoniums quaternaires (triazines), suivis des fongicides des familles des imidazoliques et triazoliques. Les insecticides de la famille des pyréthrinoïdes sont apparus dans les années 1970-80. Les tonnages utilisés dans le monde ont régulièrement augmenté depuis soixante ans, notamment au États-Unis et en France.

Quel recul pouvons-nous avoir sur l'impact de l'utilisation des pesticides sur la production végétale en France ? La **Figure 9** révèle une corrélation similaire à celle constatée au sujet de l'impact des engrais (**Figure 8**) (la courbe de production végétale semble croître à un niveau plus faible, mais à même échelle, cette croissance est comparable à celle de la production des grandes cultures de la **Figure 8**).

Il est difficile d'établir des liens directs de causalité entre d'une part l'utilisation d'engrais et de pesticides, indépendamment l'un de l'autre, et d'autre part l'augmentation des productions agricoles. Il n'y a cependant pas de doute sur la contribution des produits phytosanitaires dans l'augmentation des volumes de production et dans la stabilisation des rendements agricoles. En effet, ces derniers ne sont plus sujets aux effondrements catastrophiques qui ont eu lieu dans l'histoire en conditions climatiques favorables à la prolifération des pathogènes. Cette sécurité, qui a éloigné les crises associées aux disettes et aux famines, n'a réalisé que partiellement le rêve de l'humanité d'échapper au manque de nourriture. Elle reste fragile comme l'ont montré les effets des mauvaises récoltes de 2007, menacées notamment par le changement climatique.

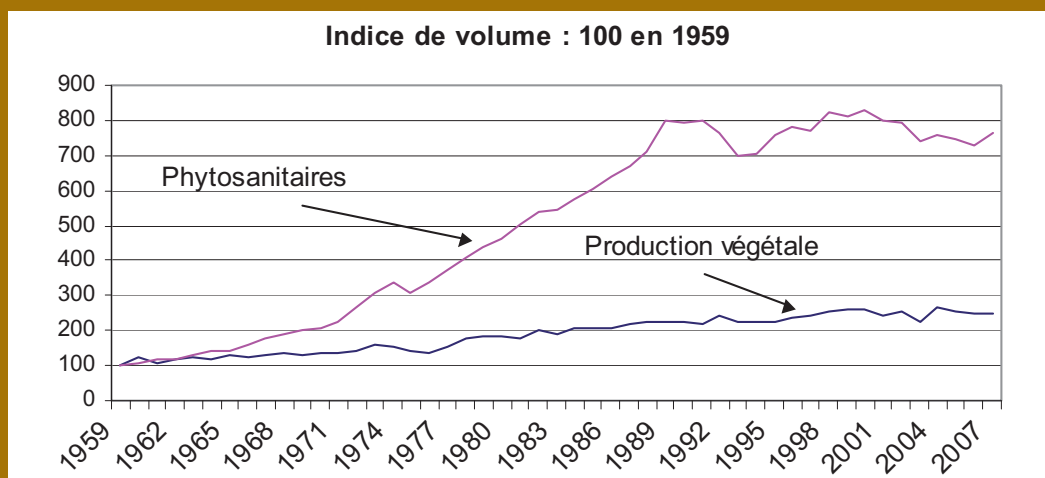


Figure 9

Quel est l'impact des pesticides sur la productivité végétale en France ?



Figure 10

*La mécanisation a décuplé la productivité des agriculteurs.*

### 2.2.2. Mécaniser l'agriculture

Parallèlement aux progrès liés à l'optimisation des sols et des plantes, des **outils mécaniques** puissants ont été développés et mis à disposition des agriculteurs (Figure 10), ce qui a décuplé la productivité du travail. En France, alors que les rendements agricoles ont été multipliés en moyenne par trois ou quatre, la productivité du travail a été multipliée par vingt voire par trente ! Il en a résulté une diminution considérable de la population agricole en Europe, notamment dans notre pays.

### 2.3. Les conséquences du modèle agricole intensif

L'intensification de l'agriculture dans de nombreux pays a abouti à un succès remarquable et unique dans l'histoire de l'humanité, on parle de « révolution verte ». Elle a permis un **accroissement de la population**, qui est passée de 2 à 6,5 milliards en quelques décennies.

Elle a également eu pour conséquence la **réduction des coûts alimentaires**. Les prix des produits en valeur relative n'ont cessé de diminuer, contribuant à améliorer le niveau de vie des populations,

et à la possibilité pour les familles de consacrer leurs budgets à d'autres marchés issus des développements industriels parallèles que l'on connaît dans les sociétés modernes.

Le fondement conceptuel en termes de schéma de fonctionnement de l'agriculture est qu'elle a été assimilée à un processus industriel. Le terme le plus achevé en est l'utilisation des serres, qui reviennent à « faire entrer des engrais dans le process » et à faire « fonctionner » une plante en condition artificielle parfaitement contrôlée : des conditions typiquement industrielles (Figure 11). Même en plein champ, nous

Figure 11

*Faire pousser des plantes en serre : des conditions typiquement industrielles.*



n'en sommes pas loin avec l'irrigation localisée fertilisante : le milieu est alors un support physique qui sert simplement à ancrer la plante et à faire circuler les engrais à destination de ses racines. Globalement, ce système est très dépendant de ce qu'on peut appeler les « intrants chimiques » : engrais, produits phytosanitaires, retardateurs de croissance, etc.

### 3 Bilan des coûts et risques : un modèle intensif remis en cause ?

#### 3.1. Premières mises en cause : les contaminants des eaux

Le premier fait marquant, cause de large contestation du modèle de l'agriculture intensive, est la contamination des eaux par les engrais, puis par les pesticides. Faisons un retour sur les faits.

##### 3.1.1. La contamination par les nitrates

Les premiers éléments quantitatifs recueillis ont été les niveaux observés de contamination des eaux douces par

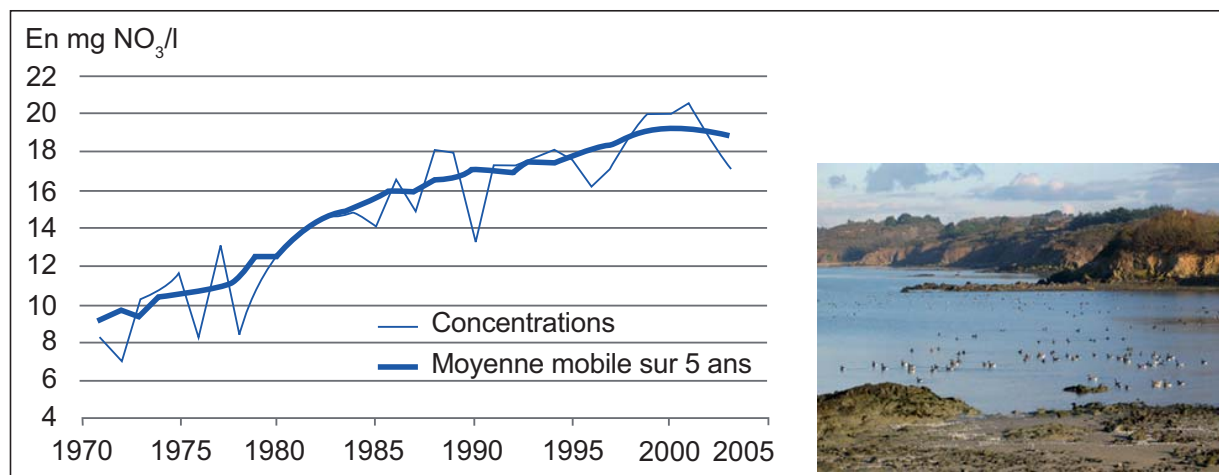
les nitrates, qui ont fait l'objet d'attentions très fortes dès les années 1970, lorsque l'on prévoyait déjà que l'utilisation d'excédents d'azote aurait pour effet cette augmentation de concentration. Effectivement, aux exutoires du bassin versant agricole, l'augmentation de concentration des nitrates a été régulière et continue entre les années 1970 et la fin du xx<sup>e</sup> siècle. L'Europe avait pourtant pris des mesures et mis en place des directives au milieu des années 1970 pour stopper cette progression menaçante, mais sans changements manifestes jusqu'à présent, notamment en France (Figure 12). En un siècle, les taux de nitrates des rivières bretonnes ont été multipliés par dix !

##### 3.1.2. La contamination par les pesticides

Pour les pesticides, la situation s'est avérée de même nature que pour les nitrates, mais les questions ont été mises en avant de façon plus tardive, notamment en raison de difficultés et du coût beaucoup plus élevé des analyses. À mesure que les performances analytiques se sont

Figure 12

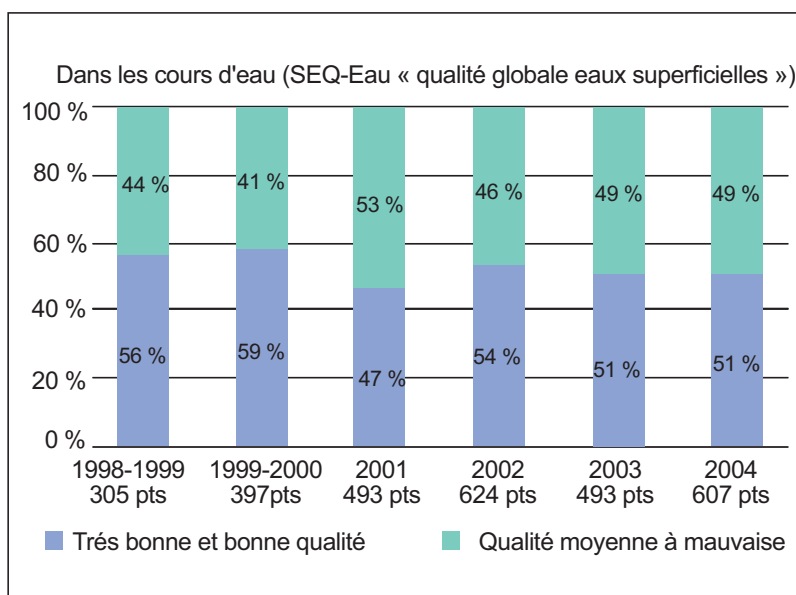
La concentration en nitrates en aval des bassins versants agricoles n'a fait qu'augmenter en France, contribuant à une eutrophisation (modification et dégradation du milieu aquatique liées à l'apport exagéré de substances nutritives, qui augmentent la production d'algues et de plantes aquatiques). Ce phénomène a été particulièrement observé en Bretagne, par exemple dans la Baie de Saint-Brieuc.





accrues, on s'est aperçu que l'on trouvait de façon assez fréquente dans les eaux superficielles et souterraines des pesticides ou des molécules issues de la dégradation des pesticides. D'après les statistiques produites par l'Institut français de l'environnement (IFEN) sur la période de 1998 à 2004 (on observe une relative stabilité de la qualité des eaux superficielles au cours des années 1998 à 2004 ; **Figure 13**), la majorité des eaux superficielles françaises peut être considérée comme contaminée par la présence d'au moins un type de molécule, avec des concentrations dépassant le seuil de 0,2 µg/L pour une molécule donnée, ou le seuil de 0,7 µg/L pour un ensemble de molécules. Ces seuils restent très bas, comparativement à la norme qui avait été adoptée en Europe sur les eaux de boisson, qui fixait le seuil à 0,1 µg/L, correspondant à l'époque au seuil de détection. Ce qui montre que l'Europe s'engageait déjà dans une voie conduisant à dire : « il faut zéro pesticide dans les eaux », un défi extrêmement difficile à tenir, et qui n'a pas de signification connue en termes de toxicité ou d'écotoxicité.

Petit à petit, ces premières mises en cause de l'agriculture fondée sur un usage intensif de la chimie se sont étendues à d'autres domaines, à mesure que les questions environnementales prenaient une ampleur croissante. Depuis 1990, la question du réchauffement climatique planétaire et de la biodiversité est plus que jamais abordée dans les sociétés des pays développés.



Dans ce contexte, l'agriculture intensive est souvent montrée du doigt...

**Figure 13**

Fréquence des contaminations par les pesticides.

### 3.2. Des effets sur l'atmosphère et le climat

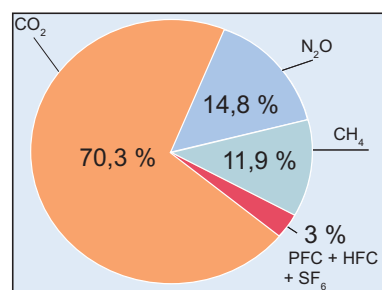
En même temps que la question de l'effet de serre et du réchauffement climatique préoccupe de plus en plus les sociétés modernes, l'agriculture en a été désignée comme un contributeur important.

En première ligne, a été dénoncée l'utilisation des engrais azotés en France, qui seraient responsables des trois quarts des émissions de protoxyde d'azote N<sub>2</sub>O, un gaz à effet de serre au pouvoir de réchauffement trois cent fois supérieur à celui du dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>, représentant ainsi 15 % des émissions des gaz à effet de serre exprimées en pouvoir de réchauffement (**Figure 14**) !

Le passage de l'état d'engrais au gaz protoxyde d'azote s'effectue soit directement à travers les processus de nitrification ou de dénitrification de l'azote dans les sols

**Figure 14**

Le protoxyde d'azote tient une part importante dans les émissions de gaz à effet de serre. PFC = perfluorocarbures ; HFC = hydrofluorocarbure.



(voir *Encart : « Le cycle de l'azote dans l'agriculture »*), soit indirectement à travers les effluents d'élevage et leur gestion, ou encore à travers les émissions vers les milieux humides ou aquatiques où se produisent les mêmes phénomènes que dans les sols.

### 3.3 Des effets sur la biodiversité

Les impacts de l'agriculture intensive sur la biodiversité ont depuis plus longtemps donné lieu à des alertes, et ces impacts sont aujourd'hui davantage renseignés que ceux sur l'effet de serre. L'une

## LE CYCLE DE L'AZOTE DANS L'AGRICULTURE

L'azote suit un cycle biogéochimique, durant lequel il est successivement transformé en différentes formes : azote gazeux  $N_2$ , nitrate  $NO_3^-$ , nitrite  $NO_2^-$ , ammoniac  $NH_4^+$ , azote organique. L'une des étapes de transformation de l'azote est le processus de **nitrification** que réalisent des micro-organismes du sol. Il conduit à la transformation de l'ammoniac  $NH_4^+$  en nitrite  $NO_2^-$  (nitrification par *Nitrosomonas*) puis à la transformation du nitrite en nitrate  $NO_3^-$  (nitratation par *Nitrobacter*) (Figure 15).

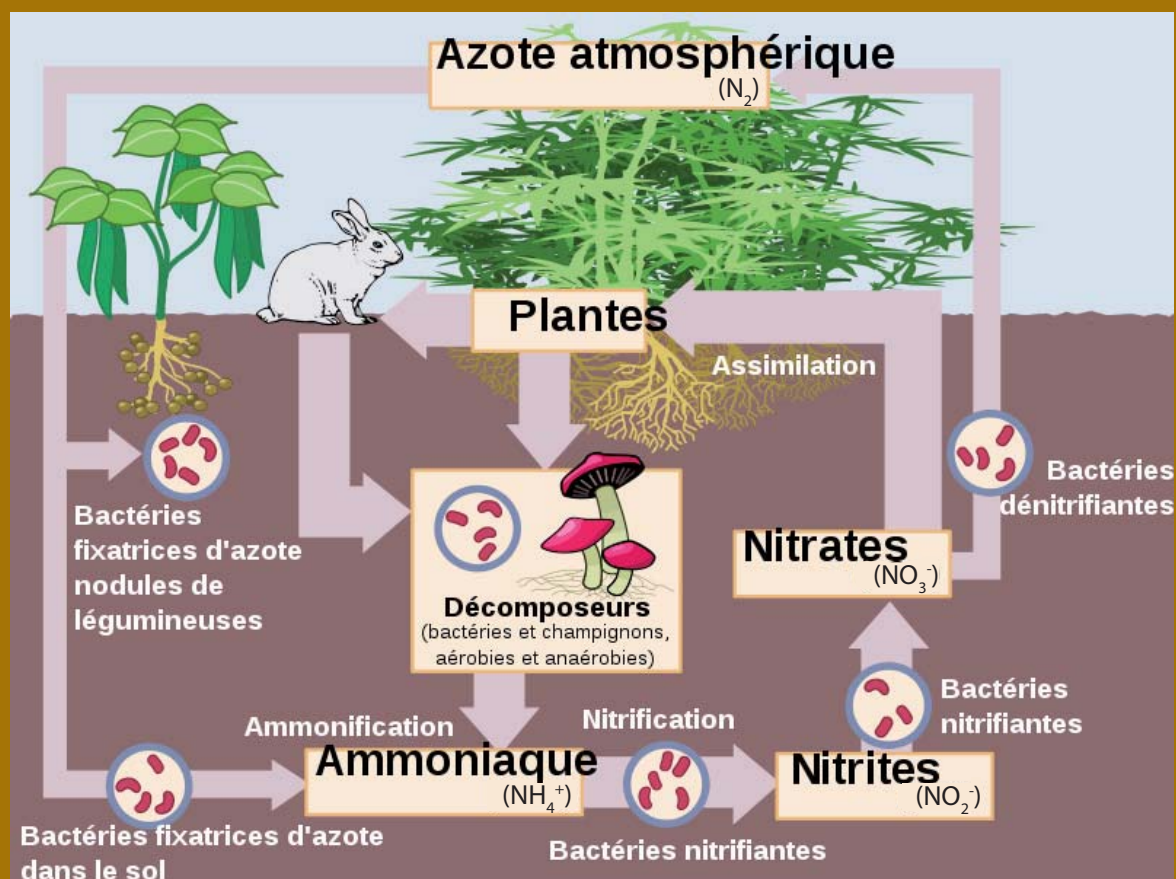


Figure 15

Le cycle de l'azote dans l'agriculture. Comment s'y insèrent les engrais chimiques azotés ? Comment le protoxyde d'azote est-il produit ?

des premières alertes a fait suite à la parution aux États-Unis du livre *Le printemps silencieux*, écrit en 1962 par la biologiste Rachel Carson. Ce livre est largement reconnu pour avoir contribué à lancer le mouvement écologiste dans le monde occidental, montrant les dégâts que les pesticides pouvaient produire sur l'environnement, et plus particulièrement sur les oiseaux. Ce qui a notamment conduit en 1972 à l'interdiction du DDT aux États-Unis, un insecticide qui a montré des conséquences néfastes sur la santé humaine<sup>3</sup>.

3. L'arrêt de l'utilisation du DDT en 1996 a cependant conduit à une augmentation considérable des cas de paludisme en Afrique, jusqu'à ce que l'Organisation mondiale de la santé (OMS) recommande le maintien de son utilisation dans ces pays, ce qui a contribué à abaisser les cas de la maladie.

### 3.3.1. Les engrais et l'eutrophisation de l'eau et des sols

Un premier effet massif sur la biodiversité est l'**eutrophisation** (**Encart : « L'eutrophisation des milieux aquatiques »**), des milieux aquatiques, effet généralement spectaculaire et bien quantifiable. Nous sommes aujourd'hui malheureusement familiers aux dégâts qu'ont pu causer les activités agricoles sur les milieux aquatiques. L'utilisation parfois mal mesurée d'engrais azotés et phosphatés provoque des déséquilibres dans les milieux qui reçoivent les eaux de ruissellement ou d'infiltration issues de l'agriculture. Ces éléments minéraux nourrissent par excès des algues bien souvent indésirables, qui prennent la place de toute autre forme de vie à cause de leur surdéveloppement.

## L'EUTROPHISATION DES MILIEUX AQUATIQUES

L'eutrophisation (du grec *eu* = bien, vrai ; *trophein* = nourrir) est la modification et la dégradation d'un milieu aquatique, lié en général à un apport excessif de substances nutritives, qui augmentent la production d'algues et de plantes aquatiques.

Le phénomène peut se décomposer en quelques étapes : des nutriments, notamment les phosphates et les nitrates issus de l'agriculture, sont déversés en grande quantité dans le milieu aquatique ; les eaux ainsi enrichies permettent la multiplication rapide des végétaux aquatiques, en particulier la prolifération d'algues (l'« efflorescence algale ») ; le stock d'oxygène étant très limité dans l'eau, celui-ci est rapidement épuisé lors des périodes pendant lesquelles la respiration des organismes et la décomposition des matières produites excèdent la production par photosynthèse et les échanges possibles avec l'oxygène atmosphérique. Le développement éventuel de plantes flottantes empêche le passage de la lumière, donc la photosynthèse dans les couches d'eau inférieures, et gêne également les échanges avec l'atmosphère ; le milieu devient alors facilement hypoxique puis anoxique, favorable à l'apparition de composés dits réducteurs et de gaz délétères (thiols, méthane) ; il peut en résulter la mort d'organismes aquatiques aérobies – insectes, crustacés, poissons, mais aussi végétaux –, dont la décomposition, consommatrice d'oxygène, amplifie le déséquilibre.

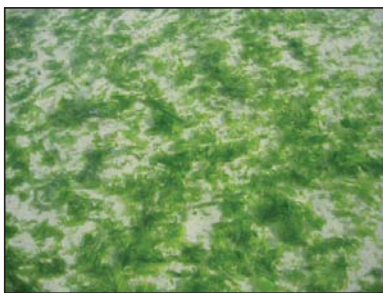


Figure 16

Les marées vertes sont apparues en Bretagne et se sont amplifiées dans les années 1970, ne cessant de s'aggraver depuis cette époque. Sur la façade ouest, on observe surtout la pullulation des espèces *Ulva armoricana*.

C'est ainsi que nous connaissons actuellement le phénomène des marées vertes en Bretagne, qui sont une manifestation d'eutrophisation massive détériorant complètement le milieu et aboutissant à des problèmes sanitaires qui n'étaient pas forcément soupçonnés jusqu'à une époque récente (Figure 16). L'accumulation de ces éléments dans les cours d'eau peut avoir un impact important sur le milieu marin, à l'endroit même où se déversent des fleuves, ou par le retour des nappes souterraines qui forment des sources sous-marines ou proches du bord de mer.

Ces constats ont donné lieu à des actions très fortes, notamment pour préserver des milieux aquatiques terrestres comme les grands lacs alpins, dans lesquels le phosphore, plus que l'azote, joue un rôle prépondérant, la combinaison des deux éléments aboutissant à une aggravation considérable du problème.

Dans le cas des sols, il est plus difficile de parler d'eutrophisation ; la situation est différente : le fait d'avoir cherché à adapter un grand nombre de sols à l'agriculture, notamment en améliorant leur fertilité, a progressivement conduit à la disparition des sols peu riches ou acides. Or, beaucoup de végétaux s'étaient adaptés à ces conditions extrêmes et disparaissent dès lors que l'on a enrichi ces sols en éléments nutritifs. C'est particulièrement le cas des prairies, où la biodiversité s'est trouvée significativement réduite par suite des activités

agricoles utilisant des fertilisants (Figure 17).

### 3.3.2. Les pesticides et l'écotoxicologie

L'effet des pesticides sur des populations bien ciblées est généralement bien connu, souvent davantage observé au niveau expérimental que mesuré dans les conditions naturelles, même s'il arrive que l'on suive une espèce dans la nature, dans des conditions particulières. Il est toutefois très difficile de quantifier les effets des pesticides (mis à part les contaminations massives, mais qui sont devenues extrêmement rares en Europe). La raison en est que, de manière générale, une masse d'eau polluée ne l'est pas par un seul type de molécules, mais par un ensemble de molécules, à des niveaux de concentration en pesticides très bas, et avec l'intervention de nombreux autres facteurs, qui parfois sont plus délétères pour les populations que les pesticides eux-mêmes : température de l'eau, oxygénation, etc.

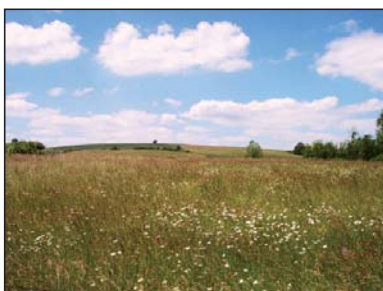
C'est donc un grand défi pour les scientifiques qui étudient l'écotoxicologie, que de déterminer précisément l'effet d'un ou plusieurs pesticides sur la biodiversité.

### 3.4. Agriculture intensive et environnement : un ensemble complexe

L'ensemble de ces observations – gaz à effet de serre, pollution des eaux et des sols, appauvrissement de la biodiversité –, mêlées aux incertitudes dues à la complexité des phénomènes en jeu,

Figure 17

Les prairies sont des milieux riches en biodiversité.



aboutit à des réactions de mise en cause de l'effet global de l'agriculture intensive sur l'environnement.

Au premier plan sont montrés du doigt les fertilisants et les produits phytosanitaires. On peut pour l'instant dire que les techniques de culture utilisant ces produits ont surtout un effet sur la biodiversité locale, celle attachée à la surface du sol où elle est nourrie, que ce soit une plante sauvage, ou la faune et la microflore du sol. Mais cet effet est aussi dû à la réduction du nombre d'espèces cultivées, du fait des spécialisations de l'agriculture : des paysages très homogènes ont beaucoup de mal à héberger une multitude d'espèces. Enfin, entrent en jeu d'autres effets qui ne proviennent pas de l'agriculture intensive en tant que telle, mais par le fait que la mécanisation et l'expansion des exploitations ont conduit à modifier les paysages en éliminant une grande part des espaces dits semi-naturels. Parmi ces espaces, on compte les bordures de champs, les fossés, les bordures de chemins, sans oublier un certain nombre d'éléments appréciés pour leur valeur esthétique mais qui jouent aussi un grand rôle dans la préservation de la biodiversité : les haies, les bosquets, les arbres isolés.

L'ensemble de ces facteurs contribue à réduire la biodiversité dans l'espace agricole, sans que l'on soit, à ce stade, véritablement capable de quantifier la part de chacun d'entre eux. Il existe néanmoins un certain nombre d'indicateurs révélateurs

de la situation globale (voir *Encart : « Des populations d'oiseaux : un bon indicateur de la biodiversité »*).

## DES POPULATIONS D'OISEAUX, UN BON INDICATEUR DE LA BIODIVERSITÉ

Appréhender et suivre la biodiversité dans son ensemble est humainement et techniquement impossible. Actuellement, seules quelque 1,4 millions d'espèces ont été identifiées sur un potentiel de quinze à cent millions, et parmi celles qui sont décrites, seulement quelques milliers sont relativement bien suivies. On a donc recours à des modèles utilisant des indicateurs pertinents, qui peuvent donner une idée réaliste de la situation, afin d'aider les scientifiques, les pouvoirs publics et les citoyens à hiérarchiser les priorités et prendre des décisions (par exemple : implanter des haies ou des zones enherbées, habitats de l'avifaune (oiseaux) et de l'entomofaune (insectes)).

Les oiseaux sont fréquemment choisis comme un baromètre précis et pratique de la répartition de la biodiversité et du changement de l'environnement mondial. Le suivi de la population des oiseaux communs dans les zones agricoles peut ainsi être un bon indicateur de l'impact de l'agriculture sur la biodiversité : il tient compte à la fois de la disparition d'habitats, de lieux de reproduction et de disponibilités trophiques, ou d'actions toxiques sur les oiseaux.

On observe une diminution tendancielle de ces populations depuis la fin des années 1980, qui se poursuit malheureusement jusqu'à l'époque présente sans aucune manifestation d'inversion de cette tendance (*Figure 18*).

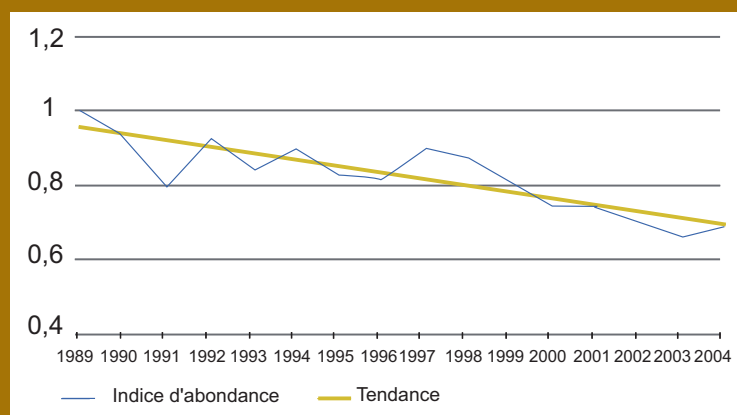


Figure 18

Évolution de l'indice d'abondance des oiseaux communs caractéristiques des zones agricoles.

Source : Muséum national d'histoire naturelle (MNHN).

### 3.5. Agriculture et produits chimiques, en ligne de mire

#### 3.5.1. Des contaminations de l'environnement mieux documentées et plus visibles

Les contaminations de l'environnement ont cependant des origines multiples. Elles sont de plus en plus précisément documentées grâce à des moyens d'analyse et à la mise en place de systèmes d'observations plus performants. Certaines sources de pollutions aquatiques massives, urbaines et industrielles, ont pu être considérablement réduites par les politiques de limitation et d'épuration des rejets. Il en est ainsi des matières organiques fermentescibles,<sup>4</sup> grâce notamment à l'extension du traitement des eaux urbaines et à l'amélioration de son efficacité. Le résultat en est une amélioration de la qualité des eaux de grands fleuves, attestée par l'accroissement du nombre d'espèces de poissons qui les habitent, comme c'est le cas dans la Seine.

Cette double amélioration, des données d'observation et de la maîtrise des pollutions non agricoles, accroît la visibilité et la part de l'agriculture comme source de contamination des milieux aquatiques. Ce commentaire peut être étendu à l'atmosphère, à propos de l'ammoniac et des pesticides.

4. Les déchets fermentescibles sont composés de matière organique biodégradable, car susceptible de fermenter.

#### 3.5.2. Une défiance croissante à l'égard du risque toxique

La multiplication et la meilleure accessibilité des données ont contribué à légitimer un contexte de défiance croissante à l'égard de la sécurité des produits alimentaires, largement induit par des crises sanitaires qui ont affecté nos sociétés, même si elles ne concernent pas le champ de l'alimentation. Les pesticides sont en ce sens le premier objet de préoccupation de nos concitoyens. Leurs effets sur la santé publique aux très faibles doses qui sont en cause, et en condition d'exposition à de très nombreuses molécules potentiellement toxiques, sont très difficiles à quantifier. Leur existence, à propos de certaines molécules ou formulations, peut cependant être soutenue par des tests à l'échelle cellulaire notamment, et la mise en cause corrélative des conditions de test imposées pour autoriser la mise sur le marché. La persistance dans les eaux, le sol ou l'atmosphère de molécules interdites depuis plusieurs années, atrazine, lindane ou chlorodécone par exemple, est par ailleurs avérée. Les consommateurs tendent alors à appliquer à titre personnel le principe de précaution. Cela se traduit par une attente collective d'une agriculture plus saine et respectueuse de l'environnement, voire par un rejet du système de production dominant qu'exprime le succès grandissant de l'agriculture biologique<sup>5</sup>.

5. Organisée à l'échelle mondiale depuis 1972, l'agriculture biolo-

## 4 Répondre aux enjeux agricoles du XXI<sup>e</sup> siècle : les défis pour l'agronomie

### 4.1. Premières réponses : protéger les eaux en maîtrisant les fuites

#### 4.1.1. Maîtriser les fuites d'azote

L'agronomie a déjà tenté depuis longtemps de répondre aux problèmes de pollution liés à l'azote, en s'efforçant d'en limiter les fuites.

C'est ainsi que dans la gestion de la fertilisation azotée, on a cherché à estimer au plus juste les besoins des plantes, ajusté et fractionné les doses, de façon à limiter les risques de fuites. Ces engrais étant véhiculés par l'eau, soit par leur ruissellement soit par l'infiltration, on a introduit des **couvertures hivernales des sols**, qui correspondent à des cultures intercalaires pièges à nitrates. Ces techniques permettent de réduire les concentrations des eaux de drainage en général sous le seuil réglementaire de 50 mg/L. On peut donc considérer que cette méthode est

gique s'est constituée en réaction à l'avènement de l'agrochimie, au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, et surtout au développement de l'usage des engrais issus de la chimie de synthèse. Ce système de production agricole est basé sur le respect du vivant et des cycles naturels, et gère de façon globale la production en favorisant l'agrosystème mais aussi la biodiversité. Pour atteindre ces objectifs, les agriculteurs « biologiques » choisissent d'exclure l'usage d'engrais et de pesticides de synthèse, ainsi que d'organismes génétiquement modifiés.

au moins un succès partiel. Néanmoins, les fonctionnements du système souffrent d'une certaine inertie, à la fois sur le plan biologique, physique et chimique, liée au cycle de l'azote (voir l'**Encart** : « *Le cycle de l'azote dans l'agriculture* »). Ainsi, ce n'est pas l'engrais apporté l'année N qui fuit en profondeur la même année ou l'année N+1. Il va s'incorporer à la matière organique du sol, qui se re-minéralise et ainsi de suite. C'est ce cycle global de la matière organique du sol qui « fuit ». Cela implique que les excédents d'azote dans les sols y séjournent longtemps et peuvent aussi fuir pendant très longtemps si l'on ne les exploite pas en les exportant à travers la production. Mais il existe également une inertie de diffusion des changements de pratique chez les agriculteurs : les pratiques visant à répondre à la réglementation, notamment européenne, ne diffusent que lentement, et particulièrement dans les régions d'élevage où l'on cumule la double pratique d'une fertilisation avec des éléments minéraux, et l'épandage des effluents d'élevage. Cela a abouti à des excédents « structurels » considérables dans les régions où l'élevage est concentré. La limitation des apports totaux d'azote à 170 kilogrammes par hectare et par an, n'y a pas permis de réduire massivement les pollutions. Mais on semble assister à une stabilisation récente : respecter la norme de 50 mg/L est un objectif qui peut être généralement atteint. Si cette norme est prudente par rapport aux

effets toxiques sur l'homme en l'état des connaissances, il est élevé vis-à-vis de l'environnement et de la maîtrise de l'eutrophisation. L'Union Européenne recommande une valeur de 25 mg/L elle-même sans doute excessive quant à l'état écologique des masses d'eau. L'effort à accomplir en vue de préserver l'environnement reste donc considérable.

#### 4.1.2. Maîtriser les fuites de pesticides

S'agissant des pesticides, un effort est porté sur la limitation des fuites directes, liées par exemple au rinçage des cuves ou au devenir des emballages. Les dérivés, c'est-à-dire l'atteinte directe des eaux superficielles par le produit de traitement, en proximité des rives, sont mieux maîtrisés par l'existence de bandes enherbées et la qualité technique de l'application des produits. Une autre préoccupation est la gestion des transferts *via* la circulation de l'eau dans les bassins versants agricoles. Le principe est de réduire le ruissellement superficiel, principal vecteur de contamination des eaux, et favoriser l'infiltration permettant une rétention et une biodégradation accrue des pesticides dans le sol. Un moyen utilisé est la technique des bandes enherbées (Figure 19) particulièrement en bordure des cours d'eau. Les couvertures hivernales des sols y contribuent également, en même temps qu'elles retiennent l'azote. S'y ajoutent d'autres types d'aménagement possibles comme la création de fossés, de zones humides où l'on

favorise la dégradation microbienne des pesticides.

En 2005, une expertise de l'INRA et du Cemagref<sup>6</sup> a conclu que ces diverses techniques ne suffisent pas à garantir un niveau négligeable d'impact environnemental des pesticides. La conclusion majeure en était la nécessité d'adopter une stratégie de réduction de leur usage et de modifier les systèmes et techniques de production pour y parvenir, en prenant exemple sur d'autres États comme le Danemark.

### 4.2 Un lourd cahier des charges pour l'agronomie

#### 4.2.1. Produire autrement et d'autres choses

Les agronomes se trouvent devant la nécessité de remettre en cause un certain nombre de pratiques pour « produire autrement », et notamment « **consommer moins** ». Outre l'obligation de réduire les impacts sur l'environnement, la question de limiter la consommation d'énergie est redevenue prioritaire. Elle concerne directement les agronomes, puisque la synthèse des engrais azotés est, par exemple pour la culture de blé, la principale source de consommation d'énergie. Dans le même temps, il leur est demandé de limiter l'extension de l'espace agricole au détriment des

6. Le Cemagref est un organisme de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture. Il est spécialisé dans la gestion des ressources, de l'aménagement et de l'utilisation de l'espace à dominante rurale (systèmes aquatiques et technologie de l'eau notamment).

Figure 19

Zone de culture où un labour en terrasse a été associé à un maillage de zones tampons (talus enherbés, haies ou bandes enherbées) pour restaurer et protéger la qualité du sol et de l'eau. Exploitation agricole dans l'Iowa (1999).





espaces naturels, c'est-à-dire de maintenir ou d'augmenter les rendements pour assurer la suffisance alimentaire.

Il est facile d'imaginer les antagonismes entre ces objectifs. Mais le défi se complique encore quand on demande à l'agriculture de **produire des matières premières non alimentaires** en substitut à d'autres sources. On pense évidemment à l'énergie, avec les agrocarburants issus de la biomasse pour se substituer en partie aux carburants pétroliers. Mais cela s'étend à la production de molécules par la chimie du végétal ou de matériaux par l'agriculture... ce qui nous rapproche de la situation antérieure au  $xx^e$  siècle, où l'énergie était largement fournie par la traction animale, et les matériaux étaient très souvent d'origine biologique – la laine, la paille, etc.

Cette rediversification des usages des produits de l'agriculture, doit s'opérer sans affecter la sécurité alimentaire mondiale, qui dépend elle-même d'un fort accroissement de la production en réponse à l'accroissement démographique et au développement économique des pays émergents.

D'autre part, au-delà de la maîtrise de ses impacts négatifs, il est attendu que l'agriculture contribue à la production de « services écosystémiques » ou services écologiques. Il s'agit de valoriser les agro-écosystèmes en stockant par exemple du carbone dans les sols cultivés ou ceux des prairies, ou pour recycler les déchets orga-

niques d'origine urbaine, ou pour entretenir la biodiversité des paysages.

#### 4.2.2. Produire mieux et plus

Enfin, il faut « **produire mieux et plus** ». C'est-à-dire non seulement garantir l'innocuité des produits en évitant la présence de substances toxiques, mais aussi contribuer à leur valeur nutritive, gustative, hédonique et symbolique (ces aspects sont abordés dans les *Chapitres de M. Desprairies, P. Etiévant, S. Guyot et H. This*).

Cette accumulation d'exigences du cahier des charges, et leurs contradictions, doivent être assumées sous une condition impérative pour une agriculture durable : que les agriculteurs disposent du revenu nécessaire au maintien de leur activité.

### 4.3 Des perspectives pour l'avenir ?

#### 4.3.1. L'azote, une difficulté incontournable

Les plantes ne peuvent croître sans azote. Pour atteindre des rendements élevés, il faut donc leur en fournir d'une manière ou d'une autre. C'est un facteur de production sans substitut. Or, nous l'avons vu, l'azote pose un problème environnemental de taille. À titre d'exemple, la production du blé en France requiert une énergie s'élevant à environ 20 500 MJ/ha, dont plus de la moitié (13 000 MJ/ha) est liée à l'utilisation d'engrais (essentiellement azotés). S'ajoutent à la consommation d'énergie, les émissions de gaz à effet de serre *(voir le*

*paragraphe 3.2)*, qui nécessitent d'être mieux quantifiées. Or, on peut soupçonner que le problème est peut être plus grave que ce qu'on imagine, à en croire les propos du prix Nobel de chimie (1995) Paul Josef Crutzen. Il annonçait il y a trois ans que les coefficients d'émission calculés pour l'azote des milieux terrestres sont sans doute sous-estimés à partir de la modélisation du fonctionnement des oxydes d'azote dans l'atmosphère. En les corrigeant, on verrait croître la part des gaz à effet de serre liée à la fertilisation azotée.

Quelles solutions trouver au-delà des techniques efficaces déjà éprouvées, mais d'effets limités sur la consommation d'engrais ? Revenir massivement à la pratique d'utilisation de la fixation symbiotique de l'azote par les bactéries qui accompagnent les légumineuses ? Cela impliquerait une modification considérable de l'assolement et une occupation de milliers d'hectares par la culture de luzerne ou du trèfle par exemple, au détriment du blé et du colza... Pour une utilisation de ces produits, il faudrait réassocier les productions végétales et animales, réintroduire par exemple des ruminants dans les grandes plaines du bassin parisien, ce qui est loin d'être simple à organiser.

Une autre piste d'espoir est d'accroître l'efficacité de l'utilisation de l'azote par les cultures. Des progrès importants ont été accomplis dans le cas du blé. Ils sont moins avancés pour d'autres plantes comme le colza, également

grande consommatrice d'engrais azoté, mais qui le valorise mal dans la production.

#### *4.3.2. Les pesticides : une politique de forte restriction d'usage*

La conclusion de l'expertise citée précédemment s'est trouvée reprise dans la décision politique consécutive au « Grenelle de l'environnement », à travers le plan Ecophyto 2018<sup>7</sup>, qui fixe une réduction de moitié de l'utilisation des pesticides à l'échéance de 2018. Cette mesure doit pousser à une maîtrise accrue des traitements, et impulser ce qui est appelé « **agriculture raisonnée** », n'utilisant les pesticides qu'en cas de besoin avéré par un risque phytosanitaire sérieux et très probable.

Les autres solutions nécessaires pour atteindre la réduction de 50 %, consistent à mobiliser des techniques alternatives aux traitements chimiques. Par différence avec la fertilisation azotée, il en existe de différentes natures, même si aucune n'a la même efficacité et la même commodité d'emploi que les

7. Le plan Ecophyto 2018 est en France l'une des mesures proposées par le Grenelle de l'environnement fin 2007 et reprise par le PNSE 2 (second Plan national santé environnement) en 2009. Il vise à réduire et sécuriser l'utilisation des phytosanitaires (y compris en zone non agricole) pour notamment diviser par deux l'utilisation des pesticides avant 2018 (formulation ambiguë car ne précisant pas s'il s'agit de tonnage, de matière active, des produits les plus utilisés ou les moins utilisés ou les plus toxiques, etc.).

produits phytosanitaires. C'est notamment le recours à des variétés végétales génétiquement résistantes aux parasites. Elles sont, dans certaines cultures, d'emploi courant vis-à-vis de certaines maladies. Mais la difficulté est d'assurer la permanence de ces résistances vis-à-vis des pathogènes qui s'y adaptent et les contournent.

Pour rester dans les voies biologiques, il est possible de développer la lutte biologique en introduisant un agent qui peut par exemple consommer ou parasiter un insecte ravageur. Le risque peut être alors que l'espèce introduite devienne proliférante ou invasive, ou ne s'attaque à d'autres cibles. La technique requiert donc un important travail de recherche pour identifier une espèce efficace et anticiper ses capacités adaptatives au nouveau milieu dans lequel elle est introduite.

Au-delà de ces exemples et d'autres solutions de substitution à l'emploi des pesticides, il apparaît difficile de le

réduire fortement sans modifier les assolements et les rotations culturales. Diversifier les cultures est un moyen de limiter la multiplication des bioagresseurs spécialisés sur chacune d'entre elles. S'engager dans cette voie de réduction de la pression sanitaire consiste à développer ce que l'on appelle la « **production intégrée** ». Elle implique un bouleversement profond de la dynamique de spécialisation des exploitations agricoles qui s'est imposée en quelques décennies.

Une étude de l'INRA, en cours, a pour but de comparer les résultats potentiels de tels changements au niveau national. Les résultats du **Tableau 1** en illustrent un résultat important. Il montre comment la valeur de la production nationale pourrait être affectée par une réduction d'usage des produits phytosanitaires. Les estimations montrent que l'effet sur la rentabilité des cultures est moindre, voire nul, compte tenu des économies résultantes en achat de produits.

**Tableau 1**

*Effets des différentes stratégies de réduction d'usage des pesticides sur la production. Évolution du produit par hectare et du volume de la production, au prix 2006, selon les niveaux de rupture. Les prix sont en euros par hectare. (1) Les prix des produits « biologiques » sont ici considérés comme égaux à ceux des produits « conventionnels ».*

	Niveau actuel de 2006	Agriculture utilisatrice de pesticides (y compris traitements préventifs)	Agriculture raisonnée	Agriculture intégrée « élémentaire »	Agriculture intégrée avec rotations et assolements	Agriculture biologique <sup>(1)</sup>
<b>Grandes cultures</b>	890	933	917	834	785	581
<b>Vignes</b>	9 457	11 699	9 321	7 211	7 211	7 044
<b>Fruits</b>	9 216		9 321	9 321	7 457	4 661
<b>Ensemble</b>	<b>1 593</b>	<b>1 782</b>	<b>1 617</b>	<b>1 394</b>	<b>1 319</b>	<b>1 076</b>

#### 4.4. La réalisation du cahier des charges est-elle possible ?

Pour l'avenir, que va-t-il se passer ? Deux approches sont à examiner : le développement des solutions du futur dépend en premier lieu d'une **évaluation intégrée et globale**. En effet, ce n'est pas en limitant localement chacune des pollutions que seront nécessairement réduits les impacts environnementaux globaux. Par exemple la technique de couverture hivernale des sols réduit sans doute les transports de pesticides mais consomme davantage d'eau. Deuxième élément important : la consommation des ressources. Considérons le bilan de l'agriculture biologique par exemple : elle a sans doute un effet bénéfique sur l'environnement local, mais au niveau global, si l'on réduit la production de 40 à 50 %, sachant que la demande doit être satisfaite, il faudra produire sur des surfaces plus grandes, voire cultiver dans d'autres pays. Or, étendre les cultures au Brésil ou en Indonésie se fera sans doute au détriment d'espèces naturelles précieuses.

De plus, les différentes solutions évoquées répondent très inégalement aux différents défis aux échelles locale et planétaire. Un système adapté à une région ou un pays ne l'est pas forcément pour d'autres pays ou à l'échelle mondiale. Les décisions seront donc des arbitrages entre objectifs différents, qui sont de nature politique et ne dépendent pas de l'agronome.

#### 4.5. La nécessité d'innovations technologiques

L'urgence face aux besoins planétaires en termes d'alimentation et de protection de l'environnement implique le recours sans doute incontournable à l'innovation technologique.

Dans cet objectif, on peut attendre beaucoup des biotechnologies végétales, avec un rôle central de l'amélioration des plantes, avec ou sans organismes génétiquement modifiés (OGM). Un espoir est également permis du côté des « biotechnologies blanches » qui portent sur les champignons et les micro-organismes, lesquels fournissent des moyens de biocontrôle alternatifs aux molécules des pesticides, ou agissent sur le fonctionnement du sol. Un rêve serait d'augmenter l'activité des bactéries fixatrices d'azote du sol pour réduire la dépendance aux engrais azotés.

D'autres éléments sont à trouver du côté des sciences et des techniques de l'information et de la communication, à savoir des systèmes de pilotage fins dit de l'« **agriculture de précision** », qui permet d'améliorer la gestion des engrais, et peut être dans l'avenir celle de la protection phytosanitaire...

Et la place de la chimie ? L'efficacité des intrants chimiques – engrais, pesticides – les rend indispensables à une agriculture de haute productivité. Mais les capacités d'innovation autorisent à espérer l'arrivée de nouveaux produits qui respecteraient le cahier des charges de l'agronomie.

Ces produits devront cette fois être conçus en étroite connexion avec la biologie et l'écologie, avec des modes d'action plus ciblés en termes de mécanismes, et en fonction d'évaluations plus complètes et intégrées de leurs effets. Par exemple, si l'on pense à la protection des plantes, la

stratégie consistant à éliminer tous les agresseurs des végétaux n'est probablement pas la bonne. Il faut sans doute plutôt essayer de stimuler des acteurs, notamment biologiques, qui interagissent positivement avec ces végétaux et les protègent.

## L'agronomie et demain ?

Contrairement à la situation « historique », les attentes des citoyens et des consommateurs tendent à opposer l'agronomie et la chimie, ce dont témoignent les conclusions du Grenelle de l'environnement en 2007. Cette tension n'intègre malheureusement pas la diversité des enjeux. Il est aujourd'hui souhaitable et nécessaire que les innovations de la chimie contribuent à une nouvelle « révolution verte », qui sera celle d'une intelligence écologique partagée, ... ce qui n'est pas encore prêt à passer dans les faits. De lourds enjeux planétaires reposent en grande partie sur les épaules des chimistes, ainsi que sur une coopération transdisciplinaire qui s'avère plus que jamais incontournable.

### Pour en savoir plus :

- Rapport OPECST (Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques) « Pesticides et santé », avril 2010.
- Rapport INRA « Écophyto R&D 2018. Quelles voies pour réduire l'usage des pesticides ? », janvier 2010.

# Crédits photographiques

- Fig. 1 : Night Three. Licence CC-BY-SA
- Fig. 8 : champ de colza : Daniel Schwen
- Fig. 10 : David Monniaux
- Fig. 12 : Ponsero. Licence CC-BY-SA
- Fig. 15 : Johann Dréo. Licence CC-BY-SA,
- Fig. 16 : Thesupermat. Licence CC-BY-SA
- Fig. 17 : TitTornado. Licence CC-BY-SA