

Comprendre le fonctionnement des agroécosystèmes pour ajuster l'offre de phosphore, potassium et magnésium aux besoins des cultures

Pascal Denoroy*, Christine Le Souder**, Jean-Claude Fardeau***

* TCEM, INRA Bordeaux. denoroy@bordeaux.inra.fr ; ** Arvalis Institut du végétal, Boigneville. c.lesouder@arvalisinstitutduvegetal.fr ; *** Commission des matières fertilisantes et des supports de cultures. jc.fardeau@wanadoo.fr

Résumé

La production agricole ne peut se développer, et à coup sûr se perpétuer, dans un milieu donné, que si l'agriculteur apporte aux plantes, le plus souvent via le sol, les éléments nutritifs indispensables pour satisfaire, en complément de ceux fournis par les sols, les besoins des cultures. Les matières fertilisantes sont là pour compléter l'offre du sol, ce qui peut conduire à ne pas en apporter en cas de suffisance. Le COMIFER, dans le cadre d'une méthode explicitée pour les grandes cultures, a formalisé ce principe en retenant comme premier facteur du raisonnement des apports de P et K l'exigence des cultures et la connaissance de leurs besoins. La biodisponibilité de ces éléments dans le sol est le second facteur du raisonnement. Le groupe PK du COMIFER, tout en poursuivant l'affinage de sa méthode, aborde désormais les perspectives de gestion durable de l'agro-environnement en relation avec le phosphore. Pour cela, on fait appel à des outils analytiques mieux représentatifs de la biodisponibilité, et des modèles de simulation, qui devraient, à terme, permettre de quantifier les flux d'éléments minéraux dans l'ensemble des agroécosystèmes.

Se procurer et produire des nourritures terrestres de qualité en quantités suffisantes ont été, de tous temps, des préoccupations constantes de toutes les sociétés humaines. Ces préoccupations ont même fréquemment abouti à des guerres fratricides aux conséquences environnementales particulièrement néfastes. Il faut évoquer les situations où, quelles qu'en soient les causes, le déficit de production agricole par rapport à la demande humaine, s'est traduit par le passé, et se traduit encore actuellement, par des famines meurtrières alors que l'homme a acquis suffisamment de connaissances universelles, et de moyens techniques pour savoir produire la nourriture nécessaire à la satisfaction de la totalité de ses besoins essentiels.

L'objet de ce document est d'une part de conter les acquis majeurs de connaissances en matière de phosphore, de potassium et de magnésium «agronomiques» et d'autre part d'illustrer les conséquences de ces acquis en matière de recommandations permettant de maîtriser la production agricole sans dégrader de manière irréversible notre environnement, en clair de se comporter en citoyen responsable du devenir des humains.

Comprendre la nécessité de fertiliser. **De la genèse à 1980**

Les Egyptiens, qui avaient acquis la certitude que les récoltes étaient moindres sans les débordements du Nil, considéraient ces débordements, véhicules de limons eux-mêmes porteurs par exemple de $1.5 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, comme un don de leurs Dieux. Les peuples riverains du Tigre et de l'Euphrate n'étaient pas différents. Et c'est peut-être de cette époque que date, non seulement dans la majorité des langues indo-européennes, la racine unique «cult» contenu dans les mots culte, culture et agriculture mais aussi, sous un autre son, le son «tian» (bien connu pour la place Tian-An Men), dans la langue chinoise.

L'Homme semble donc avoir compris très tôt que la production de nourriture avait pour conséquence ***une perte de quelque chose*** pour les terres et que cette perte devait être compensée par ***un retour de quelque chose*** vers les terres : en quelque sorte le schéma de la **méthode du bilan** avant l'heure. La pratique agricole est ainsi apparue très tôt comme dépendante du cycle biogéochimique spatio-temporel d'éléments, avec comme conséquence directe une nécessaire restitution vers les champs de tout ou partie de ce que les hommes sortaient des champs avec leurs récoltes. Sans cette restitution, les terres sont soumises au "**soil mining**" (Van der Pool, 1980), exploitation minière non durable, et les hommes qui les cultivent deviennent alors victimes de la **spirale de la paupérisation** associée au soil mining. Ainsi implicitement d'abord, puis explicitement à partir du moment où les éléments chimiques

indispensables à la vie ont été petit à petit découverts, les **sociétés humaines** ont été confrontées à l'indispensable **fertilisation des terres** dont elles tiraient leur nourriture (Boulaine, 1995 ; Newman, 1997) et dont elles devront bientôt tirer, via la photosynthèse, une fraction de l'énergie dont elles auront besoin (Vitousek *et al*, 1997).

1. L'indispensable accroissement de la production végétale nourricière appelée à devenir source énergétique dans un proche avenir.

La population planétaire croît. La quantité de nourriture nécessaire pour assurer la survie de chacun de ses peuples doit donc croître (Hervieu, 1996). Les surfaces disponibles pour la pratique agricole étant limitées sur notre planète et nombre de sols étant dégradés par des pratiques anthropiques peu adaptées aux conditions pédoclimatiques locales (Robert, 1999), l'accroissement de la production impose un accroissement des rendements surfaciques. L'apport, aux plantes et aux terres, de matières fertilisantes (réglementairement les engrais, les amendements basiques et les amendements organiques) est, à côté d'autres bras de levier, un des moyens les plus efficaces pour tendre vers cet objectif au plan mondial.

Dans des pays comme la France où, à partir d'une époque -somme toute- récente, la quantité de nourriture produite par nos agriculteurs a été suffisante pour nourrir sans contrainte notre population, il est apparu politiquement séduisant de continuer à faire croître la production agricole pour contribuer à assurer le paiement de notre facture pétrolière, en vendant à l'extérieur le surcroît de notre production alimentaire. C'était le « pétrole vert » des années 1970. Certains états, comme le Brésil, ont depuis longtemps choisi de produire du sucre de canne pour le transformer en alcool énergie. Puis, plus récemment, la raréfaction annoncée du pétrole brut, et surtout l'idée désormais admise que le maximum de production planétaire de pétrole serait atteint sous quelques décennies, ont conduit certains stratèges à recommander également localement la production de «**pétrole vert**», immédiatement renouvelable. Ce terme prend une nouvelle définition, il couvre alors la production agricole de produits énergétiques, grâce au recyclage photosynthétique du carbone atmosphérique, c'est à dire du bioéthanol, du diester ou des huiles végétales brutes, toutes substances porteuses d'énergie chimique et/ou thermique. Le rapport entre énergie contenue dans les produits fabriqués et énergie fossile utilisée s'établirait, avec les pratiques culturelles actuelles, à 2.05 pour le bioéthanol blé, 2.05 pour le bioéthanol betterave et à 2.99 pour le diester colza (Price Waterhouse Coopers, 2002), voire plus encore pour des biomasses lignocellulosiques comme le miscanthus.

2. Le mythe plus que centenaire de la vieille graisse et sa lente extinction.

Les recommandations d'application des matières fertilisantes contenant P, K et Mg ont significativement varié au cours des siècles (Newman, 1997). Les justifications avancées pour justifier les recommandations l'ont été en utilisant, plus souvent implicitement qu'explicitement, des connaissances avérées, des hypothèses plausibles et toujours les contraintes économiques du moment, sans que soit précisé quel était le facteur principal retenu pour justifier la recommandation. Ce type de comportement se perpétue ; pour s'en convaincre, il suffit d'analyser les multiples définitions données actuellement à la formule «agriculture durable» à laquelle se réfèrent tous les hommes politiques copiés par les demandeurs de subventions.

2.1. Les découvertes clé concernant la nutrition P et K des couverts végétaux en présence de matières fertilisantes

Sans réécrire toute l'histoire des conseils «raisonnés» de fertilisation pour P et K, voire Mg, on doit rappeler que :

- ✓ vers 1840, alors qu'à cette époque les seules matières fertilisantes disponibles étaient, à l'exception des marnes, essentiellement organiques, Liebig montra que les plantes ne pouvaient prélever, puis métaboliser, les éléments nutritifs que s'ils étaient présents sous leurs formes minérales.
- ✓ Daubeny (1845) mis en évidence que, dans les terres, nombre d'éléments nutritifs sont présents sous au moins deux formes : une active qui, en étant dissoute, dans la solution du sol, devait assurer la nutrition et une dormante qui, contenue en phase solide du sol, était a priori susceptible de se réveiller. C'est pourquoi il a recommandé que les plantes soient nourries en leur fournissant les éléments sous la forme active dissoute, c'est à dire, selon son expression, **disponible sans délai** pour que les plantes n'aient pas à attendre la minéralisation des matières organiques des sols. Daubeny venait de poser le principe des analyses de terre et l'intérêt des matières fertilisantes hydrosolubles.
- ✓ dès 1850 Way constate la difficulté de mise en œuvre concrète de la recommandation de Daubeny, tout particulièrement pour NH_4 , P, K, et Mg. Il venait, en filtrant des urines au travers de couches de terre, de découvrir **«le pouvoir des sols à adsorber les éléments nutritifs»** et d'en généraliser le concept. Il faisait ainsi des constituants solides des terres le réservoir nutritif pour les plantes. Cette propriété physico-chimique des terres est universelle, puisqu'elle concerne aussi les sols de la lune (Hossner and Allen, 1989) ou ceux de Mars (Mautner et Sinaj, 2002). Cette propriété a parfois été transcrite en «vieillesse des engrais P et K» (Barbier & Trocmé, 1964) ou en «perte au sol», en oubliant, pour le moins, la formule de Lavoisier «rien ne se perd, rien ne crée, tout se

transforme». La découverte de Way a alors donné naissance ultérieurement au concept de pouvoir fixateur des terres, puis de pouvoir tampon des terres (Barber, 1984), quand on a montré la réversibilité de cette fixation. Le pouvoir tampon concerne la majorité des éléments minéraux assimilables qu'ils soient nutritifs comme les phosphates, le potassium et le magnésium (les nitrates en sont exclus), ou bien qu'ils soient potentiellement toxiques comme Al, Cd ou Ni.

✓ puis Heuzé, à partir de 1862, prenant en compte la découverte de Way, cherche à transposer aux éléments nutritifs présents sous forme minérale la théorie de l'humus présentée 40 ans plus tôt par Thaer (1856), mais pour partie erronée. En faisant de la phase solide des sols l'unique source nutritive pour les couverts végétaux, il propose pour nombre d'éléments nutritifs, et tout particulièrement pour P et K mais sans validation de terrain, deux stratégies possibles de fertilisation :

- la **fertilisation de maintenance**, future fertilisation d'entretien, qui devait maintenir la fertilité P et K des terres en apportant les éléments nutritifs en quantités voisines de celles dues aux exportations par les récoltes. Cette fertilisation pouvait être pratiquée chaque fois que la fertilité des sols, jugée uniquement par les rendements, semblait suffisante à l'agriculteur.

- la **fertilisation de capitalisation**, future fertilisation de redressement obtenue par une **fumure de fond**, qui devait permettre d'accroître la fertilité du sol en apportant des substances nutritives en quantité significativement supérieure aux besoins des cultures à venir. Il en résulte, à coup sûr, un accroissement des teneurs des terres en élément total, et le plus souvent, un accroissement des quantités d'éléments extraient par les réactifs dont on pense qu'ils extraient la fraction des éléments la plus assimilable par les cultures. L'intérêt supposé de cette pratique reposait sur l'idée, largement répandue à cette époque et directement issue de la théorie de l'humus, mais aussi de sa pratique, qu'il n'est pas possible, sur une terre qui n'a pas été fertilisée régulièrement et qui *de facto* se serait «appauvrie», ou plus exactement dont la fertilité aurait diminué, et sur laquelle on apporterait de nouveau des matières fertilisantes en quantités largement supérieures aux besoins de la culture à venir, d'obtenir des rendements égaux à ceux que l'on peut obtenir sur une terre régulièrement fertilisée. **En clair l'efficacité des matières fertilisantes appliquées de longue date, et ayant créé de la vieille graisse, était considérée comme supérieure à celle des matières fertilisantes appliquées l'année de la culture.** L'agriculteur devait donc chercher à accumuler de la «**vieille graisse**», y compris pour les héritiers ; il allait embellir, engraisser, **les fonds des héritiers.**

Ce faisant, Heuzé abandonnait la proposition de Daubeny consistant à nourrir la plante au plus près de ses besoins pour la remplacer par une pratique de fertilisation des sols et non des cultures portées par les sols.

2.2. La formalisation de la pratique de la vieille grasse

Forts de ces idées, et en raison du développement industriel des matières fertilisantes minérales, K en 1861 et P en 1865, Heuzé, et de très nombreux agronomes d'Europe occidentale, et uniquement d'Europe occidentale, en sont venus à recommander aux agriculteurs d'accroître les teneurs du phosphore et du potassium extractible des sols en apportant aux sols plus de phosphore et de potassium que les plantes n'en prélevaient l'année qui suit l'apport afin, *in fine* «**d'enrichir les sols**» jusqu'à ce que le sol soit capable de satisfaire seul la demande des plantes.

Pour prendre en compte l'existence des plantes exigeantes et des plantes peu exigeantes dont le concept avait vu le jour à l'époque romaine, **il fût alors admis que l'on devait porter les teneurs de P et K dans les terres à un niveau tel qu'un supplément de fertilisation par rapport aux exportations prévisibles n'apporterait aucun supplément de récolte et ce pour la culture la plus exigeante de la rotation.** Les **fumures de fond**, de capitalisation, d'enrichissement, ainsi pratiquées ne devaient plus être amoindries par une absence temporaire de fumure.

2.3. L'analyse des éléments retenus pour justifier la pratique de la vieille grasse

Le raisonnement reposait en fait sur :

- une certitude : qui peut le plus peut le moins, ce qui permet de satisfaire les plantes non exigeantes en toute circonstance.
- la transposition d'observations, et des conséquences de ces observations, à des situations où elles ne pouvaient pas être transposées. En effet la théorie de l'humus a été bâtie à une époque où seuls étaient possibles des apports de matières organiques aux terres. Or si les matières organiques sont bien porteuses des éléments P, K, Mg et de bien d'autres, elles contribuent aussi à des fonctions physico-chimiques influençant les propriétés physiques et biologiques des terres sur le long terme. Or les apports d'éléments minéraux seuls ne peuvent avoir les mêmes conséquences sur ces propriétés physiques et biologiques. C'est dire que les recommandations de Thaër ne pouvaient pas être transposées, sans validation de terrain, à l'emploi des matières fertilisantes minérales.
- une hypothèse. On supposait que, lorsque la fertilité phosphatée et potassique de la terre aura atteint le niveau auquel un supplément de matière fertilisante, par rapport aux besoins des cultures, ne provoquerait pas de supplément de récolte, il n'y aura plus de «perte au sol» : il suffirait de pratiquer une fertilisation de maintenance pour maintenir le niveau de fertilité considéré comme suffisant pour toutes les cultures, quelles qu'elles soient. C'était ignorer que cette hypothèse basée sur des principes de physico-chimie erronés est fautive, comme l'a ultérieurement démontré expérimentalement Barrow (1980) : la "fixation apparente", même amoindrie, continue, car elle est l'expression des équilibres chimiques responsables du pouvoir tampon.

2.4. La fin raisonnée du mythe de la vieille grasse confectionnée avec les seuls apports minéraux

Les travaux du COMIFER des années 1980-1990, et en particulier l'analyse de multiples essais de longue durée ayant reçu des doses croissantes d'engrais minéraux (Le Souder, 2001), ont permis de mettre fin au mythe de la vieille grasse tellurique confectionnée avec les seuls apports minéraux.

L'histoire séculaire de la vieille grasse est peut être l'occasion d'examiner le poids des symboles portés par les mots utilisés pour décrire un mécanisme en cherchant à l'illustrer pour le transposer plus aisément dans la pratique. L'utilisation de termes imagés, issus du langage de tout un chacun, tels «vieille grasse», «fonds des héritiers», «capitalisation», «l'enrichissement», «l'appauvrissement» pollue peut-être le raisonnement, et crée à coup sûr des ambiguïtés. Le terme «vieille grasse» est toujours présenté implicitement avec une connotation positive dans le cas des sols. Il renvoie, par exemple, à un proverbe populaire, *in fine* discutable, «C'est dans les vieux pots qu'on fait la meilleure soupe !». Cependant force est de rappeler les conséquences réelles d'une part du vieillissement : ce peut être bonification comme parfois observé dans le cas du vin mais c'est aussi une lente dégradation à l'image des humains et d'autre part de la grasse qui peut être certes de la bonne grasse mais aussi de la mauvaise grasse. Notons simplement que le terme anglais «residual effect», plus proche de faits scientifiques, est beaucoup moins racoleur, et surtout moins ambigu, que l'expression «vieille grasse».

Cette histoire est aussi l'occasion de rappeler le risque qu'il peut y avoir à transposer les résultats d'une situation, la fertilisation organique, à une autre situation, la fertilisation minérale, dans laquelle les constituants apportés n'ont pas les mêmes effets sur les propriétés des sols. Mais les mythes associés à la matière organique ont la vie dure ! C'est certainement aussi l'occasion de repenser l'utilisation globale des matières fertilisantes disponibles, surtout dans une période où la teneur des matières organiques des sols tend à diminuer, sauf dans des pratiques particulières, et où le concept de crédit de carbone prend du poids dans les réflexions environnementales citoyennes.

3. Les spécificités biogéochimiques des ions phosphate, potassium et magnésium, base des méthodes d'estimation des formes phytodisponibles présentes dans les terres.

3.1. Les caractéristiques biogéochimiques essentielles de P, K et Mg.

Le phosphore est présent dans les sols essentiellement sous forme d'ions orthophosphates, c'est à dire d'anions alors que le potassium et le magnésium sont des cations. Le devenir du premier sera donc sous la dépendance soit de charges positives portées par des cations ou par les surfaces des constituants des terres soit des éléments Al, Fe et Ca avec lesquels les phosphates forment des composés dont les liaisons chimiques avec les éléments métalliques sont à forte énergie. Le destin des seconds dépend des charges négatives portées par des anions et surtout par les

surfaces des constituants des sols, en particulier par celles des argiles minéralogiques.

Tout apport de ces éléments sous une forme soluble-eau dans les terres se traduit par une diminution du potentiel chimique de ces éléments apportés, donc par une diminution de leur disponibilité, du fait de précipitations chimiques pour P, de mécanismes d'adsorption pour les cations. Les éléments ainsi apportés par les matières fertilisantes soluble-eau quittent, sous forme ionique, la phase liquide des terres pour s'associer à des constituants de la phase solide des terres. Les quantités transférées et les vitesses de transfert de ces éléments dans le sens liquide vers solide dépendent de ce qu'il est coutume de nommer le **pouvoir fixateur des terres** pour les différents éléments et qu'il serait souhaitable de déterminer pour proposer des pratiques de fertilisations raisonnées.

A l'inverse, lorsque les plantes prélèvent par diffusion les éléments nutritifs (ou potentiellement toxiques), c'est à dire sont le moteur du transfert solide vers liquide par dissolution de certains composés phosphatés ou par désorption des cations échangeables, le potentiel chimique en solution de ces éléments diminue moins qu'il ne le ferait si les éléments transférés dans les plantes ne provenaient que de la solution, c'est à dire sans la présence universelle de ces mécanismes.

3.2. Les formes mobiles et phytodisponibles des éléments présents dans les terres.

Les formes mobiles sont celles susceptibles de se déplacer soit dans un profil soit dans un bassin versant. Dans le profil il s'agit des formes en solution alors que dans un bassin versant il peut s'agir, en raison des processus d'érosion, de formes en solution ou de formes particulières. Les formes biodisponibles (ou phytodisponibles, ou assimilables), sont les formes susceptibles de contribuer, sans transformation chimique, à l'alimentation minérale des cultures. La biodisponibilité va qualifier la propriété d'une certaine quantité de minéraux, dans un contexte pédologique donné, à passer sous des formes assimilables dans la solution du sol, dans un laps de temps compatible avec les besoins nutritifs de la végétation. L'estimation de la quantité biodisponible de minéraux nutritifs se fait en routine avec des analyses de terre.

Dans le cas du phosphore, l'objectif de ces analyses est de dissoudre, dans des réactifs plus ou moins spécifiques et parfois assez arbitraires, les formes les plus solubles, donc jugées potentiellement les plus phytodisponibles. De manière globale, les réactifs chimiques les moins agressifs pour les constituants des sols, procurent des indicateurs de fertilité phosphatée plus informatifs que les réactifs agressifs.

Dans le cas des deux cations K^+ et Mg^{++} , l'objectif est de déterminer les quantités des ions K^+ et Mg^{++} qui sont échangeables contre un autre cation, le plus souvent l'ammonium (Quemener, 1988).

En tout état de cause, l'analyse chimique conventionnelle n'a pas un lien très étroit avec les phénomènes naturellement en oeuvre au champ. Néanmoins, le

grand nombre de références simultanées [teneur du sol, réponse des cultures] accumulées sur les essais au champ permet de positionner des plages de « risque ». Actuellement, seules des méthodes plus élaborées, non utilisées en routine, techniques isotopiques pour P ou de désorption pour K et Mg, permettent d'accéder aux paramètres contrôlant effectivement la mobilité des ions phosphates dans les systèmes terre-eau (Morel *et al.*, 2000 ; Pellerin *et al.* 2001).

Les résultats d'une analyse de terre pratiquée en routine, sont donc des indicateurs nécessitant une grille d'interprétation, c'est à dire un référentiel où doivent être consignées les corrélations liant soit quantités d'élément extraites et quantités prélevées au champ ou rendement des différentes cultures, soit quantités extraites et comportement des cultures recevant des matières fertilisantes. Le COMIFER, et tout particulièrement les acteurs du groupe PK, se sont grandement employés (Comifer, 1993 ; Comifer, 1997 ; Le Souder, 2001) à établir de tels référentiels en analysant les multiples essais de moyenne et longue durée disponibles en France.

4. Les fonctions physiologiques essentielles des éléments P, K et Mg dans la plante.

On se contente de rappeler que :

- ces trois éléments sont des éléments essentiels et que aucun des trois n'est écotoxique sous sa forme ionique. C'est pourquoi rien ne peut autoriser les adeptes des cultures sans produit de synthèse à affirmer de manière péremptoire en parlant de l'engrais : **poison qui tue** ! De plus, même apportés aux sols en quantités très nettement supérieures aux quantités prélevées par les cultures, aucun de ces éléments ne provoque de modifications physico-chimiques irréversibles des terres qui rendraient ces sols ultérieurement impropres à la production végétale.

- le phosphore est un des éléments strictement indispensables à la vie et qu'il ne peut être remplacé par aucun des autres éléments chimiques de notre planète. Il est, essentiellement sous forme d'ions phosphate, indispensable pour assurer : (i) via l'ATP, les transferts d'énergie au sein de tous les organismes vivants ; (ii) les processus respiratoires, via DPN – DPNH₂ ; (iii) les reproductions conformes des organismes vivants via l'ADN et l'ARN.

- le potassium est indispensable à la production végétale dans la mesure où il contrôle le métabolisme des sucres et régule la pression osmotique intracellulaire, influençant, entre autres mécanismes, l'ouverture stomatique (Muson, 1985 ; Bennet, 1993). Il est également impliqué dans la production de l'ATP.

- le magnésium est tout d'abord l'indispensable élément central des molécules de chlorophylle. Il est, de plus, impliqué dans de nombreuses enzymes de transphosphorilation (Bennet, 1993).

Ces rappels suffisent à illustrer que :

- l'apport de ces éléments aux plantes, en fonction de leurs besoins, est le moyen de valoriser au maximum le potentiel génétique des couverts végétaux ;
- les fonctions de ces éléments sont intimement liées ;
- et que, en conséquence, les pratiques de fertilisations doivent être conçues comme un tout qui devrait imposer une analyse systémique de l'ensemble des éléments nécessaires à la satisfaction des besoins des plantes pour atteindre le rendement quantitatif et/ou qualitatif cible.

Cependant, force est de reconnaître que la gestion de l'offre en ces éléments, à côté de l'azote à ne jamais oublier, et son ajustement synchrone aux besoins des couverts végétaux, n'est pas forcément chose simple, les besoins dépendant des espèces cultivées, des techniques culturales mises en œuvre, des propriétés physico-chimiques et biologiques des sols et du climat. De plus P, K et Mg appliqués pour atteindre les niveaux désirés des récoltes sont susceptibles de se déplacer, soit sous forme particulaire (P et K) par érosion, soit sous forme dissoute (K et Mg) par lessivage, vers des compartiments des écosystèmes autres que celui où l'agriculteur les a placés. Ces éléments seront alors perdus pour l'agroécosystème et leur destin inapproprié peut conduire la puissance publique à imposer des contraintes réglementaires générales destinées à éviter les transferts inopportuns. La difficulté pour l'agriculteur est donc de réussir à eutrophiser la production végétale sur terre sans eutrophiser, voire contaminer, des compartiments autres non cible des apports.

C'est pourquoi il importe de mettre en œuvre, chaque fois que nécessaire et pour chaque élément séparément, tous les moyens disponibles pour d'une part connaître les besoins des différents couverts végétaux se succédant sur une parcelle, voire dans un parcellaire ou un bassin versant, et d'autre part quantifier l'offre du système sol-matière fertilisante pour les différents couverts possibles.

Comprendre la variabilité des besoins des productions agricoles pour répondre à la diversité des situations.

De 1980 à nos jours

1. Le contexte socio-économique

Cette période est caractérisée par des préoccupations économiques fortes au niveau de l'agriculture. Depuis les années 70 et les chocs pétroliers, la rentabilité de la production agricole décroît, en raison d'une part de l'augmentation du coût des intrants, et d'autre part de la diminution du prix des produits agricoles associée à des surproductions locales affectant de façon variable les productions, toutes contraintes qui conduisent à l'amplification du «ciseau des prix».

L'inquiétude des producteurs grandit encore au début des années 1990 en raison de l'annonce d'une nouvelle PAC comportant une diminution des aides «au volume produit», diminution qui aurait pour conséquence directe une moindre rémunération de l'agriculteur. Cette inquiétude latente, toujours d'actualité, conduit nombre d'agriculteurs à s'interroger sur les possibilités de réduction des charges opérationnelles supportées par les productions végétales, en particulier sur ce que l'on a appelé les «engrais de fond».

Cette période est aussi caractérisée par la recherche de nouvelles connaissances sur la fertilisation. Les enseignements collectés à partir des expérimentations PK de longue durée commencent à être partagés. Et cette réduction des marges d'ignorance permettait alors de dégager des marges de progrès économiques possibles sur ce poste d'intrants en en raisonnant davantage l'utilisation.

Sur le terrain, les situations, entre régions et départements, étaient alors très variables. Cette variabilité résultait selon les cas, des efforts locaux de conseillers agricoles motivés, de la réussite d'opérations de la Relance Agronomique, ou de la remise en cause locale, par les agriculteurs eux-mêmes, de concepts de fertilisation qui paraissaient dépassés par les faits. Certains prescripteurs constataient la diffusion de conseils exagérés en décalage avec la pratique.

Les prescripteurs et les chercheurs vont alors travailler ensemble sous l'égide du COMIFER en se fixant deux objectifs : d'une part d'examiner et d'analyser les faits et d'autre part rénover, en tant que de besoin, certaines recommandations de fertilisation P et K. Les questions pressantes des agriculteurs confrontés au quotidien au contexte économique ont alors conduit à une accélération obligeant à rendre plus concrets, donc plus fonctionnels, les résultats des discussions. Simultanément, le concept d'agriculture durable fait son apparition dans des textes officiels français et européens, alors que le souci des «générations futures» et la vision «patrimoniale» de la terre pour certains impliquent le positionnement de garde-fous.

2. La méthode COMIFER développée pour le «raisonnement des fertilisations P et K»

2.1. Contexte et objectifs

a) contexte scientifique : mise en place d'essais de longue durée et acquisition de connaissances avérées

Dans les années 1970, différents intervenants sont à l'origine d'essais PK de moyenne et/ou longue durée : soit individuellement l'INRA, la SCPA, Grande Paroisse,..., soit par des collaborations de plusieurs partenaires, comme les instituts techniques dont l'ITCF et l'AGPM, certains laboratoires, des CETA, des Chambres d'Agriculture, les firmes productrices d'engrais, ... Le cadre des réflexions a *de facto* constitué les prémices du COMIFER : on parle alors de protocole COMIFER. D'autres essais, comme celui de Grignon, mis en place en 1875, sont beaucoup plus anciens.

Les protocoles de ces essais sont simples : ce sont des régimes pluriannuels de fumure à doses croissantes, comportant donc des effets cumulatifs. Le principal intérêt de ces essais est leur nombre très important et leur répartition couvrant des rotations et des milieux très différents. Les synthèses réalisées au début des années 1990 portaient sur 92 essais P et 110 essais K.

La recherche scientifique, avec les équipes INRA et associés (Bosc, Blanchet, Boniface, Fardeau,...) pour P et K, et celle du pôle SCPA d'Aspach, pour K et Mg, publie des informations ayant trait principalement à :

- la structure et l'organisation de P et de K dans les constituants des terres ;
- les limites de l'effet «vieille graisse» ;
- la signification de l'analyse de terre, en particulier la limite des indicateurs classiques sans pour autant proposer de nouveaux outils.

Les travaux du COMIFER des années 1980-1990, et en particulier l'analyse de multiples essais de longue durée ayant reçu des doses croissantes d'engrais minéraux (Le Souder, 2001), ont permis de démontrer, sur la base de résultats expérimentaux de plein champ :

- que la réalité de la vieille graisse était pour le moins discutable ; ce qui permettait à Bosc (1988) d'énoncer que «la vieille graisse est d'autant plus efficace qu'elle est plus jeune», une manière élégante de signifier à un agriculteur qu'il a tout intérêt à ne pas faire «vieillir» ses engrais minéraux P et K dans ses terres.

- qu'il n'y avait pas de risque de non durabilité à piocher dans **le fonds des héritiers**.

L'aphorisme de Bosc (1988), complété par les informations de Castillon (2001), suffisent à résumer l'état des connaissances actuelles sur la vieille graisse phosphatée et potassique.

b) Définition d'objectifs et lancement des travaux de formalisation d'une méthode opérationnelle.

A partir de 1991, le groupe PK du COMIFER, composé de membres d'origines diverses, souvent partie prenante des essais de longue durée, se réunit fréquemment, dans l'optique d'organiser les connaissances acquises à l'occasion de l'analyse de ces essais, et d'en déduire un mode de raisonnement opérationnel adapté à l'ensemble des pratiques agricoles de cette période.

Rappelons le cadre de la méthode présentée dans l'avertissement du document publié (COMIFER, 1993) dans lequel il est précisé que «le raisonnement de la fertilisation phosphatée et potassique des grandes cultures proposé s'inscrit dans le contexte actuel où l'agriculteur, sous le poids des contraintes économiques, cherche à limiter les coûts de production et à privilégier la rentabilité immédiate : l'application des principes élaborés par le groupe de travail tente à concilier la maîtrise des coûts de production et la gestion de la fertilité phosphatée et potassique du milieu à moyen terme». Le groupe PK considère alors que **«l'objectif de la fertilisation est de satisfaire les besoins nutritionnels des plantes en complétant l'offre du sol en éléments minéraux dans des conditions économiquement rentables»**, proposition immédiatement validée par l'ensemble des acteurs du COMIFER. Cette approche illustre que les stratégies sécuritaires antérieures d'assurance du rendement brut n'étaient plus d'actualité, aussi bien pour des aspects économiques associés à la production que pour les aspects environnementaux.

La méthode de raisonnement, explicitement intitulée **«Aide au diagnostic et à la prescription»**, devait définir une méthodologie, et ses limites, tout en laissant beaucoup de place à l'adaptation régionale.

2.2. Les grands principes du raisonnement actuel des fertilisations P et K des grandes cultures

a) Les cultures ne se comportent pas toutes de la même façon, ce qui impose la prise en compte de la notion d'exigence des cultures

L'analyse des rendements de successions de cultures, conduites avec et sans apports de P et/ou K, révèle des différences significatives de diminution relative de rendements en fonctions des cultures. L'essai P de SEUZEY (55) (figure 1) montre que les diminutions de rendements, exprimées en %, sont respectivement plus fortes pour le colza, que pour l'orge, et plus pour l'orge que pour le blé.

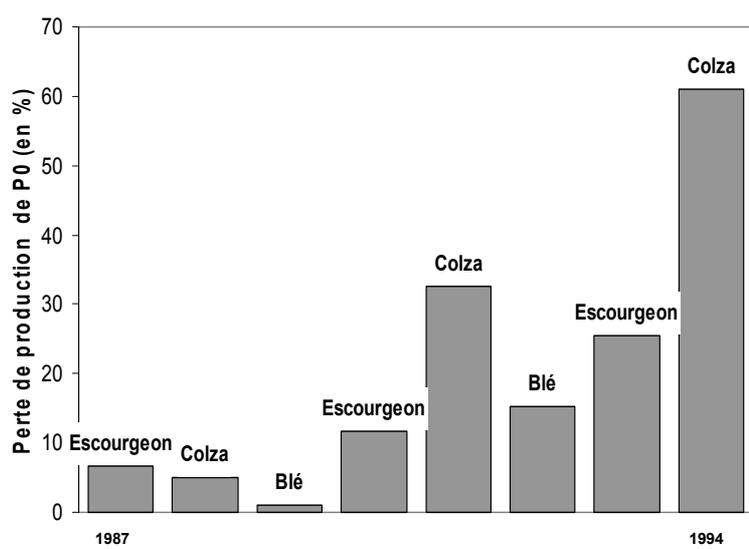


Figure 1 : Perte de production du traitement P0 (absence de fumure) par rapport au traitement P1 (70 kg P2O5/ha/an) sur l'essai P de SEUZEY (55) (Ch.Agriculture 55, SAS, ITCF)

L'essai K de St Jean sur Moivre (51) souvent présenté (figure 2) permet d'observer des résultats similaires.

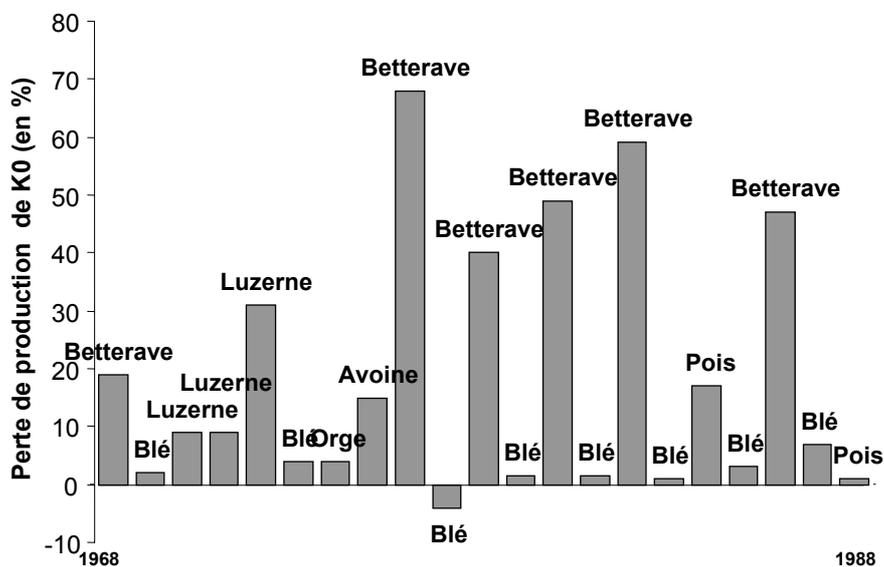


Figure 2 : Perte de production du traitement K0 (absence de fumure) par rapport au traitement K1 (100 kg K2O/ha/an) sur l'essai de St Jean-sur-Moivre (51) (SCPA).

Ainsi, pour un état nutritif proche (années successives), la diminution de rendement est beaucoup plus forte pour la betterave sucrière ou le colza que pour le blé. Les cultures ne se comportent pas de la même façon vis-à-vis d'un même état nutritif du sol. On retrouve ici une caractéristique majeure des cultures : la sensibilité des espèces à la «richesse» du milieu, également bien connue pour les oligo-éléments. Et c'est ainsi qu'est introduit le **concept d'exigence des cultures** vis à vis d'un élément nutritif donné.

Une culture exigeante est définie comme une culture ayant une faible capacité à extraire du sol les quantités d'éléments nécessaires à la satisfaction de son besoin (définition Glossaire COMIFER). L'exigence est donc un critère relatif entre espèces. Les propriétés des plantes expliquant leur exigence ne sont pas encore bien connues. On considère que les plantes exigeantes ont une faible capacité à extraire du sol les quantités d'éléments nécessaires à la satisfaction de leurs besoins. Les explications résident certainement d'une part dans le système racinaire, sa forme, son volume, et son «agressivité», voire aussi la durée et l'intensité des phases de prélèvement intensif, et d'autre part dans l'influence de l'état de nutrition de la plante sur le mode d'élaboration de son rendement (racine, grain, tige, feuilles).

La méthode retenue pour prendre en compte ce critère a été de calculer et de comparer, selon les cultures, les diminutions moyennes de rendement en régime de non-apport. Des discussions ont eu lieu, au sein du groupe PK du COMIFER, sur la base de synthèses, sur les effets régionaux, de sol et de climat, mais aussi de niveau de production.

Un tableau de répartition des cultures en 3 classes d'exigence pour P et pour K a été bâti sur cette base. Le positionnement des cultures a été réalisé expérimentalement avec des données en quantité variable avec les espèces, certaines étant peu représentées ; c'est pourquoi la répartition entre classes pourrait évoluer avec l'acquisition de nouvelles références.

L'espèce cultivée est donc le premier facteur à prendre en compte pour apprécier les besoins en engrais P et K. C'est pourquoi il importe toujours de chercher à quelle culture on s'adresse avant de regarder la teneur du sol. Ce critère correspond à une avancée fondamentale dans le raisonnement de la fertilisation P et K : à chaque espèce et chaque rotation son régime de fertilisation, à la différence de l'ancien mode de raisonnement, construit autour de la culture de plus forte exigence.

b) Le conseil de dose nulle, ou impasse, est une préconisation comme toute autre

Les engrais P et K, à la différence d'autres intrants telles les matières organiques aux fonctions multiples, sont appliqués pour compléter l'offre nutritive du sol. La difficulté est, bien sûr, de disposer d'outils analytiques permettant d'évaluer avec suffisamment de précision l'offre du sol. Les résultats les plus frappants des essais de longue durée sont le grand nombre de situations (lieu x année) pour lesquelles il n'est pas apparu de différences

significatives de rendement entre les parcelles fertilisées et les parcelles non fertilisées en P et/ou K ; il n'était donc pas nécessaire, pour satisfaire les besoins des cultures dans nombre de ces essais, d'apporter un fertilisant P ou K. Cette situation est, bien sûr, plus fréquente lorsque l'essai est mis en place sur une parcelle «riche» au départ. Sur l'exemple ci-contre de l'essai PK de Guichainville (27) (figure 3), les rendements sont égaux (certes variables mais non significativement différents) sur 20 ans, que l'on apporte 0, 60 ou 120 kg K₂O/ha/an. L'idéal serait d'avoir les bons indicateurs pour prévoir avec certitude cette situation, ce qui n'est pas toujours le cas actuellement. Le terme impasse est utilisé ici dans le sens d'une année sans apport, terme bien compris et utilisé des agriculteurs.

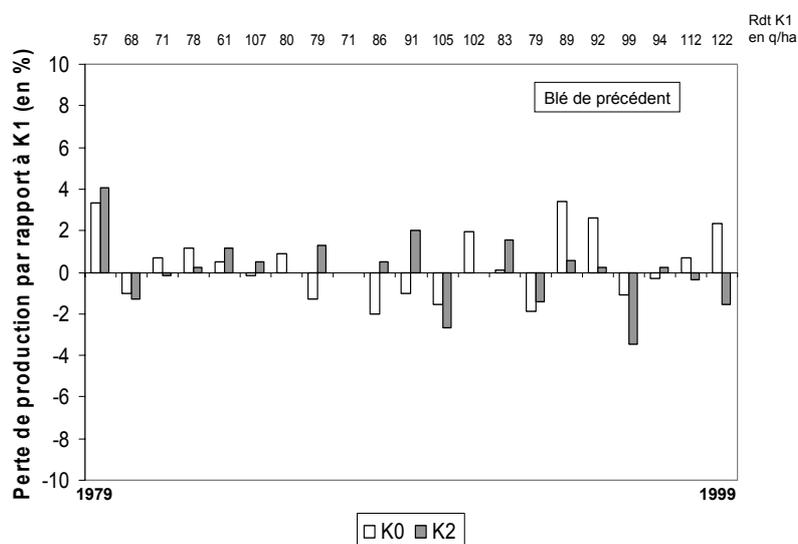


Figure 3 : Perte de production en blé de K0 et K2 par rapport à K1 pendant les 20 premières années de l'essai PK de Guichainville (27) (GRCETA Evreucin, ITCF, SAS) – Teneur en K2O éch. au départ : 240 mg/kg – rotation Pois-Blé-Blé – essai comprenant 3 soles

Dans quelles conditions l'agriculteur peut-il réaliser une impasse sans risque ?

L'impasse doit se raisonner, et certains indicateurs sont à notre disposition pour nous aider. Le coût actuel des engrais est encore relativement trop peu élevé pour se permettre de prendre le risque d'une diminution sensible de rendement, surtout pour une production à forte marge. L'impasse ne peut pas être conseillée aussi fréquemment sur toutes les cultures. Concernant le sol, le conseil de dose nulle dépendra de la biodisponibilité de l'élément dans le sol estimée sur la base de 3 critères :

- ✓ l'analyse de terre : un travail de dépouillement des essais de longue durée a été réalisé au sein du COMIFER de façon à proposer, par type de sol, un seuil T_{impasse} au-delà duquel l'impasse est possible sans risque.
- ✓ le passé récent de fertilisation : en particulier, l'impasse annuelle est conseillée si la fertilisation passée était fréquente, ce qui indique qu'il peut rester dans le sol suffisamment de P ou de K rapidement disponible. Du fait de ce critère, les impasses sont conseillées sur de faibles durées ; on ne dispose pas encore d'indicateurs pour prévoir les 20 ans à Guichainville !
- ✓ la restitution des résidus de culture (pour K) : les résidus enfouis améliorent la disponibilité en K rapidement disponible pour les plantes.

Les essais de longue à très longue durée ont aussi démontré que l'impasse a de très faibles effets sur la teneur à l'analyse de terre. Réaliser une impasse durant 1 ou 2 ans de suite n'entraîne absolument pas de chute catastrophique de la teneur du sol ; elle ne diminue en moyenne la teneur que de 5 à 10 mg (K_2O échangeable) kg^{-1} ou de 5 à 10 mg (P_2O_5 Joret-Hébert) kg^{-1} (en sol limoneux) (Le Souder, 2001), c'est à dire de quantités ne permettant pas d'observer de différences significatives au niveau du champ.

c) La structure actuelle de la méthode COMIFER pour P et K

Cette méthode comprend un calcul de dose ainsi que des conseils sur les modalités d'apport. Le calcul de dose repose sur **la combinaison de 4 critères** de raisonnement, la dose étant calculée sur la base des exportations (grille de calcul). Ces 4 critères hiérarchiquement organisés sont :

- l'exigence des cultures ;
- la teneur de l'élément extractible à l'analyse de terre ;
- le passé récent de fertilisation P et/ou K ;
- la gestion des résidus de culture du précédent (pour K).

3. Diffusion du raisonnement

a) Fertilisation des grandes cultures

La méthode est publiée en 1993 accompagnée de proposition de teneurs-seuils par type de sol à régionaliser. Cette publication a soulevé des demandes exprimées principalement par les laboratoires d'analyse de terre. Il importait de :

limiter les effets de marche autour du T_{impasse} ,
 proposer des doses inférieures aux exportations en sol à teneur élevée pour les cultures de forte exigence,
 proposer des abaques plutôt que des teneurs-seuils par type de sol.
 Ces demandes ont été retenues et prises en compte en donnant lieu à une modification de la grille de calcul et à la parution d'une deuxième brochure en 1997 (COMIFER, 1997).

En matière de **fertilisation magnésienne**, les travaux n'ont pas encore réellement commencé au sein du groupe, ils devraient démarrer à partir de cette année.

b) Le cas particulier de l'herbe

L'analyse de terre présente certaines limites et contraintes sous couvert de prairie. De nombreux travaux, orientés sur un indicateur plante, ont été réalisés sur prairie, pour P et K, associés à N.

En collaboration avec d'autres organismes tels l'Institut de l'Élevage, l'ITCF, l'INRA, l'ACTA, de nombreuses Chambres d'Agriculture, le COMIFER a publié en 1999 «**L'analyse d'herbe : un outil pour le pilotage de la fertilisation phosphatée et potassique des prairies naturelles et temporaires**». La méthode de prélèvement, ainsi que l'interprétation des indices I_P et I_K (rapports de teneurs de N et de P, et de N et de K) des couverts y sont présentés.

c) Utilisation de la méthode de raisonnement PK développée par le COMIFER sur les grandes cultures

✓ En France

Le transfert d'une innovation, en particulier d'une méthode, demande du temps et l'implication de tous les acteurs intermédiaires pour pouvoir concerner *in fine* les agriculteurs. Malgré un certain nombre de freins apparus dans le passé, des signes d'espoir apparaissent nettement actuellement. En effet cette méthode de raisonnement, associée au COMIFER, est maintenant prise en compte et citée dans un grand nombre de logiciels de calcul de plans de fumure, ainsi que de laboratoires d'analyses de terre. Le logiciel REGIFERT, créé par l'INRA, avec ses algorithmes mais un paramétrage libre, va tout à fait dans cette voie COMIFER : les formules de calcul sont partiellement différentes mais les préconisations sont très proches (selon le paramétrage). La méthode est également citée dans certains cahiers des charges de production. Elle est citée aussi dans le recueil CORPEN, Programme d'action pour la maîtrise des rejets de phosphore provenant des activités agricoles, 1998, comme base des orientations en matière de raisonnement de la fertilisation, en cas de situation à risque en matière d'eutrophisation (actuellement non encore suivi de réglementation).

✓ Et à l'étranger ?

En 1997, nous avons fait le point des préconisations en matière de P et K dans nos pays voisins (COMIFER, 1997).

Au Royaume Uni, les conseils sont donnés directement en quantité P ou K par culture, en fonction de la teneur à l'analyse de terre (Olsen pour le phosphore). L'impasse y est donc conseillée au-delà d'un seuil, et les doses conseillées ne sont globalement pas très élevées.

En Allemagne, les conseils sont exprimés en fonction des exportations, avec des majorations possibles, mais aussi le conseil de dose nulle, selon la teneur

du sol (les méthodes d'analyse de terre sont différentes de celles pratiquées en France).

En Suisse, les conseils de fumure ont été largement revus à la baisse depuis cinq à sept ans.

Ces préconisations, même si leurs présentations diffèrent des nôtres (moins de critères et donc de cases dans les grilles), vont vraiment dans le même sens en matière de quantité à apporter.

Comprendre la dynamique des éléments nutritifs pour assurer, dans le futur proche, une gestion durable de notre environnement

1. Gestion durable de notre environnement et gestion raisonnée des fertilisations P, K et Mg

L'apport d'engrais a souvent été la première pratique agricole dénoncée par des citoyens parlant de dégradation de l'espace rural. C'est pourquoi il importe, ici, de chercher à savoir si les pratiques de fertilisation P, K et Mg peuvent induire des dégradations quantitatives et/ou qualitatives irréversibles de nos ressources naturelles collectives que sont l'air, le sol et l'eau qui sont tout à la fois éléments de l'environnement de la parcelle cultivée susceptible de recevoir des matières fertilisantes et vecteurs de matière vers d'autres unités géographiques.

L'agriculteur en agissant quantitativement et temporellement, sur les flux de matière et d'éléments, est un des acteurs "gestionnaires" majeurs de l'environnement. Une gestion durable des flux d'éléments minéraux vers la culture, et son environnement, impose à l'homme agricole d'organiser ces flux de façon à ne pas dégrader la qualité de l'environnement, c'est à dire en assurant le maintien, voire l'amélioration, de caractéristiques "satisfaisantes" (avec ce que cela peut présenter de subjectif) de l'air, du sol et de l'eau. Et ceci dans le cadre d'une production agricole elle-même durable, c'est à dire en mesure d'assurer maintenant mais aussi sur le long terme, en quantité et en qualité, l'alimentation de la société – première priorité -, voire la satisfaction des besoins en autres biens (fibres, matériaux, énergie, etc. ...).

Prévoir le long terme, pratique exotique pour les acteurs des bourses mondiales qui jouent au jour le jour sur le cours des produits alimentaires, est particulièrement indispensable pour les éléments P et K dont la mobilité dans les sols est beaucoup plus limitée que celle de N. Pour ces éléments, ce sont en fait des effets cumulés sur le long terme qui pourraient poser problème.

L'objectif de ce paragraphe est de présenter l'état des réflexions et des apports du groupe PKMg du COMIFER ainsi que d'aborder quelques questions d'avenir.

2. Thématiques environnementales associées à des fertilisations P, K et Mg

2.1. L'air.

A l'exception de formes pulvérulentes (scories,...), devenues très exceptionnelles dans la pratique, qui peuvent donner des poussières sans risque chimique avéré, ou des odeurs liées aux adjuvants de fabrication, les formes chimiques usuelles utilisées comme matières fertilisantes pour P, K et Mg n'étant pas volatiles, ces éléments ne sont pas porteurs de risques environnementaux dans l'air.

2.2. Le sol

Des fertilisations très excédentaires en K et totalement déséquilibrées, appliquées dans des milieux non cultivés dans lesquels on constate une diminution significative des teneurs des matières organiques, peuvent entraîner une dégradation de la structure du sol en raison du "pouvoir dispersant" du cation monovalent K (Pernes-Debuyser & Tessier, 2004). Cependant cet exemple n'est qu'un cas d'école, et les essais planétaires de très longue durée, plus que centenaires, ne font pas apparaître d'effet négatif des éléments P, K et Mg sur les propriétés intrinsèques des sols. Parler de "stérilisation des sols par l'usage d'engrais de synthèse" relève du fantasme tant qu'on se place dans le cadre d'une gestion équilibrée des matières fertilisantes destinées au sol : engrais minéraux, amendements organiques et basiques, résidus de cultures, déjections animales.

Certaines filières de fabrication d'engrais minéraux peuvent conduire à des contaminations induites des sols. Une question récurrente est celle de la contamination des sols par le cadmium, conséquence de l'utilisation, dans les process industriels, de minerais phosphatés contenant du cadmium. En l'absence de solution industrielle économiquement supportable permettant de transférer le cadmium dans les résidus ultimes de production au cours des transformations chimiques, on ne peut actuellement que recommander l'utilisation des phosphates naturels les moins contaminés et surveiller, dans les sols et les végétaux, les risques d'accumulation de Cd. Néanmoins, l'existence des essais de fertilisation minérale centenaires européens, ou américains, ayant reçu des engrais phosphatés connus permet de constater que la teneur du Cd dans les plantes est bien plus liée au pH du sol qu'au contenu de Cd dans les engrais.

2.3. L'eau

On ne connaît aucun effet négatif résultant du transfert de K et de Mg vers les eaux de surface ou des eaux profondes. Ces éléments omniprésents dans notre environnement ne sont pas connus comme agents polluants.

P, sous forme orthophosphate la seule forme présente à l'état naturel, n'est jamais écotoxique et n'est donc pas *sensu stricto* un élément polluant. Mais sa présence dans l'eau peut, au-delà d'une certaine concentration, permettre une croissance incontrôlée et non souhaitable d'algues et de macrophytes (eutrophisation) dans les eaux de surface, surtout quand elles sont stagnantes (Pellerin *et al.*, 2005). Le seuil de concentration susceptible de déclencher l'eutrophisation se situe, selon les conditions climatiques et écologiques, entre 20 à 50 mg P-PO₄ m³. C'est dire qu'il peut suffire, à l'occasion d'un épisode pluvieux durant lequel 20 mm d'eau ruisselleront en surface, de perdre en solution 4 g de P-PO₄ par ha pour atteindre, à l'exutoire, le seuil le plus bas et 10 g de P pour le seuil le plus haut ; la "dangerosité" est alors essentiellement un problème de dilution.

Les risques de transfert de P, à partir des terres agricoles vers les eaux, ont retenu l'attention du groupe PK qui a organisé une journée (26/05/2003) sur ce thème. L'agriculture n'est certes pas le seul "contributeur" de P aux eaux de surface, mais son poids relatif tend à augmenter dans un contexte où les eaux usées urbaines sont, en raison du durcissement des réglementations nationales ou européennes, de plus en plus déphosphatées.

3. Etat des connaissances et évolution des moyens d'investigation

3.1. Dynamique des éléments minéraux P et K dans les agroécosystèmes

Les dernières avancées concernant la dynamique de P et K dans les agroécosystèmes se situent soit à l'échelle de la rhizosphère (Hinsinger *et al.*, 2005) soit à celle du peuplement végétal (Pellerin *et al.*, 2001, Morel, 2003).

Les effets rhizosphériques, dus spécifiquement à la plante, sur la mobilité des ions sont toujours estompés par le pouvoir tampon des terres. C'est pourquoi, à l'exception du cas des mycorhizes, la quantification de ces effets, en matière de nutrition annuelle effective des plantes de grande culture, reste un sujet de recherche.

La mobilité des éléments minéraux dans les terres est sous le contrôle des équilibres dynamiques permanents existant entre les éléments en phase solide et ceux dans la solution du sol, aussi bien pour le lessivage que pour l'absorption racinaire ou encore la fixation temporaire et, généralement réversible, des éléments nutritifs apportés avec les matières fertilisantes. La répartition, entre phase solide et phase liquide, de la fraction potentiellement mobile des éléments est l'expression du pouvoir tampon de la terre pour chaque élément. Ce pouvoir tampon dépendant des caractéristiques physico-chimiques du sol (silicates et argile pour K & Mg, oxydes et hydroxydes de Fe & Al ainsi que carbonates pour P ...) est la principale variable explicative de la capacité des sols à retenir ou céder des éléments minéraux.

Le pouvoir tampon des sols n'est ni illimité ni une caractéristique permanente invariable d'une terre. Quel que soit l'élément P, K ou Mg, il décroît lorsque la teneur de l'élément présent sous sa forme mobile dans la terre croît. C'est ainsi que l'accumulation de P liée à des apports massifs en surface conduit à une solubilité croissante du P et à une descente progressive en profondeur du front d'enrichissement, avec à terme un risque significatif durable de transfert vers les eaux (Morel *et al.*, 2004). Une gestion raisonnée, en tenant compte en particulier du pouvoir tampon, de la teneur des phosphates et du potassium, dans les sols reste donc recommandée.

L'estimation du pouvoir tampon, via des modèles d'équilibre utilisant des variables collectées avec des analyses de terre de routine (argile, carbonates, carbone organique, ...) semble maintenant proche de l'application. La situation d'équilibre du système sol-solution à un instant est accessible par une mesure de la quantité d'éléments minéraux passant dans la solution, indicateur aussi bien de la biodisponibilité à très court terme que de la mobilité vers les autres compartiments de notre environnement. Ces nouveaux indicateurs (teneur en solution et pouvoir tampon) sont donc à la fois d'intérêt agronomique et environnemental. Leur formulation en méthodes normalisée est une tâche à terme de quelques années.

La recherche d'un recyclage optimal des éléments nutritifs contenus dans nos déchets, et l'ambition d'une protection raisonnée de notre environnement, ont favorisé le développement d'études sur la biodisponibilité du P de divers déchets et effluents. Les résultats obtenus ont révélé que cette biodisponibilité dans beaucoup de ces produits était souvent plus élevée que ce qui était autrefois avancé, en particulier pour le P des effluents d'élevage porcin ou avicole (Morel *et al.*, 2002 ; Linères et Morel 2004). Le compostage semble par contre réduire la biodisponibilité du P, en particulier pour les boues d'épuration (Morel *et al.*, 2002 ; Linères et Morel, 2004).

3.2. Production agricole et besoins en éléments minéraux

Pendant des décennies, des essais agronomiques mettant en regard des traitements et des rendements ont côtoyé des travaux plus analytiques identifiant divers effets physiologiques de carences (Mengel & Kirkby, 1987).

Depuis quelques années, les approches consistent, plus que par le passé, à chercher à regrouper les connaissances acquises, au sein de modèles descriptifs du comportement des cultures, dans les conditions du champ, en explicitant leur état nutritionnel. Ce type de démarche est nécessaire pour hiérarchiser l'importance de chacun des mécanismes identifiés comme influençant le comportement des cultures puisque les conséquences d'une contrainte donnée varient avec le contexte dans lequel elle va s'exprimer. Disposer de modèles de comportement permet aussi de quantifier les probabilités d'effets suivant les probabilités relatives des divers "risques" climatiques ou induits par la combinaison des pratiques agricoles.

C'est ainsi que, chez le maïs, le blé ou le tournesol, une carence en P, conséquence d'une situation dans laquelle, à un instant donné, les possibilités

d'offre du sol ont été inférieures aux besoins des cultures, modifie prioritairement la morphogénèse (Plenet *et al* 2000, Rodriguez, 1998). Les conséquences en sont un retard de développement et une moindre photosynthèse cumulée du couvert du fait d'une interception du rayonnement plus faible qu'en conditions de non carence de P. Il faut encore chercher à préciser les effets d'une carence phosphatée sur la mise en place des composantes du rendement en grains. La carence de K modifie également la morphogénèse mais diminue également le rendement même de la photosynthèse foliaire, probablement en lien avec la régulation de la transpiration.

4. Perspectives et prospective

4.1. Passé récent et temps présent en matière de fertilisations P et K

Les apports moyens de P et de K, toutes sources confondues ont diminué durant la décennie passée (UNIFA, 2004). D'après des traitements des informations disponibles dans la base de données des analyses de terre (BDAT) et issues des laboratoires d'analyse de routine (Abadi 2005), cette réduction ne s'est pas traduite par une baisse visible des teneurs analytiques des terres sur la décennie passée. Ce fait pourrait apparaître contradictoire avec des écrits précédents du COMIFER, démontrant que, sur une parcelle donnée, toute suppression d'apports a pour conséquence une diminution des quantités extraites (Le Souder, 2001). Cette observation est cependant normale dans les conditions où elle a été effectuée. En effet les apports moyens ont diminué sur 13 ans de $140 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$. C'est dire que cette diminution représente globalement une impasse durant deux ans. La précision des mesures, couplée aux problèmes d'échantillonnage des terres, rend impossible toute possibilité de constater une quelconque différence significative dans les quantités extraites.

Cette même étude d'Abadi montre également que la plupart des sols restent à des niveaux de richesse correcte ou élevée voire très élevées, mais avec de fortes disparités locales et régionales. Une vigilance s'impose pour ne pas mettre en péril la durabilité des systèmes de production. L'évolution des bilans à la parcelle peut être très variable suivant les systèmes de production qui peuvent être équilibrés, déficitaires dans quelques grandes cultures céréalières à faible marge, ou systématiquement positifs en raison de la présence d'élevages hors sol recevant de l'extérieur des aliments pour le bétail. Le raisonnement régulier de la fertilisation pour la gestion durable de l'environnement et de la production agricole s'impose toujours et il passe par l'analyse régulière des terres.

4.2. Quelles perspectives pour la gestion durable de l'environnement

Eutrophisation des eaux de surface

Alors qu'un ha de terre agricole contient de 2 à 8 t P, la perte de quelques centaines de g de P, sous forme d'ions PO_4 , peut déjà donner à l'exutoire du

champ une eau dépassant les seuils de risque d'eutrophisation. Mais les risques les plus importants sont liés aux transferts érosifs qu'il faut tout faire pour les limiter. Cela impose d'abord une gestion raisonnée des pratiques culturales à l'échelle de l'année favorisant, à tout moment, l'infiltration de l'eau et la stabilité structurale par un travail adapté du sol, une gestion de l'état calcique satisfaisante et des bilans organiques favorables. L'implantation de bandes enherbées contribue également à limiter les pertes par ruissellement à condition d'en exploiter *in fine* le P par des fauches et exportation des produits récoltés (Pellerin *et al*, 2005). Ces mesures prioritaires de lutte contre l'érosion peuvent être positivement complétées par une limitation de l'accumulation de P dans les sols, voire un destockage, du fait des prélèvements culturaux, dans les situations les plus excédentaires.

Quantification des flux dans les parcelles

Les flux de P à l'échelle de la parcelle sont faibles au regard des quantités totales, de 2 t ha⁻¹ à 8 t ha⁻¹, présentes dans les sols, mais les bilans déséquilibrés se cumulent d'année en année. Pour disposer d'une quantification pertinente des flux parcellaires d'éléments, il convient d'actualiser nos valeurs références des teneurs de P et K, voire Mg, des plantes mais aussi des effluents et de leur biodisponibilité dans ces derniers.

Cette année, le groupe PK du COMIFER vous offre une table de référence des teneurs des éléments P, K et Mg dans les cultures et quelques uns de leurs sous produits. Cette table se veut une image de la situation actuelle. Les teneurs des récoltes actuelles semblent assez souvent inférieures aux "normes" couramment utilisées jusqu'à présent.

Accroître l'efficience de certains systèmes de culture

Ajuster aussi exactement que possible la fertilisation aux besoins des cultures est la première voie pour limiter les risques de carence dans les cultures et d'excès dans les milieux. L'application de la méthode COMIFER, et des outils de raisonnement associés, semble jusqu'à présent s'avérer efficace pour réaliser cet ajustement sans effet négatif sur les rendements. C'est pourquoi il ne semble pas, actuellement, nécessaire modifier les bases des raisonnements. Par contre des aménagements concernant, par exemple, des paramétrages sont toujours possibles.

Dans un objectif raisonné de durabilité impliquant toute la société, il sera souhaitable que tous les déchets et effluents riches en minéraux utiles retournent *in fine* à la terre. La fertilisation minérale serait alors un complément dans les situations à bilan négatif. Dans une certaine mesure, une diminution des teneurs dans certaines récoltes (P des céréales destinées à l'alimentation animale) peut être considérée comme un effet secondaire favorable puisqu'elle conduit à un moindre retour de P par les lisiers.

4.3. Quelles applications pour le futur des recherches en cours ?

La prise en compte récente dans la PAC d'un volet environnemental impliquant le phosphore, mais surtout le développement de la mondialisation,

dont la première conséquence pour les agriculteurs est une diminution effective des prix des produits agricoles, impose plus que jamais de proposer des conseils de fertilisations parfaitement optimisés aboutissant non plus certainement au rendement agronomique maximal mais au rendement le plus rémunérateur. Le groupe PK du COMIFER imagine actuellement trois orientations complémentaires portant sur une amélioration de la pertinence des indicateurs utilisés, la qualification de modèles de comportement des cultures et l'exploitation de base de données régionalisées.

Mise au point d'indicateurs à pertinence opérationnelle accrue

L'estimation des flux potentiels est d'une plus grande importance fonctionnelle que la connaissance, même affinée des stocks. L'estimation des flux passera certainement par la mise en routine de nouveaux indicateurs analytiques descriptifs des équilibres [phase solide - solution de terre] et la mobilité du stock du sol, mobilité dont la clé est pour partie le pouvoir tampon. Cette approche implique d'une part une mise au point méthodologique analytique pour le passage en routine d'indicateurs validés et d'autre part l'acquisition de référentiels d'interprétation de ces futurs indicateurs.

Ce travail vient de commencer dans le cadre d'une collaboration exploratoire INRA-ITB-Arvalis-LDAR. Un référentiel rendement*qualité basé sur les nouveaux indicateurs donnera déjà un meilleur outil pratique de raisonnement car on devrait pouvoir raisonner les besoins de la culture par rapport à un "état tampon" du sol, critère permettant d'extrapoler objectivement les références acquises dans un type de sol vers un autre type de sol sans recommencer les essais culturaux.

La mise au point d'une méthodologie d'essais agronomiques adaptée puis l'acquisition du référentiel prendront encore quelques années. C'est pourquoi la première activité du groupe reste l'actualisation de nos références dans le cadre du raisonnement actuel, avec le souhait de mieux en évaluer l'application et valider les résultats.

Modèles de développement des cultures

L'outil analytique, associé à son référentiel spécifique, ne donnera sa pleine mesure que lorsque des modèles de comportement des cultures lui seront couplés. Ces modèles doivent permettre d'explorer rapidement des situations (changement du climat, de travail du sol,...) sans passer systématiquement par la complexité, et donc le coût, des expérimentations de plein champ.

Utilisation des bases de données nationales et/ou européennes

En complément à l'évolution des outils analytiques et décisionnels, la montée en puissance de la Base de Donnée des Analyses de Terre (BDAT) et du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) du GIS SOL nous laissent espérer une vision plus affinée de l'évolution du patrimoine sol et surtout de ses potentialités agricoles et environnementales.

CONCLUSION

L'introduction et la transposition des principes de la physique, de la chimie et de la biologie à l'agronomie et à la science des sols, en ajoutant un peu de rationalité aux connaissances empiriques séculaires, ont permis de réduire de manière très significative nos zones d'ignorance en matière de pratique de fertilisations P et K des cultures. Elles permettent de conclure, entre autres choses, que les pratiques actuelles de fertilisations raisonnées selon la méthode COMIFER ne mettent nullement en péril la valeur patrimoniale des sols. Des marges de progrès restent possibles en régionalisant encore davantage des informations et recommandations. Les outils les plus récents, et tout particulièrement ceux de la modélisation, sont de plus en plus présents dans ce domaine et continueront de progresser.

Mais l'agriculture n'est pas une science éthérée. Elle est un pan significatif de notre économie, probablement trop souvent oubliée des acteurs du COMIFER, et en tous les cas passée pudiquement sous silence. Or toute modification nationale, européenne et mondiale des politiques agricoles va influencer les pratiques de fertilisation à la parcelle. C'est pourquoi la réforme de Juin 2003 de la PAC (Boiffin *et al.*, 2004) n'a pas, dans ce domaine, fini de nous surprendre et d'appeler de nouvelles questions de gestion à la fois à court terme et à long terme des pratiques touchant aux fertilisations P, K et Mg des cultures que devrait aborder au plus vite le COMIFER.

Références.

Abadi H (2004) *Evaluation du niveau de fertilité phospho-potassique des sols cultivés en France à partir de la BDAT*, Mémoire de fin d'étude ISA Lille 58 p + annexes.

Barber SA (1984) *Soil nutrient bioavailability*, John Wiley and Sons, New York, 398 p.

Barbier G, Trocmé s (1964) Rôle comparé des engrais et des réserves nutritives du sol dans la production des récoltes. *Zeitschrift für Pflanzen, Dungung, Bodenkunde*. 109, 2, 113-120.

Barrow NJ (1980) Evaluation and utilisation of residual phosphorus in soils. *In: The role of phosphorus in agriculture*. Khasawneh FE, Sample EC and Kamprath EJ (eds). Pp. 333-359. ASA. Madison. Wisconsin. ISBN 0-89118-062-1.

Bennet WF (1993) *Nutrient deficiencies & toxicities in crop plants*. American Phytopathological Soc. St Paul. Minnesota. ISBN 0-89054-151-5. 202 p.

Boiffin J, Hubert B, Durand N (2004) La réforme de la PAC de Juin 2003. *In : Agriculture et développement durable. Enjeux et questions de recherche*. INRA. pp 12-16.

- Bosc M** (1988) Enseignements fournis par des essais de longue durée sur la fumure phosphatée et potassique. Essais sur la fertilisation potassique. *In* : Gachon (ed) *Phosphore et potassium dans les relations sol-plante. Conséquences sur la fertilisation*. pp. 403-466. INRA. Paris.
- Boulaïne J** (1995) Quatre siècles de fertilisation, première partie, *Etude et Gestion des Sols*, 2 (3), 201-208.
- Boulaïne J** (1995) Quatre siècles de fertilisation, seconde partie, *Etude et Gestion des Sols*, 2 (4), 219-226.
- Castillon P** (2001) Eléments complémentaires pour la conduite de la fertilisation phosphatée et potassique des cultures. *In* : G Thévenet et A Joubert (eds). *Les nouveaux défis de la fertilisation phosphatée*. Actes du Coll. COMIFER-GEMAS, pp. 141-150. Saint François Blois.
- Comifer** (1993) *Aide au diagnostic et à la prescription de la fertilisation phosphatée et potassique des grandes cultures*, Comifer, Paris, 28 p.
- Comifer** (1997) *Eléments complémentaires à la méthode de raisonnement de la fertilisation PK permettant d'aider à sa mise en oeuvre*, Comifer, Paris, 28 p.
- Corpen** (1998) *Programme d'action pour la maîtrise des rejets de phosphore provenant des activités agricoles, Groupe « programme d'action phosphore », octobre 1998*. Corpen, 54 pages + annexes.
- Daubeny S** (1845) On the distinction between the dormant and active ingredients of the soils. *J. R. Agri. Soc. England*. 7 : 237-245.
- Emsley J.** (2000) *The shocking history of phosphorus. A biography of the devil's element*. ISBN. 0-330-39005-8 Pan Books. London. 336 p.
- Hervieu B** (1996) *Du droit des peuples à se nourrir eux-mêmes*. Flammarion. 135 p.
- Heuzé G** (1862) *Les assolements et les systèmes de cultures*. Hachette. 530 p.
- Hinsinger** (2005) Le sol : ressource en nutriments et biodisponibilité , *In* : *Sols et environnement*, Girard M.C., Walter C., Remy J.C., Berthelin J., Morel J.L. (Eds.) , pp 285-305 - , Dunod, Paris, 816p.
- Hossner ER, Allen ER** (1989) Nutrient availability and element toxicity in lunar derived soils. *In* : DW Ming and DL Henninger (eds) *Lunar base agriculture : soils for plant growth*. pp. 85-92. ASA. Madison. Wisconsin. ISBN. 0-89118-100-8.
- Le Souder C** (2001) Vitesses d'évolution des teneurs dans les sols soumis à des régimes différents de fertilisation d'entretien ou d'appauvrissement. *In* : G Thévenet et A Joubert (eds). *Les nouveaux défis de la fertilisation raisonnée*. Actes du Coll. COMIFER-GEMAS, pp. 109-116. Saint François Blois.
- Linères M, Morel C** (2004) Fertilising value of phosphorus from urban and agricultural organic wastes. *Ramiran 2004 ; 11th international conference of the FAO ESCORENA Network on Recycling of Agricultural , Municipal and Industrial Residues in Agriculture*.p.72.
- Mautner MN, Sinaj S** (2002) Water-extractable and exchangeable phosphate in Martian and carbonaceous chondrite meteorites and in planetary soil analogs. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 66 (17) 3161-3174.

- Mengel K, Kirkby EA** (1987) *Principles of plant nutrition*, IPI Berne, 687 p.
- Morel C, Tunney H, Plénet D, Pellerin S** (2000) Transfer of phosphate ions between soil and solution : perspectives in soil testing. *J. Environ. Qual.* 29, 50-59.
- Morel C, Linères M, Guivarch A, Kvarnström E, Parneadeau V, Nicolardot B, Morel JL** (2002) Phytodisponibilité et valeur fertilisante du phosphore des déchets urbains, Dossier de l'environnement INRA n° 25, pp.35-43.
- Morel C** (2002) Caractérisation de la phytodisponibilité du P du sol par la modélisation du transfert des ions phosphate entre le sol et la solution. Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches (HDR), INPL-ENSAIA Nancy. 80p., www.bordeaux.inra.fr/TCEM.
- Morel C, Cachot C, Martinez J, Peu P, Elsass F, Robert M, Fardeau JC** (2004) Evolution sur 12 ans de la solubilité, mobilité et lixiviation du phosphate dans un sol ayant massivement reçu du lisier. *Etude et Gestion des Sols*, 11, 4, 403-418.
- Muson RD** (1985) *Potassium in agriculture*. ASA. Madison. Wisconsin. ISBN. 0-89118-086-9. 1210 p.
- Newman EI** (1997) Phosphorus balance of contrasting farming systems, past and present. Can food production be sustainable. *Journal of applied Ecology*. 34, 6: 1334-1347.
- Ozanne PG** (1980) Phosphate nutrition of plants. A general treatise. *In: The role of phosphorus in agriculture*. Khasawneh FE, Sample EC and Kamprath EJ (eds). pp. 559-590. ASA. Madison. Wisconsin. ISBN 0-89118-062-1.
- Pellerin S, Morel C., Schneider A., Mollier A., Denoroy P., Jordan-Meille L.**, 2001, Transfert sol-plante des éléments minéraux : avancées des connaissances et perspectives d'application *In* : G Thévenet et A Joubert (eds). *Les nouveaux défis de la fertilisation raisonnée*. Actes du Coll. COMIFER-GEMAS, pp. 129-140. Saint François Blois.
- Pellerin S, Dorioz JM** (2005) Bilan environnemental du phosphore, *In* : *Sols et environnement*, Girard M.C., Walter C., Remy J.C., Berthelin J., Morel J.L. (Eds.) , p.628- , Dunod, Paris, 816p.
- Pernes-Debuyser A, Tessier D** (2004) Soil physical properties affected by long-term fertilization, *European Journal of Soil Science*, 55, 505-512.
- Plénet D., Etchebest S., Mollier A., Pellerin S.** (2000) Growth analysis of maize field crop under phosphorus deficiency. I. Leaf growth *Plant and Soil*, 223 , 117-130.
- Price Waterhouse Coppers** (2002) Bilans énergétiques et gaz à effet de serre des filières de production de biocarburants en France. Etude ADEME/DIREM, sept. 2002. 132 p.
- Quemener J, Bosc M** (1988) Remarques sur la détermination du potassium échangeable. *In* : Gachon (ed) *Phosphore et potassium dans les relations sol-plante. Conséquences sur la fertilisation*. pp. 109-132. INRA. Paris.

- Robert M, Stengel P** (1999) Sols et agriculture : ressource en sol, qualité et processus de dégradation. Une prospective européenne et française. *Cahiers Agricultures*, 8 : 301-308.
- Rodriguez, D.** (1998). Understanding growth limitation in wheat and sunflower under low phosphorus conditions, Thesis Landbouwniversiteit Wageningen (Wageningen Agricultural University).
- Thaër AD** (1856) *The principles of practical agriculture*. Translated by Shaw W and Johnson CW. Saxton and Compagny publishers. New York. 551 p.
- Tunney H, Carton OT, Brookes PC, Johnston AE** (1997) *Phosphorus loss from soil to water*. CABI. ISBN.0-85199-156-4. 467 p.
- Turner BL, Frossard E, Bladwin DS** (2005) *Organic phosphorus in the environment*. CABI Publishing. Cambridge. ISBN 0 85 199 822 4. 399 p.
- UNIFA.** (2004) *Evolution de la fertilisation des sols agricoles en France, N, P2O5, et K2O de 1988-1989 à 2002-2003*, 17 p.+annexes.
- Van der Pool F** (1990) *Soil mining as a source for farmer's income in Southern Mali*. Amsterdam : Royal tropical Institute.
- Vitousek PM, Mooney HA, Lubchenco J, Melillo JM** (1997) Human domination of earth's ecosystems. *Science*. 277 : 494-499.
- Way JT** (1850) On the power of soils to absorb manure. *J. R. Agric. Soc. England*. 11 : 313-379.