

Actes des **troisièmes rencontres de la fertilisation raisonnée
et de l'analyse de terre**
Palais des Congrès de Blois
18 - 19 - 20 novembre 1997

QUALITE DES SOLS ET QUALITE DES PRODUCTIONS AGRICOLES

édité par **G. THEVENET (COMIFER)** et **P. RIOU (GEMAS)**
Responsable technique **P. DUC**

*Réalisé avec le concours financier de la Direction de l'Espace Rural et
de la Forêt au Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation.*

COMITE D'ORGANISATION

COMITE FRANÇAIS D'ETUDE ET DE DEVELOPPEMENT
DE LA FERTILISATION RAISONNEE (COMIFER)
et du
GROUPE D'ETUDES METHODOLOGIQUES POUR L'ANALYSE
DES SOLS (GEMAS)

C. BAILLERGEAU - Chambre d'Agriculture de la Sarthe
D. BLOR - AGPM
J. BOIFFIN - INRA
D. BOUVIER - CNJA
M. CARIOLLE - ITB
C. CHABOUIS - Enseignante
P. CHASSIN - INRA
M. CHEROUX - C.A.S.
C. DE BEAUPUIS - COMIFER
J. DECROUX - Europe sols
J.-M. DREJZA - BASF
P. DUC - CERA AF
Ph. DUGAST - Grande Paroisse SA
L. FAEDY - SADEF
J.-Cl. IGNAZI - COMIFER
J.-L. JULIEN - ALAA
J. LACHAUX - CELAC
F. LIMAUX - Chambre d'Agriculture de Lorraine
J. LURQUIN - SICARADO
Ch. MARECHAL - UNIFA
L. MATHYS - Chambre d'Agriculture de la Marne
M. MENCH - INRA
J.-M. MERILLOT - ADEME
P. RIOU - LDA 22 - Présidente du GEMAS
J.-Cl. REMY - ENSAM
C. SCHVARTZ - ISA Lille
J.-Y SOMMIER - Ministère Outre Mer
J.-P. STAIMESSE - SNST
P. STENGEL - INRA
J.-Cl. TAUREAU - Hydro Azote
J.-N. TERRIBLE - APCA
G. THEVENET - ITCF - Président du COMIFER

TABLE DES MATIERES

I. PROBLEMATIQUE ET ENJEUX

C. LAMBERT	Qualité et avenir de l'agriculture.....	11
J.-L. VOLATIER	Qualité des produits alimentaires et attente des consommateurs.....	21
C. MERCIER	Qualité du produit récolté : enjeu pour le transformateur.....	23
D. PIERRE	L' Accréditation en Europe.....	33
J. BOIFFIN P. STENGEL	Sols et qualité des produits : quels problèmes pour la recherche ?.....	39

II. LE SOL, COMPOSANTE DE L'« EFFET TERROIR »

J. SALETTE	Le sol, la terre, le terroir : d'une définition à une réalité opérationnelle.....	47
R. MORLAT	Les facteurs naturels des terroirs viticoles. Méthodologie de leur caractérisation.....	55
J.-M. DORIOZ J.-B. COULON Ph. FLEURY B. MARTIN	Composante sol et milieu physique dans l'effet terroir pour la production fromagère : quelques réflexions à partir du cas des fromages des Alpes du Nord.....	67
F. VILLENEUVE	L'effet « terroir » du sol sur la qualité de la production légumière : exemple de la carotte.....	75
J. SALETTE	Aspects multiples de la gestion d'un terroir face aux enjeux d'une plus-value qualitative pour les produits.....	83

III. SOL, FERTILISATION ET QUALITE DE LA PRODUCTION

A. BOUTHER C. LE SOUDER	Fertilisation azotée et qualité du blé tendre panifiable.....	91
M. LE BAIL	Sol, fertilisation et qualité de l'orge de printemps brassicole.....	103
M. CARIOLLE	Sol, fertilisation et qualité de la betterave industrielle.....	113
F. LAURENT J.-M. GRAVOUEILLE	L'itinéraire technique au service de la maîtrise des qualités de la pomme de terre de consommation.....	123
R. HABIB M. GENARD F. LAFOLIE P. LOBIT Y. DUMAS	Sol, fertilisation et qualité des productions fruitières et légumières.....	133
M. DURU G. LEMAIRE A. GIBON G. BALENT	Sol, fertilisation et qualité des fourrages.....	145

IV. SOL ET RISQUES DE CONTAMINATION DES RECOLTES

M. SCHIAVON E. BARRIUSO E. LICHTFOUSE J.-L. MOREL	Contamination des sols et des productions agricoles par les produits phytosanitaires et les micropolluants organiques.....	155
M. LEGEAS	Contamination par les pathogènes.....	171

D. BAIZE	Interpréter les teneurs totales en micropolluants minéraux : fonds pédo-géochimiques locaux et contaminations modérées.....	181
----------	---	-----

V. QUELLES IMPLICATIONS POUR LE DIAGNOSTIC ET LA PRESCRIPTION

P. DUC	Conséquence pratique pour les laboratoires.....	193
D. ROBIN C. BITAUD B. BOURRIE J.-Y. BALITEAU L. FAEDY	Un exemple de démarche d'expertise agro-environnementale : les travaux d'Aspach.....	205

VI. INTRANTS ET QUALITE DES SOLS

J. MASSE G. THEVENET	Engrais et amendements	215
P. PLET C. CHEVERRY	Les effluents d'élevage.....	227
R. CHAUSSOD M. LINERES M. TERCE P. CHASSIN	Déchets urbains : impact sur la qualité des sols et des produits	241
D. FRELET	Recyclage agricole de déchets industriels et qualité des sols - situation en Haute Normandie.....	259
L. AFFRET J.-P. LESCURE	Valorisation agronomique en aval de la sucrerie	269
M. GUILLOU	Conclusion.....	277

QUALITÉ ET AVENIR DE L'AGRICULTURE

La qualité des produits agricoles et alimentaires est une notion complexe et évolutive.

Elle est complexe, car chacun exprime des besoins différents et chacun a sa propre définition de la qualité. Pour l'agriculteur, le transformateur, le distributeur ou le consommateur, la qualité d'un produit peut se définir de différentes façons.

Elle est évolutive, car la qualité telle qu'on la définissait il y a 20 ans et telle qu'on la définit maintenant a bien changé et elle changera encore probablement au cours des années à venir. Depuis plus de trente ans, les objectifs de production de biens alimentaires de grande consommation de qualité standard "et à prix modéré" assignés par la Politique Agricole Commune ont été largement dépassés. A tel point que la France est devenue une des toutes premières nations exportatrices de produits agricoles et alimentaires.

Aujourd'hui, notre agriculture se doit également de répondre à de nouveaux besoins, que ce soit en matière de qualité des produits et d'information du consommateur, d'aménagement du territoire, d'environnement. Nous sommes passés en effet d'une situation de satisfaction des besoins vitaux de la population à une situation d'abondance.

Les attentes ne portent plus sur la disponibilité des produits alimentaires mais sur leur prix, leur qualité, leur provenance, leur salubrité. Avec 18 % de son budget consacré à l'alimentation, le consommateur veut désormais être rassuré non seulement sur la qualité intrinsèque du produit mais également sur les conditions de production, qu'il s'agisse de méthodes culturales ou de pratiques d'élevage. Or, face à ces nouvelles interrogations, certains modes de développement ont conduit à distendre le lien direct de l'agriculture à la terre et ont brouillé le dialogue avec les

consommateurs. Leurs exigences s'accroissent et obligent les producteurs à surmonter, après la barrière des prix, les obstacles de la qualité, de l'environnement et de la sécurité sanitaire.

Ces trois attentes constituent le nouveau contrat sur lequel reposent les rapports entre producteurs et consommateurs. Avec l'affaire de l'Encéphalopathie Spongiforme Bovine (ESB) suivie de peu par l'arrivée en force, sur le marché européen, des Organismes Génétiquement Modifiés (OGM) l'inquiétude grandissante des consommateurs doit nous amener à mettre ces derniers au coeur des préoccupations de la recherche, des producteurs, des groupements, des filières et des politiques. Face à cette nouvelle donne, expression d'une nouvelle compétitivité, l'agriculteur moderne doit tout en se préoccupant de reconquérir ses marchés, redonner confiance à l'acheteur.

Dans cette optique, s'attacher à développer la qualité permet d'aller au devant de la demande des consommateurs, tout en valorisant le savoir-faire du producteur.

La politique de qualité constitue, pour les agriculteurs comme pour les entreprises agro-alimentaires un instrument de diversification mais aussi de valorisation des productions et un atout majeur pour le monde agricole et rural.

Au-delà de son importance économique à l'échelon national ou encore européen - la part de marché des produits de qualité pourrait s'accroître de 50 % d'ici 2005 - la politique de qualité peut être également un des moyens de faire face à la libéralisation des marchés agricoles qui a constitué, sous la pression des États-Unis, un des enjeux majeurs de la dernière négociation du GATT. Libéralisation qui sera probablement accentuée à l'issue des prochaines négociations à venir dans le cadre de l'OMC.

L'une des voies d'avenir passe en effet par le développement de produits de qualité, capables d'être vendus à un prix élevé à une clientèle à hauts revenus. La France a dans ce domaine, de nombreux atouts à faire valoir. Elle dispose de terroirs et de savoir-faire qui ont fait la réputation de sa gastronomie dans le monde.

Elle a mis en place depuis longtemps, des signes de qualité qui sont prépondérants dans certaines productions et qu'elle a su imposer au niveau européen. Au moment où la concurrence est extrêmement vive sur les marchés, la politique de la qualité devient un véritable atout de compétitivité. Elle permettra de plus en plus aux professionnels qui s'y engagent d'être économiquement présents sur des marchés en pouvant s'abstraire de la seule logique du prix.

Ce sont davantage les produits transformés que les produits bruts qui seront concernés dans la mesure où d'une part plus de 80 % des produits agricoles sont d'ores et déjà transformés avant d'être mis sur le marché et ce sont, d'autre part, les produits transformés qui ont pris le relais du recul des exportations de produits bruts consécutif à la réforme de la PAC de 1992.

I - La qualité : une nouvelle compétitivité

Afin de faciliter le choix des consommateurs et leur permettre d'identifier les produits ayant une réelle qualité ou spécificité, les Pouvoirs Publics ont avec la profession agricole, instauré une politique qui privilégie à la fois "sécurité" et "régularité" des produits mais aussi "excellence" et "authenticité" grâce à la mise en place des signes de qualité. Cette politique est en fait une œuvre fort ancienne (dès 1919, ont été mis en place des appellations d'origine contrôlées). Cependant, la perspective du Marché unique européen, avec le risque de banalisation et les craintes de déréglementation frappant surtout la spécificité et la qualité des produits ont conduit au cours des dernières années la France à accentuer sa politique d'identification et de certification des produits alimentaires.

Les différents instruments officiels de qualité qui occupent une place croissante dans l'économie agricole française ont depuis largement inspiré les instances européennes. Grâce aux efforts déployés par la France, cette politique de qualité bénéficie en effet désormais d'une véritable reconnaissance de l'Union Européenne.

L'importance et le succès d'une telle politique s'illustrent certes par son poids économique et sa notoriété mais aussi par son impact pour le monde rural. C'est en terme d'aménagement du territoire et de maintien des activités socio-économiques que la qualité se révèle un instrument essentiel pour l'avenir de l'agriculture comme du monde rural.

1.1 Un atout pour l'avenir du secteur agricole

Plus de 180 000 agriculteurs français et parmi eux beaucoup de jeunes agriculteurs, élaborent aujourd'hui des produits sous signe officiel de qualité. Cela représente 11 % du marché alimentaire et un chiffre d'affaires de plus de 90 milliards de Francs.

La politique de qualité au travers de ces signes officiels - appellation d'origine contrôlée, label, certification de conformité, agriculture biologique et produits de montagne - est donc vitale pour le monde agricole et agro-alimentaire. Elle constitue un élément essentiel de la politique agricole, tant à l'échelon national qu'europpéen. Élément qui va occuper une place prépondérante dans les années à venir.

Cependant, pour que cette politique de qualité porte ses fruits, tant pour les consommateurs que pour les producteurs et les entrepreneurs, elle ne doit pas être un simple outil de marketing d'affichage permettant aux entreprises agro-alimentaires françaises de se démarquer de leurs concurrents. Aujourd'hui, il ne s'agit plus de produire pour produire, de vendre pour gagner des parts de marché mais de satisfaire en premier lieu le consommateur pour pérenniser les débouchés. La crise de l'ESB a confirmé, s'il en était besoin, que la méfiance croissante des consommateurs pouvait conduire à une crise de confiance généralisée.

Les consommateurs veulent connaître l'origine, la provenance, la composition, le mode d'obtention ou d'élevage des produits alimentaires mis sur le marché.

Ces exigences légitimes dépassent la seule recherche de la qualité intrinsèque du produit. Cette dernière est toutefois étroitement liée aux nouvelles attentes qui s'expriment en termes d'identification, de traçabilité et plus globalement de transparence.

C'est pourquoi il convient de restaurer la confiance de toute la filière comme celle des consommateurs par le respect de normes plus strictes sur les conditions de production et par une plus grande exigence sur les caractéristiques mêmes des matières premières agricoles.

Origine, qualité et transparence forment le triptyque sur lequel doit prendre appui désormais la filière agro-alimentaire.

Ces objectifs permettront aux agriculteurs notamment d'être économiquement présents sur le marché et de développer une activité viable et rémunératrice. La politique de qualité permet en effet de vendre les produits plus chers de 10 à 30 % environ dès lors que le différentiel de prix est justifié par des contraintes supplémentaires et que le consommateur reconnaît la spécificité ou la qualité du produit. Elle permet en quelque sorte de fixer la plus-value au bénéfice du producteur.

Une politique de qualité renouvée, prenant en compte ces différents paramètres, se traduira par de nouvelles formes de relations entre les différents acteurs de la filière agro-alimentaire, mais aussi par un nouveau contrat social basé sur le partenariat au service d'une économie qui associera davantage objectifs de prix, de rentabilité et satisfaction des consommateurs. La Loi d'Orientation proposée par le Président de la République en 1996 pour préparer l'entrée de l'agriculture dans le XXI^e siècle, qui après avoir connu quelques vicissitudes devrait aboutir en 1998, doit poser les bases de ce nouveau contrat social.

Celles-ci visent notamment à créer les conditions d'une adaptation offre/demande, en répondant aux nouvelles exigences des consommateurs, à dynamiser l'organisation économique des producteurs afin que ces dernières conservent un réel pouvoir au sein des filières et à consolider le dispositif des garanties officielles de qualité.

1.2 un atout pour l'avenir du monde rural

Ce nouveau contrat social conduit par une politique de la qualité renforcée intègre nécessairement un souci d'harmonisation et de répartition des activités sur le territoire national, de préservation d'un patrimoine alimentaire, de revalorisation du travail.

C'est par l'impact de cette politique sur l'aménagement du territoire et le maintien de l'emploi que la politique de qualité est essentielle pour l'avenir du monde rural. Dans de nombreux cas, les produits de qualité sont d'ailleurs une réponse pour les régions en difficulté.

N'oublions pas que 80 % des fromages d'appellation d'origine contrôlée sont produits en zone de montagne où ils constituent l'ossature économique de régions entières. Il apparaît indispensable, à la lumière de cette expérience, de dégager autant que faire se peut les moyens permettant de concilier hommes, productions, territoires.

C'est d'ailleurs dans ce contexte que la politique d'installation que nous avons dernièrement largement redynamisée, prend toute sa dimension. C'est une économie performante qui constitue le moteur de développement d'un espace rural viable à long terme. Cela passe par une valorisation optimale des caractéristiques des différents territoires et une approche différenciée du métier d'agriculteur.

Ainsi, au-delà de la seule compétitivité sur des marchés de masse largement mondialisés, coexistent une compétitivité par la qualité des produits, par les garanties nouvelles offertes aux consommateurs ou

encore par les services non marchands apportés à la collectivité. Face aux difficultés et aux contraintes rencontrées actuellement par les agriculteurs en raison du rationnement des surfaces ou de celui des droits de produire dans un contexte de baisse des prix, ces nouvelles contributions de l'agriculture assureront le maintien d'une activité économique sur tout le territoire.

Philippe Vasseur avait déclaré en 1996 que 450 000 exploitations agricoles au moins devraient "occuper valablement" le territoire. Il ajoutait qu'il verrait bien "le tiers de ces exploitations travailler pour les AOC". A cette fin, il avait engagé une promotion de produits de qualité à forte valeur ajoutée par une vaste campagne sur les produits de qualité et de terroir. Cette promotion est indispensable pour capter de nouveaux marchés où il y a des opportunités très réelles. Il faut franchir des obstacles et faire des efforts. Nous ne pourrons gagner que si nous rassemblons nos moyens et que si nous faisons un effort collectif pour mieux faire connaître et mieux vendre nos produits. Nous en sommes toutefois encore loin. A titre de comparaison, le budget promotionnel d'une célèbre entreprise américaine spécialiste du fast food représente en France avec la politique de communication presque la totalité de tous les budgets promotionnels collectifs gérés par la SOPEXA dans le monde.

II - La qualité : une réponse à l'internationalisation des marchés

La demande de produits de base vendus en l'état va continuer à croître dans les prochaines années, grâce à l'augmentation de la population mondiale et à l'élévation du niveau de vie dans certaines zones, comme l'Asie du Sud-Est. Dès lors, la France et plus largement l'Union européenne, vont devoir transformer leur système d'exportation des excédents en véritable vocation exportatrice par la mise en place d'une politique offensive et conquérante. L'autre voie d'avenir pour certains produits plus élaborés, dont la demande est sans cesse croissante, tant à l'intérieur de l'Europe que sur les marchés mondiaux, passe par le

développement de produits de qualité. L'une et l'autre voie exigent toutefois de faire évoluer la PAC.

2.1 De nouvelles opportunités de croissance

Les derniers accords du GATT ont imposé une réduction forte et programmée des exportations avec subventions. Avec la mise en place de dispositifs adaptés, l'Europe peut, sur une longue période, devenir compétitive sur le marché mondial. Mais la réponse n'est pas unique et dépend de la nature du produit comme de son degré de transformation.

Tous les secteurs ne peuvent, en effet, du jour au lendemain, se passer de soutiens publics sans désorganiser complètement l'agriculture européenne et assumer le coût social qui en résulterait.

Pour certaines productions, le développement de produits de qualité, leur transformation, peuvent permettre à l'Europe et plus particulièrement à la France de gagner d'ores et déjà d'importantes parts de marché. La France est d'ailleurs le premier exportateur mondial de produits alimentaires transformés, devant les États-Unis.

C'est cette position qui doit être confortée dans la mesure où ces exportations se font sans subvention mais grâce à la qualité des produits et au dynamisme commercial des producteurs et des entreprises.

Là encore, c'est en favorisant une démarche de filière, en respectant tout au long de la chaîne de production et de transformation des normes de qualité, sanitaires notamment, en segmentant les marchés pour s'accaparer des niches à haute valeur ajoutée que l'on y parviendra. C'est déjà le cas pour de nombreux secteurs - vin, fromages, volailles... - pour lesquels les exportations sans restitutions ont dépassé les prévisions les plus optimistes dès les premières années d'application des accords du GATT. C'est en alliant qualité des produits, innovations technologiques, valeur ajoutée, augmentation des marchés et dynamisme commercial que

la France consolidera durablement et "qualitativement" la vocation exportatrice de son agriculture.

Par ailleurs, au sein même du marché européen, de nouveaux marchés se font jour. Depuis que l'Europe a concrétisé son ouverture sur une démarche qualitative en élaborant des textes permettant la protection des produits de qualité, en réalisant un marché unique, les échanges entre États membres s'intensifient, de nouveaux besoins sont exprimés.

Ces évolutions tant réglementaires qu'institutionnelles donnent à la France de réelles opportunités et un avantage certain pour accroître sa compétitivité. D'autant plus qu'elle a déjà, de par ses traditions joué un rôle moteur dans le nouvel essor de la politique de qualité.

2.2 Faire évoluer la PAC

Les échéances qui se profilent sur la scène communautaire et internationale sont celles qui dessineront la politique agricole pour demain. Les bases de la future négociation de l'OMC qui s'expriment en terme de baisse des soutiens, baisse des exportations subventionnées, baisse de la production tarifaire extérieure, apparaissent comme une tendance lourde vers une plus grande ouverture des marchés.

Si le repli sur le marché intérieur est l'annonce du déclin programmé de notre agriculture, il est clair également qu'une agriculture alignée sur les prix mondiaux est budgétairement irréaliste et sonnerait le glas de notre mode de développement.

Pour nous, la politique agricole de l'Europe doit être adaptée aux spécificités du vieux continent.

Cela veut dire que nous préservions notre marché européen, un des plus grands marchés solvables au monde, tout en renforçant notre présence sur les marchés extérieurs. Ce double-défi ne sera relevé qu'avec des approches différenciées selon les productions.

Dans l'objectif de créer de la richesse et un développement équilibré, il serait souhaitable d'affiner l'allocation des soutiens communautaires pour tenir compte de la diversification des missions reconnues à notre secteur. Ainsi, parallèlement à un contrat lié aux différentes OCM, le CNJA propose que chaque exploitation puisse élargir à un contrat d'entreprise en fonction de la plus-value économique et sociale qu'elle engendre en matière de qualité, mais aussi d'emploi, d'environnement ou encore de valorisation du territoire. C'est enfin la reconnaissance de l'apport qualitatif que l'agriculture peut et doit générer en faveur de l'équilibre de la société.

* * *

La démarche qualité gagne de plus en plus la filière agro-alimentaire du producteur au distributeur. C'est probablement une évolution irréversible qui permet de mettre à la disposition du consommateur des produits ayant des caractéristiques bien définies, contrôlées avant commercialisation, élaborés selon des itinéraires techniques stricts dans le plus grand respect de l'environnement. L'échelle des signes de qualité retenue par la réglementation française et européenne est en mesure de satisfaire les attentes fortement diversifiées et parfois contradictoires ("plus de qualité, plus de sécurité, mais pas plus cher") des consommateurs au-delà même de nos frontières.

Toutefois, il revient aussi aux consommateurs eux-mêmes d'être acteurs de la qualité. Lors de leurs achats, ils assurent un rôle décisif dans la mesure où il vont orienter les marchés. Encore faut-il qu'ils acceptent de contribuer aux investissements humains, techniques et financiers que nécessitent une production de qualité.

L'avenir de l'agriculture et du monde rural passe aussi par eux.

Qualité des produits alimentaires et attentes des consommateurs

Jean-Luc VOLATIER

Responsable du département Prospective
de la Consommation
CREDOC

Qu'est-ce qu'un produit alimentaire de qualité du point de vue du consommateur ? Les consommateurs sont souvent rationnels et prennent en compte les caractéristiques objectivables du produit comme la facilité d'emploi, le goût, l'intérêt nutritionnel ou la sécurité. Mais la perception de ces caractéristiques est elle même subjective.

De plus, les consommateurs sont aussi sensibles aux critères plus immatériels des produits alimentaires, à l'imaginaire que véhicule par exemple l'origine régionale, le caractère exotique, les connotations festive ou familiale, l'aspect naturel.

Toutes ces dimensions de la qualité sont prises en compte simultanément au moment du choix du produit alimentaire par les consommateurs.

L'importance relative des différentes dimensions de la qualité évolue rapidement. Ainsi, nos études montrent clairement depuis un an ou deux une augmentation des attentes à l'égard du goût des produits alimentaires, mais surtout vis à vis de l'origine régionale des produits qui garantit le goût, la sécurité, le respect de modes de fabrication traditionnels et des ingrédients naturels. La valorisation des produits de terroir ne ralentit pas et la crise de l'ESB a même renforcé l'attrait des produits alimentaires traditionnels.

Les signes officiels de qualité et les marques sont aussi fortement recherchés pour la sécurité mais aussi pour la qualité organoleptique des aliments.

Du point de vue de la sécurité alimentaire, toutes les craintes classiques à l'égard des aliments ont été ravivées par la crise de l'ESB. Ce sont surtout les peurs vis à vis des résidus de produits phytosanitaires et des contaminants éventuels (métaux lourds...etc) qui paraissent les plus fréquentes. Au printemps 1997, la médiatisation de différentes affaires relatives au génie génétique comme la brebis Dolly et le maïs transgénique expliquent l'inquiétude relevée alors vis à vis des organismes génétiquement modifiés. La présence de nitrates dans l'alimentation inquiète aussi, mais dans une moindre mesure. Les produits d'agriculture biologique ont le vent en poupe mais ne séduisent de façon régulière qu'une personne sur dix.

En conclusion, les consommateurs restent donc globalement préoccupés de leur alimentation sans sacrifier le plaisir de bien manger. Les produits du terroir sont aujourd'hui pour beaucoup de consommateurs le meilleur moyen de concilier qualité gustative et sécurité alimentaire et le succès des signes officiels de qualité montre bien que de nombreux consommateurs attendent avant tout d'être rassuré de leur alimentation.

QUALITE DU PRODUIT RECOLTE, ENJEU POUR LE TRANSFORMATEUR

Christiane MERCIER
Directeur Scientifique, Groupe Danone

Face à l'évolution quantitative et qualitative de la consommation, l'agriculture et l'agro-alimentaire ont subi au cours des dernières décennies des mutations de fond.

Présents sur tous les marchés de l'alimentation, sur les cinq continents, les industriels de l'agro-alimentaire sont confrontés aux multiples réalités de l'agriculture mondiale, et sont rendus sensibles aux nombreuses préoccupations liées à ce domaine : développement durable, agriculture et élevage raisonnés, productivisme... avec des priorités différentes selon les régions et la variabilité des exigences des consommateurs.

Concevoir et fabriquer les aliments de l'Homme met ces industriels en contact permanent avec ceux qui fournissent les matières premières : les agriculteurs. La nécessité de conduire une réflexion commune sur le lien entre matière première et produit fini est perçue par tous. La notion de filière est très présente, car tous les acteurs ont conscience de l'importance d'un partenariat réel, où les relations sont guidées par le consommateur, qui juge par son achat et son ré-achat. Si le choix porte sur le produit fini, il ne néglige pas pour autant l'origine de celui-ci, c'est à dire l'agriculture. Le lien entre matière première agricole et produit fini s'articule autour de deux axes essentiels, les *qualités intrinsèques* de la matière, et la qualité des *pratiques culturelles* conduisant à ces qualités intrinsèques. A ceci s'ajoute une préoccupation de durabilité qui renvoie au respect de l'environnement.

I- Produit cultivé, produit récolté, produit transformé : une même matière...

L'agro-alimentaire est un des secteurs de l'économie où la notion de filière est la plus forte, à cause de la fragilité des produits. Même si des transformations poussées interviennent, la qualité de la matière première initiale est essentielle à la qualité du produit fini.

1.1- La sécurité des aliments, une exigence prioritaire

L'innocuité des matières premières mises en oeuvre dans les aliments constitue la préoccupation majeure de l'industrie agro-alimentaire.

La notion de sécurité des aliments, perçue comme un tout par le consommateur, se décline pour l'industriel sous deux aspects. Le premier aspect est rationnel. Il se rapporte aux dangers "scientifiquement prouvés" (par exemple la salmonellose). Le second aspect se joue autour de sujets plus polémiques, dont les médias et les consommateurs s'emparent avant que les scientifiques ne s'accordent. Cette situation peut générer des crises de consommation (on se souvient du veau aux hormones...).

Pour toute la filière, l'existence de ces dangers rend nécessaire une implication sans faille dans la prévention. La prévention des "crises de peur" passe par l'information. Il faut expliquer, et ne pas attendre que le coup soit porté pour réagir ! Cela signifie qu'il faut être vigilant, conscient du danger potentiel, et solidaire de l'amont et de l'aval de sa filière.

La prévention des risques "scientifiques" passe par une parfaite maîtrise de toutes les étapes de l'élaboration d'un produit. L'enregistrement d'un maximum d'informations pour chacune de ces étapes constitue la traçabilité, qui est aujourd'hui un facteur clé de la sécurité. Le développement de systèmes de traçabilité doit être conçu en collaboration avec l'ensemble des intervenants d'une filière, afin que les outils créés soient pertinents.

La transformation des produits en usine constitue certes un facteur de risque (altération, contamination microbienne). La pratique de l'assurance qualité et la mise en place de méthodes dites "analyse des dangers et points critiques pour leur maîtrise" (HACCP) tendent cependant à faire chuter le risque d'incident sanitaire. Mais assurer la sécurité des aliments en usine n'est pas suffisant.

Les pratiques agricoles sont le premier maillon pour garantir l'innocuité des aliments.

On pense bien sûr en premier lieu aux matières premières animales. Il convient par exemple de s'assurer que le lait ne contient pas de germes microbiens pathogènes, qui pourraient être transmis au consommateur.

Plus récemment, le lien fort entre la sécurité des aliments et les pratiques agricoles a été remis au premier plan par la crise de la "vache

folle". Le consommateur s'est soudain soucié de connaître la provenance de la viande, les conditions d'élevage, d'alimentation des animaux. La filière entière s'est alors mobilisée, et la relation entre l'agriculteur et l'industriel agro-alimentaire a été réellement perçue par le grand public. Ce lien se concrétise par la définition de cahiers des charges, réalisés par l'interprofession. Cette collaboration permet de conserver des exigences en lien avec la réalité et le terrain et constitue la meilleure garantie de respect des engagements.

Les matières premières végétales n'échappent pas à la préoccupation de sécurité. Certaines matières sont très sensibles et le consommateur exprime ses exigences.

Concernant les fruits et les légumes, les résidus de traitements phytosanitaires sont réglementés et les agriculteurs sont conscients de l'importance de leurs pratiques sur leur production.

Certains produits finis sont plus particulièrement exposés : les denrées destinées à l'alimentation infantile font l'objet d'une attention particulière et les producteurs doivent donc être informés de la destination de leur production. Des industriels, en accord avec les organisations professionnelles, ont donc rédigé des cahiers des charges précis sur les produits phytosanitaires à appliquer, les délais à respecter entre traitements et récolte, les conditions de production et de suivi du produit (stockage, transport...). Certains, comme le Groupe Danone, vont plus loin. Pour les produits Blédina, les producteurs de blé, les coopératives et les minotiers s'engagent dans la "Charte Qualité Blé Diététique Infantile" sur le produit, les lieux et techniques de culture, la récolte, le transport, le stockage, la transformation, la traçabilité.

Le lien entre l'industriel de l'agro-alimentaire et son fournisseur agriculteur est donc essentiel à la garantie de la sécurité des aliments et nécessite une collaboration d'une ampleur nouvelle sur les pratiques culturelles. Mais la matière première agricole ne doit pas se contenter d'être saine, elle doit également être utilisable dans de bonnes conditions par l'industriel (qualités technologiques du produit) et doit présenter des qualités organoleptiques satisfaisantes pour le consommateur. Ceci constitue un deuxième volet de collaboration entre les agriculteurs et les industriels.

1.2- Les qualités intrinsèques du produit cultivé

1.2.1- Qualités technologiques de la matière première agricole

La réalisation d'aliments par l'industrie implique un certain nombre de transformations de la matière première agricole, dont la performance et le succès dépendent souvent des caractéristiques du produit récolté.

Pour fabriquer yoghourts et fromages, les teneurs en matières protéiques et lipidiques du lait sont essentielles. Ces teneurs dépendent de la race bovine utilisée, et des conditions d'élevage des animaux. Le paiement du lait "à la qualité" reflète cette exigence de l'industriel, et nécessite de la part du producteur l'adaptation de la conduite de son cheptel.

La fabrication des pâtes exige une qualité de blé dur particulière (quantité et qualité des protéines). Les industriels participent donc aux travaux de sélection variétale sur le blé et incitent les producteurs à cultiver certaines variétés spécifiques.

On pourrait multiplier les exemples à l'infini : chaque produit fini guide la production d'une qualité spécifique de matière première.

1.2.2- Qualités organoleptiques de la matière première

Ici encore, le rôle de l'agriculteur est essentiel. A l'échelle domestique, les cuisiniers savent qu'on ne fait pas de bons plats avec de mauvais ingrédients... L'adage s'applique sans restriction à l'industrie alimentaire.

La sélection de races particulières et les conditions d'élevage permettent d'obtenir une qualité de viande spécifique. L'industriel peut donc orienter les choix des éleveurs en fonction des débouchés.

La maturité des fruits et légumes à la récolte assure la qualité des produits transformés : l'industriel travaille avec les producteurs pour définir les conditions optimales de collecte...

La collaboration des filières est essentielle à la satisfaction de chaque maillon de la chaîne : la production adaptée à sa destination sera mieux valorisée par l'agriculteur, sera plus facilement transformée par l'industriel et satisfera plus pleinement le consommateur...

Un troisième aspect de la relation concerne le respect de l'environnement, et cette attention rejoint par certains aspects les deux axes précédemment abordés.

1.3- Le respect de l'environnement, une préoccupation pour chacun

Le respect de l'environnement est essentiel pour l'agriculteur, qui assure ainsi la pérennité de son instrument de travail et, le plus souvent, des économies d'intrants.

L'intérêt pour l'industriel est double. Le respect de l'environnement est souvent très corrélé à la sécurité des aliments. Les résidus de phytosanitaires sont en général quasiment nuls dans des productions où les traitements sont bien maîtrisés et raisonnés ; la bonne gestion de la fertilisation azotée permet de réduire le taux de nitrates dans les productions végétales et dans l'eau, utilisée directement (eaux de source) ou par l'industrie...

D'autre part, l'industrie aujourd'hui, quel que soit son secteur d'activité, ne peut faire abstraction du contexte environnemental. Une entreprise soucieuse de son image doit prendre en compte la bonne gestion de l'environnement, sans limiter son action à ses sites industriels.

Le consommateur exprime également sa position très clairement. Il veut des produits sains, et manifeste son attachement à des pratiques respectueuses de l'environnement. Les études montrent qu'il lie d'ailleurs fortement les deux notions...

Cet aspect des pratiques culturelles réunit les acteurs de la filière pour travailler sur des spécifications de production raisonnables et adaptées aux exigences de chacun.

La filière Bière est particulièrement exemplaire pour illustrer la coopération des intervenants.

II- Exemple d'une filière intégrée : de l'orge à la bière

II.1- Différents organismes collaborent pour l'amélioration du produit

La filière Bière est organisée autour de différentes structures qui permettent une réflexion sur les attentes et la mise en place d'action pour la réalisation des objectifs.

Institut Français des Boissons de la Malterie-Brasserie (IFBM).

Cette association, à laquelle adhèrent les brasseurs et malteurs, constitue l'instrument technique de la filière. Il travaille à la sélection variétale et réalise des études scientifiques (qualité des orges, du malt, influence des résidus de produits phytosanitaires...).

Comité Technique Permanent de la Sélection des Plantes Cultivées (CTPS). Son avis permet l'inscription d'une variété au catalogue français.

Comité Bière-malt-Orge (CBMO)

Ce comité interprofessionnel a défini une Charte dont l'objectif est la promotion de la culture des orges brassicoles en France et l'optimisation de leur qualité en fonction des contraintes de l'ensemble de la filière. Y participent les membres de la Commission Technique et Recherche des Brasseurs de France, de la Commission des Orges des Malteurs de France ; à titre d'experts siègent des représentants de l'IFBM et un sélectionneur.

Institut Technique des Céréales et des Fourrages (ITCF)

Il intervient pour l'amélioration des pratiques culturales et la formation des agriculteurs.

Institut Français de la Recherche Agronomique (INRA)

Cet organisme est représenté au CTPS. Il intervient en outre pour l'homologation des produits phytopharmaceutiques.

Les entreprises peuvent être également actives individuellement. Les brasseries Kronenbourg sont par exemple adhérentes au programme "Ferti Mieux" de l'ANDA (Association Nationale de Développement Agricole, organisme professionnel agricole).

La coordination de ces acteurs à différents niveaux de la filière permet une optimisation des pratiques de chacun.

II.2- Quelques exemples de collaboration

L'élaboration de la bière est un processus relativement complexe, pour lequel une démarche de filière est souhaitable.

II.2.1- Fabrication de la bière

L'orge après récolte est transformée en malt :

<i>trempage</i>	Alternance de passages sous eau et sous air pour réhydrater le grain (initialement à 12 % d'humidité, il se charge en eau jusqu'à un taux de 46 %). Ceci permet de réactiver les processus biologiques.
<i>germination</i>	Dans des conditions d'humidité et de température précises, le grain entre en phase de germination. Il synthétise des enzymes hydrolytiques et l'endosperme (paroi du grain) se désagrège, permettant la sortie de la plantule.
<i>touraillage</i>	Séchage progressif du malt vert de 40 °C à 80 °C pour arrêter les activités biologiques sans dénaturer les enzymes, développement d'arômes et de couleurs.
<i>dégermage</i>	Le grain est débarrassé de son germe. Le malt peut alors être stocké avant d'être utilisé par les Brasseurs.

<i>brassage</i>	Mélange de mouture de malt et d'eau : les enzymes produites au cours de la germination dégradent l'amidon et les protéines en sucres fermentescibles et en acides aminés.
<i>filtration</i>	Séparation du moût et des drêches.
<i>ébullition</i>	Addition de houblon au moût, chauffage : transformation des composés chimiques du houblon, stérilisation.
<i>fermentation</i>	Addition de levures, fermentation du moût : transformation des sucres en alcool, production de dioxyde de carbone, développement d'arômes.
<i>filtration</i>	Séparation levures et colloïdes / bière.

A partir du processus de fabrication de la bière, on peut déterminer quelques points critiques qui rendent nécessaire l'intégration de la filière. Nous illustrerons ceci sur trois exemples : la sélection variétale, l'homologation des pesticides et les pratiques culturales, ces trois aspects ayant des conséquences nombreuses sur le bon déroulement de la fabrication de la bière.

II.2.2- Sélection variétale

Elle est réalisée par les sélectionneurs, en collaboration avec l'IFBM. L'action est coordonnée par le CBMO. Chaque année, une trentaine de nouvelles variétés d'orge sont testées en vue de leur inscription au catalogue officiel par le CTPS. Le protocole d'inscription, co-signé par le CTPS, le CBMO et l'IFBM, comporte des études sur le comportement agronomique des variétés (productivité, régularité, résistances aux maladies...) et sur la valeur brassicole des orges (indice EBC - European Brewery Convention). Cette seconde partie du protocole permet l'inscription de certaines variétés sur la liste des orges à orientation brassicole (jusqu'à 20 orges sont inscrites chaque année). A partir des indices calculés pour cette inscription, le CBMO détermine les variétés qui seront testées en phase pilote par l'IFBM. Les variétés ne présentant pas de défaut sont inscrites sur la liste annuelle des variétés "en observation commerciale", testées industriellement, puis inscrites sur la liste des variétés préférées des malteurs.

Cette méthodologie d'homologation des variétés, mise en place par le CTPS et le CBMO a amélioré la qualité et a satisfait les attentes de l'ensemble de la filière depuis plus de dix ans. Ainsi le sélectionneur a-t-il pu orienter ses recherches simultanément vers une amélioration de la qualité et du rendement agronomique, permise par une meilleure connaissance des attentes des brasseurs et des malteurs.

L'importance de l'amélioration variétale apparaît plusieurs fois au long du processus de fabrication de la bière.

Etape	point critique	nature du risque
<i>trempe</i>	Perméabilité de l'endosperme.	technologique
<i>germination</i>	Vitesse de production des enzymes, quantité d'enzymes synthétisées.	technologique organoleptique
<i>brassage</i>	Saccharification (pouvoir diastasique α -amylase).	technologique organoleptique
<i>filtration</i>	Volume de moût filtré, viscosité du moût, volume de drêches (quantité de protéines résiduelles).	technologique
<i>fermentation</i>	Extrait (ratio amidon/protéines), équilibre des sucres fermentescibles ⁰ .	technologique organoleptique
<i>filtration</i>	Présence de colloïdes.	technologique

II.2.3- Homologation des produits phytosanitaires

Pour cette étape, réalisée à la demande des firmes phytosanitaires, l'IFBM dispose d'une méthode officielle mise en place par tous les professionnels de la filière : brasseurs, malteurs, organismes professionnels agricoles, organismes de recherche, entreprises phytopharmaceutiques... Les produits proposés par l'industrie chimique sont testés à toutes les étapes de la filière pour vérifier leur innocuité sur le process (mesure des effets non-intentionnels des produits phytopharmaceutiques). La définition des doses utiles est réalisée par les firmes phytosanitaires, en relation avec l'ITCF.

Outre l'éco-toxicité potentielle de ces produits, les études s'assurent que les résidus ou leurs métabolites n'interfèrent pas lors de la fabrication de la bière.

Les étapes testées sont les suivantes :

Etape	point critique	nature du risque
<i>germination</i>	Action des régulateurs de croissance sur la germination, action des résidus sur la vitesse de germination et la synthèse des enzymes.	technologique
<i>tourailage</i>	Transformation thermique des résidus.	toxicologique organoleptique technologique
<i>ébullition</i>	Transformation thermique des résidus.	toxicologique organoleptique technologique
<i>fermentation</i>	Action des résidus ou de leurs métabolites sur les levures.	technologique organoleptique
<i>filtration</i>	Persistance des résidus.	technologique organoleptique
<i>analyse du moût et de la bière</i>	Tenue de la mousse, absence de faux-goût.	organoleptique

II.2.4- Pratiques culturales

Les points évoqués précédemment peuvent être maîtrisés si les agriculteurs respectent les recommandations des firmes phytosanitaires concernant les dosages de traitements et les délais avant récolte.

L'ITCF, ainsi que d'autres organisations professionnelles agricoles (ANDA, FARRE...) jouent un rôle important dans la formation des agriculteurs sur l'agriculture raisonnée.

La fertilisation azotée des orges brassicoles est particulièrement sensible car elle contribue en partie à l'équilibre amidon/protéines des réserves :

- un excès de protéines signifie une réduction de la quantité de sucres du moût. Ceci réduit le potentiel fermentescible, donc le degré alcoolique. En outre, les protéines, qui sont en partie éliminées lors de la filtration, constituent des déchets (drêches), qui sont mal valorisées par l'industriel, et posent des problèmes environnementaux.

- au contraire, une réduction trop importante de la quantité de protéines dans le malt risque de poser des problèmes pour la fermentation (déficit en acides aminés pour les levures). D'autre part les protéines sont les "molécules moussantes" et il faut en conserver une quantité minimale pour assurer à la bière une tenue de mousse satisfaisante...

La formation et l'information des agriculteurs sur le processus de fabrication de la bière sont essentielles à la compréhension, donc au respect des cahiers de charges des malteurs et des brasseurs.

La filière bière nous a permis d'illustrer l'importance de la coordination des opérations menées par les acteurs. La qualité du produit récolté est déterminante pour la qualité du produit fini.

Il est primordial pour l'industriel agro-alimentaire de favoriser des relations de partenariat avec les agriculteurs et leurs organisations professionnelles. Comme l'assurance qualité est devenue un réflexe dans l'industrie, il semble naturel de voir une relation de confiance s'établir entre les intervenants de la filière, sur la base de contrats clairs et de la notion de prévention, fondement de l'assurance qualité.

Le Groupe Danone s'est engagé de longue date dans cet effort. La Charte Environnement est venue en 1995 formaliser cet effort et définir des objectifs à moyen terme. Elle témoigne de l'attachement des sociétés du Groupe à une bonne gestion des ressources naturelles et au respect des milieux.

Les cahiers des charges pour de nombreuses matières premières du groupe incluent des spécifications sur les pratiques agricoles. L'exigence de traçabilité renforce les liens avec l'agriculteur. La "Charte Lait" proposée depuis plusieurs années aux producteurs travaillant pour Danone est la garantie d'une qualité supérieure.

Plus récemment, le Groupe Danone s'est engagé dans une démarche d'assurance qualité de l'amont agricole. Les semouleries de Bellevue (Panzani) ont été parmi les précurseurs de la démarche Agri Confiance, qui repose sur la certification par tierce partie des relations entre les organisations de production agricole et leurs adhérents. Les principes de l'assurance qualité (enregistrements, traçabilité, auto-contrôle) sont mis en place et audités. Cette démarche, conduite à l'instigation de la CFCA, reçoit le soutien du ministère de l'Agriculture qui y voit une proposition de réponse à ses exigences de traçabilité et de qualité. La CFCA étudie la possibilité d'étendre cette démarche à l'Europe, par le biais de la normalisation.

L'ACCREDITATION EN EUROPE

par D. PIERRE, Directeur du COFRAC

I / LES ENJEUX

Les entreprises sont amenées à faire appel à de multiples organismes ou laboratoires, à des fins réglementaires ou volontaires, en vue d'apporter la preuve de la conformité de leurs produits, services ou systèmes d'organisation à certaines exigences techniques pré-définies.

L'un des enjeux de la construction européenne est d'obtenir la reconnaissance, par l'ensemble des pays membres de l'Union Européenne, des contrôles effectués par un organisme installé dans l'un de ces pays.

Pour atteindre cet objectif, tant dans le domaine réglementaire que volontaire, plusieurs dispositions ont été adoptées au niveau communautaire en 1989, sous le vocable d'"APPROCHE GLOBALE".

Le principe retenu consiste à promouvoir -et même à décréter dans le domaine réglementaire- la reconnaissance des essais, audits, inspections et autres types de contrôles techniques, dès lors qu'ils ont été réalisés par des laboratoires ou des organismes respectant certains critères définis au niveau communautaire.

Ces critères font aujourd'hui l'objet des normes européennes de la série EN 45000, ainsi que de plusieurs "guides" établis dans le cadre plus large de l'ISO, documents qui fixent un certain nombre d'exigences relatives à la constitution et au fonctionnement des organismes, en particulier en termes d'impartialité, d'organisation et de compétence.

Pour l'application des directives européennes (domaine réglementaire), chaque état membre notifie à la Commission de Bruxelles et aux autres états membres, les organismes de son choix situés sur son territoire, sous réserve que ceux-ci respectent les exigences de la norme pertinente de la série EN 45000, ou de tout autre document équivalent.

Les prestations de ces organismes notifiés dans le cadre de ces directives européennes font alors l'objet d'une reconnaissance automatique dans toute l'Union Européenne. En contrepartie, l'état membre notificateur doit être en mesure d'apporter la preuve du respect

par l'organisme des dispositions de la norme de la série EN 45000 ou du document équivalent.

Dans le domaine volontaire, les états membres sont invités à promouvoir la reconnaissance par le marché des essais et contrôles effectués par des organismes respectant les critères des normes de la série EN 45000.

Au niveau européen, l'organisation européenne pour la certification et les essais (EOTC) a été spécialement constituée en 1990 afin de promouvoir les accords de reconnaissance mutuelle passés dans le domaine volontaire entre organismes européens respectant ces critères.

Tous ces éléments ont incité la plupart des pays européens à se doter d'outils permettant d'apporter la preuve que leurs propres laboratoires et organismes respectent effectivement les normes de la série EN 45000.

Tel est l'objet des systèmes nationaux d'accréditation qui se sont créés ces dernières années en Europe, avec le soutien de la Commission de Bruxelles.

II / LES GRANDS AXES DE L'ACCREDITATION EN EUROPE

Nous reprendrons ici les termes d'un document établi en Juin 1994 par la Commission des Communautés Européennes (DG III) :

A) LES PRINCIPES DE BASE

1. L'accréditation a pour but, après évaluation, d'attester que des laboratoires et des organismes sont techniquement capables respectivement, de réaliser des essais, des analyses ou des étalonnages et de procéder à des actions d'inspection ou de certification (de produits, services, systèmes qualité ou de personnels), dans les secteurs pour lesquels ils se déclarent compétents.

Elle ne vise pas à attester que les organismes certificateurs sont organisés de façon satisfaisante, ce qui reviendrait à certifier des systèmes qualité.

2. L'accréditation est un système mis en place sous l'égide des pouvoirs publics et soutenu par ceux-ci dans le but de délivrer des jugements impartiaux sur la base de normes européennes reconnues.

3. L'accréditation est une activité à but non lucratif, sans objectifs commerciaux, afin d'être complètement indépendante. Ceci peut avoir pour conséquence un certain soutien financier de la part des pouvoirs publics à l'activité d'accréditation, en vue d'éviter toute dérive commerciale.

4. L'accréditation vise à éviter la multiplication des audits pour les organismes exerçant plusieurs activités (étalonnage, essais, certification, ...).

5. Afin de supprimer toute concurrence entre accréditeurs, laquelle risquerait de dévaluer rapidement le niveau des attestations, il est nécessaire que chaque état membre limite le nombre de systèmes d'accréditation à un et un seul, intervenant à la fois dans les domaines

réglementaire et volontaire.

6. L'accréditation est considérée par les administrations nationales comme la meilleure base technique sur laquelle se fonder pour notifier des organismes dans le cadre de l'application des directives européennes, afin de réduire les différences actuelles entre les critères de notification.

7. L'accréditation est à considérer comme étant le dernier niveau de contrôle, au plan technique, de l'activité de certification.

Il faut absolument veiller à ne pas laisser s'instaurer des systèmes d'accréditation des accréditeurs,...

8. Les organismes nationaux d'accréditation doivent être tenus de mettre en place dans le cadre d'une structure européenne adaptée, un système d'audits "croisés" (exercés à tour de rôle par exemple, par deux pays sur un troisième) afin d'assurer la reconnaissance mutuelle, dans tout l'Espace Economique Européen, des certificats émanant de laboratoires et organismes accrédités.

B) EXEMPLES D'ACTIONS A MENER

1. Les organismes nationaux d'accréditation devraient adhérer à une structure européenne élargie à tout l'Espace Economique Européen (Union Européenne + pays de l'AELE).

2. European cooperation for Accreditation of Laboratories (EAL) et European Accreditation of Certification (EAC) devraient fusionner le plus rapidement possible afin de créer une structure couvrant tous les domaines susceptibles de donner lieu à délivrance d'accréditations.

3. Des accords de reconnaissance mutuelle devraient être signés entre tous les membres des deux organisations précitées.

4. Les organismes nationaux d'accréditation devraient, tous ensemble, établir et publier les règles de base, les normes et documents d'interprétation, les critères d'admission, les conditions d'audits, ..., nécessaires à la signature de tels accords.

5. Tous ces documents devraient être officiellement approuvés tant au niveau national qu'au niveau communautaire par l'ensemble des partenaires concernés (administrations, normalisateurs, organismes,...).

6. Les organismes d'accréditation européens devraient s'interdire toute concurrence commerciale entre eux et veiller à assurer la transparence la plus totale de leurs activités.

III / LA SITUATION ACTUELLE

A) AU NIVEAU EUROPEEN

De nombreux pays se sont dotés, avant la France, de systèmes d'accréditation ne se limitant pas aux seuls laboratoires d'étalonnages ou d'essais et d'analyses.

Cependant, à ce jour, tous les pays de l'Union Européenne ne disposent pas encore, comme nous, d'un organisme unique tel que préconisé par la Commission de Bruxelles.

Il n'empêche que les travaux de rapprochement entre les différents accréditeurs européens ont commencé depuis longtemps. On distingue ainsi deux structures de discussion et de concertation :

- European cooperation for Accreditation of Laboratories (EAL) pour les laboratoires : EAL résulte de la fusion, le 1er Juin 1994, de deux structures préexistantes, à savoir, WECC pour les laboratoires d'étalonnage et WELAC pour les laboratoires d'essais,

- European Accreditation of Certification (EAC) pour les organismes de certification et d'inspection.

Les travaux sont déjà bien avancés dans le cadre d'EAL puisque des accords de reconnaissance mutuelle (MLA : MultiLateral Agreements) entre une douzaine de pays, dont la France, ont déjà été signés tant pour ce qui concerne les étalonnages que les essais et analyses.

Dans le domaine de l'accréditation des organismes certificateurs, les travaux, commencés plus récemment, ont déjà abouti à la signature de nombreux engagements d'adhésion au système (MoU : Memorandum of Understanding) et à un accord de reconnaissance mutuelle limité à dix pays, dont la France.

A noter également que la fusion entre EAL et EAC, prévue pour fin 1997, a déjà débuté par la fusion de plusieurs comités de chacune de ces deux structures.

Par ailleurs, un travail déjà considérable, mais toujours en cours, a déjà été réalisé en matière de référentiels, nécessaire à l'accréditation. Il faut citer les normes ou projets de normes suivants :

- EN 45001 : critères généraux concernant le fonctionnement des laboratoires d'essais,
- EN 45004 : critères généraux pour le fonctionnement de différents types d'organismes procédant à l'inspection,
- EN 45011 : critères généraux concernant les organismes de certification procédant à la certification de produits,
- EN 45012 : critères généraux concernant les organismes de certification procédant à la certification des systèmes qualité,
- EN 45013 : critères généraux concernant les organismes de certification procédant à la certification du personnel,
- EN 45003 : systèmes d'accréditation de laboratoires d'essais et d'étalonnage,
- prEN 45010 : prescriptions générales pour l'évaluation et l'accréditation d'organismes de certification.

Enfin, on peut considérer aujourd'hui que, tant en matière de non concurrence entre accréditeurs européens en Europe, qu'en ce qui concerne la transparence des activités d'accréditation, la situation est maintenant satisfaisante au sein d'EAL et d'EAC.

B) EN FRANCE

Avant l'avènement du Comité Français d'Accréditation (COFRAC), la France possédait, depuis longtemps, un système d'accréditation partiel, relatif aux laboratoires d'essais (le RNE : Réseau National d'Essais) et aux laboratoires d'étalonnage (BNM-FRETAC : Bureau National de Métrologie).

En revanche, pour les organismes d'inspection et pour les organismes certificateurs, rien n'était formalisé en dehors du système interne d'accréditation (C2A) de l'AFAQ (Association Française pour l'Assurance de la Qualité).

Faisant suite aux orientations préconisées dans le rapport du député Alain BRUNE, les pouvoirs publics ont choisi en Octobre 1993, de combler cette lacune par la mise en place d'un système national d'accréditation couvrant la totalité des secteurs (laboratoires, organismes de certification et organismes d'inspection) : le COFRAC, constitué le 29 avril 1994.

A signaler que cette mise en place s'est accompagnée des mesures suivantes:

- révision de la loi dite "Scrivener" régissant la procédure d'agrément des organismes certificateurs de produits industriels et de services,
- loi articulant les certifications nationales et les reconnaissances de qualité définies par la réglementation communautaire pour les produits agricoles et alimentaires.

Le COFRAC s'est donc constitué en association déclarée selon la loi du 1er Juillet 1901 et a tenu sa première Assemblée Générale le 22 Juin 1994.

Sa constitution et ses modalités de fonctionnement sont conformes aux règles définies au niveau communautaire par le projet de norme EN 45010 évoqué plus haut.

Ses membres sont les personnes morales qui s'intéressent à son objet. Ils sont répartis en quatre collèges :

- les organismes et laboratoires accrédités,
- les groupements professionnels recourant aux services des organismes ou laboratoires du collège précédent,
- les utilisateurs finaux, groupements de consommateurs et acheteurs publics,
- les pouvoirs publics.

De plus, des personnalités qualifiées sont admises en tant que membres associés.

Ses ressources sont principalement constituées des cotisations de ses membres, des redevances perçues à l'occasion de l'instruction, de la délivrance et de la surveillance des accréditations, ainsi que des aides financières de l'Etat dont le montant va, très logiquement, diminuant d'année en année.

Outre les sections « Essais » et « Etalonnage » héritées du système d'accréditation partiel décrit plus haut, le COFRAC compte maintenant six autres sections mises en place et devenues opérationnelles, de façon échelonnée, au cours des années 1995 et 1996, afin de pouvoir accréditer :

- les organismes d'inspection,
- les organismes certificateurs de produits industriels,
- les organismes certificateurs de produits agricoles et alimentaires,
- les organismes certificateurs de systèmes qualité et de personnels,
- les vérificateurs environnementaux pour l'application du règlement européen SMEA (Système de Management Environnemental et d'Audit),
- les organismes certificateurs de services.

Enfin, le COFRAC est doté d'une Commission d'Audit Interne et d'une Commission des Relations Extérieures, cette dernière, dont l'avis peut être sollicité pour tout ce qui concerne les relations du COFRAC avec ses homologues étrangers, étant également chargée de proposer et de suivre l'exécution des actions de promotion du COFRAC (tant en France qu'à l'étranger).

Le COFRAC dispose de locaux sis au 37 rue de Lyon - 75012 PARIS (tél. : 01.44.68.82.20) dans lesquels est hébergé tout son personnel permanent.

IV / EN CONCLUSION

Afin de favoriser la libre circulation des produits dans l'ensemble de l'Espace Economique Européen, des systèmes d'accréditation des laboratoires et organismes de certification et d'inspection ont été mis en place ou sont en train de l'être. La coordination indispensable de leurs travaux sera assurée par les structures EAL et EAC, en cours de fusion, avec l'appui de la Commission de Bruxelles et des organismes européens de normalisation.

Certes, les structures telles le COFRAC qui constituent un étage supplémentaire pour l'instauration de la confiance, génèrent forcément un coût de mise en place et de fonctionnement. C'est le "revers de la médaille", mais ce coût est largement compensé par les effets de la reconnaissance internationale des essais, étalonnages et certificats.

Les entreprises françaises se doivent de profiter au maximum de ce système conçu pour leur faciliter l'accès à tout l'espace européen, voire mondial.

SOLS ET QUALITE DES PRODUITS : QUELS PROBLEMES POUR LA RECHERCHE ?

Pierre STENGEL ^{*}, Jean BOIFFIN ^{**}

^{*} INRA, Département de Science du Sol

^{**} INRA, Département d'Agronomie

I. INTRODUCTION

Le choix du thème de ces rencontres est significatif d'une importante évolution en cours dans la perception des fonctions du sol par rapport à la production agricole. La révolution de l'agriculture des trente glorieuses avait surtout visé à s'affranchir des limitations à la productivité imposées par le milieu. Elle avait ainsi tendu à l'artificialisation pour assurer de façon homogène les conditions optimales de fonctionnement du couvert végétal. Progressivement, le sol était ainsi assimilé à un simple support physique, caractérisé essentiellement par ses propriétés mécaniques et son aptitude à transférer vers la plante l'eau et les éléments minéraux.

Cette vision réductrice est fortement remise en cause par le changement du contexte global dans lequel se détermine aujourd'hui l'avenir de notre agriculture. Les composantes de ce changement sont évoquées par les intervenants précédents pour ce qui concerne les produits agricoles eux-mêmes. Concurrence internationale exacerbée, préoccupation croissante des consommateurs pour l'effet de l'alimentation sur leur santé, recherche simultanée d'authenticité et de typicité, adaptation impérative aux besoins de la transformation et de la distribution en sont des éléments dominants. Ils suscitent en réponse une stratégie d'adaptation compétitive consistant à garantir de plus en plus précisément les caractéristiques qualitatives des produits, à les diversifier, à construire leur image de spécificité.

Au-delà des mises en cause qui en résultent pour les manières de produire, les procédés de transformation, l'organisation des filières, la

question de l'effet de la variabilité des sols sur celle de la qualité des produits est ainsi posée, ou reposée, par rapport à des exigences plus rigoureuses.

L'hypothèse, plus ou moins explicitée, d'une relation causale directe entre nature des sols et qualité des produits fait partie de l'héritage culturel de notre tradition agricole, marquée par la diversité des milieux et des modes d'exploitation. La tradition viticole a largement contribué à la perpétuer. A cet empirisme resté généralement assez vague doit succéder la capacité à identifier, comprendre et quantifier la part pédologique du déterminisme de la qualité des produits agricoles, pour répondre prioritairement à trois interrogations :

- comment assurer le respect de critères de qualité en tenant compte de la variabilité des sols ?
- comment valoriser la diversité des sols en tant que composante de la typicité et de l'image de qualité des produits ?
- quels risques d'altération de la qualité des produits résultent de la contamination des sols ?

Ces interrogations structurent le contenu de ces rencontres. Elles sont porteuses d'enjeux scientifiques importants dont la difficulté centrale est commune. Il s'agit d'établir une relation sol-produit qui ne se manifeste qu'à travers des interactions biologiques complexes et successives dans le processus d'élaboration de la récolte. Elles sont sous la dépendance de régulations propres à la plante, éventuellement d'un cortège d'êtres vivants qui lui sont associés, et de l'influence des conditions de terrain, soumises à l'influence des techniques de culture, dont résulte en premier lieu le régime climatique local. Cette complexité, encore plus sans doute que par rapport à l'élaboration du rendement, rend illusoire une approche expérimentale de type factoriel. La démarche de corrélation entre caractéristiques du sol et des produits peut informer sur les amplitudes de variations et l'existence de tendances lourdes. Ses limites pour l'identification des facteurs explicatifs et de leurs lois l'action, les risques d'instabilité des conclusions et de confusion d'effets sont suffisamment connus pour borner clairement la contribution à en attendre.

Ceci conduit à mettre en œuvre une démarche consistant à :

- décrire le fonctionnement biologique d'élaboration du produit et de ses caractéristiques de qualité,
- représenter ses interactions avec le milieu,
- identifier les variables édaphiques qui les influencent, pour quantifier leurs variations, leurs effets, leur dépendance des techniques culturales.

Elle revient à élaborer des modèles intégrés de fonctionnement des cultures, décrivant les voies métaboliques d'élaboration de la qualité et leur dépendance par rapport au milieu. Il convient ensuite de les coupler à des modèles de fonctionnement du sol, décrivant la dynamique spatiale et temporelle des variables contrôlant cette dépendance.

II. LE SOL, FACTEUR DU PROCESSUS BIOLOGIQUE D'ELABORATION DE LA QUALITE.

La problématique des relations sol-qualité des produits n'a pas été exclue, dans les décennies récentes, des préoccupations d'une agronomie majoritairement orientée vers l'étude de l'élaboration du rendement. L'influences des propriétés mécaniques sur les récoltes d'organes souterrains, de la disponibilité en azote sur la composition des fourrages, la correction des effets des carences en oligo-éléments, en sont des exemples. La recherche de la maîtrise de la qualité a néanmoins été considérée comme relevant majoritairement des recherches conjointes de la physiologie des espèces concernées, de leur amélioration génétique et du contrôle de leurs ravageurs. Le rôle éminent de ces disciplines se maintiendra dans l'avenir grâce notamment à l'efficacité que leur confèrent les moyens de la biologie moléculaire et le potentiel des manipulations génétiques.

Mais l'affinement simultané de la connaissance du matériel végétal et des critères de qualité implique de mieux prendre en compte les facteurs du milieu et des actions techniques dans la variabilité de ces critères. La dépendance de la composition biochimique, de la structure et des propriétés organoleptiques des organes récoltés par rapport aux conditions climatiques et à la nutrition hydro-minérale devient ainsi un objet d'étude majeur pour l'écophysiologie. Ceci l'engage à décrire de façon plus fine, les flux métaboliques, l'allocation des assimilats et le métabolisme secondaire, dans le fonctionnement de la plante. Les difficultés scientifiques d'un tel projet sont importantes et le lien avec les conditions dépendant du sol est loin d'être établi de façon à la fois précise et exhaustive. On peut néanmoins en anticiper comme conséquence le besoin d'une maîtrise sensiblement plus fine des flux hydro-minéraux. Il s'agit de passer d'une disponibilité en permanence non limitante à la maîtrise de calendriers de fournitures propres à favoriser la composition recherchée des produits.

A terme, il est probable que la diversification des critères recherchés, pour mieux assurer par exemple l'identité gustative des fruits et légumes, ou justifier l'affirmation de leur valeur pour la santé (teneur en vitamines, en minéraux, en fibres, ...), induise également une diversification des éléments pris en compte.

Au-delà du besoin de développement nouveau des recherches de base sur les flux d'éléments minéraux sol-plante, incluant plus systématiquement en particulier les conditions limitantes, la recherche d'outils de pilotage très fin de la disponibilité à partir de la connaissance des réserves du sol risque de se heurter à des limites de précision difficiles à surmonter. L'intérêt d'indicateurs végétaux sensibles, et à temps de réponse rapide, sera donc à considérer, en concurrence ou en complément de données analytiques sur le sol.

Enfin, progressivement, l'identification des conditions de réalisation d'objectifs qualitatifs, et de la plus ou moins grande difficulté à les assurer suivant les contextes pédo-climatiques, conduira à réapprécier les notions d'aptitudes et de potentialités des milieux en y intégrant de nouvelles composantes. On rejoint ainsi la question du rôle du sol dans l'"effet terroir" dont le contenu scientifique est effectivement très proche.

III. VALORISER LA DIVERSITE DES SOLS

L'hypothèse d'une relation causale entre propriétés du sol et qualité des produits est, nous l'avons vu, difficile à établir dès lors que cette relation ne s'exprime qu'en interaction avec un climat local et un processus phytotechnique dont un objectif majeur est généralement de corriger d'éventuels effets limitants du milieu. Lorsque la qualité intègre la notion de typicité la question est rendue plus complexe par la multiplicité des caractères potentiellement constitutifs de cette typicité et la nécessité préalable de les identifier. Ceci concerne des recherches qui se situent hors du champ de l'appréciation du rôle du sol, auxquelles doivent s'adjoindre, dans la démarche de valorisation d'un terroir par une appellation d'origine géographique, celles qui portent sur :

- l'identification des singularités du produit à des signes de qualité,
- la compatibilité entre l'objectivation des éléments de typicité et le principe implicitement fondateur de l'exclusivité de l'appellation, qui serait la non reproductibilité de ces éléments en d'autres lieux et par d'autres procédés.

La complexité même du problème a longtemps maintenu la question de la délimitation des terroirs dans le domaine de l'expertise, appuyée sur la connaissance corrélatrice. L'accroissement de son acuité, en terme de stratégie commerciale et son extension nouvelle ont justifié le développement d'une approche plus analytique. Elle a abouti notamment à établir sur des bases plus rigoureuses le rôle de la composition floristique des fourrages dans la qualité de fromages ou du régime thermo-hydrique du sol dans la qualité des vins. Ce dernier cas, bien que débouchant sur des caractéristiques du terrain, plutôt que du sol, incluant la topographie et

l'hydrologie, permet d'accéder via la modélisation des transferts dans le sol aux variables caractéristiques pertinentes : propriétés hydrodynamiques et d'échanges thermiques. Le problème se pose alors de la connaissance de leur variabilité spatiale et temporelle et des méthodes d'estimation. In fine, on retrouve un problème fondamental de la physique du sol que ni les bases de données ni les méthodes d'estimation disponibles ne résolvent avec fiabilité, compte tenu des résolutions requises.

Cet exemple a une portée générale. L'identification des composantes sol d'un "effet terroir" soulèvera la question de l'acquisition de données généralement non cartographiées, avec une résolution élevée. Cela conforte l'intérêt des recherches sur les méthodes permettant d'en accroître à la fois la productivité et la précision.

Engager l'investissement scientifique permettant de quantifier le déterminisme d'un effet sol dans la définition d'un terroir constitue, en raison des connaissances requises sur le fonctionnement de la plante et les propriétés du sol, une décision lourde. Elle peut être justifiée si une variabilité du produit peut être, avec un degré suffisant de présomption, associée à la variabilité du sol. Cela n'est certainement pas une situation générale et il convient de s'interroger sur une exploration plus systématique des conséquences qualitatives de la variabilité des sols, fondée sur une connaissance très détaillée de leur organisation spatiale et les données analytiques correspondantes sur les produits. Cela reviendra à étendre aux caractères qualitatifs la démarche de l'agriculture de précision, en inversant éventuellement sa perspective pour rechercher une hétérogénéité valorisable plutôt que pour la contrôler.

IV. CONTAMINATION DES SOLS ET RISQUES D'ALTERATION DE LA QUALITE DES PRODUITS

La capacité du sol à accumuler et permettre le transfert de substances contaminantes de diverses origines, agricole, industrielle ou urbaine, induit un risque de contamination des cultures par des molécules minérales ou organiques menaçant potentiellement la santé des consommateurs.

Un premier défi pour la recherche résulte de la diversité des substances en cause : éléments traces métalliques, radionucléides, composés azotés, molécules pesticides et leurs métabolites, produits organiques industriels ou émis par les combustions. C'est en particulier une difficulté propre à l'étude de l'impact des épandages de déchets urbains, susceptibles de contenir, même s'il s'agit pour beaucoup d'entre eux de teneurs très faibles, un large éventail de ces substances. Faire face à cette multiplicité impose de concentrer les travaux sur un nombre restreint de substances types, choisies comme modèles en fonction de leurs effets nocifs reconnus et de la

représentativité de leur comportement biogéochimique estimé par leurs caractéristiques physico-chimiques.

Pour chacune d'elles les recherches concernant le diagnostic des risques de contamination des récoltes induits par leur présence comporte les étapes suivantes :

- connaître les voies de contamination et identifier l'éventuelle part du transfert direct sol-racine, sans négliger le transport par voie atmosphérique dont l'implication, notamment dans le cas des pesticides, apparaît de plus en plus clairement,
- décrire les mécanismes d'absorption racinaire et le devenir des contaminants dans la plante : fonctionnement des racines et interactions avec les parties aériennes, échanges dans la rhizosphère en fonction des conditions physico-chimiques locales, localisation et spéciation des substances absorbées dans les organes et tissus végétaux,
- évaluer les concentrations et la biodisponibilité dans le sol et ses facteurs de variation.

Cette dernière étape de diagnostic, concernant plus spécifiquement le sol, apparaît centrale par rapport au thème de ces rencontres. Elle soulève de sérieuses difficultés analytiques, même au niveau de l'appréciation des teneurs totales, compte tenu des concentrations extrêmement faibles qui sont en cause, mais surtout des limites propres aux méthodes d'extraction. La pertinence de ces dernières est particulièrement cruciale dans le cas des micropolluants organiques pour lesquels la connaissance de la nature moléculaire de résidus non extractibles et de leur devenir est une composante essentielle de l'appréciation des risques.

La biodisponibilité est le concept majeur de l'analyse des transferts sol-plante. Le développement de méthodes quantitatives fiables, reconnues internationalement et économiques d'évaluation est la condition indispensable d'un diagnostic pertinent de la qualité des sols à l'égard des productions végétales, et ainsi de la possibilité de fonder sur des bases rigoureuses décisions, normes et règlements.

La persistance des incertitudes qui affectent encore l'estimation de la biodisponibilité des éléments majeurs de la nutrition minérale, malgré les efforts continus des chercheurs agronomes, éclaire les difficultés scientifiques à surmonter. Les progrès dépendent d'une mobilisation convergente des moyens d'analyse de l'état de liaison des molécules incriminées dans les phases minérales et organiques du sol, de la modélisation géochimique, de la connaissance des flux d'échange et de l'activité des communautés d'organismes rhizosphériques, bactéries et

champignons. Un effort de recherche de grande ampleur est à accomplir. Il doit nourrir le progrès des méthodes corrélatives fondées sur des tests d'extraction et la mesure directe de l'absorption par les végétaux. Son importance est décisive pour le développement de moyens de pronostic à long terme. Or, compte tenu des temps de séjour des polluants minéraux ou organiques récalcitrants dans les sols, une préoccupation majeure doit être de limiter les risques de mobilisation après de longues périodes d'accumulation, en fonction des conditions physico-chimiques modifiées par l'évolution de l'utilisation des sols ou du climat.

Cela implique en outre l'estimation des flux d'exportation à partir du sol, par l'eau et les plantes. La mise au point de modèle de pronostic à long terme, capables d'estimer la biodisponibilité et ses variations dépend de l'existence de sites de suivi de longue durée. La constitution et l'entretien d'un dispositif structuré d'observation de la qualité des sols est donc une condition nécessaire au progrès de ces recherches.

Relevant d'une problématique différente quant aux processus de contamination des produits végétaux à partir du sol, l'inquiétude à l'égard de la possibilité de survie dans le sol et de dissémination d'organismes pathogènes pour l'homme et les animaux domestiques est renouvelée par l'intensification du recours à l'épandage de déchets urbains et résidus d'élevage. On peut y associer les craintes concernant la dissémination d'organismes génétiquement modifiés, ou la conservation des prions. L'effort de recherche consacré à ces risques par les spécialistes du sol a été très limité dans le passé récent. Une des raisons principales en est la faiblesse des relations scientifiques entre ces chercheurs et les spécialistes de la biologie des organismes concernés. Le besoin de garanties de plus en plus rigoureuses à cet égard devra induire le développement de collaborations permettant de réapprécier des risques, même jugés très faibles, ou d'étudier ceux dont la nature est complètement nouvelle.

V. CONCLUSIONS

L'émergence des préoccupations concernant la protection de l'environnement avait déjà fortement modifié la vision des fonctions du sol et, en conséquence, de l'appréciation des multiples composantes de sa qualité. En particulier, celles qui régissent ses relations avec l'eau, dans leurs aspects quantitatifs et qualitatifs, les grands cycles biogéochimiques et la dynamique des polluants, avaient acquis une importance prépondérante.

L'évolution en cours au sujet de la maîtrise de la qualité des produits est très corrélée à la précédente dans ses déterminants socio-économiques. Elle lui est inextricablement liée en ce qui concerne les besoins

d'information sur les sols, leurs fonctionnements, la variabilité de leurs propriétés et leurs altérations anthropiques. Elle a cependant pour conséquence de renforcer l'interaction sol-plante comme objet de focalisation de l'analyse du fonctionnement du sol et du végétal. Elle contribue ainsi à la nécessité d'une intégration plus complète des sciences agronomiques, unissant dans une même démarche objectifs de maîtrise de la production et de contrôle de ces impacts environnementaux

Dans l'analyse du processus d'élaboration de la qualité des produits végétaux, il est clair que les questions décisives porteront d'abord sur le fonctionnement de la plante et ses déterminants parmi les variables caractéristiques du milieu. La définition de nouveaux critères d'appréciation de la qualité des sols n'en est logiquement qu'une conséquence, même si elle met en jeu des recherches complémentaires et importantes sur les sols eux-mêmes. Cependant, la gestion des sols, en tant que ressource non renouvelable, implique une évaluation qui dépasse les risques associés à un usage immédiat, pour des conditions de production connues. Le diagnostic des contaminations doit tenir compte de cette dualité, comme de la nature variée des risques : contamination des récoltes et dissémination de substances polluantes dans l'environnement. A l'extrême, ces diverses questions peuvent se confondre dans la construction de l'image de qualité des produits par le consommateur qui pourrait se traduire par l'association "des produits sains dans des sols sains".

On reconnaît là le support de l'argumentaire en faveur de l'agriculture biologique. Sa pénétration dans certains pays consommateurs de ces produits suffirait à justifier qu'il soit intégré dans ces réflexions sur l'appréciation et le devenir de la qualité des sols.

Le sol, la terre, le terroir : d'une définition à une réalité opérationnelle.

J. SALETTE

*INRA - Centre de Recherches d'Angers
Unité de recherches sur la vigne et le vin*

1) Terroir et potentialités : définitions

Les dictionnaires nous donnent deux sens complémentaires pour le mot terroir, et qui nous concernent également :

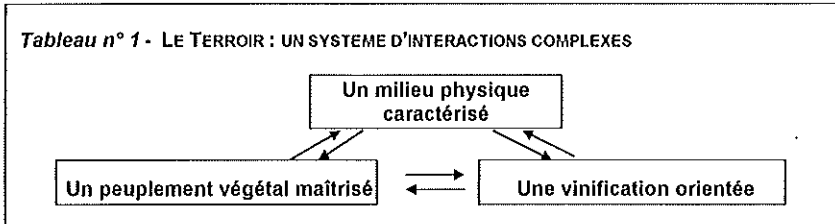
- « Une étendue de terre assez limitée considérée du point de vue de ses qualités ou de ses aptitudes agricoles »,
- « Une région rurale considérée comme la cause de caractères particuliers de ceux qui y vivent ou qui en sont originaires ».

Dans la première acception du terme domine le sol en place, **le terrain**, dans leurs aspects physique et agrologique ; mais la nécessité de mieux les **caractériser** a conduit à faire progressivement appel à des disciplines complémentaires, au fur et à mesure du propre progrès de ces dernières : géologie, climatologie (à petite échelle), pédologie, climatologie (à grande échelle), cartographie, géologie et géographie physique appliquée au paysage. D'où le besoin de dépasser le cadre agrologique et de passer du terrain au terroir pour prendre en compte des « aptitudes agricoles », ici des aptitudes viticoles. Ceci conduit obligatoirement et spécifiquement à étudier les sols par rapport au peuplement végétal particulier qui y est ou qui y sera cultivé.

Donner un cadre expérimental à ces approches nous a conduits à poser la définition de l'unité élémentaire de notre objet d'étude, d'où la définition du « Terroir de base » : la plus petite unité physique homogène (éco-géo-pédologique) que l'on peut différencier utilement, soit dans un but pratique soit dans un but d'étude scientifique, et qui constitue une entité de fonctionnement unitaire du système « milieu physique x vigne ». L'étude du terroir de base, face à la préoccupation de sa valorisation par une culture spécialisée, implique l'étude des facteurs du milieu physique qui le définissent en termes d'aptitudes culturelles, en l'occurrence, **d'aptitudes viticoles**.

La deuxième dimension du terme terroir nous invite à prendre en compte son utilisation spécifique et la valorisation particulière de ses aptitudes viticoles par une communauté rurale de viticulteurs : l'usage, le savoir-faire, les pratiques culturelles et viticoles, les pratiques de vinification font partie

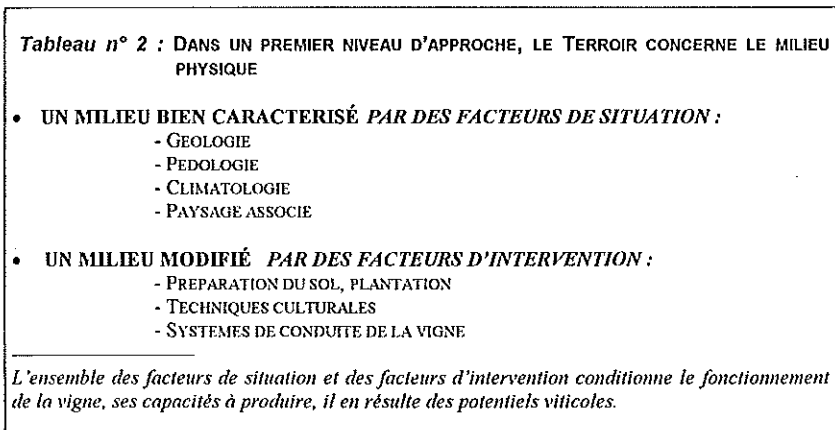
intégrante du terroir pris dans ce sens plus large. Le terroir viticole apparaît donc bien comme la résultante d'une interaction complexe entre un milieu physique, un mode d'exploitation de la vigne et un ensemble de pratiques bien définies tant pour la vigne que pour la vinification (tableau n°1). D'où l'intérêt d'une approche systémique dans les études sur les terroirs.



A ces deux niveaux d'approche, le terroir peut se définir par des facteurs de situation et des facteurs d'intervention (tableau n°2).

Les facteurs de situation sont les données qui caractérisent le terroir de base et la parcelle viticole ; ils sont de deux ordres : les facteurs naturels du milieu (décrits en termes de géologie, topographie, pédologie, climatologie ; certains sont favorables, d'autres constituent des contraintes) et les facteurs biologiques (porte-greffes, cépage, mode de conduite) ; ils peuvent être modifiés pour une meilleure adaptation à des objectifs de production ; leur ensemble contribue à définir le paysage associé au terroir de base.

Les facteurs d'intervention concernent deux domaines : les techniques culturales et viticoles ; les techniques de vinification.



Ces deux niveaux d'approche conduisent à donner respectivement les deux définitions suivantes pour le terroir (Salette, 1996) :

- Un terroir est un agro-écosystème caractérisé, doté d'une capacité à donner des produits particuliers auxquels il confère une originalité et un caractère propre.

- Un terroir est un système d'interactions complexes entre un ensemble d'actions conduites par des hommes, une production agricole et un milieu physique caractérisé : ensemble valorisé par un produit auquel il confère une originalité particulière.

2) Une logique de fonctionnement

La prise en compte de la conjonction de l'ensemble des aptitudes viticoles (facteurs de situation favorables) et des éventuelles contraintes du milieu (facteurs défavorables) conduit naturellement et logiquement à l'idée de vouloir déterminer la **capacité à produire** qui en résulte ; à exprimer ce qu'il est possible de produire, ce qui peut être obtenu en certaines circonstances et sous certaines conditions : ceci constitue précisément la définition et le contenu sémantique de ce qu'il convient d'appeler « **le potentiel de production** ».

A un terroir de base cultivé en vigne, on peut faire correspondre un **potentiel viticole** qui sert précisément à le caractériser par rapport à un objectif de production :

<i>terroir de base + peuplement végétal</i>	→	potentiel viticole
---	---	---------------------------

Pour un terroir donné, le **degré d'expression du potentiel viticole** est plus ou moins élevé ; il dépend de l'adéquation des pratiques culturales au système plante x milieu ; il se traduit par le mode d'action des diverses variables de fonctionnement (Morlat 1996).

On est donc conduit à définir et à mettre au point des itinéraires techniques qui vont permettre d'atteindre le plus haut niveau possible de l'expression des potentialités de la vigne dans le milieu considéré. D'où la nécessité logique de la mise au point d'un ensemble d'opérations techniques complémentaires et qui convergent vers un même **objectif qualitatif** ; d'où la nécessité de tout mettre en œuvre pour l'élaboration de la **meilleure vendange possible** dans un terroir de base donné. Ceci revient à faire coïncider itinéraire technique dans la conduite de la vigne et **Itinéraire physiologique** de la maturation du raisin. Cette complémentarité permet d'atteindre ce que l'on peut définir comme le **potentiel qualitatif de la vendange** (ou potentiel vendange) :

<i>potentiel viticole + techniques culturales et mode de conduite adaptés</i>	→	potentiel viticole
---	---	---------------------------

Le peuplement végétal maîtrisé par l'adoption d'un itinéraire technique adapté permet d'obtenir l'itinéraire physiologique d'élaboration des grappes et de maturation des baies qui va conduire à l'expression optimum du potentiel vendange. Mais ce processus varie selon les millésimes : l'interaction entre le fonctionnement de la vigne et les conditions climatiques de l'année est plus ou moins forte selon les terroirs (les meilleurs terroirs présentent un « effet tampon » de ces variations).

L'étude de la manière dont les itinéraires physiologiques de la maturation du raisin diffèrent selon les terroirs est naturellement l'outil de travail privilégié pour l'approche explicative du lien causal entre le milieu et le produit (tableau n°3), d'où l'intérêt des études de cinétiques comparées de maturation entre terroirs de base différents.

De manière complémentaire, il est intéressant d'aborder l'effet des diverses pratiques (culture et conduite de la vigne) sur les cinétiques de maturation. De la recherche de la meilleure expression possible du potentiel vendange va également résulter une application d'importance : la connaissance plus approfondie de l'élaboration du rendement ; elle doit permettre de fonder une méthode plus cohérente pour parvenir à la limitation des rendements que les règles des Appellations d'Origine de vins définissent pour chacune d'entre elles.

Dans ce premier niveau d'approche, la vendange (de même que les baies en cours de maturation) peut être caractérisée assez simplement par divers critères analytiques (acidité, teneurs en sucres ou en polyphénols, intensité colorante, etc...) : la comparaison analytique des vendanges issues de terroirs de base différents permet de les **hiérarchiser** et, par retour, elle permet de **valider un classement entre les différents terroirs étudiés**. Un tel classement étant établi en termes de potentialités, chacun des terroirs se différencie alors par son potentiel viticole, complété par le niveau du potentiel vendange correspondant :

<i>Plusieurs terroirs de base, caractérisés et différenciés</i>	<input type="checkbox"/>	→	0	<i>Des vendanges que l'on peut différencier par leurs caractères analytiques (= des moûts différenciés)</i>
	<input type="checkbox"/>	→	0	
	<input type="checkbox"/>	→	0	

Le potentiel vendange doit ensuite pouvoir s'exprimer au plus haut degré par l'utilisation de pratiques de vinification bien adaptées à la spécificité de la vendange obtenue, et orientées vers le **type de vin souhaité**. La vinification, si elle est bien conduite, permet de conserver dans le vin obtenu le niveau des potentialités qualitatives de la vendange qui expriment elles-mêmes les potentialités viticoles du terroir. Au bout de cette chaîne technique de la qualité, on peut donc définir un **potentiel oenologique**, ou **potentiel vin**.

Il est important de réfléchir à l'ensemble des techniques oenologiques qui peuvent être envisagées pour orienter une vinification permettant d'atteindre le niveau le plus élevé dans l'expression du potentiel vin, (tableau n°3) : c'est pour caractériser cette perspective de recherche d'optimisation d'une vinification adaptée à la variabilité des vendanges obtenues que nous avons proposé le terme d'*éco-oenologie* (Salette, 1996).

Potentiel vendange + techniques de vinification → **Potentiel vin**
bien orientées

Tableau n° 3. : TROIS NIVEAUX DE FACTEURS EXPLICATIFS DU LIEN ENTRE LE TERROIR ET LE VIN (CRITERES DE COMPARAISON ENTRE DIFFERENTS TERROIRS DE BASE)

◇ LE FONCTIONNEMENT DE LA VIGNE	<ul style="list-style-type: none"> • enracinement et fonctionnement racinaire • vigueur et fonctionnement végétatif • régularité dans l'alimentation hydrique • précocité • élaboration du rendement • fonctionnement de la grappe ; biosynthèses 	POTENTIEL VITICOLE
◇ LA VENDANGE	<ul style="list-style-type: none"> • différences de cinétiques de maturation • dates de vendanges possibles • caractérisation du grain : pulpe, pellicule • composition des moûts 	POTENTIEL VENDANGE
◇ LE VIN	<ul style="list-style-type: none"> • caractéristiques analytiques, équilibres • caractéristiques sensorielles, complexité • typicité et plus-values qualitatives • évolution au cours du vieillissement 	POTENTIEL VIN

Cette succession de potentiels imbriqués, qui se déduisent l'un de l'autre par un raisonnement de simple logique, et qui s'expriment d'autant mieux que les techniques utilisées sont bien raisonnées et orientées dans ce but prédéterminé, fonde la logique du lien du terroir au produit, et conduit aux éléments d'une réalité opérationnelle justifiée.

3) Bases pour une réalité opérationnelle

De l'esquisse de théorisation ci-dessus, on peut déduire l'importance d'un intermédiaire entre le milieu et le produit : la vendange et ses caractéristiques.

En pratique, compte tenu des difficultés d'analyse de la baie de raisin (divisée en pellicule, pulpe, jus, pépins), c'est la composition analytique du

moût qui est souvent étudiée et qui sert à caractériser le potentiel vendange (tableau n°3).

Tous les facteurs du milieu qui peuvent agir sur les variables du fonctionnement de la vigne vont donc avoir une influence sur la composition des moûts : le fonctionnement racinaire lié à l'enracinement et aux interactions sol x pédoclimat x racines (Morlat, 1989) ; le fonctionnement végétatif qui conditionne la vigueur, la biomasse des sarments, feuilles, baies et leur composition. Le fonctionnement global de la vigne conditionne directement la composition et la nature de la vendange, son niveau quantitatif (le rendement) et la cinétique de sa maturation, donc son niveau qualitatif.

Les travaux de recherche ont bien démontré l'influence de certains de ces facteurs : régularité de la nutrition hydrique de la plante au cours de la mise en place de la baie et de sa maturation (Seguin, 1975) ; relation entre les facteurs pédoclimatiques et le fonctionnement des systèmes racinaires conditionnant la précocité du départ en végétation de la vigne et, par voie de conséquence, le degré de maturité des baies au moment de la vendange (Morlat, 1989 ; 1996 ; Lebon, 1993)

A des terroirs de base différents correspondent des cinétiques de maturation différentes et des compositions de moûts différentes : la composition du moût, caractérisée par des critères simples (teneur en sucre, teneur en polyphénols) peut permettre de classer les moûts en fonction de ces teneurs (Asselin et *al.*, 1996). Au **classement hiérarchisé des moûts** (ou des vendanges) ainsi réalisé, on peut faire correspondre un **classement hiérarchisé des terroirs** de base correspondants. Il en résulte un double aspect pratique : d'une part en termes de délimitation des aires d'appellation avec un problème d'échelle (Jacquet et *al.*, 1995) ; d'autre part dans le fait qu'une propriété viticole représente le plus souvent plusieurs terroirs de base qui peuvent être valorisés selon différentes stratégies.

Il en résulte des possibilités importantes de choix par le viticulteur : chronologie des opérations selon les parcelles, différenciation de la date de vendange ; vinifications séparées avec ou sans assemblage.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASSELIN C., MORLAT R., SALETTE J., 1996. Déterminisme de l'effet Terroir et gestion oenologique en Val de Loire. Application aux vins rouges de Cabernet franc et aux vins blancs moelleux de Chenin. *Revue Française d'Oenologie*, Janv.-Fév. 1996, n° 156, 14-20.
- JACQUET A., SALETTE J., CELLIER P., MORLAT R., FANET J., 1995. Réflexions sur la notion d'échelle pour le terroir. *Revue des Oenologues*, 77, 57-60.
- LEBON E., 1993. *De l'influence des facteurs pédo et mésoclimatiques sur le comportement de la vigne et les caractéristiques du raisin. Application à l'établissement de critères de zonage des potentialités qualitatives en vignoble septentrional (Alsace)*. Thèse de Doctorat de l'Université de Dijon. 165 p.
- MORLAT R., 1989. *Le terroir viticole : contribution à l'étude de sa caractérisation et de son influence sur les vins. Application aux vignobles rouges de Moyenne Vallée de la Loire*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Bordeaux II.
- MORLAT R., 1996. Eléments importants d'une méthodologie de caractérisation des facteurs naturels du terroir en relation avec la réponse de la vigne à travers le vin. *1er Colloque International « Les Terroirs viticoles »*, INRA-URVV Angers et ISVV Montpellier, 17-18 Juillet 1996, 17-31.
- SALETTE J., 1996. Sur la réalité du lien entre le terroir et le produit : de l'analyse sémantique à l'approche écologique. *1er Colloque International « Les Terroirs viticoles »*, INRA-URVV Angers et ISVV Montpellier, 17-18 Juillet 1996, 551-560.
- SEGUIN G., 1975. *Les sols viticoles du Haut-Médoc. Influence sur l'alimentation en eau de la vigne et sur la maturation du raisin*. Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles, Bordeaux, 141 p.

LES FACTEURS NATURELS DES TERROIRS VITICOLES. METHODOLOGIE DE LEUR CARACTERISATION

R. MORLAT

URVV. Centre INRA d' Angers

I. INTRODUCTION.

Les aires d'appellations viticoles sont le fruit d'une sélection empirique, historique et évolutive qui a consacré dans la plupart des cas, une adéquation entre facteurs naturels, cépages et pratiques viti-vinicoles. La notion de terroir est présentée comme la base principale de l'appellation d'origine contrôlée dans le vignoble français. Elle s'appuie d'une part sur les facteurs naturels et le cépage, et d'autre part sur les facteurs humains ; l'ensemble permettant la production d'un vin doté d'une originalité et d'une typicité sensorielles (SALETTE, 1997). Les pratiques viti-vinicoles évoluent en fonction des progrès de la viticulture et de l'oenologie, mais en même temps se mondialisent et se standardisent ; tandis que les facteurs naturels du terroir sont beaucoup plus stables, à l'exception du millésime. Ils représentent donc un pilier fondamental et un garant de l'identité d'un vignoble d'appellation.

A l'échelle parcellaire, la majorité des appellations d'origine contrôlée sont constituées d'un plus ou moins grand nombre d'unités de terroir, dont les propriétés peuvent engendrer des différences importantes dans le fonctionnement de la vigne, avec des répercussions notables sur les caractéristiques du vin. Les viticulteurs sont confrontés à cette variabilité spatiale des facteurs du milieu, notamment à travers des choix cruciaux qu'ils doivent réaliser au niveau du porte-greffe, du cépage, de la conduite de la vigne ou du sol, des assemblages de provenance des vendanges, etc... En dehors de l'empirisme, les connaissances insuffisantes dans ce domaine laissent souvent les vigneron démunis pour une adaptation de l'itinéraire technique au couple millésime / terroir. Par ailleurs, l'approfondissement et l'affinement des délimitations A.O.C. qui débutent, doivent inciter la recherche à fournir à l'INAO de nouveaux concepts, de nouveaux outils et critères plus performants pour le zonage. Dans un contexte de réduction globale des ventes de vin et d'une mondialisation du marché, l'avenir de nombreux vignobles français semble lié à leur capacité à innover, en produisant des vins originaux. Les facteurs naturels de production qui constituent un patrimoine régional non reproductible par la concurrence, peuvent devenir l'élément principal d'une nouvelle typicité du produit. Ces différents aspects constituent un enjeu considérable pour la recherche.

Les approches scientifiques sur ce thème ont été relativement restreintes, en raison de la complexité du problème concernant les variables à étudier, leurs chaînes d'influences et la réponse globale de la vigne au terroir, à travers le vin

(RIOU et al, 1995). L'objectif de ce mémoire est de présenter la problématique de recherche concernant la mise au point d'une méthodologie de caractérisation intégrée et de cartographie des terroirs viticoles ainsi que les principaux effets des facteurs du terroir sur la vendange et le vin, démontrés scientifiquement.

II. RECHERCHES SUR UNE METHODE DE CARACTERISATION INTEGREE DES TERROIRS VITICOLES.

A. Problématique.

L'élaboration d'une méthode d'étude adaptée, est confrontée à plusieurs problèmes, dont les plus importants sont les suivants :

-- complexité du système terroir / vigne / vin lié à la multiplicité des variables et à la chaîne des facteurs qui régissent la réponse de la vigne sur le plan du produit. Cette réponse est de type « résultante » aux effets combinés des facteurs qui créent, pour une unité de terroir, un milieu de fonctionnement déterminé.

On peut distinguer des **variables dites de fonctionnement** (écophysiological) du système vigne / terroir, qui jouent un rôle direct sur la vendange et le vin (précocité de cycle, fonctionnement hydrique, potentiel de vigueur et rendement, phytoclimat, etc...). Elles dépendent de **paramètres de fonctionnement** (pédoclimat, mésoclimat, enracinement, etc..) fortement liés à la nature des terroirs, mais qui prennent des valeurs qui évoluent largement au cours de l'année (réserve en eau du sol, température du sol).

La nature d'un terroir correspond à un ensemble de variables d'état plus ou moins élémentaires et n'ayant qu'un effet indirect sur la réponse de la vigne. On peut distinguer des **variables d'état initiales** (altitude, géomorphologie, granulométrie, profil pédologique, composition chimique, etc.) et des **variables d'état composites** issues de l'agrégation des précédentes (perméabilité, porosité, etc...).

-- L'effet terroir sur la vigne et le vin est étudié le plus souvent à partir d'un réseau de parcelles expérimentales. Celles-ci doivent représenter les véritables unités de terroirs d'une région pouvant s'exprimer dans le vin, et ne peuvent être choisies qu'après une étude régionalisée poussée dotée d'un volet cartographique à grande échelle. Ce point est d'autant plus important que les résultats escomptés doivent permettre de dégager les facteurs de l'effet terroir et leur hiérarchie.

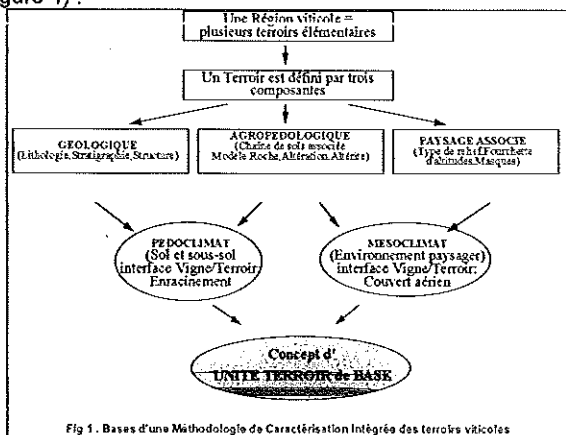
-- Analyse et traitement de la variabilité spatiale des couvertures géopédologiques, à une échelle cartographique compatible (1/25.000, 1/10.000) avec une représentativité des résultats et une utilisation concrète par la viticulture.

B. Sur une méthode de caractérisation Intégrée des terroirs viticoles.

Face aux problèmes venant d'être évoqués, il faut élaborer une méthode de caractérisation d'unités de terroir, représentatives des divers types sensoriels de vins potentiellement possibles pour une région. Elle doit permettre d'identifier des zones présentant chacune une bonne homogénéité de fonctionnement de la vigne. Pour cela, il faut aborder à la même échelle les divers facteurs constitutifs d'un milieu naturel, conduire l'étude au niveau de l'association des variables d'état

accessibles et différencier des unités de terroir présentant une intra-variabilité peu conséquente pour la réponse de la vigne. Sur un plan général, on ne peut utiliser que des variables d'état dont les valeurs ou les manifestations sont stables temporellement. Sur ces bases, une méthode a été initiée par MORLAT (1978) et améliorée par MORLAT (1989) et LEBON et al (1993). Elle est constituée de deux parties chronologiques.

La première, consacrée à la caractérisation physique des terroirs, considère une région viticole comme un ensemble de petits milieux naturels, chacun traité comme un terroir élémentaire et défini par l'association de trois composantes majeures (Figure 1) :



- une composante géologique définie en termes de structure, nature lithologique et étage,
- une composante pédologique associée et définie par une chaîne de sols et leurs variables,
- une composante paysagère définie par la géomorphologie, l'orientation, l'altitude et les diverses natures d'écrans (topographiques, végétaux, anthropiques).

Les deux premières composantes constituent l'environnement pédoclimatique global de l'enracinement, la troisième engendrant le mesoclimat qui influe sur le couvert aérien de la vigne mais qui est aussi en interaction avec le pédoclimat. L'ensemble est appelé Unité Terroir de Base (UTB).

La seconde partie aborde l'étude de l'effet terroir sur le vin et son déterminisme, à partir de réseaux de parcelles expérimentales représentatives des diverses UTB d'une région. Elle se prolonge aussi par un programme de gestion optimisée par terroir, des pratiques et techniques agro-viticoles et oenologiques, applicable à l'unité culturelle (RIOU et MORLAT, 1995).

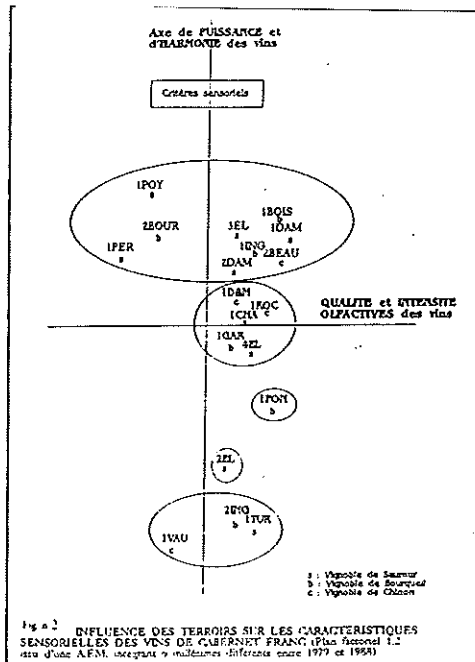
Cette méthode possède un volet de cartographie à grande échelle (1/10.000, 1/25.000) pour la spatialisation des trois composantes du terroir, sans lequel la seconde partie de la méthodologie est difficilement envisageable. La gestion multifactorielle spatialisée des données est assurée grâce à un Système d'Information à Références Spatialisées informatisé (BOLO et al, 1996).

C. L'effet Terroir sur les caractéristiques sensorielles du vin.

L'effet des terroirs, caractérisés par cette méthode, a été étudié grâce à un réseau multilocal de microparcelles de 100 souches de Cabernet franc greffé sur SO4 en Val de Loire (appellations Saumur Champigny, Chinon, Bourgueil), ou de Gewurztraminer sur SO4 en Alsace (Grands Crus alsaciens). Ces parcelles sont conduites de la même façon, et les vendanges, faites à une même date optimum, sont minivinifiées dans des conditions standard.

En Val de Loire, l'influence des terroirs sur le vin a été abordée en privilégiant l'outil de la dégustation. Un protocole rigoureux, faisant intervenir un jury de grande taille utilisant une fiche de caractérisation sensorielle multicritères, a permis d'étudier les vins après un an et cinq ans de conservation en bouteilles, pour des millésimes aussi divers que 1979, 1980, 1982, 1984, 1986 et 1988. Les résultats ont été interprétés grâce à des méthodes statistiques d'analyse multidimensionnelle (A.F.M.).

Il ressort que les vins produits par les divers terroirs se répartissent en plusieurs groupes (Figure 2), le long d'un axe défini par la plupart des critères d'intensités visuelle, olfactive et gustative, mais aussi par la structure et l'harmonie du vin. Trois groupes principaux ont pu être identifiés et donnent une idée de l'ampleur de l'effet terroir :



-- des vins qui ont été considérés, quel que soit le millésime, comme les plus intenses aux plans visuel, aromatique et gustatif ; avec un bon équilibre, une forte harmonie et même du velouté. Ils proviennent de terroirs divers comme des sables épais du Sénonien, des argiles épaisses de l'Eocène ou des sols sur craie tuffeau.

-- des vins toujours caractérisés comme les moins intenses, visuellement et aromatiquement, avec un manque d'équilibre. Ils ont de faibles intensités d'attaque et de fin de bouche, sont souvent acides et parfois brûlants, sans velouté. Ils sont issus aussi de terroirs variés comme des limons à silex du Sénonien, des limons d'apports éoliens ou des colluvions sableuses épaisses sur argiles.

-- enfin des vins dont le

jugement sensoriel change fortement selon le millésime, comme ceux produits par les sols sablo-caillouteux sur grès et poudingues de l'Eocène, ou par les sols gravelo-sableux de la basse terrasse de la Loire.

D. Etude du déterminisme de l'effet terroir.

Les différences sensorielles entre les vins sont en relation avec la composition des vendanges qui varie d'un terroir à l'autre, aussi bien en Val de Loire qu'en Alsace. Il est important de tenter d'expliquer l'origine de ces variations en étudiant d'une part les fonctions de la plante qui sont les plus modifiées et d'autre part en recherchant les composantes des terroirs qui en sont responsables.

Le profil racinaire, l'expression végétative et les potentialités de rendement varient d'un terroir à l'autre. Pour un même cépage et porte-greffe (Cabernet franc / SO4), en Val de Loire par exemple, des profils racinaires totalement différents ont été observés selon les sols. Trois grandes catégories ont pu être dégagées :

- Dans les terroirs sur craie sablo-glaucouneuse (craie tuffeau), l'enracinement est très développé dans le sol et la roche calcaire assez friable et fissurée, en raison des bonnes propriétés physiques du milieu. L'expression végétative et la potentialité de rendement, sans être excessives, sont réelles.

- Dans les sols sableux sur argiles sableuses (sénonten, colluvions) , le système racinaire présente deux zones principales de colonisation privilégiée, entre -30 et -50 cm de profondeur et à partir de -80 cm dans les argiles sableuses où s'installe un système racinaire plongeant très ramifié. Il en résulte une expression végétative et une potentialité de rendement plus élevées que dans le cas précédent.

- Dans les sols sablo-graveleux (sur terrasses fluviatiles et sur grès et poudingues) le système racinaire est moins développé en profondeur et les racines moins abondantes dans le sol, en raison des propriétés physiques moins favorables. Il en résulte une moindre expression végétative des souches et une potentialité de rendement plus basse.

Il est admis qu'une qualité satisfaisante du vin ne peut être obtenue au delà d'un certain niveau de rendement. Nous vérifions cette relation dans nos expérimentations, mais il faut souligner que les terroirs les moins productifs ne sont pas systématiquement ceux qui entraînent les vins les plus intenses, structurés et harmonieux car d'autres facteurs interviennent (notamment des stress hydriques sévères en année sèche).

La précocité de cycle de la vigne change d'un terroir à l'autre et revêt une importance particulière en vignoble septentrional où les conditions thermiques et lumineuses deviennent limitantes à l'automne. L'accumulation des composés nobles dans la baie est influencée positivement par l'état de précocité de la vigne (Figure 3).

Nous avons pu montrer en Alsace, (LEBON,1993) qu'il existe une relation nette entre la durée de la maturation (période allant de la véraison aux vendanges) et la teneur en sucres des vendanges. La durée de la maturation est d'autant plus longue que la vitesse de développement de la vigne entre le débournement et la véraison est plus grande. Selon les terroirs, cette vitesse change significativement,

en liaison avec les sommes de température reçues. Les facteurs qui sont à l'origine de ces variations sont nombreux :

-- En premier lieu les caractéristiques climatiques aériennes de chaque terroir et bien sûr du millésime, qui déterminent la durée disponible pour l'accomplissement du cycle de la vigne. En Alsace, des mésoclimats favorables, liés à des pentes exposées Sud Sud-Ouest, existent par exemple sur granite ou conglomérat calcaire. Dans ces conditions, l'échauffement diurne des versants par temps radiatif, est lié au rayonnement reçu dont l'effet thermique est renforcé par les potentialités d'échauffement de surface des sols et l'atténuation de la ventilation. Ce dernier point est en relation étroite avec l'environnement paysager. En Val de Loire, ces différences mésoclimatiques entre terroirs sont plus faibles et n'expliquent pas majoritairement les variations de précocité de la vigne.

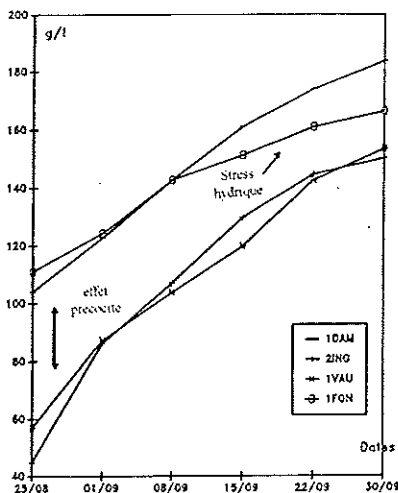


Fig 2 n° 3 ACCUMULATION DES SUCRES REDUCTEURS DANS LES BAIES PENDANT LA MATURATION 1992.

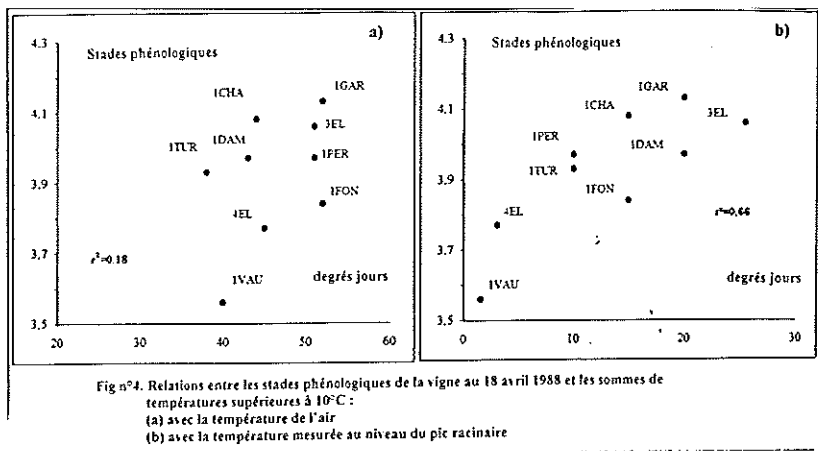
-- Dans ce cas, les décalages notés dès le débourrement et qui s'amplifient ensuite, sont apparus en liaison avec la température des horizons du sol les plus colonisés par les radicelles actives (Figure 4). Lorsque ces horizons sont proches de la surface (craie tuffeau, certains sables du Sénonien, argiles sableuses de l'Eocène, sols sablo-caillouteux sur grès et poudingues), la précocité de la vigne est améliorée. Mais la température de ces couches est aussi liée au pédoclimat thermique du sol qui dépend de ses propriétés physiques (teneur en eau, constituants du sol, type d'agencement et de contact entre les particules, couleur et état de surface, type de transition entre horizons).

Les conditions d'alimentation en eau

influent en Alsace, sur la durée de la phase débourrement - floraison du cépage Gewurztraminer (LEBON, 1993). Une contrainte hydrique trop forte (alluvions fluviales), augmente la durée de cette phase, au même titre que l'absence totale de contrainte (placages loessiques). Dans ce dernier cas, la croissance des sarments est prolongée et détourne une partie des photosynthétats à son profit, entraînant une accumulation moindre dans les baies. En situation de contrainte hydrique modérée (granite conglomérats), la longueur de cette phase est raccourcie et permet une maturation plus longue.

En Val de Loire, avec le cépage Cabernet franc, les terroirs présentant des contraintes hydriques (sols gravelo-sableux de terrasse de la Loire, sols sablo-caillouteux sur grès et poudingues) produisent des vins dont le jugement sensoriel varie fortement selon le millésime. En mauvais millésime, ces vins sont considérés

comme assez intenses, toujours harmonieux, présentant une certaine structure et souvent qualifiés par des arômes floraux ou fruités, intenses. En année très sèche,



comme en 1990, l'effet du stress hydrique se fait surtout ressentir sur la vitesse d'accumulation des sucres ou des anthocyanes (Figure 3, parcelle 1FON) qui est significativement ralentie, tandis que la combustion de l'acide malique est exacerbée (MORLAT et al., 1992).

Ce type de comportement est lié à des difficultés d'alimentation en eau, en raison de réserves du sol trop faibles, non reconstituées pendant l'hiver et trop vite épuisées par un enracinement limité en profondeur en raison de roches compactes (Tableau 1). La transpiration est ralentie et la photosynthèse chute à un niveau trop faible pour engendrer une quantité d'assimilats suffisante. Dans les terroirs de craie tuffeau ou dans certaines argiles épaisses de l'Eocène, les réserves en eau de la roche, tout en étant assez liées à la phase solide, sont quand même exploitables par des racines profondes. Il s'établit une contrainte modérée qui permet une régulation du développement, sans diminuer les performances photosynthétiques tout en limitant les puits parasites de consommation de photosynthétats (entrecoeurs par exemple). L'accumulation dans les baies est alors favorisée (Figure 3).

Parcelles	Débourr - Floraison du 27/03 au 5/06		Floraison - Véraison du 06/06 au 26/08		Véraison - Vendange du 29/08 au 26/09	
	Total	>1m	Total	>1m	Total	>1m
1DAM (craie tuffeau)	37,5 (107mm)	0	60 (254mm)	23,5 (100mm)	48 (49mm)	33 (33,5mm)
2ING (sables / argile)	31 (65,5mm)	5 (10,5mm)	65 (270mm)	23 (94mm)	66 (67mm)	47,5 (48,5mm)
1CHA (grès poudingues)	37 (91mm)	0	26 (99,5mm)	2 (8mm)	16 (15mm)	5,5 (5mm)

Tableau 1. Consommation en eau du système terroir/vigne, exprimée en % de l'ETP Brochet-Gerbier et en mm (Année 1990).

Il faut souligner que dans nos conditions expérimentales, les effets strictement chimiques des terroirs n'ont pu être mis en évidence..

III.ESSAI DE GENERALISATION ET D'ALLEGEMENT DE LA METHODE D'ETUDE DES TERROIRS VITICOLES.

Les résultats présentés dans cette note témoignent de la complexité des facteurs du terroir et de leurs effets sur la vigne et le vin, mais aussi de la lourdeur expérimentale de leur mise en évidence. L'intérêt croissant de la filière viticole française pour les terroirs, nous incite à développer des travaux permettant d'alléger la méthode des terroirs, tout en la généralisant. Cette démarche est engagée grâce à l'étude « Terroirs d'Anjou », qui a débuté en 1994. Elle associe l'INRA, l'ONIVINS, l'INAO, l'ITV et l'ensemble des partenaires professionnels angevins. Cette étude a pour but d'initier une zone nationale de recherche, valorisation et formation sur les terroirs viticoles et leur utilisation concrète par les vigneron (MORLAT et BOLO, 1995). La région viticole de l'Anjou est très bien adaptée à cette recherche car elle est située aux confins de deux grandes provinces géologiques : le Massif armoricain à l'ouest, le Bassin parisien à l'Est.

L'étude Terroirs d'Anjou permet de constituer une banque de données informatisée et spatialisée sur les Unités Terroir de Base, en utilisant les variables d'état initiales et composites du milieu naturel qui sont étudiées à partir de points de mesures et spatialisées à une échelle initiale de 1/12500, soit environ 0.5 point / Ha. Cette banque a déjà permis de tester la validité de modèles pour la prévision des UTB, basés sur la formalisation des lois sols-paysages et des lois de voisinage (SALVADOR, 1996).

Pour représenter la globalité de la réponse de la vigne à un milieu de fonctionnement créé par un terroir, et minorer la variabilité naturelle intra-terroir, il convient de rechercher, une clé de différenciation pertinente et de portée générale, pour l'Unité Terroir de Base. Le premier élément de caractérisation est

l'étage géologique. Le second concerne l'épaisseur et l'intensité de l'altération du matériau géologique d'origine qui vont orienter différemment les propriétés agro-viticoles.

Sur ces bases, nous testons la validité d'un modèle de terrain comprenant, pour une nature lithologique donnée, trois variantes différentes : roche, altération, ou altérite (Figure 1).

La variante roche est utilisée si à environ 60cm de profondeur au plus, il y a apparition d'une roche saine ou peu transformée. Une variante altération apparaîtra si le matériau géologique, en cours de transformation mais identifiable, se rencontre entre 70 et 90cm de profondeur, et enfin une variante altérite si cette profondeur est supérieure à 90cm. Cet élément, couplé à la nature lithologique et à l'étage géologique peut traduire assez fidèlement « l'ambiance écophysiological » d'un terroir pour la vigne. Cette clé peut fonctionner pour des roches très diverses et de duretés variables.. Il faut préciser que dans le cas des pentes moyennes à forte (> 10 %) une variante exposition du versant doit être incluse à l'UTB Une approche statistique sur un grand nombre de sondages a déjà montré la performance du modèle pour identifier des unités de terroir agronomiquement différentes (MORLAT, 1996).

Une validation de ce modèle est également en cours, au niveau de la réponse de la vigne elle - même, par l'intermédiaire d'une enquête réalisée auprès de vignerons, à l'échelle parcellaire. Elle concerne l'ensemble de l'itinéraire technique jusqu'au produit final, et permettrait peut être de remplacer dans certains cas les réseaux multilocaux de parcelles. Les résultats présentés sur la Figure 5 concernant la précocité de la vigne au débournement et son développement végétatif en année sèche, traduisent bien l'intérêt du modèle de caractérisation des terroirs.

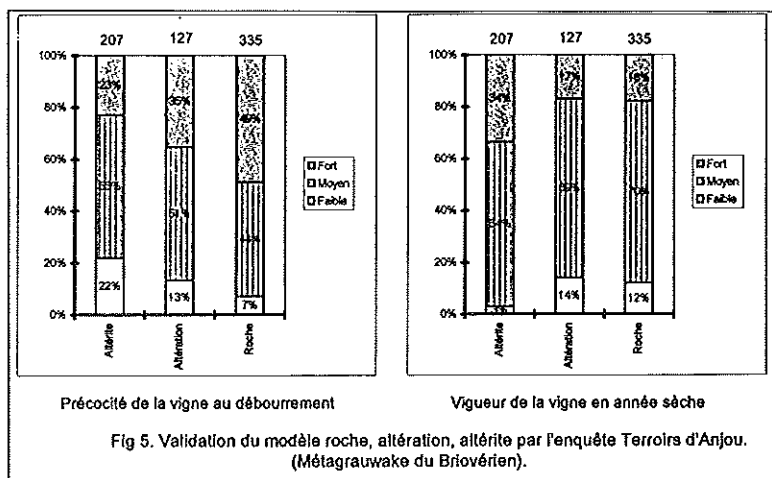


Fig 5. Validation du modèle roche, altération, altérite par l'enquête Terroirs d'Anjou. (Métagrauwake du Briovérien).

IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES.

L'élaboration d'une méthode de caractérisation des terroirs viticoles, légère, robuste et généralisable est le but principal du secteur agronomie de l'Unité de Recherches sur la Vigne et le Vin du Centre INRA d'Angers. Nous savons qu'elle doit intégrer l'ensemble des facteurs naturels. Le volet très important de valorisation de ces recherches demande que la méthode puisse s'appliquer à l'unité culturelle viticole et que les résultats puissent être utilisés directement par le viticulteur. Dans cet esprit, un programme s'engage à l'URVV sur la mise au point d'Indices de Fonctionnement du système Terroir / Vigne qui soient spatialisables à l'échelle de l'Unité Terroir de Base et qui devront être validés par la réponse de la vigne. Plusieurs indices paraissent importants à développer : indice de Précocité du terroir, Indice de consommation et régulation hydrique, Indice du potentiel de vigueur et rendement, Indice synthétique de climat local du terroir. Ces indices doivent faire appel à une étude approfondie des divers facteurs du système terroir / vigne et à leur gamme de variabilité. Ils devront s'appuyer sur les modèles climatiques écophysologiques étudiés par les collègues de la Bioclimatologie. Des travaux sont en cours au niveau du pédoclimat thermique.

BIBLIOGRAPHIE

- BOLO P., RIOUX D., MORLAT R., 1996.** Un système d'informations à références spatiales sur le vignoble - Un outil performant d'aide aux recherches sur la caractérisation des terroirs viticoles. Colloque International « Les Terroirs viticoles » Angers 17et 18 juillet 1996.
- LEBON E., 1993.** De l'influence des facteurs pédo et mésoclimatiques sur le comportement de la vigne et les caractéristiques du raisin. Application à l'établissement de critères de zonage des potentialités qualitatives en vignoble septentrional (Alsace). Thèse de Doctorat 165p. Université de Dijon.
- LEBON E., DUMAS V., METTAUER H., MORLAT R., 1993.** Caractérisation intégrée du vignoble alsacien : aspects méthodologiques et application à l'étude des composants naturels des principaux terroirs. Journ. Int. Sci. Vigne et Vin., Tome 27, n°4, 235-253.
- MORLAT R., 1978.** Contribution à l'étude des séquences géopédologiques sédimentaires du vignoble saumurois. Essai sur une méthodologie pour la caractérisation d'un milieu viticole de cru. Conn. Vigne et Vin, 12, n°4, 219-243.
- MORLAT R., 1989.** Le terroir viticole : contribution à l'étude de sa caractérisation et de son influence sur les vins. Applications aux vignobles rouges de Moyenne Vallée de la Loire. Thèse Doctorat d'Etat. Université de Bordeaux. 289p et annexes.

- MORLAT R., PENAVAYRE M., JACQUET A., ASSELIN C., LEMAITRE C., 1992.** Influence des terroirs sur le fonctionnement hydrique et la photosynthèse de la vigne en millésime exceptionnellement sec (1990). Conséquence sur la maturation du raisin. Journ Inter. Sciences Vigne et Vin 26, n° 4, 197-220.
- MORLAT R., 1996.** Eléments importants d'une méthodologie de caractérisation des facteurs naturels du terroir, en relation avec la réponse de la vigne à travers le vin. Communication au 1er Colloque international sur les Terroirs viticoles. Angers. France.
- MORLAT R., BOLO P., 1995.** Rapport au Comité de Pilotage de l'Etude « Terroirs d'Anjou ». Travaux 1994 / 1995. 23p + Annexes.
- RIOU C., MORLAT R., 1995.** Une approche intégrée des Terroirs viticoles. Valorisation agroviticole de l'effet terroir par l'enherbement permanent contrôlé des sols. Comm Colloque VINEA 95, Sierre (Suisse).
- RIOU C., MORLAT R., ASSELIN C., 1995.** Une approche intégrée des terroirs viticoles. Discussions sur les critères de caractérisation accessibles. Bull. OIV, 68, 767-768,93-106.
- SALETTE J., 1997.** Aspects multiples de la gestion d'un terroir face aux enjeux d'une plus-value qualitative pour les produits. 3ème Rencontres de la Fertilisation Raisonnée et de l'Analyse de Terre. COMIFER. Blois.
- SALVADOR S., 1996.** Zonage prédictif des terroirs viticoles, à partir de secteurs pris comme référence. Application au vignoble de l'Anjou. Mémoire de. DAA ENSA Rennes. 50 p + Annexes.

**Composante sol et milieu physique dans l'effet terroir
pour la production fromagère : quelques réflexions à partir
du cas des fromages des Alpes du Nord.**

Dorioz J.M. ⁽¹⁾, Coulon J.B. ⁽²⁾, Fleury Ph. ⁽³⁾, Martin B. ⁽³⁾

(1) INRA Thonon - Les - Bains - Science du sol.

(2) INRA Theix - Elevage et nutrition animale.

(3) GIS "Alpes du Nord" et SUACI - Chambéry.

La moitié des fromages AOC se réfèrent à des zones de montagne qui apparaissent ainsi comme le refuge de nombreuses traditions fromagères (INRA 1994). Dans les hautes vallées des Alpes du Nord, ces produits participent au maintien d'une agriculture dynamique basée sur l'herbe et notamment sur l'herbe des pâturages d'altitude ou alpages. Ils sont ainsi considérés comme un élément clé du patrimoine régional.

Le «Beaufort» est l'exemple type de cette production fromagère. Sa réputation doit beaucoup à une politique de qualité du produit et à l'association de celui-ci avec un terroir réputé « spécifique ». Sa production (3000 T/an, 1200 vaches, 850 exploitations agricoles) est fortement encadrée en terme de pratiques d'élevages de races et de zones géographiques. (Dubeuf et Burleraux, 1996)

Pour tous les fromages alpins, l'identification produit - terroir semble tout à fait « naturelle », tant les Alpes présentent une image forte et originale. Pourtant, au delà de l'image, les données concrètes disponibles pour appuyer l'idée d'une spécificité de ces produits liées aux caractéristiques du lieu de production, et notamment aux caractéristiques physiques, sont encore fragmentaires.

Ce texte a pour objectif de faire le point sur les acquis et surtout les hypothèses, relatives à ce thème des relations fromage - terroir physique, dans le cadre des Alpes du Nord. La base de cette réflexion est fournie par les recherches menées au sein du « GIS Alpes du Nord » en matière d'agronomie de montagne, d'élevage et de technologie fromagère (INRA, 1994b). En préalable, nous tenterons de définir la notion de terroir dans le cadre de la production fromagère.

1. L'effet terroir dans la production fromagère: définition,

Selon Grappin et Coulon (1996) on peut considérer le terroir pour le lait et le fromage comme « une aire géographique caractérisée par des conditions de milieu et des types d'animaux qui, exploités par l'homme, conduisent à des produits spécifiques ». Quatre ensembles, organisés en une ou des chaînes de cause, sont associés pour générer l'effet du lieu de production sur le produit:

- le milieu physique (sols, roches, climat...)
- les herbages (composition floristique, végétation)
- les animaux (races...)
- les hommes (pratiques d'élevage, technologie)

Par rapport à la production du vin, il existe donc un maillon supplémentaire, l'animal, ce qui accroît la complexité du système.

En théorie, l'effet terroir peut résulter soit d'une combinaison originale d'éléments relatif à ces 4 ensembles, soit de spécificités fortes sur des points clés comme les fourrages, les races d'animaux et /ou le lait. Ces 2 cas ne s'excluent pas.

2. Données sur les facteurs de l'effet terroir pour les fromages alpins.

Les données disponibles concernent la mise en évidence de crus de fromages au sein d'une même fabrication. Elles proviennent soit d'enquêtes auprès des praticiens, soit d'études de corrélations ou d'approches analytiques.

Les praticiens connaissent empiriquement et de longue date, l'existence de crus de fromage différenciés par leurs goûts, leurs textures, leurs comportements lors de la fabrication. Ces différences sont souvent attribuées à la région, à l'alimentation des animaux ou à la race de la vache. En alpage, par exemple, il est évident que les conditions de fabrication et le goût du fromage, varient selon la période et donc la zone pâturée (Martin, 1997). Il existe aussi une différence bien connue de goût entre beaufort d'été et beaufort d'hiver. Les enquêtes montrent que également certaines végétations, comme les groupements de combe à neige et certains végétaux comme *Ligustrum mutellina*, sont présentes partout et depuis longtemps, considérés comme de « l'herbe » particulièrement favorable à la qualité du fromage (Party, 1995 ; Bornard, com. pers.). Ces données ne sont pas à négliger, même si leur interprétation détaillée reste délicate du fait de la superposition des facteurs. (Au cours de la saison, tout évolue en parallèle : le quartier pâturé, la phénologie de l'herbe, le stade de lactation, la météo...).

Des études scientifiques récentes sont à même de valider certaines observations empiriques des praticiens et de fournir des éléments de réflexion sur les phénomènes impliqués. Une analyse couplée, sur 20 fruitières à comté du Jura, montre l'existence d'une corrélation significative entre type de milieu physique (climat, sols, roches), composition floristique des parcelles exploitées par les animaux et caractéristiques sensorielles du fromage (Monnet 1996). Ces résultats soulignent la globalité de l'effet terroir. Dans les Alpes du nord, l'accent a été mis jusqu'à présent, sur des études expérimentales (Grappin et Coulon, 1996 ; Martin, 1997). Celles-ci ont pour cadre le Chablais et la production d'Abondance en alpage. Elles montrent qu'à technologie égale, le même troupeau placé dans des quartiers d'adret puis d'ubac, est à l'origine de fromages différents en terme de texture et de qualité gustative. Il apparaît également que la richesse aromatique des fromages est très liée à la diversité floristique (Martin, non publié). Ces différences entre crus sont attribuées à l'herbe, à la fois du fait d'une action directe de composés aromatique sur le goût et du fait d'actions indirectes, encore mal élucidées, sur la composition du lait et les conditions de fabrication. Enfin, il faut aussi noter que les caractéristiques génétiques des animaux sont susceptibles d'introduire, comme cela a été démontré pour la race tarine (Beaufort), d'autre particularités en terme de fabrication fromagère. (Hauwuy et al 1996)

3. Sols et milieu physique, facteurs de différenciation des terroirs.

Puisque la variabilité de la composition des prairies détermine l'existence de crus du même fromage, la question des relations milieu physique-végétation devient centrale pour analyser l'effet terroir. Il s'agit donc de mettre en évidence les particularités du milieu alpin vis à vis de la végétation, en considérant certes la composition floristique

mais aussi les groupements végétaux et leurs fonctionnements écophysiologicals. Cette analyse permettra d'affiner les hypothèses présentées en discussion, sur les relations milieu-fromage.

Le milieu alpin se distingue avant tout par des conditions climatiques, en particulier thermiques, sélectives et par la diversité de ces biotopes. Les flores et les végétations alpines sont de ce fait, originales et diversifiées. L'originalité de la flore se traduit par une forte proportion (à basse altitude, dès 800-900m) puis une dominance (au-dessus de 1500m) d'espèces particulières (parmi les graminées fréquentes: *Poa alpina*, *Festuca violacea*...), voire de genres et de familles peu représentées dans les plaines voisines (par exemple les gentianacées). Ce phénomène général est lié à la combinaison de facteurs historiques et biogéographiques (origine des espèces) et à la sélectivité du milieu physique (Favarger 1972). Il se retrouve dans toutes les zones d'herbages mais est nettement plus marqué, en particulier dans les pâturages subalpins (alpages) et en général, dans les secteurs ou parcelles peu intensifiées.

Les secteurs plus ou moins intensifiés, à forte productivité, au-dessus de 800 à 1000 m et jusque vers 1700 m, présentent de nombreuses espèces ubiquistes et banales. Malgré cela ces prairies de montagne se distinguent de celles des plaines voisines :

- 1) par l'absence de certaines graminées dominantes en plaine en conditions intensives, notamment du *Lolium perenne* (effet de l'altitude)
- 2) par l'exubérance corrélative de certaines dicotylédones spécifiques (*Geranium silvaticum*, *Chaerophyllum hirsutum*..).

Mais les conditions de milieu régnant en montagne modifient également les espèces ubiquistes. Les graminées, par exemple, présentent en altitude des changements physiologiques et morphologiques (rapport tige/feuille, épiaison, sénescence) (Fleury et al, 1992). Toutes ces différences influent sur la qualité des fourrages et la dynamique des végétations (Dorioz et al., 1987; Jeannin et al., 1991).

Le milieu alpin présente une autre originalité : la diversité de ses groupements végétaux. Ceci s'exprime par des gradients de végétation et des mosaïques contrastées qui répondent à une forte variabilité des topo-climats, des sols et des pratiques agricoles. Le maximum de diversité s'observe dans les pâturages d'altitude, notamment en raison des contrastes de la couverture pédologique (Dorioz, 1995). Les sols varient, selon la durée d'enneigement, selon les roches mères locales, l'amont et la circulation d'eau dans les versants, selon le pendage des roches, d'un versant à l'autre d'une même montagne.... (Dorioz et Van Oort, 1991). En conséquence, les troupeaux rencontrent fréquemment, dans un même quartier de pâture, toute une gamme de milieux et de groupements végétaux, de calcicoles à acidophiles, de xérophiles à frais (Legros et al, 1987; Dorioz, 1995).

Dans le domaine des prairies de fauche la diversité est moins grande (Dorioz et al., 1987). Elle dépend en premier lieu de celle des pratiques, secondairement du régime hydrique de la parcelle (Jeannin et al, 1991). Les contraintes topographiques et les différences topoclimatiques typiques des Alpes, favorisent le maintien de la diversité des

pratiques appliquées à ces prairies (date de fauche, fertilisation..) et expliquent l'existence et l'usage de prairies maigres (dont la composition floristique est plus originale).

4. Discussion.

En premier lieu, le terroir alpin est associé à la présence, dans l'herbe pâturée et récoltée, d'espèces spécifiques parmi lesquelles pourraient se trouver des espèces clés vis à vis des caractéristiques fromagères, du fait de leurs compositions chimiques (arômes...). La probabilité de rencontrer des espèces originales est plus forte en alpage et dans les milieux pas trop intensifiés. Ceci souligne l'importance de maintenir la diversité des végétations. Celle-ci reste très grande dans le domaine prairial des Alpes du nord en raison de la diversité à la fois des sols exploités et des pratiques. Cette question est d'autant plus importante qu'il existe une relation entre diversité floristique et richesse aromatique de certains fromages.

Mais le milieu alpin est aussi associé à des modifications du fonctionnement des végétaux qui touchent de nombreuses espèces, y compris les plus courantes, comme le montre les modifications morphologiques de plusieurs espèces ubiquistes de prairies avec l'altitude. Ces modifications semblent affecter de la même manière des groupes d'espèces différentes. On peut faire l'hypothèse que ceci reflète la sélection, du fait d'un milieu contraignant, de quelques grands types de stratégies adaptatives au sens de Grime (1986). Par analogie il paraît logique de penser que des modifications globales existent également pour le métabolisme, l'appétence...

Présence d'espèces spécifiques et / ou réactions globales convergentes d'espèces plus banales sont des phénomènes qui ne s'excluent pas. Ils pourraient expliquer la richesse particulière des foin et herbages de montagne en substances aromatiques et autres métabolites secondaires (Schehovic, 1991) et au delà, les différences de crus observées dans les fromages.

Conclusion:

La composante milieu physique de l'effet terroir en matière de fromages alpins semble lié avant tout à l'originalité et à la diversité des milieux d'altitude exploités. Dès lors l'alpage pourrait constituer un lieu privilégié de cet effet terroir. Ce point de vue est séduisant car l'alpage est le berceau historique de plusieurs fromages (Beaufort, Reblochon...). En outre, c'est le mode d'occupation des sols qui caractérise et différencie le mieux le territoire Alpin. Pourtant, le terroir en matière de fromage alpin ne saurait être considéré uniquement comme un ensemble de relations biologiques et chimiques entre milieu-végétation-animal et produit. L'identité d'un fromage repose aussi sur des phénomènes sociaux, des manières de produire, des savoirs et des pratiques. Il serait donc sage de ne pas focaliser les recherches à venir uniquement sur la "vocation fromagère naturelle" des montagnes et de considérer aussi celles des hommes qui y travaillent.

Bibliographie

- Dorioz J. M.**- 1995 – Alpages, prairies d'altitude et pâturages in Le Jura – Rencontres Jurassiennes, oct 1994 – Réserve Nat. du Jura – 145 – 155.
- Dorioz J.M., Fleury P., Jeannin B.** – 1987. Impacts des facteurs pédoclimatiques sur les prairies de montagnes in Agrométéorologie des moyennes montagnes – Coll INRA, INRA ed, 233 – 248.
- Dorioz J.M., Van Oort F.**- 1991. Approche agropédologique des zones pastorales sur calschistes sédimentaires. 2 ; Répartition des sols et des valeurs d'usage pastoral. Agronomie, 11, 395 – 409.
- Dubeuf B et Burleraux G.** 1996. De la qualification des système de production laitière à la qualification d un territoire: le cas du Beaufort. Renc; recherche ruminants,3, 59-52.
- Fleury P., Dorioz J.M., Jeannin B.** – 1992. Changes in structural aspects, morphogenic features and nutritive value of *Dactylis glomorata* L and *Festuca pratensis* H in relationship with trophic state and altitude. Congrès de la Fed. Eur. des herbages (FEH) – juin 90, vol 1, 242 – 245.
- Grappin R. & Coulon J.B.** – 1996. Terroir, lait et fromage : éléments de réflexion. Renc. Rech. Ruminants 1996, 3, 21 – 28.
- Grime J.P.** - 1986. Plant strategies et vegetation processes. Wiley and sons. 223p.
- Hauwuy A & Al** – 1996. Qualité du lait et des fromages. Doc. Technique. GIS Alpes du Nord. Chambéry. 89 p.
- INRA** - 1994. Un fromage de terroir : le Beaufort – DIC Paris, 2 p.
- INRA** – 1994b. Typologie de sols et relations sols – paysages dans les zones fourragères des Alpes du Nord. DIC Paris, 2p.
- Jeannin B., Fleury P., Dorioz J.M.** – 1991. Typologie des prairies de fauche des Alpes du Nord méthode et réalisation. Fourrage, 128, 379 – 396.
- Legros J.P., Party J.P., Dorioz J.M.,** 1987. Répartition des milieux calcaires, calciques et acidifiés en haute montagne humide. Conséquences agronomiques et écologiques. Doc. Carto. Ecol., 30.
- Martin B.,** 1997. L'herbe de l'alpage influe sur le goût des fromages. Altitude. Notre terroir n° 844, - 10.

Monnet, 1996. Thèse. Université de Franche – Comté.

Party J.P., 1995. Les alpages des réserves naturelles de Haute Savoie. Rapport d'étude. APEGE. Annecy. 63 p.

Schhovic J., 1991. Revue Suisse Agric. 23, 305 – 310.

L'effet « terroir » du sol sur la qualité de la production légumière : exemple de la carotte

F. VILLENEUVE

Ctifl / Sileban, Gatteville-Phare F 50760 Barfleur France

La notion de qualité pour les cultures légumières comme pour tous les produits peut revêtir des aspects très divers d'autant plus que l'organe consommé (fleurs, feuilles, tiges, racines, fruits) et la présentation au consommateur sont très variés. Contrairement aux vins ou, dans une moindre mesure aux fruits, où la notion de qualité renvoie à la notion de plaisir, l'aspect (fraîcheur, forme, ...), la qualité sanitaire et la qualité nutritive sont des domaines non négligeables de la qualité des légumes. A chaque type de légume, correspondent plusieurs qualités, si bien que la qualité globale d'un légume serait celle qui regrouperait toutes les valeurs données par les trois principaux acteurs, chacun ayant un objectif déterminé (tableau 1).

Tableau 1 : Qualités requises en fonction des opérateurs

	PRODUCTEUR	DISTRIBUTEUR	CONSOMMATEUR
Qualité agronomique	□□		
Qualité mécanique	□□	□□	□
Qualité hygiénique	□	□	□□
Qualité nutritionnelle	□	□	□
Qualité gustative	□	□	□□
Qualité visuelle	□□	□□	□□
Qualité éthique	□	□	□

□□ = importance relative élevée ; □ = importance relative modérée

D'hier à aujourd'hui, les concepts et les attentes en terme de qualité évoluent. A ce titre, les valeurs du marché ne cessent d'évoluer, la sécurité (sanitaire), la simplification alimentaire et l'éthique de production sont des valeurs montantes alors que la dimension « santé (nutrition) et goût » reste stable. Aujourd'hui, avec le développement dans une partie du public, de la méfiance à l'égard des fruits et légumes « modernes » et de la crainte de compromettre sa santé on relève deux processus dont les effets sont imbriqués : un processus de masse, et un processus plus élitiste de

fréquentation des produits et des marchés. C'est dans ce dernier processus que le terroir prend toute sa dimension.

Néanmoins, les durées de cycles étant extrêmement variables (allant d'une quinzaine de jours pour le radis à plusieurs années pour l'asperge) et des techniques culturales très diversement sophistiquées, le terroir ne semble pas de prime abord, avoir beaucoup d'influence. Or, certains terroirs semblent avoir pris, chez les consommateurs, une telle réputation qu'associés aux légumes, ils deviennent gages de qualité. Citons par exemple : l'oignon rose de Roscoff, le coco Paimpolais, la lentille verte du Puy, l'ail du Lauraget, la pomme de terre primeur de l'Île de Ré, le melon de Cavailon, la tomate de Marmande et pour le légume qui nous intéresse : la carotte de Créances.

Quels sont les effets du sol sur la carotte? Il semble qu'ils portent sur divers compartiments de la qualité :

- l'aspect visuel,
- l'aspect nutritif,
- l'aspect gustatif.

LA QUALITÉ VISUELLE

La qualité visuelle a été pendant longtemps la seule dimension de la qualité prise en compte par l'ensemble des filières. Les règles publiques concernant les produits et les normes ont visé à fixer le niveau minimal de la qualité acceptable afin de classer les productions, de favoriser les transactions à distance et de permettre l'établissement de cotations, de mercuriales. Pour la carotte, la mise en oeuvre de règlement CEE (920/89) a consacré cette dimension de la qualité, car pour être classée « Extra » la carotte devra être entière, lisse, de forme régulière, sans meurtrissure, fente, ni crevasse

Pour les légumes « racines » (carotte, pomme de terre, scorsonère, salsifis, ...), la texture et la structure du sol vont avoir un rôle très important sur leur aspect visuel. Les sols sableux permettent d'obtenir des carottes lisses, par contre lorsque la proportion de limon et d'argile augmente, les carottes sont plus ridées. Par ailleurs, la présence de cailloux sera à l'origine de racines tordues.

De manière concomitante, l'état structural va intervenir sur la forme de la racine. ROCHE *et al* (1993) a montré que le passé et l'état hydrique des mottes avaient une grande importance sur la capacité de la racine principale à traverser une motte de terre et par voie de conséquence sur la rectitude des carottes à la récolte. Néanmoins, la descente racinaire dépend de l'interaction complexe de trois facteurs principaux : la résistance mécanique, l'aération et l'état hydrique (EAWIS, 1972).

Cet aspect revêt une importance telle que le marché a senti la nécessité de mettre en place une quotation spécifique qui prend en compte la « texture » du sol (cf. tableau n°

1). Sur la base de la moyenne de 5 dernières campagnes, la carotte dite « extra de sable » à une rémunération supplémentaire de 30% par rapport à de l'« extra de terre ».

Tableau n°1 : Comparaison des prix moyens obtenus de décembre à mars au cours des 5 dernières campagnes pour des carottes « Extra des Sables », Extra de terre ou Catégorie 1 en Basse-Normandie (source CEAFB Basse-Normandie).

Prix moyens producteur (moyenne décembre/mars)	EXTRA DE SABLE	EXTRA DE TERRE	CATÉGORIE 1
1994/95	1,20	0,97	0,67
1995/96	1,47	0,82	0,61
1996/97	1,23	0,89	0,61

Néanmoins, la texture et la structure du sol ne sont pas les seuls facteurs intervenant sur la qualité visuelle de la carotte. Celles-ci agissent en interaction complexe avec d'autres facteurs tels que la génétique, la structure et la qualité du peuplement, le niveau et la régularité de l'alimentation hydrique et minérale, le climat et enfin l'itinéraire technique pratiqué par le producteur.

Les autres constituants de la qualité visuelle : le boutage, le calibre et la longueur sont influencés principalement par ces autres facteurs et dans une moindre mesure par le terroir.

LA QUALITÉ NUTRITIONNELLE

La valeur nutritionnelle des carottes a été largement étudiée du fait de son importance dans notre alimentation, en particulier dans celle des nourrissons, elle est attribuée essentiellement à ses teneurs en sucres, en vitamines A et C et fibres.

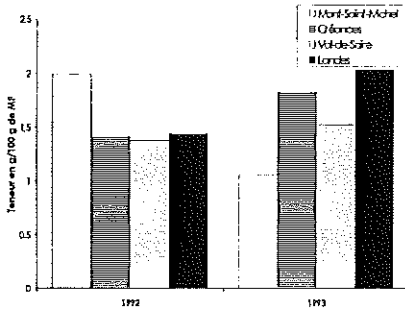
La carotte est une source importante de provitamine A (β carotène principalement) dans notre régime alimentaire (SIMON, 1987). Les principaux facteurs de variations vont être les cultivars qui fluctuent de 60 à 475 ppm dans une population spécialement sélectionnée (AUBERT, 1981, SIMON, 1987) mais également le stade de maturité (LE DILLY *et al*, 1994) et le mode de conservation (VILLENEUVE *et al*, 1994). Par contre, les études mettant en comparaison des terroirs, n'ont pas permis de mettre en évidence de différence (LE DILLY *in* Etude DGAL « Amélioration de la Qualité de la Carotte, 1995, MINNAAR, 1996).

La composition glucidique des racines de carotte est liée essentiellement à la présence de saccharose, de glucose, de fructose, et en moindre quantité de galactose et de

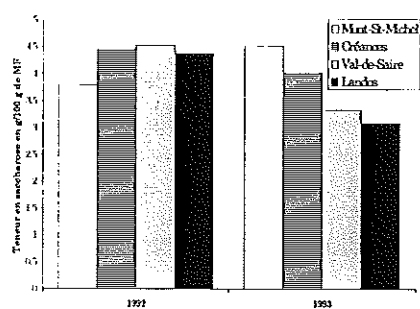
raffinose (LE DILLY *et al*, 1994). La teneur et le rapport entre ces divers sucres dépendent fortement du stade de développement de la carotte (GORIS, 1969, PHAN et HSU, 1973, LE DILLY *et al*, 1994), mais également du mode de conservation (VILLENEUVE *et al*, 1994) et de la variété. L'effet terroir intervient également (GORMLEY *et al*, 1971, SIMON *et al*, 1982). Différentes études ont pu mettre en évidence son influence (LE DILLY *in* étude DGAL « Amélioration de la qualité de la carotte, 1995 et MINNAAR, 1996). Dans la comparaison de 4 terroirs (Mont-Saint-Michel, Créances, Val-de-Saire et Landes) à variété et cycle égaux, le bassin de production du Mont-Saint-Michel s'est distingué, au cours de la campagne 1992-93 par une teneur en saccharose plus faible et des teneurs en fructose et glucose plus fortes et de façon inverse l'année suivante (cf. figure n°2). Il est important de noter que la zone du Mont-Saint-Michel se comporte toujours différemment. MINNAAR (1996) montre également un net effet terroir couplé d'un facteur année.

Figure n° 2 : Incidence du terroir sur la composition glucidique des racines de carottes de la variété Senior (Clause) après 2 mois de conservation d'après Etude DGAL « Amélioration de la qualité de la carotte », LE DILLY 1995.

2a : Teneur totale en glucose et fructose



2b : Teneur totale en saccharose



Ces différences ne semblent pas toutefois très importantes. En Amérique du Nord, les sols humifères semblent induire de plus faibles teneurs en sucres par rapport aux sols minéraux (GORMLEY *et al*, 1971, SIMON *et al*, 1982).

En ce qui concerne la vitamine C (de 60 ppm à 200 ppm, d'après SIMON, 1987) et les fibres, il n'existe pas d'études qui montrent une influence du terroir.

A l'égard de la composition minérale, malgré le peu de références dont on dispose, il existe un effet terroir. MINNAAR (1996) note que l'effet terroir s'exprime pour l'Azote, le phosphore, le potassium, le calcium et le bore. La teneur en matière organique du sol va influencer fortement sur la teneur en nitrate.

BRUNSGAARD *et al*, 1994, montre que la teneur en protéines des carottes fluctue fortement avec le niveau de fertilisation azotée mais également avec l'époque de récolte, la variété considérée et l'année considérée. Il en est de même pour d'autres légumes tels que la laitue beurre (BRUNSGAARD *et al*, 1994) et le navet (EPPENDORFER, 1978).

La mise en évidence de l'influence du terroir sur la qualité nutritionnelle n'est pas simple car elle s'exprime en inter-action avec d'autres facteurs tels que l'année et les itinéraires techniques des producteurs.

LA QUALITÉ GUSTATIVE

En 1985, SIMON établissait la liste des composants de la racine de la carotte impliqués dans ses propriétés organoleptiques. Parmi ceux-ci, il convient de signaler tout d'abord les sucres solubles (saccharose, glucose, fructose) en tant qu'agents de la saveur sucrée (nous avons vu plus haut l'incidence du terroir sur cette composante) ; les mono et sesquiterpénoïdes qui contribuent à l'âpreté ; les iso-coumarines et autres phénols comme agents d'amertume ; le L-méthoxy-3-butylpyrazine impliqué dans l'arôme ou encore les acides aminés libres qui contribuent à la flaveur délicate. La qualité gustative s'accompagne également de la perception de la texture ; la dureté ou la tendreté de la carotte fraîche, râpée ou autre étant principalement liée au niveau de lignification du cylindre central.

L'utilisation d'épreuves sensorielles de type hédonique ou basé sur un jury entraîné permet de mettre en évidence des différences qui sont principalement liées aux variétés ou au terroir ou au mode de conservation (SIMON *et al*, 1980, LIEBLEIN, 1993, CARDINET *in* Etude DGAL « Amélioration de la qualité de la carotte, 1995, MINNAAR, 1996, VILLENEUVE *et al*, 1994).

SIMON *et al*, 1980, montre en comparant différentes variétés Nord-Américaines et issues des trois principales zones de production des USA (Californie, Floride et Texas) une forte influence de la localisation. Les carottes les plus âpres sont produites en Floride et les plus sucrées en Californie. SIMON (1985) signale une forte interaction entre « sol et climat ». Les sols organiques associés à un été chaud et humide tels qu'on le connaît au Wisconsin, induisent une flaveur plus âpre que les sols sableux, en comparaison avec les conditions sèches et plus froides du Sud de la Californie où la production hivernale donne des carottes plus sucrées. CARDINET (1985) à partir d'un panel de dégustateurs dits « naïfs » a mis en évidence une différenciation entre bassins de production français : Mont-Saint-Michel, Val-de-Saire, Créances et Landes. Dans cette étude, menée deux campagnes de suite (1992-93 et 1993-94) avec la même variété Senior (Clause) comparée plusieurs fois au cours d'une conservation en chambre froide, l'effet terroir apparaît clairement sur la qualité organoleptique, néanmoins avec un facteur année important (cf. tableau n°2).

Tableau n°2 : Classement des bassins de production français selon une note gustative globale après 2 mois de conservation au froid humide, variété Senior (Clause) d'après Etude DGAL « Amélioration de la qualité de la carotte », CARDINET 1995)

CAMPAGNE 1992-93				CAMPAGNE 1993-94			
SÉRIE 1		SÉRIE 2		SÉRIE 1		SÉRIE 2	
Mont-St-Michel	a ¹	Mont-St-Michel	a	Mont-St-Michel	a	Mont-St-Michel	a
Landes	b	Landes	b	Val-de-Saire	b	Val-de-Saire	a
Val-de-Saire	b	Val-de-Saire	b	Créances	b	Créances	b
Créances	b	Créances	b	Landes	b	Landes	b

¹ Les chiffres affectés d'une même lettre ne sont pas significativement différents pour $p = 0,05$

Même si ces résultats sont à moduler, et certainement à approfondir, le bassin du Mont-Saint-Michel se distingue nettement des trois autres zones tant sur le plan de l'appréciation gustative que sur le plan de la composition biochimique.

MINNAAR (1996) dans une comparaison « culture biologique - culture conventionnelle » à partir de binômes a également montré un effet « terroir » sur la qualité organoleptique à partir de tests hédoniques mais également à partir de la cristallinité sensible, de mesures biophotoniques.

CONCLUSION

Malgré des cycles de production relativement courts compris entre 90 et 180 jours, la carotte bénéficie des effets du terroir. Ces effets sont issus de l'incidence combinée des sols, des microclimats et des pratiques culturales. L'effet « année » se fait également fortement sentir. Outre le choix du sol pour obtenir la qualité visuelle requise par les différents opérateurs du marché, il est possible de mettre en évidence des modifications de la qualité nutritionnelle et gustative. La valorisation de ces effets, au travers d'un signe distinctif de qualité, IGP voir AOC par exemple, devra se faire de concert avec les autres paramètres intervenant fortement sur la qualité nutritionnelle et gustative, à savoir : les cultivars, la fertilisation et le stade récolte.

En dehors de la carotte, des différences au niveau nutritionnel ou sensoriel ont pu être mises en évidence, par exemple, la laitue beurre (BRUUSGAARD *et al*, 1995), le navet (EPPENDORFER, 1978, EPPENDORFER et EGGUM, 1993), l'épinard, le chou-fleur et la pomme de terre (EPPENDORFER, 1978). Ces études ont mis surtout en évidence le rôle de la conduite des cultures. A ce titre, Bardet *et al*, 1997, ont précisé l'influence de la conductivité électrique ou concentrations en ions d'une solution minérale sur la qualité gustative de tomates. Ainsi, une conductivité élevée augmente l'acidité, l'épaisseur de

la peau, la jutosité, la sucrosité et l'intensité aromatique. Une conductivité basse favorise la fibrosité et la farinosité.

Finalement le terroir reprend une certaine valeur perdue au cours de ce siècle de modernisation agricole et de mondialisation des échanges, et dont chacun tenait compte auparavant pour adapter chaque produit aux qualités - et défauts - du « pays ». Les réputations locales étaient un élément fondamental des échanges. Citons Vilmorin qui en 1883, disait dans son livre « Les plantes potagères » : « *Beaucoup de races (variétés) ainsi obtenues restent locales faute d'être connues suffisamment ; quelques unes ne peuvent pas reproduire fidèlement en dehors des conditions où elles ont pris naissance ... ces réputations locales qui sont un des ressorts du commerce* ».

Le 20^{ème} siècle a cru en l'idée d'un « tout partout ». Peut-être déçante-t-on et ressent-on le besoin de revenir aux valeurs premières : le terroir. Il ne faudrait cependant pas oublier que l'effet terroir, s'il peut accroître chez le consommateur le potentiel d'estime, de reconnaissance et de sûreté, peut très rapidement - suite à des pratiques inconsidérées - engendrer un sentiment de méfiance vis-à-vis du produit (melon de Cavaillon).

Remerciements :

Une partie des résultats présentés a été obtenue avec le soutien financier de la Direction Générale de l'Alimentation du Ministère de l'Agriculture, que nous remercions vivement, ainsi que MM. BOSCH, LUNEAU, LE DILLY, et Mme CARDINET, pour leurs participations.

REFERENCES

- AUBERT, S., (1981). La carotte (*Daucus carota* L.) revue de quelques facteurs d'intérêt diététique. *Cah. Natur. Diét.* XVI (3) : 173-188.
- BARDET, M.C., WACQUANT C., FRESQUET, C., GRASSELLY, D., SIBILLE, I., TRESVAUX, C., 1997 : Tomate : Effet de la concentration en ions de la solution minérale sur la qualité gustative. *Infos-Citfl*, 133 : 34-39
- BRUNSGAARD, G., KIDMOSE, U., SØRENSEN, L., KAACK, K., EGGUM, B.O., (1994) : The influence of variety and growth conditions on the nutritive value of carrots. *J. Sci. Food Agric.*, 65 : 163-170
- BRUNSGAARD, G., KIDMOSE, U., SØRENSEN, L., KAACK, K., EGGUM, B.O., (1995) : Influence of growth conditions on the value of crisphead lettuce 3. Protein quality and energy density as determined in balance experiments with rats. *Plant Foods Human Nutr.*
- CARDINET, C. (1995). Amélioration de la qualité de la carotte, épreuves sensorielles. Rapport de synthèse, rapport final DGAL, 75 p + annexes.

- EAVIS B.W., 1972 : Soil physical conditions affecting seedling root growth. I mechanical impedance, aeration and moisture availability as influenced by bulk density and moisture levels in a sandy loam soil. *Plant and Soil* 36 : 613-622.
- EPPENDORFER, W.H., (1978) : Effects of N-fertilisation on amino acid composition and nutritive value of spinach, kale, cauliflower and potatoes. *J. Sci. Food Agric.*, 29 : 305-311
- EPPENDORFER, W.H., EGGUM, B.O., (1992) : Dietary fibre, sugar, starch and amino acid content of kale, ryegrass and seed of rape and field beans as influenced by S- and N-fertilization. *Plant Foods Human Nutr.*, 42 : 359-371
- GORIS, A., (1969). Métabolisme glucidique de la racine de carotte cultivée (variété Nantaise demi-longue) au cours du cycle végétatif de la plante. *Qual. Plant. Mater. Vég.* 18 : 307-330.
- GORMLEY, T.R., GRIORDAIN, F., et PRENDIVILLE, M.D., (1971). Some aspects of the quality of carrots on different soil types. *J. Food Technol.* 6.: 393-402.
- LE DILLY, F., (1995). Amélioration de la qualité de la carotte, analyse biochimique, rapport de synthèse, rapport final DGAL, 75 p + annexes.
- LE DILLY, F., VILLENEUVE, F., BOUCAUD J. (1994) : Qualité et maturité de la racine de carotte : influence de la conservation au champ et au froid humide sur la composition biochimique. *First International Workshop on carrot*, Caen, 15-16 sept. 1992. *Acta Horticulture* 354, p. 187-199.
- LIEBLEIN, G., (1993). Quality and yields of carrots : effects of composted moisture and mineral fertilizer. Dr. Scient. Dissertation, Agricultural University of Norway.
- MINNAAR, C., 1996. Etude comparative des qualités des produits issus de l'agriculture biologique et de l'agriculture conventionnelle, étude réalisée par le GRAB, rapport final DGAL, 75 p. + annexes.
- PHAN, C.T., HSU, H. (1973). Physical and chemical changes occurring in the carrot root during growth. *Can. J. Plant. Sci.*, 53 : 629-634.
- ROCHE, R., FLEURY, A., VILLENEUVE, F., ROGER ESTRADE, J. (1993) : Qualité morphologique de la racine et état du profil cultural . *First International Workshop on carrot*, Caen, 15-16 sept. 1997. *Acta Horticulture* 354, p. 67-82.
- SIMON P.W., (1987) Genetic improvement of carrots for meeting human nutritional needs. In « Proceedings of the First International Symposium of Horticulture and Human Health, 12-15 april 1987 Arlington Ka., p. 208-214.
- SIMON, P.W., (1985). Carrot flavor : effect of genotype, growing conditions, storage and processing. In : *Evaluation of quality of fruits and vegetables* (Pattee H.E. Ed.) pp. 315-328, Westport, Connecticut.
- SIMON, P.W., PETERSON, C.E., et LINDSAY, R.C., (1980). Genetic and environmental influences on carrot flavor. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 105(3) : 416-420.
- SIMON, P.W., PETERSON, C.E., et LINDSAY, R.C., (1982) : Genotype, soil, and climate effects on sensory and objective components of carrot flavor. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 107, 644-648.
- VILLENEUVE, F., LE DILLY, F., BOSC, J.P., (1994) Incidence du mode de conservation sur l'évolution qualitative de la carotte. *Infos-Citifl*, 107 : 28-33.
- VILMORIN-ANDRIEUX, (1883) : Les plantes potagères : description et culture des principaux légumes des climats tempérés. Vilmorin-Andrieux et Cie, éditeur, 650 p.

Aspects multiples de la gestion d'un terroir face aux enjeux d'une plus-value qualitative pour les produits

J. SALETTE

*INRA - Centre de Recherches d'Angers
Unité de recherches sur la vigne et le vin*

Dans la note précédente (C.R. de ces mêmes rencontres), l'intérêt des diverses potentialités caractérisant le terroir a été dégagé, et leur logique précisée. Il convient que sa possible gestion soit raisonnée et optimisée en fonction d'objectifs précis et tout particulièrement ceux qui concernent la recherche d'une qualité mieux exprimée.

1) A quelle échelle travailler

Quelle que soit la problématique envisagée pour la gestion du terroir, il est important de répondre à cette question de manière à éviter toute dérive dans l'adéquation d'une action à des objectifs préalablement discutés et choisis.

Deux aspects sont à envisager : la géographie physique, la géographie fonctionnelle.

La question d'échelle relevant des aspects géographiques est liée aux relations entre le terroir et le territoire : l'unité de base pour ce raisonnement a été dénommée « unité terroir de base » : c'est « la plus petite unité naturelle d'ordre éco-géo-pédologique que l'on peut différencier utilement et qui constitue une entité de fonctionnement unitaire du système milieu physique x vigne ». La taille de l'unité terroir de base varie selon l'homogénéité de la géologie et la géomorphologie, et aussi selon la finesse de l'analyse que l'on peut faire du milieu physique.

Un terroir viticole, l'unité de taille supérieure, est composé d'un petit nombre de terroirs de base distincts, dans un paysage assez homogène, et dans le cadre d'une unité climatique homogène. Les aires délimitées caractérisant une appellation contrôlée concernent un ou plusieurs terroirs viticoles (cohérence de la typologie des sols et de leur distribution dans l'espace). Ces ensembles peuvent être cartographiés ; là encore se pose la question de l'échelle opérationnelle.

Au delà des terroirs viticoles, le choix de l'échelle à adopter concerne l'usage qui sera fait du travail ainsi réalisé, et le destinataire principal de ce travail : du viticulteur au technocrate national ou européen. Chacun d'eux exige une échelle d'étude qui correspond à sa manière de travailler : la parcelle, le groupe de parcelles avec des fonctionnements unitaires, ou, à l'opposé, des grandes zones que l'on pourra considérer comme homogènes pour leur appliquer une même politique.

Tous les découpages de territoires peuvent donc engendrer des demandes différentes dans la manière d'appréhender le terroir, qu'il s'agisse d'un agro-éco-système spécialisé par un potentiel de production qualitativement original, ou d'un ensemble d'interactions complexes entre un milieu, des hommes et un produit (Salette, 1996).

L'approche de la géographie fonctionnelle est donc incontournable, même pour le pédologue ou pour l'agronome spécialisé dans le fonctionnement écophysologique des parcelles. Le viticulteur gère une exploitation représentant en général plusieurs unités terroirs de base en fonction de ses objectifs de production : soit un seul vin obtenu par assemblages, soit plusieurs vins différenciés en types correspondent à chacune des unités terroir. Les syndicats propriétaires d'une AOC, tout comme les coopératives de vinification, se sentent de plus en plus motivés pour valoriser l'existence de terroirs différents. Comment gérer cette différence et à quelle échelle ? Ceci revient à répondre à la question du choix du niveau intégrateur des différences (ex. taille de la cuve de vinification, rythme d'arrivée de la vendange, volume des assemblages... etc). Gérer des terroirs c'est donc, dans le cadre de la prise en compte d'une diversité territoriale, choisir des modes de fonctionnement qui soient valorisateurs de différences qualitatives potentielles. Cet aspect doit compléter le souci d'organiser l'espace aux différents niveaux d'échelle requis par tous les acteurs.

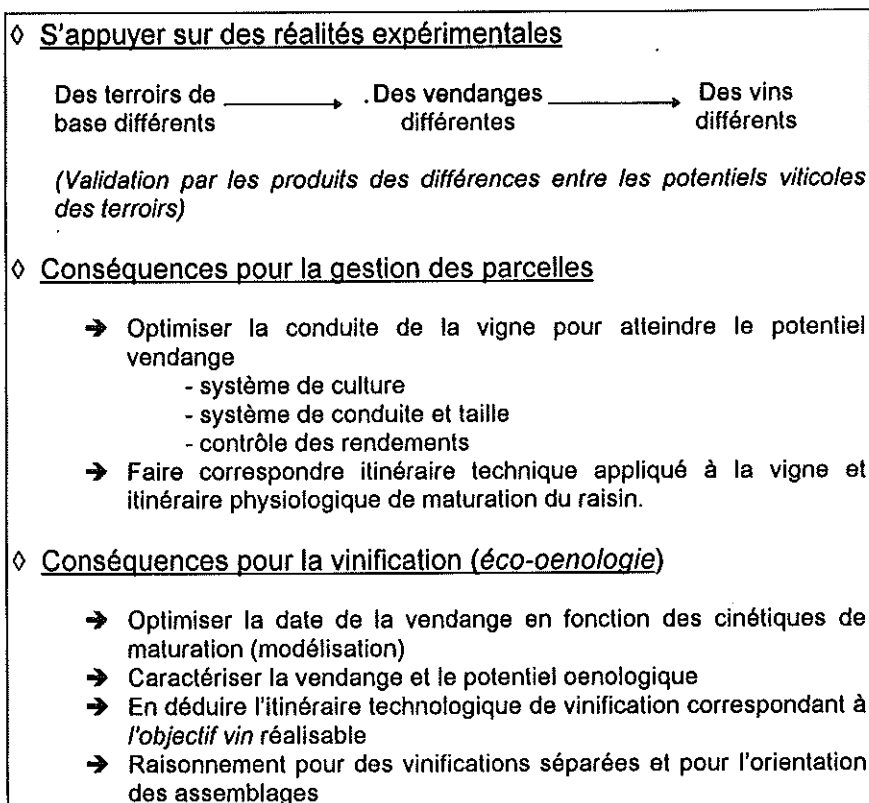
2) Comment gérer la différence

La discussion du niveau d'échelle conduit à répondre à la question du niveau choisi pour l'intégration des différences, ce qui est une manière cohérente d'envisager une gestion. Ne perdons pas de vue que la prise en compte du concept de terroir revient à valoriser davantage les potentialités qualitatives originales que le terroir engendre. Cette prise en compte est évidemment génératrice d'un coût de production plus important : il ne cesse d'être une cause d'impossibilité économique que dans la mesure, précisément, où il donne lieu à une plus value qualitative reconnue et acceptée. Gérer le terroir revient donc à optimiser des différences, à assurer

leur reproductibilité par des itinéraires techniques adaptés et maîtrisés, à organiser des flux et des actions en fonction d'objectifs bien précisés et qui correspondent aux potentialités qualitatives des milieux concernés. Le tableau n° 1 illustre cette démarche dans le cas des vins : du constat de l'existence des différences, et de leurs conséquences sur la gestion des opérations techniques, à la vigne comme au chai.

Tableau 1

Gérer le lien du terroir au produit (cas des vins)



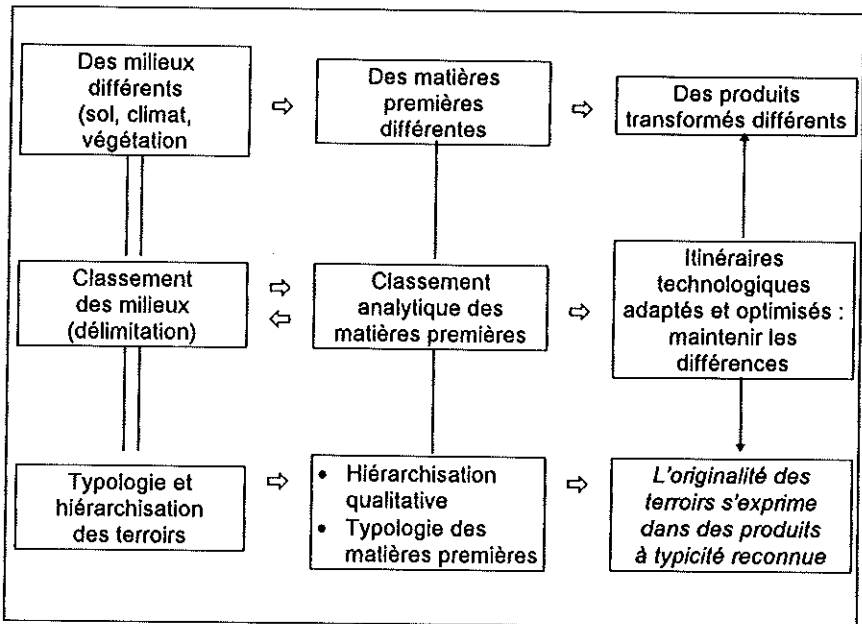
Mais « il n'y a pas que les vins », et il convient d'insister sur les points communs entre les vins (pour lesquels la « démarche terroir » est ancienne, ce qui ne signifie pas qu'il ne soit pas utile de la réactualiser et de l'améliorer) et d'autres produits. Le point commun le plus essentiel est de considérer que la matière première issue du terroir, et avant transformation, doit être bien prise en compte. Ce sont les différences entre des matières premières

provenant de terroirs de base différents qui valident les différences entre les aptitudes de ces terroirs (tableau 1 ; Salette 1996, Salette et al. 1997) ; le tableau n° 2 schématise ces relations. Au delà de l'exemple terroirs-vendanges-vins, on peut raisonner d'une manière analogue pour terroirs-laits-fromages...

Cette gestion des terroirs correspond à des choix dans lesquels le contexte historique, économique et culturel tient une place dominante. Les techniques de transformation des différentes matières premières issues de terroirs différents peuvent être organisées de deux manières totalement opposées : supprimer les différences ou les transmettre au produit fini qui devient ainsi plus original.

Tableau n° 2 :

**Du terroir à la matière première et au produit élaboré :
confirmer et gérer les différences**



Il convient donc d'étudier, selon les filières, les systèmes de production et les « bassins d'approvisionnement », quels sont les acteurs qui interviennent conjointement dans la gestion du terroir, et quelles sont leurs inter-relations. Dans le domaine des vins d'Appellation, co-existent de manière claire les viticulteurs individuels et les coopératives. On constate que,

de plus en plus, les coopératives réalisent effectivement de la gestion des terroirs avec le résultat très apprécié de mieux typer les vins qu'elles élaborent.

3) Le terroir et l'objectif qualité

La qualité est une notion complexe et plurielle qu'il convient de préciser. La relation du terroir à la qualité ne peut s'exprimer que par ce que nous proposons d'appeler des « plus-values qualitatives » (Salette 1996).

La qualité, dans son acception la plus courante (absence de défauts, réponse aux attentes du marché), n'est pas une notion suffisante pour servir à décrire de manière adéquate l'originalité par laquelle un produit révèle son terroir d'origine. Il faut donc dépasser le cadre normé de critères référencés objectivables, mesurables, et quantifiables. Ce qui conduit à faire appel au domaine subjectif de la connaissance : d'où la notion de plus-value qualitative liée à des critères qualitatifs subjectifs dont la plupart relèvent de l'analyse sensorielle. Un produit original trouvera un acheteur prêt à accepter un prix plus élevé justifié par cette plus-value qualitative. C'est dans ce contexte que s'est peu à peu développée la notion de typicité (Salette, 1997). La typicité (ou caractère de ce qui est typique) exige donc une connaissance accrue de ce qui fait qu'un produit est typique, de ce qui permet de distinguer des types différents dans un produit donné. La typicité est plus ou moins marquée ; les caractères qui permettent de définir un type (par leur présence, leur fréquence de rencontre et leur intensité d'expression) ne sont pas simples à établir, d'où les exigences de grande rigueur que requiert l'analyse sensorielle qui permet de « qualifier » un produit, conjointement avec quelques critères relevant de l'analyse instrumentale. A la différence du produit élaboré dont l'appréciation nécessite une approche subjective, la matière première, étape incontournable entre le terroir et le produit transformé, justifie une analyse qualitative complète pour que soit appréhendée toute sa variabilité.

Dans un produit comme le vin pour lequel la typicité relève essentiellement de critères subjectifs, l'importance de l'expertise est essentielle pour valider des produits liés à un terroir, par la conformité à un type : le contrôle de l'origine (un terroir délimité, des conditions de production et une histoire) est complété par une dégustation d'agrément (le produit est alors « reconnu »).

Dans ce contexte, la gestion de la qualité relève d'un double jeu : s'imposer des contraintes de production ; accepter des contrôles. De la fiabilité des procédures d'agrément, dépend la confiance que le marché (ou le consommateur) accordera au produit.

Conclusions

On constate actuellement l'existence d'un phénomène sociologique « produits de terroirs ». Il convient que les techniciens et les scientifiques sachent le gérer, en ce qui les concerne, avec une certaine maîtrise, donc avec une grande rigueur, au delà du contexte de mode.

La gestion du terroir nécessite une unité d'action très élaborée de la part de tous les acteurs de la filière concernée : il s'agit d'une « unité d'action dans une unité de lieu ».

Au delà de la qualité au sens habituel du mot, la définition de la typicité, résultat de l'analyse des différents types présentés par un même produit, permet une communication cohérente pour faire connaître l'originalité et l'identité particulière des produits liés à un terroir.

Une gestion du terroir avec un corollaire de gestion de la qualité nécessite une prise en compte particulière du consommateur : au delà de l'information de ce dernier il faut aller jusqu'à contribuer à sa formation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CASABIANCA F., VALCESCHINI E., Editeurs 1996. Construction sociale de la qualité. La qualité dans l'Agro-Alimentaire : émergence d'un champ de recherches. Publications INRA-SAD.
- JACQUET A., SALETTE J., CELLIER P., MORLAT R., FANET J., 1995. Réflexions sur la notion d'échelle pour le terroir. *Revue des Oenologues*, 77, 57-60.
- SALETTE J., 1996. Sur la réalité du lien entre le terroir et le produit : de l'analyse sémantique à l'approche écologique. *1er Colloque International « Les Terroirs viticoles », INRA-URVV Angers et ISVV Montpellier, 17-18 Juillet 1996, 551-560.*
- SALETTE J., 1997. La typicité : une notion nouvelle au service du produit, de ceux qui l'élaborent, et de ceux qui le consomment en l'apprécient. *Revue des Oenologues*, à paraître.
- SALETTE J., ASSELIN C., MORLAT R., 1997. Une problématique pour l'étude du lien du terroir au produit : Analyse du système terroir-vigne-vin ; possibilité de généralisation à d'autres produits. *Science des Aliments*, à paraître.

FERTILISATION AZOTEE ET QUALITE DU BLE TENDRE PANIFIABLE

Alain BOUTHIER - Christine LE SOUDER (ITCF)

Parler de qualité pour le blé tendre n'a de sens que si l'on se réfère à une utilisation donnée. Nous allons aborder, dans cet article, uniquement l'utilisation du blé en alimentation humaine et plus particulièrement en panification. Ce débouché représente 75 % du blé collecté sur le territoire français en 95-96. Parmi ces 75 %, 15 % sont utilisés par la meunerie française et le reste exporté vers la CEE (28 %) ou des pays tiers (32 % : Europe de l'Est, Maghreb, Chine). A l'intérieur même de ce débouché "panification", le marché devient de plus en plus segmenté et les utilisateurs ont des exigences de plus en plus fortes et précises, correspondant à un type déterminé de produit fini et une technologie de fabrication, qui tend à s'industrialiser. Cette évolution est constatée sur le marché français mais également sur les marchés d'exportation. En effet, les acheteurs des pays étrangers ne sont plus les états mais de plus en plus souvent les utilisateurs locaux (meunerie) qui fixent des cahiers des charges plus précis.

Dans ce contexte, les producteurs et leurs organismes collecteurs, vont devoir mettre sur le marché des lots de qualité bien identifiés, homogènes, avec une régularité de qualité entre livraisons. La maîtrise de la qualité est donc devenue un objectif incontournable pour pouvoir continuer à vendre sur un marché de plus en plus concurrentiel.

LA TENEUR EN PROTEINES, UN PARAMETRE IMPORTANT POUR LA QUALITE BOULANGERE

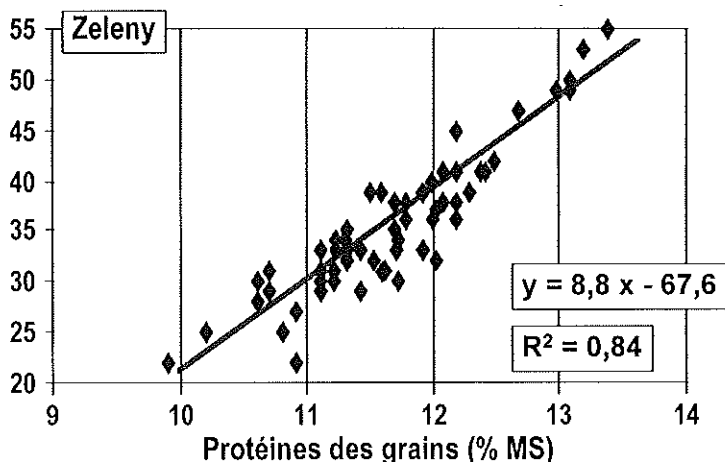
La qualité d'un blé destiné à la panification, porte sur de nombreuses caractéristiques : physiques (grains cassés, impuretés, teneur en eau, poids spécifique ...) sanitaires (insectes, grains toxiques, résidus de pesticides...) et technologiques. Ces dernières sont appréciées par deux types de mesures ou tests (Encadré 1):

- les mesures globales qui donnent une réponse complète sur la valeur d'utilisation comme le test de panification. Ces mesures, de méthodologie compliquée et lourde ne sont pas pratiquées de manière courante.

- les mesures indirectes : plus rapides et simples de mise en oeuvre, donnent une image prédictive du comportement de la farine lors de certaines étapes du processus de transformation en pain. Plusieurs tests sont utilisables, donnant pour chacun d'eux, une image partielle de la valeur d'utilisation. Selon les différents "types de panification", les utilisateurs ont défini des classes d'exigence pour chacun des tests (Encadré 2).

Parmi les mesures indirectes, la mesure de la teneur en protéines est le test le plus couramment utilisé. Elle présente l'intérêt d'être bien reliée, pour une variété donnée, aux autres paramètres technologiques (Figures 1 et 2). Les relations entre la teneur en protéines et les résultats des autres mesures indirectes ou du test de panification sont établies pour l'ensemble des variétés cultivées, utilisables en panification.

Figure 1 : Relation Proteines - Zeleny (Soissons - 1993-96)



Sources Enquête Qualité Blé ITCF - ONIC - ANMF

Encadré 1 : Tests d'appréciation de la qualité :

◆ Mesures indirectes

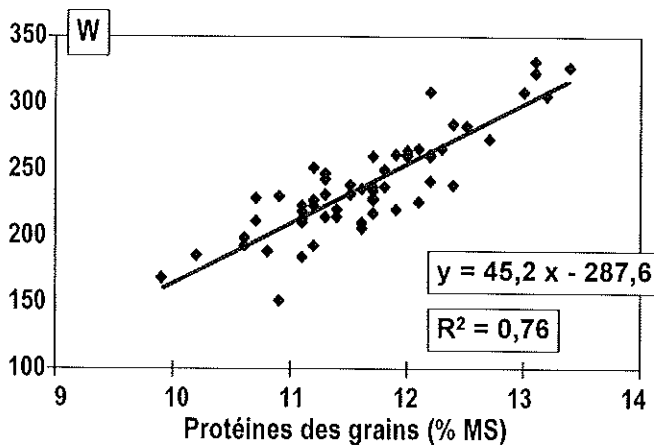
- *Teneur en protéines* : La teneur est déduite de la mesure chimique de la quantité d'azote, en la multipliant par un facteur de conversion. En France, ce facteur est de 5,7 dans le cadre de l'alimentation humaine et de 6,25 pour l'orge de brasserie et les utilisations en alimentation animale. Le résultat est en général ramené à la matière sèche, mais ce n'est pas le cas dans les autres pays (résultat ramené à 14 % de teneur en eau en U.K. et à 12 % de teneur en eau aux U.S.A.).
- *Indice de chute de Hagberg-Perten* : L'indice de chute de Hagberg mesure indirectement l'activité des amylases (enzymes dégradant l'amidon) qui peut devenir excessive dans le cas de présence de grains germés ou en voie de germination. L'indice de chute de Hagberg s'exprime en secondes. Il globalise la durée d'agitation de la préparation (60 secondes) et celle de la chute de l'agitateur. Un indice de chute ne peut donc être inférieur à 60 secondes.
- *Indice de sédimentation (test de Zeleny)* : L'indice de sédimentation a une faible valeur prédictive en panification française, mais il permet de classer les blés, est simple et nécessite peu de matière première. C'est un indicateur de la quantité et de la qualité des protéines à travers leur capacité à gonfler dans un milieu acide.
- *Essai à l'alvéographe Chopin* : Le principe de la mesure repose sur l'étude du comportement d'un échantillon de pâte, formé à partir d'un mélange de farine et d'eau salée, soumis à une déformation sous l'effet d'un déplacement d'air à débit constant. Dans un premier temps, le disque de pâte résiste à la pression et ne se déforme pas, puis il gonfle sous la forme de bulle plus ou moins volumineuse selon l'extensibilité de la pâte et éclate. L'évolution de la pression dans la bulle, en fonction du temps, est mesurée et reportée sous forme de courbe, appelée alvéogramme. L'alvéogramme est caractérisé par 4 paramètres principaux : P, G ou L, W et le rapport P/L. La hauteur P correspond à la pression maximale, exprimée en millimètres, enregistrée avant que le disque ne commence à gonfler. P est en relation avec la ténacité de la pâte. La longueur L, mesurée en millimètres, correspond à l'allongement maximum de la bulle et est en rapport avec l'extensibilité de la pâte. Le gonflement G se déduit par le calcul à partir de L ($G = 2,22 \sqrt{L}$). Le rapport P/L donne une indication de l'équilibre entre ténacité et extensibilité de la pâte. La surface de l'alvéogramme W représente le travail de déformation de la pâte jusqu'à la rupture et exprime la force de la farine. W s'exprime en 10^{-4} joule rapporté à un gramme de pâte.

◆ Mesures globales :

- *Test de machinabilité* : Le principe repose sur la préparation d'une pâte à partir de farine, d'eau, de levure, de sel et de sucre dans un pétrin spécifique (STEPHAN) et l'observation de ses caractéristiques après le pétrissage et le façonnage mécanique d'une boule de pâte. Si les opérations de pétrissage et de façonnage se sont déroulées sans que la pâte colle, le blé est dit non collant et machinable. Si, au contraire, la pâte colle au pétrissage ou lors des phases de façonnage, le blé est dit collant et non machinable : il est considéré comme impanifiable.
- *Test de panification* : Le test reproduit, à l'échelle du laboratoire, le diagramme de panification pratiqué par l'artisan boulanger. Les notes sont globalisées en une note totale sur 300 points, une note de pâte et de pain sur 200 points et une note de mie sur 100 points. Les résultats sont sujets à des différences dues aux appréciations variables d'un boulanger à l'autre. Ce qui conduit à interpréter avec prudence des résultats qui proviennent de différents fournisseurs.

Encadré 2 : Caractéristiques technologiques attendues pour la Meunerie	
Blés panifiables de force protéines : > 14 % W : > 350	<ul style="list-style-type: none"> • W : Force boulangère • P : Tenacité de la pâte • L : Extensibilité <p><i>W, P, L : Résultats de l'essai alvéographe Chopin</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Note de panification : résultat du test de panification française.
Blé panifiables protéines : de 12 à 12,5 % note de panification : > 225 W : >200 P/L : < 0,7	
Blés à tendance biscuitière P/L : entre 0,3 et 0,5 W : < 150 protéines : < 11,5 % blé de dureté soft	
Source : ANMF	

Figure 2 : Relations Protéines - W (Soissons - 1993-96)

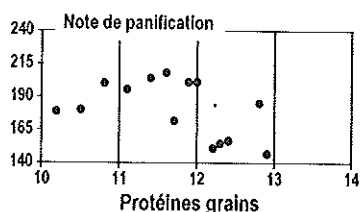


Sources : Enquête Qualité Blé ITCF - ONIC - ANMF

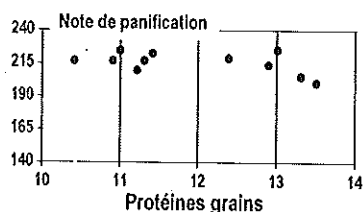
Globalement la teneur en protéines permet d'expliquer 60 à 80 % de la valeur boulangère d'une variété. La relation teneur en protéines - note de panification française passe par un optimum (caractéristique de chaque variété) à une teneur en protéines comprise entre 11,5 et 12,5 %. Les variétés se distinguent au niveau de la teneur en protéines correspondant à la note minimale de panification française et de la plage de teneur où la note reste stable (Figure 3).

Figure 3 : Protéines - Panification française (*Exemples de relations*)

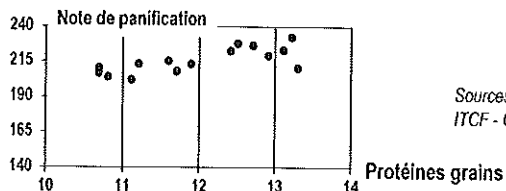
CHARLY



SHANGO



SUPRAL



Sources Enquête Qualité Blé
ITCF - ONIC - ANMF

Ainsi la prise en compte du couple variété-protéines constitue un outil pertinent à la récolte pour classer les lots. La teneur en protéines peut être mesurée très rapidement à la livraison avec la spectrométrie infrarouge. C'est également par rapport à ce couple variété-protéines que l'on cherche à définir un itinéraire technique pour satisfaire un objectif de qualité défini par l'utilisateur.

LE TAUX DE PROTEINES S'ELABORE EN DEUX ETAPES

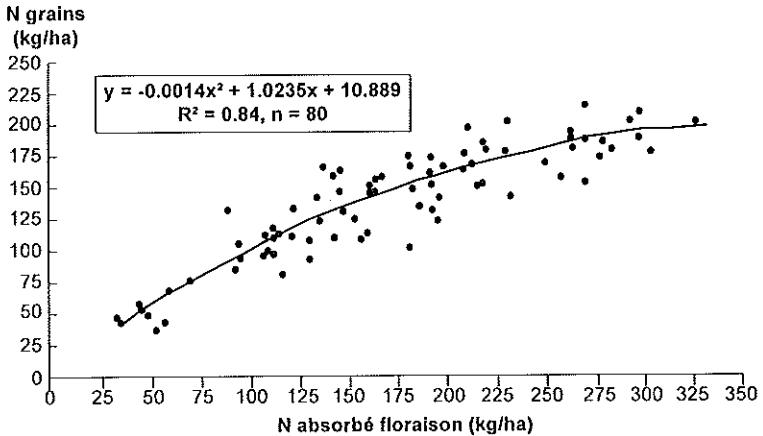
Les protéines dans les grains proviennent d'une remobilisation, au cours de leur remplissage, d'azote absorbé principalement avant floraison dans les parties végétatives, contrairement à l'amidon dont la majeure partie résulte de la photosynthèse entre floraison et maturité.

La quantité d'azote absorbé à la floraison explique environ 80 % de la variation de la quantité d'azote contenue dans les grains par variété (Figure 4).

La cinétique d'accumulation d'azote dans les grains suit de manière quasi identique celle de la matière sèche totale des grains. Toutefois l'accumulation d'azote dans les grains réagit différemment à celle de l'amidon vis-à-vis de la température et du déficit hydrique. Les températures élevées supérieures à 25° pénalisent davantage le remplissage des grains en amidon et vont dans le sens d'un enrichissement relatif en protéines par rapport à l'amidon. Le déficit hydrique en cours de remplissage affecte l'accumulation d'amidon et l'absorption d'azote. Mais l'accumulation d'azote, provenant principalement de la remobilisation d'azote absorbé avant floraison, est moins limitée que celle du carbone.

Ainsi, à partir d'une quantité d'azote absorbé à la floraison et d'un nombre de grains fixé à ce stade, le climat entre floraison et maturité plus ou moins favorable pour le remplissage des grains en amidon, détermine une variabilité importante de la teneur en protéines (jusqu'à 2 %).

Figure 4 : Relation entre l'azote observé à la floraison et l'azote contenu dans les grains à la récolte
(Expérimentation Azote Variété SOISSONS - 1994-95-96)



ITINERAIRE TECHNIQUE ET QUALITE : PLACE DETERMINANTE DE LA FERTILISATION AZOTEE

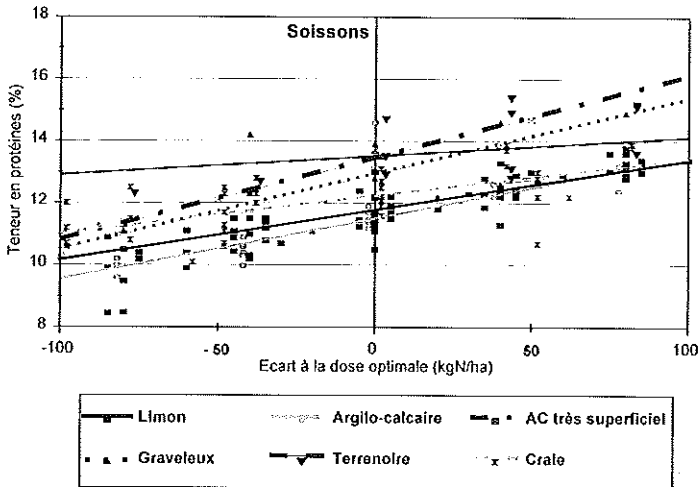
Après le choix de la variété, la fertilisation azotée (dose, fractionnement) représente le principal moyen à la disposition du producteur pour viser un objectif de rendement et de teneur en protéines.

La relation entre la dose d'engrais azoté et la teneur en protéines a été étudiée pour quelques variétés à partir d'essais courbes de réponse, dans différents contextes pédo-climatiques (*Taureau et Martin, 1992 ; Le Souder et al, 1995*). Dans le cas d'un fractionnement en deux apports, au stade début tallage (Feekes 3) et stade épi à 1 cm (Feekes 5), il a été montré que la teneur en protéines s'ajustait linéairement à la dose d'azote sur une gamme de ± 80 kg N/ha de part et d'autre de la dose d'engrais permettant d'atteindre l'optimum de rendement. La pente (enrichissement en protéines par kg N/ha apporté) et la constante (teneur en protéines à l'optimum de rendement) de l'ajustement linéaire varient selon la variété, le sol et le climat.

L'effet variétal a été mis en évidence sur le couple Soissons-Thésée, de productivité et précocité proches, avec une teneur en protéines à l'optimum de rendement supérieure de 0,5 % pour Soissons par rapport à Thésée. Cette différence provient en grande partie d'une quantité d'azote absorbé à la floraison supérieure pour Soissons ainsi que d'une capacité de remobilisation d'azote des parties végétatives vers les grains, plus élevés (*Gate, 1995*). D'autres travaux mentionnent également des aptitudes variables selon les génotypes pour l'absorption et la remobilisation d'azote (*Corbellini et al, 1985 ; Halloran, 1981 ; Anderson et al, 1991*). Ceci conduit à la nécessité de caractériser et classer les variétés vis-à-vis de leur réponse "protéines" à la fertilisation azotée.

La variabilité de la réponse "protéines" liée au type de sol et au climat, est beaucoup plus importante, comme le montre une première synthèse de 50 essais sur la variété Soissons réalisés sur six types de sols entre 1991 et 1995, avec dans la grande majorité des cas une même forme d'engrais azoté (ammonitrates et seulement quelques points en solution azotée parmi les points en Craie) (*Ballandras, 1996*) (Figure 5).

Figure 5 : Evolution de la teneur en protéines selon le type de sol, avec la dose d'azote en deux apports (variété Soissons)



Au niveau de la teneur en protéines à l'optimum de rendement, deux types de situations sont distinguées :

- Teneur proche de 13 % d'une part dans les sols à faible réserve en eau (argilo-calcaires superficiels et sols graveleux) où le déficit hydrique en fin de cycle est plus marqué, d'autre part dans les terres noires de Limagne à plus forte minéralisation printanière. Il convient de rester prudent sur ce résultat ; le nombre de points mesurés dans ces milieux est bien inférieur à ceux des autres sols.

- Teneur voisine de 11,5 - 12 % dans les autres sols.

L'effet du milieu apparaît également sur la pente des ajustements avec des valeurs allant de + 0,5 % pour 100 kg de N/ha en terres noires de Limagne à + 2,5 % en argilo-calcaires superficiels.

De manière générale, cette synthèse, pour la variété Soissons, montre qu'une fertilisation azotée conduite, en deux apports, avec une dose totale calculée selon la méthode du bilan prévisionnel pour atteindre un objectif de rendement fixé, ne permet pas de dépasser 12 % de protéines dans certains milieux. L'obtention d'une teneur de 12,5 % exigée par certains contrats nécessiterait donc une surfertilisation. Toutefois à l'intérieur d'un même milieu, la variabilité reste importante.

APPORT D'AZOTE FIN MONTAISON, BENEFIQUE POUR LA TENEUR EN PROTEINES

Le fractionnement de la dose d'engrais qui consiste à réaliser un troisième apport après le stade 2 noeuds (Feekes 7) en plus des deux apports classiques, augmente à dose totale égale, la teneur en protéines. En effet l'azote absorbé en fin montaison est assimilé principalement dans les organes en croissance active (dernières feuilles, épis) à partir desquels la remobilisation vers les grains est importante. De plus, le coefficient apparent d'utilisation (CAU) de cet apport tardif est plus élevée pour peu qu'il soit suivi d'une pluie de 15 à 20 mm. Le stade auquel est effectué cet apport, a une incidence sur le gain de protéines réalisé : par rapport à une dose identique en deux apports, le gain moyen augmente de 0,25 % au stade 1-2 noeuds à 0,5 %, 10 jours après l'épiaison (*Le Souder et al, 1994*). Le fractionnement en trois apports avec le troisième avant le stade Gonflement n'a généralement par d'incidence négative sur le rendement, voire dans certains cas, peut se montrer favorable. Le stade dernière feuille (Feekes 8-9) semble offrir le meilleur compromis entre le maintien du rendement et l'enrichissement en protéines.

Enfin l'enrichissement en protéines avec un troisième apport, varie selon la dose totale et sa position vis-à-vis de celle donnant le rendement optimum : le gain est plus important dans le cas de doses inférieures, ainsi en cas d'erreur par défaut sur la dose calculée, on perd moins, en teneur en protéines, avec trois apports qu'avec deux apports.

En conclusion de ces travaux, sur la variété Soissons, la dose d'azote calculée par le bilan prévisionnel pour l'objectif de rendement fixé et fractionné en trois apports, suffit le plus souvent, pour réaliser une teneur en protéines de 11,5 à 12 %. Si on recherche une teneur supérieure à 12 %, la dose totale devra être majorée (de 20 à 50 kg N/ha pour 12,5 % de protéines). Dans ce cas, il faudra évaluer localement, l'impact environnemental de cette pratique et mettre en oeuvre toute solution adaptée pour limiter le risque de fuites de nitrates.

PILOTER UN TROISIEME APPORT POUR UNE MEILLEURE MAITRISE DE LA TENEUR EN PROTEINES

Le pilotage de la fertilisation azotée avec la méthode Jubil[®] mise au point par l'INRA et l'ITCF, a permis un gain de précision dans la détermination de la dose d'azote pour un objectif de rendement, par rapport à l'utilisation du bilan prévisionnel seul. L'utilisation de cette méthode permet également de mieux approcher une teneur en protéines de 11,5 - 12 %, correspondant à l'optimum de rendement, dans les sols autres que les sols superficiels. Par

contre, l'obtention de teneurs en protéines plus élevés (12,5 %) nécessite une adaptation de la méthode pour décider de l'opportunité d'un apport au stade sortie dernière feuille et en déterminer la dose.

Une expérimentation a été engagée depuis 1995 à l'ITCF pour construire une méthode de pilotage de la fumure azotée pour différents objectifs de teneur en protéines, avec une méthodologie analogue à celle utilisée pour élaborer la méthode Jubil[®].

UN DIAGNOSTIC QUALITE PLUS PRECIS GRACE A LA CONNAISSANCE DE LA COMPOSITION PROTEIQUE DES GRAINS

La connaissance de la composition protéique du grain améliore l'appréciation de la qualité boulangère par rapport à la teneur en protéines seule. La méthode de dosage par chromatographie de taille moléculaire, récemment mise au point, permet de séparer et quantifier les différents types de protéines : glutenines, gliadines, albumines et globulines (Figure 6). La répartition des protéines dans les différentes fractions est en bonne relation avec les caractéristiques technologiques intervenant dans la qualité (Figure 7) et constitue un moyen de diagnostic plus performant des effets sol climat et techniques culturales sur la qualité. C'est ainsi que l'on a pu, sur les premiers essais analysés, avec cette méthode, mieux expliquer des effets "qualité" variables, différenciés de fractionnement en trois apports à différentes doses totales, malgré des effets teneurs en protéines comparables. Cette méthode pourra également s'avérer performante pour discriminer les effets de la fertilisation soufrée, qui d'après les références existantes joue peu sur la teneur en protéine mais surtout sur leur composition.

CONCLUSION GENERALE

Les références disponibles sur la réponse rendement-protéines à la fertilisation azotée, permettent de construire une préconisation pour Soissons, en cours de validation pour d'autres variétés de blé panifiable. Toutefois, la marge d'incertitude sur la teneur en protéines reste importante, et en particulier, l'effet du contexte pédoclimatique, devra être mieux compris. C'est l'objectif d'un travail de modélisation de l'élaboration de la teneur en protéines des grains du blé (*Thèse de M.L. GIRARD - Laboratoire d'Agronomie de l'INRA Grignon en cours*). Le modèle envisagé de type "mécaniste", intègre les effets du milieu et du climat, sur les différents processus écophysiologiques impliqués dans le remplissage des grains en carbone et en azote.

Figure 6 : Chromatographie des protéines de la farine des blés tendres

- Extraction des protéines par sonication à puissance modérée dans un tampon phosphate + SDS à pH 6,9
- Stabilisation des extraits à température modérée
- Elution en 30 minutes dans un tampon phosphate +SDS sur colonne à gel de silice

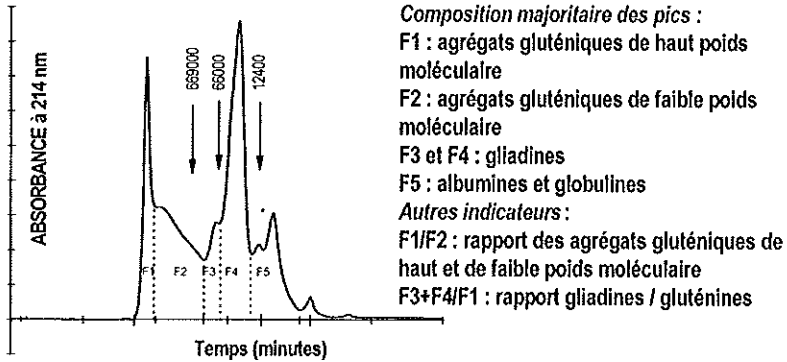
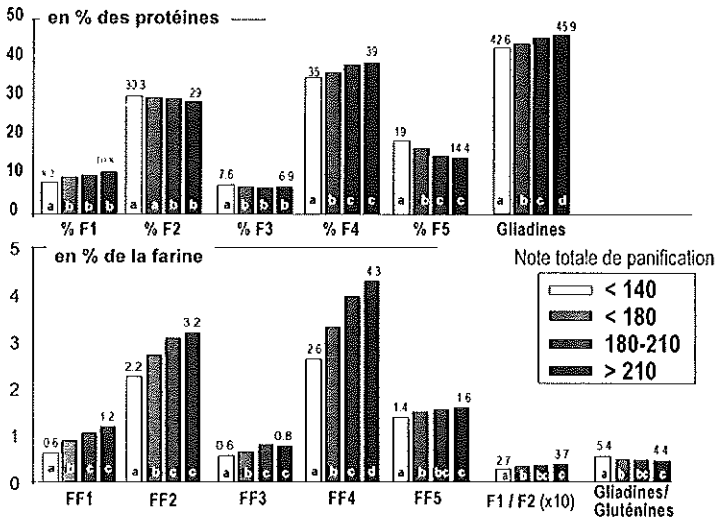


Figure 7 : Un chromatographe représentatif de chaque classe de qualité boulangère



BIBLIOGRAPHIE

- BALLANDRAS D., 1996 - Contribution à la définition de stratégies de fertilisation azotée sur trois variétés de blé tendre d'hiver, visant des teneurs en protéines fixées. *Mémoire de fin d'étude ENSAIA, 44 pages + annexes.*
- BAR C., 1995 - Tests d'appréciation de la qualité : Comment les interpréter ? *Tiré à part de Perspectives Agricoles n° 203, XXVI-XXXI.*
- BERNICOT M.H., MARTIN G., 1995 - Itinéraire technique et qualité : Agir sur le choix de la variété. *Tiré à part de Perspectives Agricoles n° 203, XI-XIII.*
- BRANLARD G., TRIBOI E., 1983 - Remobilisation of carbon and nitrogen in wheat as influenced by postanthesis water deficits. *Crop.Sci., 34, 118-124.*
- CUBIZOLLES V., 1991 - Etude de l'influence de la température sur un peuplement de blé tendre d'hiver pendant la période post-floraison. *Mémoire de fin d'étude ENITA Clermont-Ferrand, 38 pages + annexes.*
- GATE P., 1995a - Le rôle de l'azote sur l'élaboration de la teneur en protéines du grain. *Tiré à part de Perspectives Agricoles n° 203, XLIV-XLVIII.*
- GATE P., 1995b - Ecophysiologie du blé : de la plante à la culture. *Tec&Doc Lavoisier Paris ou ITCF Paris, 417 pages.*
- LE SOUDER C., BERNICOT M.H., 1993 - Faut-il fertiliser de la même façon toutes les variétés ? *Perspectives Agricoles n° 179, p 67-73.*
- LE SOUDER C., MARTIN G., BRIFFAUX G., DRIEU Y., 1994 - Les "plus" du fractionnement. *Perspectives Agricoles n° 188, p 24-28.*
- LE SOUDER C., BOUTHIER A., CASTILLON P., 1995 - Itinéraire technique et qualité : un point clé : la fertilisation azotée. *Tiré à part de Perspectives Agricoles n° 203, XIV-XVII.*
- MARTIN G., TAUREAU J.C., 1992 - Blé tendre : Qualité et fumure azotée. *Perspectives Agricoles n° 165, p 16-25.*
- PALTA J.A., FILLERY I.R.P., 1993 - Postanthesis remobilisation and losses of nitrogen in wheat in relation to applied nitrogen. *Plant and Soil, 155/156, 179-181.*

SOL, FERTILISATION ET QUALITE DE L'ORGE DE PRINTEMPS BRASSICOLE

(M. Le Bail INA P-G, département AGER¹)

La question de la qualité de l'orge de printemps destinée à la malterie que nous traitons ici inscrit la problématique de la qualité des céréales à une échelle un peu différente de celle qu'Alain Bouthier présente pour le blé tendre d'hiver.

Nos travaux (Le Bail et al 1990, Le Bail 1995, Le Bail thèse en cours) portent sur la qualité des lots d'orge résultant de l'assemblage des récoltes parcellaires d'une région donnée. Cette finalisation qui tente de prendre en compte des objectifs de l'agriculteur et de l'entreprise de collecte, tous deux associés dans la construction du lot, nous semble poser de nouvelles questions à l'agronome.

La première est celle de la définition des objectifs auxquels la recherche va s'attacher. La seconde est celle de la mise au point pour répondre à ces objectifs, de procédures techniques à l'échelle de la parcelle et à l'échelle du bassin de collecte.

A- Définition des objectifs de travail

La plupart des cahiers des charges parvenant à l'agriculteur retiennent quatre critères en plus des obligations attachées au contrat de Paris : la variété, le calibrage (au tamis de 2.5 mm), le taux de germination (> 93 %) et le taux de protéines (< 11.5%).

Ces critères ne résolvent pas totalement les questions de qualité pour les malteurs et les brasseurs mais l'utilisation de lots répondant à ces critères de manière homogène et régulière serait moins couteuse par rapport à une situation actuelle de l'offre.

De leur côté, si les agriculteurs ont boudé l'orge de printemps, préférée des malteurs, c'est avant tout parce que les prix offerts ne compensaient pas l'incertitude sur l'obtention des qualités requises et des rendements, plus faibles et plus variables qu'en orge ou blé d'hiver.

Sollicités en 1989 par plusieurs acteurs de la filière dans l'Oise², nous avons donc retenu un double objectif de recherche : un niveau de rendement (seuil visé 60 qx de M.S.) et un niveau de taux de protéine (seuil maximal : 11.5%).

¹ 16 rue Claude Bernard 75005 Paris tel : 01 44 08 16 87 Fax : -16 57 Mail : lebail@inapg.inra.fr

Le taux de germination ne semble pas être un problème majeur et la question du calibrage est, au moins partiellement, prise en charge dès lors que l'on peut établir une corrélation entre calibre et poids moyen d'un grain (Le Bail 1995).

L'objectif de l'entreprise de collecte-stockage est d'assurer qu'elle pourra fournir en quantité suffisante des lots homogènes aux malteurs. Cette question justifie que l'on tienne compte globalement sur l'aire de collecte des risques de mauvais résultats et que l'on adapte les procédures techniques à la limitation de ces risques selon 2 axes :

- 1- Comment proposer des systèmes de culture qui améliorent conjointement rendement et taux de protéines et en réduisent la variabilité sur le bassin ?
- 2- Comment proposer des procédures précoces de classement des parcelles qui permettent éventuellement d'éliminer les moins adaptées ?

B- Diagnostic et propositions de systèmes de culture

A partir d'un schéma de la co-élaboration du rendement et du taux de protéines (Encadré 1) qui distingue les composantes sensibles à la variabilité des facteurs du milieu, azote et eau, on a pu proposer un diagnostic de la variabilité régionale du taux de protéines et du rendement.

En 1989 (cv Pression), 1990 et 1991 (cv Volga), une vingtaine de parcelles représentatives de la diversité des terrains et des systèmes de culture de la région ont été suivies. On y a relevé au cours du cycle cultural des composantes du peuplement, des caractéristiques du milieu et les itinéraires techniques des agriculteurs.

Encadré 1 : Elaboration du rendement et du taux de protéines au cours du cycle

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{RDT} = \text{NG} \times \text{PIG} \\ \text{PROT} = 6.25 \times \text{NHI} \times 1/\text{EFF} \times 1/\text{PIG} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{PROT} = 6.25 \times \text{NHI} \times 1/\text{EFF} \times 1/\text{PIG} \end{array} \right.$$

où RDT: Rendement; NG : Nombre de grain; PIG : le poids d'un grain; NHI : indice de récolte de l'azote (rapport entre l'azote des grains et l'azote total), PROT : taux de protéines des grains; EFF : efficacité de l'azote absorbé pour le nombre de grains (NG/NABS); NABS : azote absorbé par la plante entière.

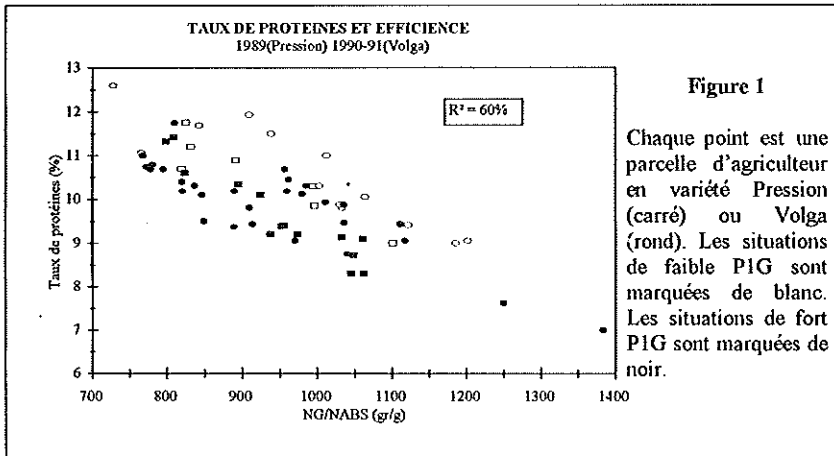
B1- Des variations du rendement et du taux de protéine pilotées avant tout par deux variables : l'azote absorbé et l'efficacité de l'azote pour le nombre de grains

Les conditions d'élaboration du rendement sont étroitement liées à celles qui président à l'élaboration du NG. Une différence dans les PIG due à une compétition entre grains ou à un échaudage n'a pas, seule, d'effet sur le rendement. Le facteur majeur de l'élaboration du rendement est donc le Nabs, facteur principal de l'élaboration du NG. En tendance plus l'azote absorbé augmente, plus le rendement est fort jusqu'à un plateau au delà duquel l'efficacité de l'azote pour la production de grain diminue. Ce plateau s'établit pour Volga à des quantités d'azote absorbé de l'ordre de 220-230

² Travaux encadrés par M. Sebillothe et J.M. Meynard à la chaire d'agronomie de l'INA P-G.

kg/ha. La partie linéaire de la relation est perturbée par les conditions de l'absorption de l'azote révélées par l'efficacité de l'azote pour le NG.

Cette efficacité est la composante principale de l'élaboration du taux de protéines. Son effet est renforcé par celui du poids de grain (figure 1). En tendance plus l'efficacité diminue plus le taux de protéines augmente. Une forte baisse du poids de grain³, qui se joue plus sur une faible accumulation post-floraison des produits de la photosynthèse que sur une réduction des transferts d'azote des parties végétatives vers le grain en fin de maturation, provoque une hausse du taux de protéines.



B2 Les conditions de l'alimentation azotée et hydrique au centre de la co-élaboration du rendement et du taux de protéines

L'Efficacité varie avant tout sous l'effet de deux facteurs (figure 2) :

- L'azote absorbé. Quand celui-ci croît l'efficacité de l'azote décroît (Meynard 1985)
- Les conditions d'accumulation carbonée dans la plante qui peuvent être limitantes sous l'effet de conditions hydriques déficitaires dans le mois qui précède la floraison.

Ces deux facteurs interviennent avec un poids variable selon les dispositifs.

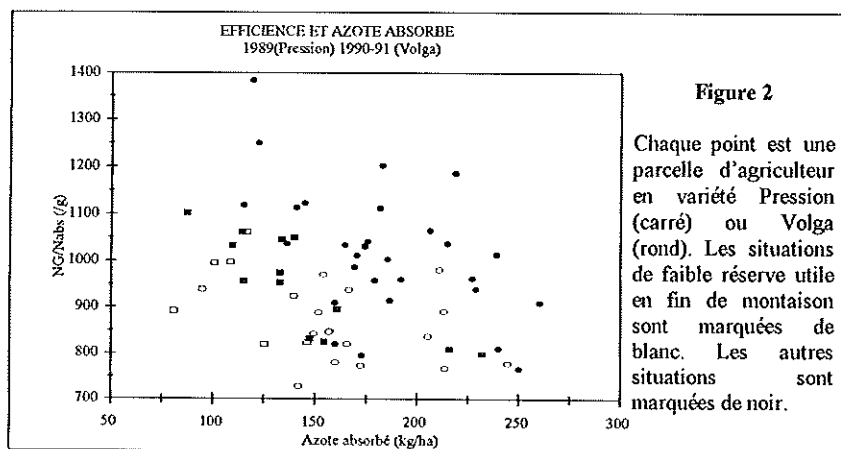
En 1989 ces deux facteurs expliquent 60% de la variabilité de l'efficacité. En 1990 les conditions hydriques déficitaires écrasent l'effet de l'azote absorbé et estompent les variations entre parcelles. Dans ces conditions de sécheresse marquée on note un effet de l'état structural des parcelles sur l'efficacité qui n'est pas ou peu sensible dans les deux autres réseaux de 1989 et 1991. Gede Wibawa fait les mêmes observations dans sa thèse (1992) sur un essai croisant azote et traitements structuraux. Il évoque deux hypothèses quant à l'effet de ces états structuraux sur l'efficacité en année sèche :

- Un effet négatif sur la conductance stomatique et le nombre de grains, hypothèse cohérente avec les travaux de Tardieu (1987) et Masle et Farquhar (1988)

³ En deçà de 80% du potentiel variétal (ici 46 mg).

- Un effet positif sur l'absorption tardive d'azote après une carence temporaire qui se traduit par l'émission de verdillons (Gbongué 1985). Après une période de sécheresse, la réhumectation de la couche arable est particulièrement favorable à la minéralisation. Cette minéralisation tardive est particulièrement forte dans les traitements avec gros blocs massifs de l'essai de 1990 de Wibawa (1992).

En 1991 la variabilité de l'efficience est expliquée à 60% par l'azote total absorbé et par la part d'azote absorbé après floraison qui n'est pas négligeable pour certaines des parcelles dans lesquelles la quantité globale d'azote absorbé a été forte.



L'azote absorbé par la culture est fortement lié à l'azote disponible (ici : somme entre l'azote absorbé par un témoin 0 et l'engrais apporté) mais le coefficient apparent d'utilisation est réduit par l'existence de tassements dans le profil au moins en 1989 et 1991 (tableau 1). En 1990, année très sèche l'effet du déficit hydrique recouvre l'effet des tassements.

B3 Conséquences sur les règles de décision techniques

le diagnostic précédent oriente les choix techniques majeurs pour le contrôle d'un double objectif de rendement et de taux de protéines. Ils concernent trois niveaux de décision.

Tableau 1
Coefficient Apparent d'Utilisation de l'azote et tassements dans le profil 1989 (Pression), 1990-1991 (Volga)

Année	Semelle de labour	%C > 40%	%C ≤ 40%
1989	0.47 b	0.47 b	0.76 a
1990		0.78 a	0.71 a
1991	0.64 b	0.43 c	0.79 a

Ont été écartées de ce tableau les parcelles dans lesquelles l'azote disponible était très fort ou apporté tardivement, les parcelles marquées par des adventices ou un déficit minéral (MgO). Dans une ligne deux lettres différentes désignent une différence significative (Newman Keuls 95%)

1- le choix de la parcelle semée en orge de printemps,

Le tableau 2 résume les caractéristiques des situations parcellaires à écarter au regard des risques qu'elles représentent pour le taux de protéines et le rendement. Ce n'est pas tant le niveau élevé de la minéralisation de certains précédents ou des matières organiques qu'une prévision difficile de leur valeur et de leur date de disponibilité qui pose problème.

**Tableau 2 Choix des parcelles
(Situations à éviter dans l'Est de l'Oise)**

	AZOTE ABSORBE		EFFICIENCE		PIG	
	Effet principal	renforcé par	Effet principal	renforcé par	Effet principal	renforcé par
Terrain	Etat structural C > 40% et semis en conditions humides	Semis roues jumelées et Précédent récolté en mauvaises conditions	RU < 100 mm (1 an/2 déficit hydrique fin mai)	Semis tardif	RU < 130 mm (1 an/3 déficit hydrique au 20 juin)	Floraison tardive
Précédent /Anté précédent	situations minéralisat variable (pois prairie)	Apports de matière organique ou engrais vert	id	id	hôte/hôte hôte/amplificateur piétin échaudage	Hiver doux et semis précoces

Les parcelles à ressuyage lent où l'on pourrait être conduit à passer en conditions humides et à employer des roues jumelées sont à hauts risques au titre des conditions d'absorption de l'azote, ainsi que les parcelles dont les précédents sont récoltés dans de mauvaises conditions. Un déficit hydrique avant floraison peut provoquer une baisse d'efficacité de l'azote pour le nombre de grain tandis qu'un déficit hydrique après floraison va jouer sur le poids d'un grain. Les parcelles de faible réserve utile et les semis tardifs comportent plus de risques de ce point de vue. Un taux de nécroses racinaires supérieur à 30% des racines atteintes par le piétin échaudage a un effet sur le poids de grains. La nature des précédents et des antéprécédents, le type de sol et les conditions climatiques de l'hiver jouent sur ce taux (Colbach et al 1994).

On voit que le statut de « céréale secondaire rustique », adaptée à des conditions de terrain difficiles ne peut pas être appliqué à une orge de printemps sous contrat brassicole au risque de ne pouvoir produire régulièrement une qualité satisfaisante.

2- le choix de la date et des techniques d'implantation,

La date d'implantation joue sur le tassement du profil en fonction des conditions de ressuyage de la parcelle et des outils utilisés au semis (tableau 2). Elle joue aussi sur la position des stades principaux de la culture par rapport à des composantes climatiques limitantes de l'efficacité ou du poids des grains. Pour la région étudiée on évalue la borne inférieure de la période d'implantation au 10 février en fonction des fréquences d'occurrence de gel et de pluies au printemps. La borne supérieure est évaluée au 15 mars en fonction des risques de sécheresse de fin de cycle.

3- le choix de la dose d'engrais azoté et de sa date d'application.

La fixation de la dose à apporter peut se faire par une évaluation du bilan azoté (AZOBIL[®]). Sur les dispositifs étudiés et pour des reliquats compris entre 30 et 60 kg/ha, les doses préconisées varient entre 80 et 150 kg/ha en fonction du précédent et des potentialités des parcelles. L'apport en un seul passage au moment du semis ne nous semble pas impératif tant que la date d'apport n'excède pas six semaines après semis. Certaines doses ou certains sol (sables) peuvent justifier un second apport.

C Stratégies de constitution de lots de qualité voulue

Le débouché en malterie reste la meilleure façon de valoriser la production d'orge de printemps pour l'agriculteur si la qualité est satisfaisante. Pour garantir aux malteurs que les termes du contrat, souvent signé avant implantation des orges, seront respectés l'entreprise de collecte stockage doit s'assurer que la moyenne des taux de protéines des parcelles constitutives du lot sera inférieure à 11.5% et que la variabilité sera faible entre parcelles et entre années pour assurer l'homogénéité des lots et la régularité des livraisons. Autrement elle doit écrêter le lot pour verser les récoltes trop riches en protéine en lot de mouture.

Aujourd'hui les dispositifs mis en place se fondent essentiellement sur l'information sur les lots stockés chez les agriculteurs et sur un contrôle à réception par infralyseur dans quelques silos. Or, il peut être nécessaire de trouver dès la moisson des volumes complémentaires de ceux des contrats et les mesures directes de taux de protéines à réception sont coûteuses et ne répondent pas à deux préoccupations importantes de l'organisation de l'approvisionnement : anticiper les niveaux qualitatifs pour s'organiser au niveau des silos et dans la négociation des marchés et, assurer une certaine traçabilité des lots jusqu'aux manières de produire.

On cherche donc à classer les parcelles d'orge de printemps précocément à l'aide d'indicateurs relevés avant récolte. Ce classement testé sur deux années (1991, 1992) et deux variétés (Volga, Prisma) doit permettre de construire deux lots distincts par leur taux de protéine moyen. Deux indicateurs sont principalement testés :

1- Les itinéraires techniques. Au regard du diagnostic vu plus haut appliqué aux conditions des années 1991 et 1992, on classe les parcelles en deux catégories dont les récoltes forment les lots 1 et 2 :

- doses et conditions d'implantation compatibles avec les préconisations,
- dose d'azote forte (> 20 unités à la dose calculée), ou trop tardive (+ de 40% de la dose au delà du 20 avril), implantation tardive (au delà du 15 mars) ou en conditions très humides.

2- Le diagnostic foliaire (DF) à floraison⁴ (Loué 1987) est utilisé de deux façons :

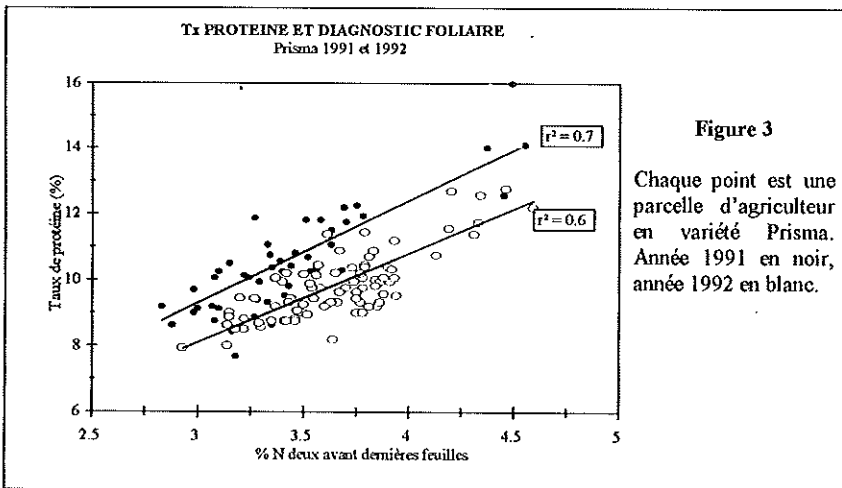
- Après un classement en DF croissant ou écarte dans le lot 2 les récoltes des 10% ou 20% de parcelles de plus fort DF.

⁴ dosage de l'azote par la méthode Kjeldahl dans les deux avant dernières feuilles.

- Valeur seuil du DF. On écarte dans le lot 2 les récoltes des parcelles dont le DF à floraison promet un taux de protéines supérieur ou égal à 11.5% selon la relation T_x de Protéines = a DF + b (établie sur l'une des deux années de données disponibles pour Prisma et appliquée sur l'autre année)

Ces indicateurs sont complétés par des observations de verse.

Les méthodes fondées sur la fixation d'une valeur seuil du diagnostic foliaire supposent une relation assez stable entre cet indicateur et le taux de protéines. Or, sur les deux années testées, si la corrélation entre le diagnostic foliaire à floraison et le taux de protéines est correcte, l'équation de la relation linéaire entre ces deux variables est différente (figure 3). L'indicateur utilisé seul permet surtout d'ordonner les parcelles mais pas de prévoir leur taux de protéines à un stade aussi précoce.



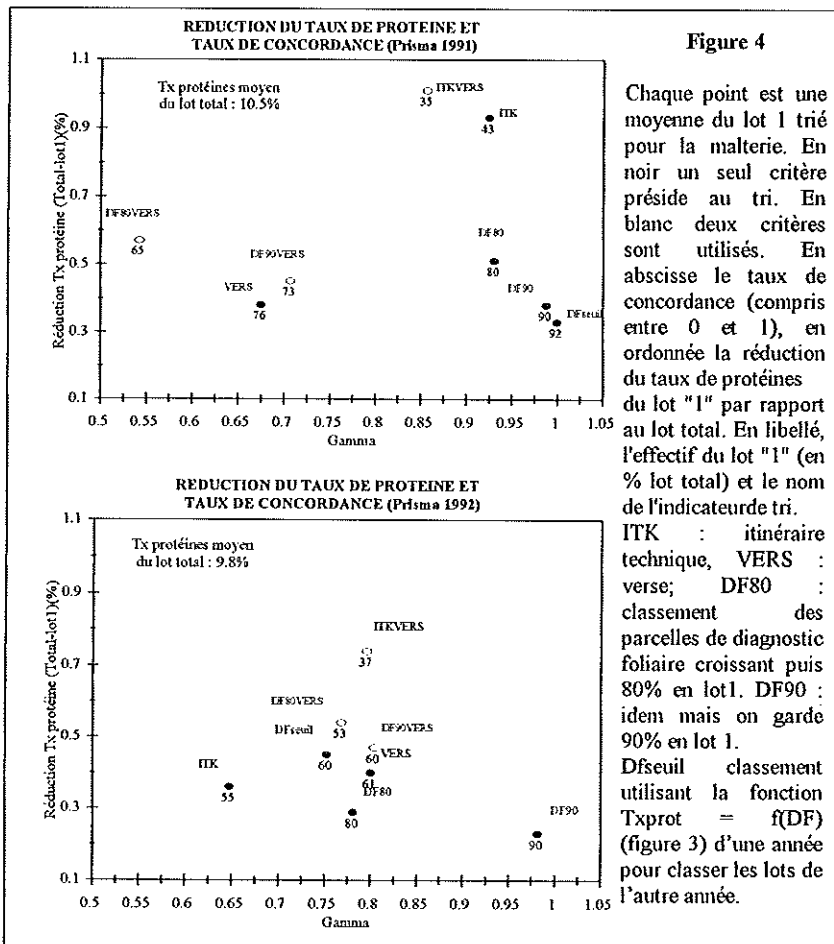
Quelle que soit la méthode de tri choisie, les lots ont des taux de protéines significativement différents. Les lots 2 obtenus en 1991 pour Volga et Prisma ont toujours un taux de protéine moyen supérieur à 11%, et les lots 1 ont toujours un taux de protéines inférieur ou égal à 10%. En 1992 le taux de protéines moyen total n'étant que de 9.8% avec un écart-type faible (1% contre 1.5% en 1991) le taux de protéine moyen du lot 2 ne dépasse 11% que pour quelques parcelles.

Cette modalité de gestion des flux doit circonscrire les méthodes permettant, quelle que soit l'année, de trier un lot significativement moins riche en protéines et plus homogène que le lot initial et ce, en retirant le minimum de parcelles et en réduisant au maximum les erreurs d'affectation d'une parcelle à l'un ou l'autre lot.

La figure 4 montre que la connaissance de l'itinéraire technique éventuellement complétée par l'observation de la verse permet de gagner 0.9% de protéines en 1991

et 0.7% en 1992 sur Prisma, mais ce, au prix d'un écartement de 50 à 60% des parcelles.

La mesure du diagnostic foliaire à floraison permettant d'écarter 20% de parcelles les plus risquées, éventuellement complétée par l'observation de la verse permet d'obtenir des effectifs maximum (entre 70 et 80% du lot initial), pour une réduction notable du taux de protéines (0.5% en 1991) et de son écart type (30%) et ce avec un taux de concordance de plus de 75% du classement testé par rapport à un classement a posteriori c'est à dire avec un risque faible de classer une parcelle dans le mauvais lot.



Malgré la faiblesse des taux de protéines moyens de ces deux années (qui ne justifiaient pas qu'un tri soit déclenché) les baisses de taux de protéines obtenus par ces classements précoces des récoltes parcellaires peuvent atteindre 0.5%. Une année à risque de fort taux de protéine le gain d' ½ point est appréciable.

Enfin, pour compléter ces démarches sur orge nous avons testé sur blé tendre l'utilisation d'autres indicateurs de l'état azoté de la culture comme la concentration du jus de base de tige et la valeur de la transmittance de la lumière dans les feuilles (chlorophyll meter) à différents stades (Le Bail, thèse en cours).

En conclusion, pour piloter le double objectif rendement-taux de protéines, la maîtrise de la fertilisation, des conditions d'absorption et d'utilisation de l'azote par le peuplement sont centrales. Pour gérer les flux à l'échelle d'une région la connaissance des systèmes de culture (nature du terrain, des précédents et des modes de fertilisation), les observations des accidents de végétation et des indicateurs analytiques de l'état azoté de la plante sont mobilisables pour prévoir le classement des parcelles vis à vis du taux de protéines. Pour monter de véritables procédures d'allotement il faut combiner une prévision d'un taux de protéines moyen (Bordes et al, 1994) à ces modalités de classement des parcelles.

Bibliographie

- Bordes J.P., Martin G., Gate Ph., Gouet J.P., 1994 Comment prévoir le rendement et la qualité avant récolte? *Perspectives Agricoles* n°197 70-72.
- Colbach N., Lucas P., Cavelier N., 1994 Influence des successions culturales sur les maladies du pied et des racines du blé d'hiver *Agronomie* 14, 525-540.
- Gbongué D., 1985 Influence de l'alimentation azotée sur l'élaboration du nombre de grains d'un peuplement d'orge d'hiver Thèse de Docteur de l'INA-PG, Paris.
- Le Bail M., 1995 Linking yield and quality in spring malting barley *BIOS* 255:91-95.
- Le Bail M., Meynard J.M., Sebillotte M., Delpit B. 1990. An agronomic diagnosis for spring barley adapted to brewery. European Society of Agronomy. Proc. 1st Congress, A. Scaife, ed. Session 4p05.
- Loué A., 1987 Diagnostic foliaire sur blé et orge in L'analyse végétale dans le contrôle de l'alimentation des plantes tempérées et tropicales Martin Prével P., Gagnard J. et Gautier P. eds Tec et Doc Lavoisier.
- Masle J., Farquhar G.D. 1988 Effects of soil strength on the relation of water use efficiency and growth to carbon isotope discrimination in wheat seedlings. *Plant Physiol*, 86: 32-38
- Meynard J.M., 1985 construction d'itinéraires techniques pour la conduite du blé d'hiver. Thèse de Docteur-Ingénieur, INA-PG Paris, 297 p.
- Tardieu F., 1987 Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. III Disponibilité des réserves en eau du sol *Agronomie* 7: 279-288
- Wibawa G., 1992, Approche par enquête et expérimentation de l'effet de l'état structural du sol sur la nutrition azotée et l'élaboration du rendement de l'orge de brasserie. Thèse de Docteur de l'INA-PG, Paris, 209 p. + annexes.

SOL, FERTILISATION ET QUALITE DE LA BETTERAVE INDUSTRIELLE

M. CARIOLLE, R DUVAL, D GUIRAUD

* Institut Technique Français de la Betterave Industrielle (ITB)
45, rue de Naples, F-75008 PARIS

En matière de qualité en culture de betteraves, le sol intervient à deux niveaux.

- Ses caractéristiques physico-chimiques déterminent directement la disponibilité des éléments nutritifs et l'équilibre nutritionnel de la culture, facteur de qualité interne.
- Ses caractéristiques physiques et mécaniques influent largement sur la masse de terre exportée hors de la parcelle lors de la récolte, élément clef de la qualité externe.

1- SOL ET QUALITE INTERNE : MAITRISE DES FACTEURS NUTRITIONNELS

La qualité interne caractérise l'aptitude d'une betterave à l'extraction du saccharose et donc à générer le moins possible des "non sucres" et en particulier les non sucres non précipitables. Ces derniers réduisent l'extraction et également la cristallisation du sucre blanc et augmentent la part de mélasse. Si les caractéristiques intrinsèques de la variété déterminent le potentiel de qualité interne, l'environnement nutritionnel peut très sensiblement altérer ces performances. En particulier, la richesse de la betterave en éléments alcalins est un facteur négatif très important de la qualité technologique. En France, l'appréciation de cette qualité interne passe par l'utilisation d'une formule d'estimation du sucre mélasse théorique (S.M/Pol en % g de betterave) qui outre la prise en compte de la teneur en glucose(G.), met essentiellement l'accent sur l'azote, le potassium et le sodium.

$$S.M/Pol = 0,14(K+Na)+0,25N+3,3G+0,3$$

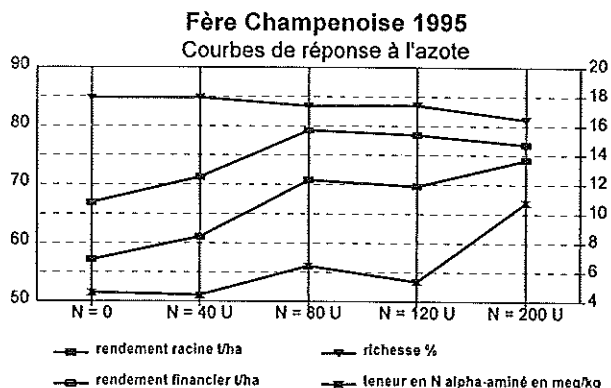
avec N, K et Na en mmol%g de betterave ; G en g%g de betterave

Sur le terrain, l'objectif du praticien, au travers du choix de la variété et des autres facteurs agronomiques, est d'atteindre la meilleure productivité sans sacrifier la qualité interne.

11- Fertilisation azotée et qualité interne

La consommation excessive d'azote a pour conséquence une diminution importante de la richesse en sucre, du rendement financier et une forte altération de la qualité technologique par l'augmentation des teneurs en azote alpha-aminé qui est l'un des principaux éléments mélassigènes. A l'inverse, des quantités d'azote disponibles trop faibles se traduisent par une chute des rendements racine et financiers (exemple : essai de fertilisation azotée de Fère-Champenoise 1995, graphique 1).

Graphique 1 :



Actions de recherche

Jusqu'aux années 70, l'application de doses trop élevées d'azote rendait difficile la maîtrise de la qualité technologique et l'obtention du rendement optimum. Les professionnels se sont donc tournés vers la recherche pour trouver des solutions.

La collaboration de l'ITB et de l'IRIS (Institut de Recherche de l'Industrie Sucrière) avec l'INRA de Laon a débouché sur l'adaptation à la culture de la betterave de la méthode prévisionnelle du bilan de l'azote.

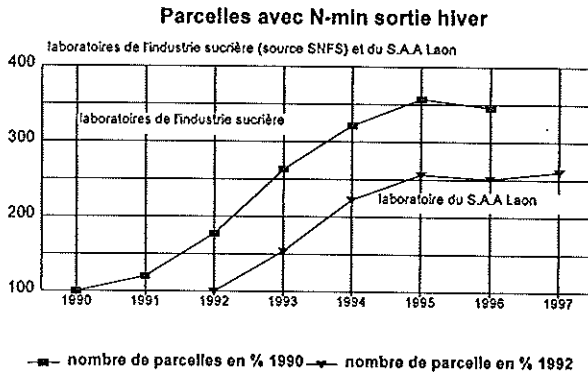
Parallèlement un programme expérimental associant l'ITB, la chaire de science de sol de l'INA-P.G. et le C.E.A. de Cadarache et basé sur l'utilisation d'engrais marqué à l'isotope ^{15}N a permis de préciser la nature et l'importance des flux réels d'azote en culture.

Sur le terrain, l'application de doses calculées par la méthode du bilan s'est développée progressivement, puis s'est intensifiée à partir de 1990. Afin d'encadrer cette évolution et d'acquérir des références susceptibles d'améliorer encore cette méthode, l'ITB a mis en place une très large expérimentation organisée en réseau. Chaque année, environ 50 essais de doses centrées sur la dose calculée par la méthode du bilan sont mis en place chaque année depuis 1989 dans l'ensemble des régions betteravières françaises et couvrent les principales situations techniques représentatives des pratiques habituelles (type de sol, précédent, gestion des effluents d'élevage, etc.). Ce réseau permet ainsi d'identifier les cas où les réponses aux apports d'azote s'éloignent de celles prévues par la méthode du bilan et de tester différents paramétrages ou hypothèses. Les références acquises ont ainsi contribué à renseigner Azobil.

Utilisation de la méthode du bilan dans la pratique

Le nombre croissant d'analyses de la quantité d'azote minéral en sortie hiver à l'ouverture du bilan, témoigne de la confiance des betteraviers vis à vis de cette méthode. Il a d'ailleurs fallu augmenter les capacités des laboratoires existants ou même créer de nouveaux laboratoires pour répondre à la demande. Ce qu'ont fait les professionnels de la filière notamment au travers des analyses réalisées par les services agronomiques des sucreries et de la création des laboratoires de la Société de Services des Betteraviers (S2B). Selon une enquête récente, à eux seuls ces deux pôles assurent près de 45 % des analyses N-min actuellement réalisées pour le calcul de la dose conseillée.

Graphique 2 :

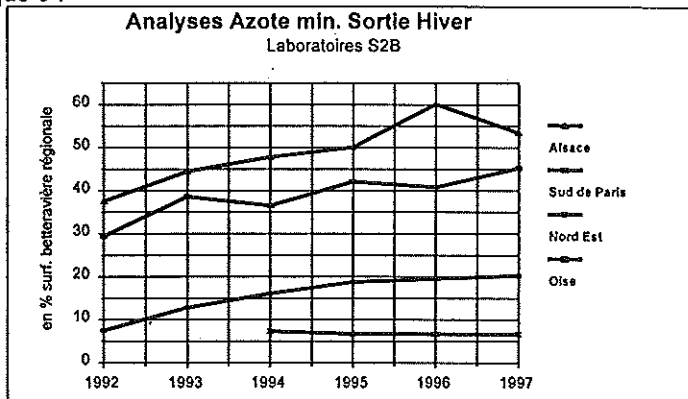


En terme d'évolution, les données nationales fournies par le Syndicat National de Fabricants de Sucre (SNFS) et celles départementales par le Service Agronomique de l'Aisne indiquent une progression importante du nombre de parcelles avec une analyse de N min sortie hiver, jusqu'en 1995 puis une stabilisation de l'effectif (graphique 2).

Les laboratoires régionaux de S2B (graphique 3) enregistrent dans chacune de leur zone d'implantation, une progression régulière du nombre de planteurs réalisant des analyses N min.

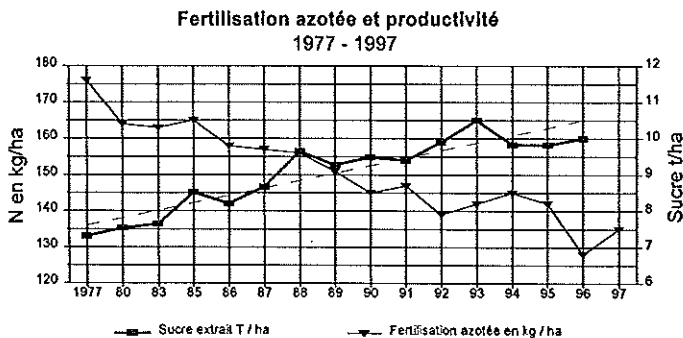
D'après ces informations, on estime que 30 à 40 % des parcelles de betteraves font actuellement l'objet d'une analyse N min préalable au calcul de la dose d'azote par la méthode du bilan.

Graphique 3 :

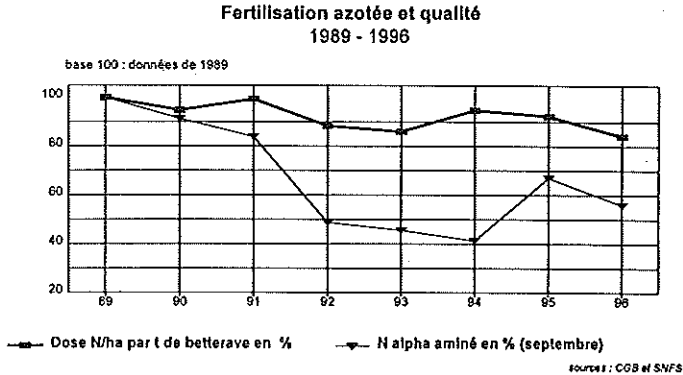


Cet investissement technique des acteurs de la filière s'est traduit (graphique 4) par une réduction très sensible des quantités d'azote utilisées à l'ha (-23 % au niveau national des doses d'azote en betterave depuis 1977) qui n'a pas nuit à l'augmentation régulière de la productivité sur la même période (+2 % par an pour le rendement sucre) et de 1989 à 1996 par les diminutions parallèles du ratio N/rendement unitaire et des teneurs en N alpha aminé (graphique 5). Au niveau national, l'utilisation de la méthode du bilan devrait encore progresser ces prochaines années. Elle devra aussi être de mieux en mieux adaptée à la gestion des apports organiques de toute nature dont l'utilisation s'intensifie dans les successions culturales betteravières.

Graphique 4 :



Graphique 5 :



A moyen terme, la technique récente d'enfouissement localisé de l'azote au semis semble également devoir se développer. Par rapport aux applications classiques, elle permet une meilleure utilisation de l'azote par la culture et régularise la productivité sans risque important de dégradation de la qualité interne. Son utilisation en pratique devrait se traduire globalement par une adéquation encore meilleure des doses aux besoins.

Par ailleurs, des études réalisées avec le concours de l'INRA sont en cours pour améliorer la connaissance du statut azoté de la culture afin de définir des indicateurs pertinents et opérationnels permettant un diagnostic de nutrition.

12- Maîtrise des autres paramètres agronomiques de la qualité interne

Bien que l'on ne observe pas d'évolution significative depuis dix ans des fertilisations potassiques, on constate une baisse régulière des teneurs en potassium dans les jus. Ce phénomène pourrait avoir différentes explications : très probablement, l'amélioration génétique des variétés utilisées et aussi la meilleure maîtrise agronomique globale de la culture.

Pour les régions du sud du bassin de production, l'irrigation a ainsi contribué à améliorer les performances de la culture. En règle générale, l'irrigation raisonnée, conduite selon des règles précises définies par l'ITB conduit à augmenter la productivité et la qualité. En particulier, des baisses de l'azote alpha aminé sont très fréquemment observées et résultent vraisemblablement de la suppression des à-coups de croissance dus aux stress hydriques.

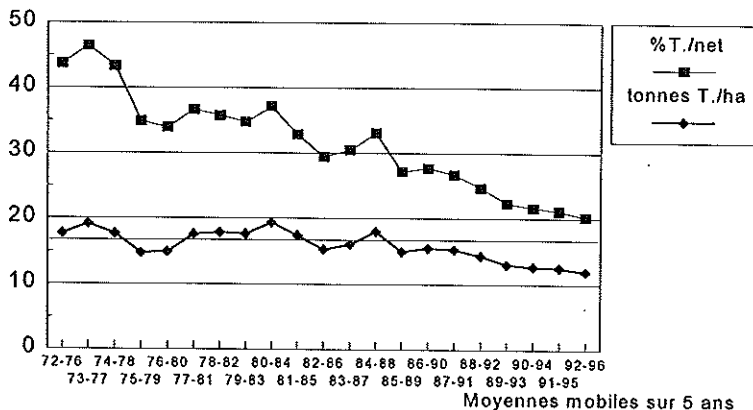
2- SOL ET QUALITE EXTERNE : GESTION DE LA TARE TERRE

La terre exportée hors de la parcelle à la récolte a deux origines : la terre attenante qui adhère à la racine et est retenue par les radicelles et incrustée dans le sillon saccharifère et la terre non adhérente prélevée au champ au cours des opérations d'arrachage et d'enlèvement des silos.

Au niveau national, la terre exportée représente en moyenne 10 à 15 tonnes / hectare à chaque récolte de betterave. La gestion globale de cette terre demande une logistique de transport et de stockage importante et onéreuse qui grève les coûts de production tant pour l'industriel que pour l'agriculteur betteravier.

Graphique 7 :

Evolution de la tare terre de 1972 à 1996



Au cours des dix dernières années, la tare terre a diminué de 25 % environ (graphique 7). Cette diminution est due aux progrès accomplis aussi bien sur les matériels de récolte que sur les méthodes culturales et les variétés.

Récemment, un cadre contractuel a été défini entre les professions betteravière et sucrière. Opérationnel depuis 1995, ce protocole complète l'accord interprofessionnel qui régit les conditions d'achat des betteraves. Il encourage notamment la réduction de la "tare terre" par des bonifications financières accordées à l'agriculteur betteravier qui diminue la tare de sa livraison par rapport à une tare individuelle de référence et par une participation aux frais si la tare de sa livraison est supérieure. Cette participation alimente un fond destiné à mettre en place des actions spécifiques définies par chaque commission mixte d'usine afin d'aider les planteurs à diminuer la tare terre.

Ce nouveau système devrait notablement accélérer l'amélioration de la qualité externe des récoltes et diminuer significativement le volume de terre exportée. La tare dépend de nombreux facteurs qui peuvent être partiellement ou totalement contrôlés dès la mise en place de la culture et à la récolte

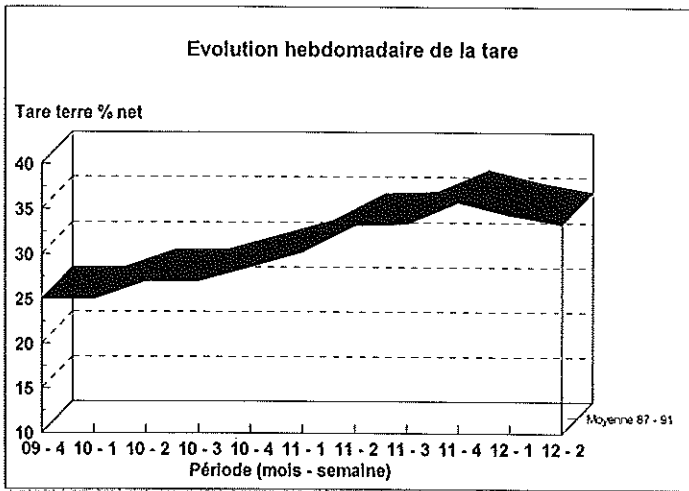
Certains facteurs augmentent ou diminuent la tare d'une façon globale : type de sol, climat, humidité du sol, effeuillage, emplacement de silo. D'autres agissent en faisant varier d'une façon constante le taux de terre exportée, plus ou moins indépendamment des conditions locales : rendement, populations, variétés, écartement entre rangs, types et réglages des matériels de récolte, nettoyage au silo.

21- Variations annuelles

Les variations dues au climat sont concrétisées par des résultats très différents d'une année à l'autre, les tare nationales les plus élevées correspondant aux années pluvieuses.

22- Influence climatique : variations hebdomadaires au cours de la campagne .

Graphique 8 :

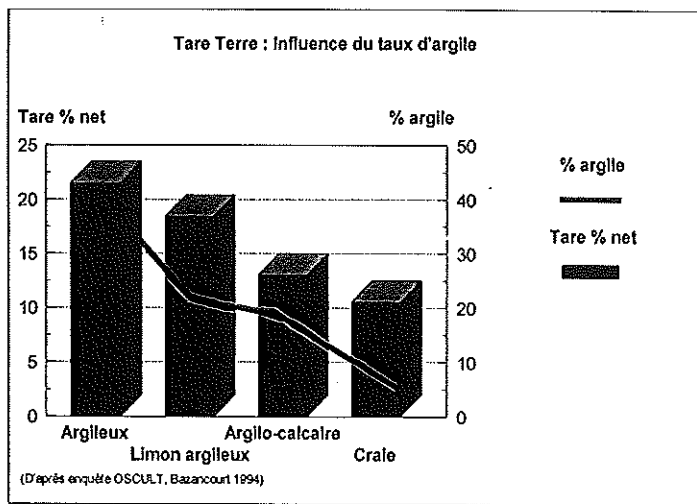


Au cours de la campagne, la tare terre augmente au cours du temps avec la pluviométrie (graphique 8). Le choix de la date de récolte reste un compromis entre l'évolution des rendements (jusqu'à la fin du mois de novembre) et l'augmentation de la tare terre, dont tient compte l'échelonnement des enlèvements de silos par l'usine.

23- Influence du type de sol

En règle générale, la tare terre croît avec le taux d'argile du sol et diminue avec la teneur en calcaire (graphique 9). Ce qui est cohérent avec les propriétés d'adhésivité des sols.

Graphique 9 :



L'influence du type de sol sur la tare terre ne se retrouve pas directement au travers des résultats régionaux. car ce ne sont pas dans les régions où les sols argileux sont les plus représentés que les tares sont les plus élevées (Loiret, Centre-Est...). En effet, dans ces régions, la récolte y est achevée plus tôt qu'ailleurs : fin octobre, début novembre, afin de limiter l'influence du climat. Il en résulte un meilleur contrôle de la tare terre.

Au niveau de l'exploitation, sauf sur le très long terme par le biais d'amendements, il ne paraît pas possible d'agir sur les propriétés d'adhésivité du sol. pour une gamme d'humidité donnée. Par contre il est possible, de répartir l'assolement betteravier dans les différentes parcelles et de récolter les plus argileuses d'entre elles dans les meilleures conditions.

24- Facteurs agronomiques

Rendement racines à l'ha - On enregistre en France un progrès moyen de productivité de 2 % annuel. Parallèlement, la tare diminue au fil des ans, d'une valeur moyenne de 2,5 %. En pratique, on considère qu'il y a une diminution réelle qui se situe entre 0,15 et 0,50 % de terre/net pour chaque tonne de rendement en plus.

Types de variétés - Des différences entre variétés sont mesurées chaque année. Les "variétés à tare réduite" permettent des réductions qui peuvent atteindre 20 à 25 % de terre exportée par rapport aux variétés les moins intéressantes dans ce domaine.

Peuplement - La population à l'hectare a une incidence directe sur la tare avec une augmentation moyenne de 1 % de terre exportée pour 10000 pieds supplémentaires.

Toutefois les diminutions de population peuvent avoir une répercussion négative sur le rendement. Là encore il convient de trouver un compromis qui de fait, repose sur l'amélioration des levées en terre via les préparations de sol, la qualité des semences et la protection phytosanitaire dans le but d'augmenter les distances de semis et d'éviter les populations excessives.

Ecartements entre rangs - Une différence de -10 à -13 % de tare terre/net correspond aux écartements entre rangs de 50 cm par rapport à ceux de 45 cm.

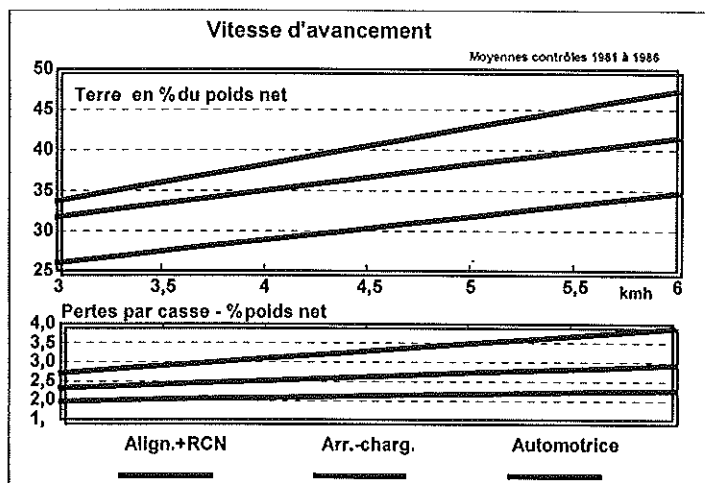
Préparation du sol - Toutes les pratiques tendant à ameublir ou à fragmenter le sol en profondeur sont généralement favorables à une réduction de la tare terre. Certaines pratiques ont une influence directe sur la production en plus ou moins grand nombre de betteraves fourchues en fonction de l'état du sol. On ne peut donc pas directement affecter à un type de préparation une plus ou moins grande propension à engendrer de la tare terre, mais indirectement par le biais de la qualité de l'enracinement. Et l'on constate que les différences entre types de préparation peuvent être grandes.

L'irrigation - L'irrigation raisonnée a une influence positive sur la tare terre / net, du fait de l'augmentation importante du rendement qui compense la plus grande adhésivité du sol. Par contre, les excès et les apports trop tardifs accroissent la quantité de terre exportée sans compensation par l'augmentation du rendement.

25- Qualité de la récolte

Les résultats de qualité externe des betteraves sont évidemment très dépendants des matériels et équipements utilisés à la récolte et bien sur à leur réglage. Cette ultime phase technique de la culture est prépondérante. Outre le choix d'un matériel bien adapté à ses conditions, l'agriculteur ou l'entrepreneur doit particulièrement soigner les réglages des pièces travaillantes et gérer au mieux la réduction de la tare terre en maintenant les pertes par casse à un niveau raisonnable.

Graphique 10 :



En simplifiant, pour un matériel donné la quantité de terre exportée va diminuer avec le nombre de turbines de nettoyage, leur vitesse de rotation, mais augmenter avec la vitesse d'avancement de l'arracheuse (graphique 10). Le réglage des matériels de récolte est complexe et nombre d'autres facteurs interviennent qu'il serait ici trop long d'énumérer.

26- Mise en silo

Les conditions de stockage au champ peuvent à elles seules annuler les efforts réalisés. Il convient en particulier d'éviter les terrains trop mous où des ornières peuvent induire plus qu'un doublement de la tare terre au moment de la reprise du silo par la grue. L'utilisation de plates formes en dur est idéale.

Conclusion

La démarche de qualité en culture de betteraves n'est pas récente. Elle concerne et implique tous les domaines de la filière de production, depuis la sélection, la recherche fondamentale et appliquée, les relais d'information et de développement jusqu'à l'action du planteur. Elle n'est pas linéaire car elle résulte de l'évolution des techniques et de l'appréciation des acteurs qui définissent par la concertation, les objectifs à atteindre.

Par les résultats obtenus, elle témoigne du dynamisme et des capacités d'évolution de la filière betterave sucre.

Remerciements : Les auteurs remercient les services techniques de la C.G.B. et du S.N.F.S. ainsi que le S.A.A d'avoir bien voulu leur confier les éléments nécessaires à la rédaction de cette communication ainsi que pour leurs conseils avisés.

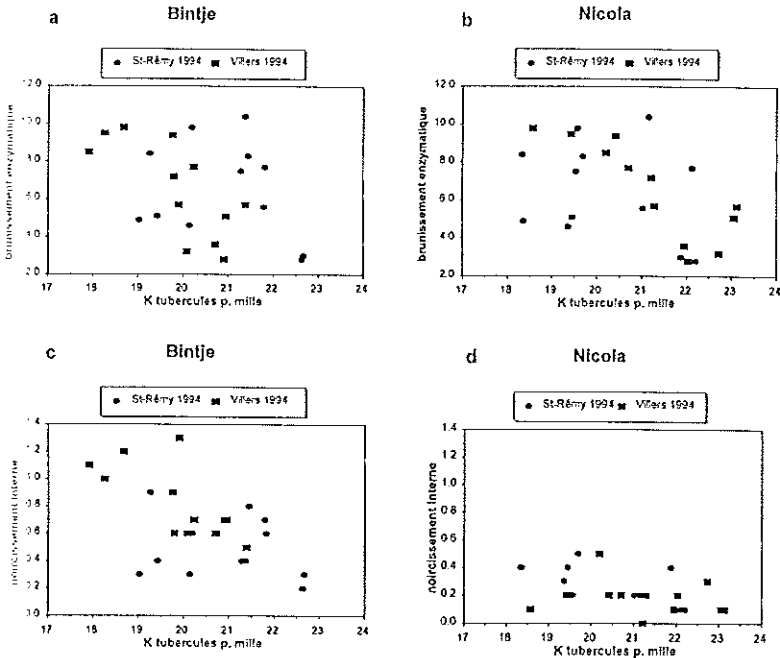
ERRATUM

L'ITINERAIRE TECHNIQUE AU SERVICE DE LA MAITRISE DES QUALITES DE LA POMME DE TERRE DE CONSOMMATION

L'exemple de la fertilisation

F. LAURENT - J.M. GRAVOUEILLE (ITCF Boigneville)

Figure 3: Effet de la teneur en potassium du tubercule (en 0/00 ms) sur le brunissement enzymatique (a et b) et le noircissement interne (c et d). Synthèse de 2 essais ITPT-ITCF conduits en 1994 sur les variétés Bintje (a et c) et Nicola (b et d).



L'ITINERAIRE TECHNIQUE AU SERVICE DE LA MAITRISE DES QUALITES DE LA POMME DE TERRE DE CONSOMMATION.

L'EXEMPLE DE LA FERTILISATION.

F. LAURENT - J.M. GRAVOUEILLE ITCF BOIGNEVILLE.

1. CRITERES DE QUALITE DE LA POMME DE TERRE DE CONSOMMATION

1.1 Définition

La qualité de la pomme de terre est un ensemble de caractéristiques perçues comme favorables par l'utilisateur. Elle ne peut être définie qu'en référence à la destination de la récolte. Les caractéristiques principales impliquées dans le terme qualité sont les **propriétés organoleptiques** soit, dans l'ordre chronologique de jugement, l'apparence, en l'état ou après cuisson (forme, couleur, présence de défauts), relevant de la vue ; la **flaveur** (arôme, saveur), relevant de l'odorat et du goût ; la **texture** (fermeté, consistance à la mastication, croustillant, etc.) relevant du toucher. La qualité implique également la **salubrité**, c'est-à-dire l'absence d'action toxique : limitation des teneurs en substances naturelles indésirables (nitrates et glycoalcaloïdes) ; respect des limites maximales en résidus de produits phytopharmaceutiques et en métaux lourds, ainsi que la **valeur nutritionnelle**, c'est-à-dire la composition en terme de teneur en calories, protéines, acides aminés indispensables, vitamines, sels minéraux, oligo-éléments, etc. Ces différents aspects sont en étroite relation avec la composition chimique du tubercule, régée, elle-même, par la variété, les conditions pédoclimatiques et les techniques de production et de conservation.

1.2 Critères principaux

La présentation conditionnant l'achat, c'est le premier caractère qui attire, soit directement, soit après épluchage du tubercule, l'attention de l'acheteur. Aussi, quel que soit le type de débouché, on recherche d'abord des tubercules de bel aspect (en particulier pour la commercialisation en l'état après lavage), de calibre et de maturité homogènes, indemnes de verdissement, de déformations, de crevasses, d'endommagements mécaniques, d'altérations superficielles (gales, dartrose, rhizoctone brun, etc.), exempts de défauts internes (coeur creux, taches de rouille, coloration de l'anneau vasculaire, noircissement interne).

Ensuite, selon l'emploi culinaire ou le produit transformé envisagé, on retient une matière première répondant à un certain nombre de normes qui sont généralement formulées en des termes plus précis et plus impératifs pour la transformation industrielle. Parmi les constituants du tubercule, les glucides (amidon - matière sèche et sucres réducteurs) ont un rôle prépondérant.

Les caractéristiques principales recherchées au niveau de la matière première peuvent être résumées dans les tableaux 1 et 2.

Tableau 1: Critères de la matière première, selon l'emploi culinaire, pour la consommation en l'état

Produits	Calibre (mm)	Matière sèche (%)	Sucres réducteurs (%)	Divers
Pommes vapeur, salades, pommes sautées,...	30-55	17-21 (18-20)	-	Absence de noircissement après cuisson
Frites, pommes rissolées	50-75	20-25 (20-22)	< 0,4-0,6	-
Purées, pommes au four	40-75	20-25 (20-22)	-	Absence de noircissement après cuisson

Tableau 2: Critères de la matière première, selon le type de produit fini, pour la transformation industrielle

Produits	Calibre (mm)	Forme	Matière sèche (%)	Sucres réducteurs (%)	Divers
Frites	> 50	oblongue à allongée	20-25 (21-23)	< 0,4-0,6 (< 0,25)	Absence de noircissement après cuisson
Flocons	> 35	-	20-25	< 0,6	Délitement facile et absence du noircissement après cuisson
Chips	35-60	oblongue courte à ronde	20-25 (23-25)	< 0,2-0,3 (< 0,1)	-
Stérilisées, appertisées	< 40 et selon produits	-	17-21 (18-20)	< 0,6	Absence de noircissement après cuisson

2. IMPACT DES TECHNIQUES CULTURALES SUR LA QUALITE: GENERALITES

L'effet des techniques culturales sur la qualité du produit récolté est très indirect et ne peut être analysé qu'au travers de l'interaction avec les conditions climatiques et l'état du peuplement végétal.

Ainsi, et à titre d'exemple, on doit souligner le rôle prépondérant des régimes hydriques et thermiques qui modifient certaines caractéristiques en lien direct ou indirects avec les caractéristiques qualitatives comme :

- la répartition des calibres qui résulte du rendement et du nombre de tubercules par unité de surface. Le premier est notamment sous la dépendance du rayonnement intercepté (Ellisèche, 1996),
- la teneur en matière sèche et le taux de sucres réducteurs: tendance à la diminution de la première et à l'augmentation du second en cas d'excès pluviométrique,
- les déformations: crevasses, diabolos, tubercules en chapelet sont souvent provoqués par des alternances de périodes sèches et humides qui modifient rapidement la vitesse de croissance.

Par ailleurs et de façon plus générale, le régime thermique et la lumière ont un rôle déterminant sur la tubérisation. Les faibles températures et les photopériodes courtes lui sont plus favorables. Des températures élevées et des photopériodes longues peuvent provoquer le phénomène de repousse surtout quand elles alternent avec des conditions inductives (formation de

tubercules en "chapelet" se traduisant par des déformations plus ou moins prononcées, accompagnées de crevasses et vitrosité).

Crosnier et Montigny (1981) ont traité l'effet des différents facteurs - subis ou maîtrisables - dans le cas de la pomme de terre. Nous résumerons ces quelques points illustratifs de l'itinéraire avant d'aborder de façon plus spécifique le cas de la fertilisation.

2.1 Variété

Le choix d'une variété de pomme de terre de consommation doit être réfléchi, avant tout, en fonction de la vente. Aussi doit-il s'inscrire dans la relation commerciale de l'agriculteur à ses clients pour le producteur-vendeur, de l'agriculteur à sa coopérative, son négociant ou son industriel dans le cas le plus fréquent.

La précocité de maturation, traduisant la durée relative du cycle végétatif, conditionne en partie le mode d'exploitation d'une variété et les caractéristiques qualitatives. Pour les pommes de terre destinées à la consommation en l'état, il est recommandé de raisonner le choix variétal en fonction de l'utilisation culinaire envisagée. Il convient alors de s'appuyer sur le groupe culinaire des variétés (A, A-B, B, B-C, etc.) et leur aptitude à la friture. Il est également conseillé de prendre en compte la note de grosseur ainsi que l'aptitude au lavage (couleur, régularité de la forme, superficialité des yeux, résistance à la gale commune) et à la conservation. Pour ce qui est de la pomme de terre industrielle, le choix est généralement établi par le transformateur avec des variétés spécifiques (exemple : Saturna pour les chips ; Russet Burbank, Shepody, Felsina pour les frites).

2.2 Implantation

Le nombre de tubercules peut être modifié par la qualité de l'implantation qui modifie les capacités de réchauffement du sol (bultage).

Les endommagements des tubercules peuvent être affectés par les techniques d'implantation: la limitation du nombre de mottes ou pierres susceptibles de provoquer par chute ou frottement des blessures du tubercule est un facteur important de la maîtrise de la qualité. A ce titre les techniques d'épierrage- andainage et de tamisage (associées ou non à la plantation en billon) connaissent un certain essor en France (Martin, 1997).

Par ailleurs, des défauts de bultage provoquent le verdissement par manque de protection des tubercules contre la lumière (accumulation de chlorophylle associé à l'élévation de la teneur en solanine).

2.3 Irrigation

Une irrigation bien conduite, en favorisant l'absorption minérale ainsi que le transfert régulier des sucres du feuillage vers les tubercules est un facteur primordial de maîtrise de la qualité. Elle permet notamment d'augmenter la proportion de moyens et gros calibres, de limiter les défauts physiologiques (repousses, crevasses), de contrôler le grossissement des tubercules et l'accumulation de matière sèche, d'améliorer les conditions de récolte en année sèche, de limiter l'accumulation des nitrates dans les tubercules.

3. L'EXEMPLE DE LA FERTILISATION

3.1 Présentation et répartition des calibres

La fumure modifie à la fois le nombre et la taille des tubercules. De façon générale, l'azote et la potasse augmentent le rendement commercialisable (>35 mm) en favorisant la production de gros tubercules (Figure 1).

La pomme de terre est classée "culture très exigeante" vis à vis de la nutrition phosphatée et potassique (Comifer, 1993) et, à ce titre, tolère de façon moins fréquente que d'autres espèces les impasses de fertilisation PK. Les cinétiques de prélèvement des éléments minéraux montrent une absorption intense, notamment du potassium, à partir de l'initiation des tubercules sur une période de 30-40 jours. Néanmoins, le prélèvement du phosphore ne se caractérise pas par cette dynamique soutenue, malgré son rôle important sur la croissance et plus encore sur le nombre de tubercules.

Figure 1 : Effet de la fertilisation azotée et potassique sur le rendement >40 mm
Essai Villers 1995

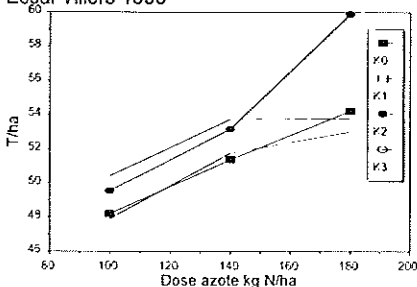
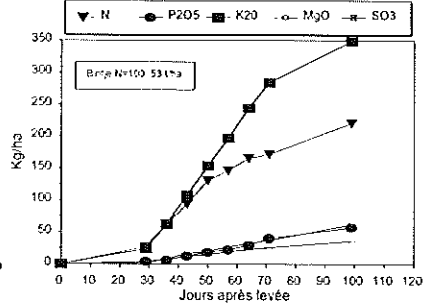


Figure 2 : Cinétiques d'absorption
Essai Gueudreville 1996

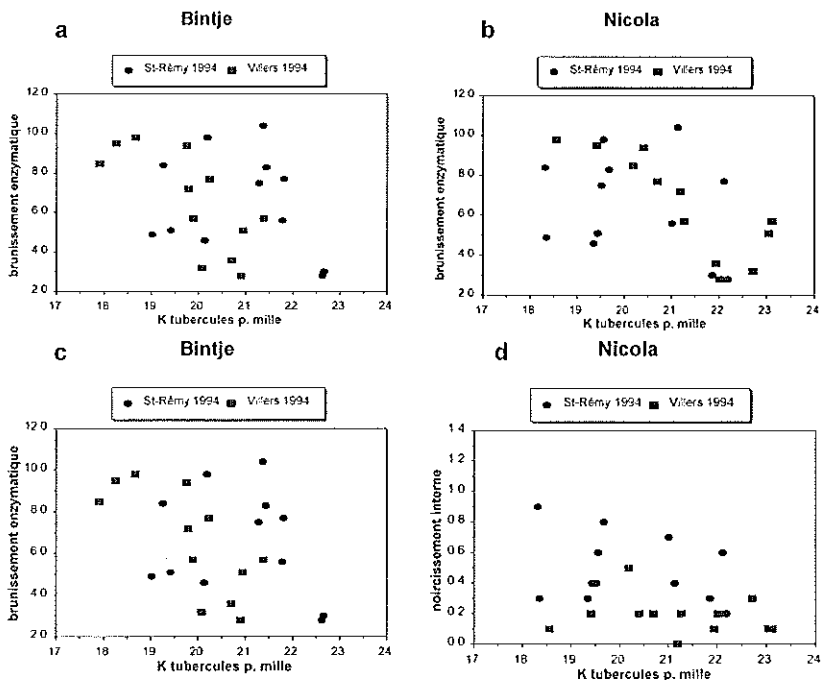


La surfertilisation azotée peut entraîner l'apparition de coeur creux, déformations, crevasses, génère des difficultés de défanage (trop forte croissance des parties aériennes) et diminue la résistance de la peau (retard de maturité).

3.2 Endommagements et noircissement interne

Le noircissement interne se présente sous forme de taches cendrées sous-épidermiques et résulte de chocs subis par le tubercule. De nombreuses études montrent que ce type d'endommagement diminue avec la teneur en potassium du tubercule (Gravouelle, 1996). La figure 3 (c et d) montre effectivement une tendance à la diminution du noircissement interne avec l'élévation de la teneur en K, variable selon le cultivar et le lieu. Néanmoins, ces essais récents n'ont pas démontré la nécessité d'un renforcement de la fumure potassique au-delà des doses conseillées (Comifer, 1993) pour diminuer ce risque (Laurent et Lancelot, 1996)

Figure 3: Effet de la teneur en potassium du tubercule (en 0/00 ms) sur le brunissement enzymatique (a et b) et le noircissement interne (c et d). Synthèse de 2 essais ITPT-ITCF conduits en 1994 sur les variétés Bintje (a et c) et Nicola (b et d).



Echelles: brunissement enzymatique: échelle qualitative (plus la note est élevée, plus l'intensité est forte)

noircissement interne: 0 = indemne à 5= très fortement atteint

3.3 Composition des tubercules

- Teneur en matière sèche et en amidon.

Les fumures azotées et potassiques diminuent la teneur en matière sèche (figure 4). Concernant le potassium, cette observation peut être mise en relation avec l'effet sur le noircissement interne où ce type d'endommagement est favorisé par une teneur élevée en matière sèche.

Figure 4: Effet de la fertilisation azotée et potassique sur la teneur en matière sèche. Essai St-Rémy 1994

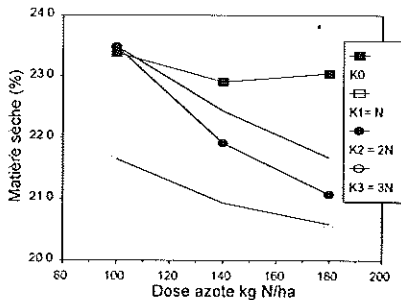
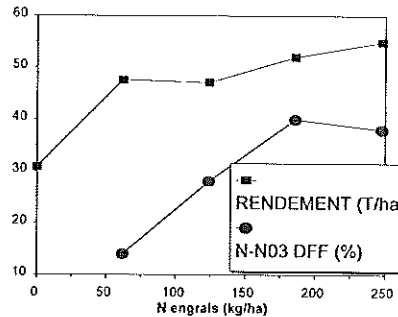


Figure 5: Effet de la fertilisation azotée sur le rendement (tubercules frais t/ha) et la proportion de nitrate issu de l'engrais (N-NO₃ Derived From Fertilizer %) essai ITPT-CEA, St-Rémy 1992



- Teneur en sucres réducteurs

La fumure azotée provoque généralement une élévation du taux de sucres réducteurs, sans doute encore par son effet négatif sur la précocité de maturation. Le potassium peut limiter cet effet, de façon plus marquée avec la forme sulfate plutôt que chlorure.

- Teneur en nitrate

Elle est sous la dépendance, entre autre, de la nutrition azotée: un excès de fertilisation azotée se traduit par une élévation de la teneur en nitrates des tubercules. Ceci peut être relié à la part importante du contenu en nitrate issu de la fertilisation azotée: la figure 5 montre que moins de 15% de cette teneur est imputable à la fertilisation pour les doses inférieures ou égales à l'optimum. Au delà, cette valeur augmente rapidement pour atteindre 50%. Ceci n'est pourtant pas généralisable à toutes les situations: la variété et les conditions de milieu (particulièrement l'alimentation en eau) vont fortement modifier d'une part la valeur absolue de la concentration en nitrate et d'autre part l'impact de la fertilisation azotée. Quoiqu'il en soit, le raisonnement de la

fertilisation à l'aide d'outils "plante et sol" est impératif et constitue la première étape d'une démarche de maîtrise de la teneur en nitrate du produit (Duchenne et al., 1997, Laurent et Lancelot, 1997).

Il ne semble pas qu'il y ait interaction avec la nutrition potassique (Gravouelle et Grolier, 1996b)

3.4 Qualité culinaire et technologique

- Brunissement enzymatique

Ce phénomène est conditionné par la nutrition minérale: le brunissement, le taux de tyrosine et de phénolases sont plus faibles lorsque la concentration en potassium du tubercule est élevée (Gravouelle, 1996a): figure 3 (a et b).

- Texture des tubercules

En général, à maturité, les tubercules présentant des teneurs élevées en amidon et en matière sèche se désagrègent plus facilement à la cuisson, et sont plus farineux à la dégustation (Gravouelle, 1987). Bien que basé sur des résultats contradictoires, on peut admettre que la fertilisation potassique réduit la tendance au délitement et la farinosité de la chair, avec un effet plus prononcé de la forme chlorure. Cet effet est à relier aux considérations antérieures sur la teneur en matière sèche.

- Couleur des produits frits

Le brunissement à la friture augmente avec les fortes doses d'azote et diminue avec la fertilisation potassique, là aussi de façon plus marquée pour la forme chlorure. Néanmoins nos résultats récents concernant l'interaction N.K ne nous ont pas démontré une différence significative de l'aptitude à la friture aux différentes doses de K₂O (Gravouelle et Grolier, 1996b): les effets les plus marqués seraient observés dans des situations nettement carencées en potassium, ce qui n'était pas le cas de ces expérimentations (Laurent et Lancelot, 1996).

En résumé, le Tableau 3 rassemble de façon synthétique les tendances observées pour l'effet de la fertilisation NPK sur pomme de terre.

Tableau 3: Effets de la nutrition azotée, phosphatée et potassique sur quelques critères qualitatifs de la pomme de terre (d'après Gravouelle, 1987).

(+ : augmentation, - : diminution, 0 : sans effet , sur le critère considéré)

Critères de qualité	N	P	K	
			Dose	forme sulfate \rightarrow Chlorure
Proportion de tubercules commercialisables	+	0	+	
Endommagements (fractures)	variable	-	-	
Noircissement interne	variable		-	-
Teneur en matière sèche	-	0 (+)	-	-
Teneur en protéines	+		variable	
Teneur en nitrates	+	0	0	
Tenue à la cuisson	+ (variable)		+	+
Farinosité de la chair	-		-	-
Noircissement après cuisson	+ (0)	0 (-)	- (0)	
Brunissement à la friture	+		-	-
Pertes en conservation	+		-	

4. CONCLUSION: VERS UNE MAITRISE TECHNIQUE DE PLUS EN PLUS POUSSEE

La structure coût de production de la pomme de terre est telle que la fertilisation ne représente que 7% du total des charges (20% des charges opérationnelles dont un tiers pour l'azote). La logique économique est donc encore favorable à des stratégies d'assurance permettant de couvrir les risques liés à la fertilisation.

Néanmoins, les exigences du marché en matière de qualité du produit et de l'itinéraire technique mis en oeuvre pour les atteindre se font de plus en plus pressantes. La mise en place de "cahiers des charges" imposant des choix techniques rigoureux, voire contraignants, sont de plus en plus nombreux et attestent de la nécessité d'une gestion toujours plus précise des intrants, et notamment de la fertilisation azotée, compte tenu de ses multiples implications dans les processus d'élaboration du rendement, de la qualité du produit fini et de l'environnement.

BIBLIOGRAPHIE

Comifer, 1993: Aide au diagnostic et à la prescription de la fertilisation phosphatée et potassique des grandes cultures, 28 pp + annexes.

Crosnier, J., Montigny, C., 1981: Agronomie et qualité de la pomme de terre. EAPR survey papers, 8th triennial conference of the European Association of Potato Research, München, 55-79.

Duchenne, E., Laurent, F., Machel, J.M, 1997: Des outils pour améliorer le conseil en fertilisation azotée. Expérimentation, résultats 1996, ITCF-ITPT, 51-64.

Ellisèche, D. 1996: Aspects physiologiques de la croissance et du développement. In La pomme de terre, Rousselle, Robert, Crosnier Eds, 71-124.

Gravouelle, J.M, 1987: fertilisation et qualité de la pomme de terre, La Pomme de Terre Française, 442, 213-220.

Gravouelle, J.M., 1996: Utilisation pour l'alimentation humaine, in La Pomme de Terre, Rousselle, Robert, Crosnier eds, INRA, 451-498.

Gravouelle, J.M., Grolier, N., 1996a: Nitrates dans les tubercules, cerner les influences. La pomme de terre française, 495, 40-44.

Gravouelle, J.M., Grolier, N., 1996b: Influence de la fertilisation azotée et potassique sur le rendement et la qualité de la pomme de terre. Expérimentation, résultats 1995 et synthèses, ITCF-ITPT, 71-111.

ITCF-ITPT, 1995: La culture de la pomme de terre de conservation. Brochure Collection itcf-itpt, 64 pp.

Laurent, F., Lancelot, F., 1996: Etude de l'interaction azote - potassium sur deux variétés de pomme de terre. Expérimentation, résultats 1995 et synthèses, ITCF-ITPT, 63-70.

Laurent, F., Lancelot, F., 1997: Outils de diagnostics et de pilotage de la fertilisation azotée. Premiers éléments de réflexion. Expérimentation, résultats 1996, ITCF-ITPT, 43-49.

Martin, M., 1997: Epierrage-andainage, tamisage et culture en billons: des techniques en développement. Perspectives agricoles n° 223, avril 1997, dossier implantation, 12-14.

Sol, fertilisation azotée et qualité des productions fruitières et légumières

M. GENARD¹, F. LAFOLIE², P. LOBIT³, Y. DUMAS¹ et R. HABIB¹

¹UR-ECHO, ²Science du Sol, INRA, Domaine St Paul, Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9

³CTIFL Centre de Balandran, 30127 Bellegarde

Introduction

Bien que l'azote (N) soit un des éléments majeurs de la croissance des plantes, il n'existe pas de relation simple entre niveaux de fertilisation azotée et qualité des fruits ou légumes. En effet, d'une part le concept de qualité est difficile à cerner, car il est à la fois multivarié et variable en fonction de la plante cultivée, des organes récoltés et des usages auxquels on les destine, et d'autre part le devenir du fertilisant est régi par des mécanismes complexes tant au niveau du sol que de la plante.

On peut définir deux grands types de **qualité**, la qualité d'usage et la qualité alimentaire. La première regroupe l'aptitude à la récolte mécanique, au transport et à la conservation, la qualité de présentation (taille,...) et la qualité technologique. La qualité alimentaire regroupe la qualité hygiénique, la qualité nutritionnelle et la qualité organoleptique (sucres, acides,...). Dans le cas des fruits et légumes, l'aspect, la tenue au transport et la qualité technologique sont des critères importants, mais la composition biochimique de l'organe récolté, sa texture, son arôme, son goût, ses qualités nutritionnelles sont des éléments de la qualité porteurs pour l'avenir.

Le devenir de l'azote dans le sol est régi par des mécanismes physiques (circulation de l'eau, volatilisation de l'ammonium,...), et des phénomènes biologiques (minéralisation de la matière organique, dénitrification,...) complexes qu'il convient d'analyser et de comprendre en vue d'une meilleure gestion de la fertilisation. Au niveau de la plante, bien que l'azote soit absorbé par le système racinaire, il est courant de constater que sa teneur dans les parties aériennes est supérieure à celle des racines (Pate et Layzell, 1981). Force nous est de postuler avec Thornley (1972) et de nombreux autres auteurs, l'existence de mécanismes capables de redistribuer les composés azotés à longue distance dans la plante. L'azote ainsi redistribué a un effet important à la fois sur la morphogenèse et la croissance des parties végétatives et fructifères de la plante, et on peut faire l'hypothèse qu'il modifie la composition du produit récolté, en agissant sur l'orientation des flux de matière (nombre et répartition des zones source et puits de la plante). L'azote peut également agir directement sur la physiologie de l'organe récolté. Comme dans le cas du sol, une meilleure compréhension des processus liant azote et qualité du produit est nécessaire à une meilleure gestion de la fertilisation.

Après avoir rappelé les principaux mécanismes et facteurs impliqués dans le devenir de l'azote dans un sol, nous illustrerons la relation (ou l'absence de relation) entre azote et qualité chez les fruits et légumes par deux exemples contrastés : le cas de la tomate et celui des arbres fruitiers.

Sol

La circulation de l'eau dans le sol est responsable du déplacement des formes solubles de l'azote et de leur perte par lessivage. Les flux hydriques sont induits par le climat, le prélèvement par les racines et la conduite de l'irrigation. L'intensité des transformations biogéochimiques du cycle carbone-azote dépend fortement de la teneur en eau, de la température du sol (Recous, 1995) et du type de substrat (Nicolardot et Molina, 1994). Il y a un couplage important entre les rythmes biologiques des transformations de l'azote dans le sol et les mécanismes physiques contrôlant le bilan hydrique et énergétique du profil de sol. On ne pourra estimer le rythme de minéralisation d'un sol que si l'on est capable de prédire simultanément avec une bonne précision l'humidité, la température et les flux hydriques tout en ayant une bonne connaissance des quantités prélevées par la culture. Minéralisation et pertes en azote sont les aspects développés ci-après.

Facteurs influant sur les états hydriques et énergétiques du sol. Du point de vue des transferts d'eau, le sol peut être caractérisé par une relation potentiel matriciel-teneur en eau (courbe de pF) et par une courbe de conductivité hydraulique traduisant sa capacité à transférer l'eau. De même pour les transferts de chaleur le sol est caractérisé par une capacité calorifique et une conductivité thermique. Ces caractéristiques physiques vont directement influencer sur l'état d'humidité, l'aération et la température du profil de sol en réaction aux sollicitations externes que sont le climat et les irrigations.

En culture irriguée, on peut supposer que le climat va principalement influencer sur l'évapotranspiration et le réchauffement du sol qui dépend du bilan d'énergie à la surface du sol. Celui-ci dépend du développement du couvert végétal, classiquement défini par un indice foliaire : rapport entre la surface de feuille et la surface au sol (LAI : Leaf Area Index). Cette notion d'indice foliaire n'est pas très bien adaptée aux cultures légumières, pour lesquelles un taux de recouvrement du sol serait plus judicieux et pour les cultures en rangs (arboriculture) pour lesquelles on a juxtaposition de zones ombrées et de zones exposées. En culture légumière le sol est souvent recouvert d'un mulch plastique. On peut déduire des travaux récents (Ham et Kluitenberg, 1994) sur le réchauffement de sols couverts d'un *paillage plastique*, que le travail du sol (structure plus ou moins fine et soufflée) et la mise en oeuvre du paillage auront une influence non négligeable sur son réchauffement par le biais du contact sol-mulch. En l'absence de couverture végétale, des températures très élevées peuvent être atteintes dans les 20 premiers centimètres de sol. Pour les cultures irriguées, la température de l'eau d'irrigation peut jouer sur la température du sol. Ceci est d'autant plus important que, une fois la plante développée, le flux de chaleur radiatif dans le sol est très faible. Une autre caractéristique des irrigations est leur hétérogénéité spatiale (Dubalen, 1990) qui a des conséquences importantes sur le bilan azoté. Un exemple d'hétérogénéité du stock d'azote à l'échelle d'une parcelle de salade est présenté dans Bruckler et al. (1997).

Estimation du pouvoir minéralisateur: fourniture à la plante. Une voie consiste à suivre le stock d'azote nitrique dans le sol, les variations de ce stock résultant du prélèvement par la culture, de la minéralisation, de la fertilisation et des pertes. Mais l'incertitude d'estimation de chacun de ces termes ne permet pas d'en déduire la minéralisation. Ce problème est accru du fait que le prélèvement par la plante est un flux au moins aussi

grand que le flux de minéralisation. Les techniques de mesure in situ en période de culture (bougies poreuses par exemple) offrent donc peu d'espoir. De plus, les bougies ou les carottages ne donnent qu'une image très locale des concentrations, alors que le champ cultivé présente une très grande variabilité spatiale, ne serait-ce que du fait de l'hétérogénéité des apports d'eau et de distribution spatiale des racines. Cependant, d'un point de vue pratique, on peut considérer que lorsque les mesures in situ indiquent des concentrations stables ou croissantes en azote dans le sol, il est inutile de fertiliser. Des incubations au laboratoire peuvent donner des vitesses potentielles de minéralisation à corriger en fonction de la température et de la teneur en eau. Un suivi du statut organique avec estimation des prélèvements et des restitutions est probablement une solution à adopter bien que la précision ne puisse pas être aussi bonne que dans le cas des grandes cultures. L'utilisation de modèles, plus ou moins compliqués, du devenir de l'azote dans le sol, tels que ceux développés par l'unité d'Agronomie de Laon, pourrait fournir des estimations assez robustes des quantités d'azote minéralisé. Un contrôle de la nutrition azotée de la plante, comme ce qui est fait sur blé, permettrait de contrôler l'état d'alimentation et de gérer la fertilisation.

Pertes pour la plante : lessivage et dénitrification. Elles sont principalement liées à la gestion de l'irrigation et de la fertilisation. Les risques sont, d'une part, le lessivage du nitrate au delà de la zone d'enracinement et, d'autre part, la dénitrification suite à des irrigations excédentaires. Les problèmes qui se posent sont donc : quand et comment irriguer et fertiliser, et comment minimiser les risques dus au climat? L'utilisation de modèles simples permet de gérer l'irrigation. L'utilisation de modèles plus compliqués incluant les mécanismes physiques, chimiques, biologiques du devenir de l'azote ainsi que la croissance de la culture en relation avec l'état d'alimentation en eau et azote devrait permettre de tester la robustesse de stratégies d'irrigation-fertilisation avec pour objectif de minimiser les pertes par lessivage. Un exemple est donné dans Leenhardt et al. (1997).

Cultures légumières de plein champ

On compte plus de trente espèces légumières cultivées couramment pour des produits très variés : fruits riches en sucres et en eau (tomate), graines riches en protéines (pois), racines, bulbes, tiges (asperge), feuilles (salade). Il existe donc aussi une multitude de critères de qualité.

Certains de ces critères ont fait l'objet de recherches en particulier par rapport à l'alimentation azotée de la culture, comme la teneur en nitrate des carottes ou des salades. La relation entre la fourniture en azote à la culture et la qualité du produit récolté sera illustrée ici à travers l'exemple de la tomate de plein champ destinée à l'industrie. Cette culture est soumise à d'importantes évolutions, parmi lesquelles la mécanisation de la récolte, entraînant de nombreuses contraintes pour les itinéraires techniques (Dumas et Bussièrès, 1992) et la prise en compte de la qualité. Ainsi, depuis 1991, du fait de la réglementation communautaire, le prix de vente à la production est fixé en fonction de la teneur en matière sèche soluble ($^{\circ}$ Brix du jus) qui est un critère essentiel pour l'industrie de première transformation en concentré. On assiste aussi à une rapide diversification des produits finis faisant émerger des exigences nouvelles vis-à-vis de critères importants pour l'industrie de seconde transformation et qui concernent directement les consommateurs (couleur, viscosité, goût et innocuité).

Prélèvement d'azote par la culture de tomate. L'absorption de l'azote par la plantule de tomate commence au moment de la levée (Suniaga Quijada, 1991). Après la phase d'installation de la culture, la fourniture d'azote en excès réduit la croissance racinaire et favorise le développement de nombreux bouquets courts qui avortent en grande proportion. La vitesse de prélèvement est maximale pendant la période floraison-nouaison qui dure pendant 5 à 7 semaines. Les fruits récoltés contiennent environ les deux-tiers de la quantité d'azote prélevée par l'ensemble de la biomasse aérienne au cours du cycle cultural. Selon Maestrey et al (1987), la quantité d'azote présente dans l'ensemble de la biomasse varie de 2.3 à 3.8 kg N par tonne de fruit commercialisable produit, en fonction de la variété et des conditions de culture.

Disponibilité en nitrate au cours de la culture et qualité des tomates. Les références bibliographiques concernant des relations entre niveaux de fertilisation azotée et qualité sont souvent contradictoires. Selon Wight et al. (1962), de l'azote en excès (jusqu'à 200 kg N/ha) est sans effet sur les caractéristiques de qualité. Garrison et al. (1967) indiquent que l'apport d'azote entraîne une teneur en matière sèche totale du jus plus faible, tend à augmenter l'acidité totale et est sans effet sur le pH. Patil et al. (1984) ont trouvé que l'apport d'azote accroissait la teneur en matière sèche totale, l'acidité et la teneur en acide ascorbique. Kaniszewski et al. (1987) ont mesuré une chute de la teneur en vitamine C, de la résistance

de la peau et de la fermeté du fruit en accroissant l'apport d'azote jusqu'à 300 kg/ha. Des quantités d'azote importantes peuvent modifier les caractéristiques de la culture à la récolte, d'une part en accroissant la biomasse aérienne et d'autre part en augmentant la quantité de fruits verts et en diminuant corrélativement le groupement de maturité, ce qui rend plus délicate la récolte mécanique et peut modifier la qualité du produit livré. Ceci a été vérifié respectivement dans 50 et 30% des cas d'un ensemble d'expérimentations conduites entre 1991 et 1993, dans un dispositif de recherche commun sur six sites dans 5 pays du sud de l'Europe (Dumas et al., 1994). Très peu d'effet du facteur azote sur les caractéristiques de qualité technologique a été observé dans ce dispositif (tableau 1).

Tableau 1. Résultats moyens obtenus par dose d'azote pour 12 expérimentations réalisées en 1992 et 1993 avec une variété unique.

Niveau de fertilisation azotée (kg N /ha)	50	150	250
Pourcentage de fruits rouges (%)	77	77	75
Poids moyen d'un fruit rouge (g)	61.8	61.0	59.6
Nombre de fruits pourris/m ²	19	20	21
Teneur du jus en matière sèche soluble (%)	5.47	5.48	5.54
Teneur du jus en matière sèche totale (%)	6.28	6.30	6.27
pH du jus	4.37	4.37	4.37
Couleur du jus (a/b Gardner)	2.24	2.27	2.29

Seule l'acidité totale du jus extrait des tomates a augmenté dans 25% des cas avec l'accroissement de la fertilisation azotée. Dans la pratique agricole, les systèmes de cultures légumiers sont réputés être gros consommateurs d'engrais azotés. En culture de tomate d'industrie, à la fin des années 1970, l'apport moyen d'azote minéral en France était d'environ 150 kg/ha. Depuis une dizaine d'années, il est en réduction et se rapproche des préconisations de l'interprofession (100 à 120 kg/ha). Cette évolution est favorisée par la recherche de la réduction des coûts et de l'obtention d'une culture facile à récolter mécaniquement, et par la pression exercée progressivement sur l'agriculture pour la protection de l'environnement.

Cultures fruitières

Comme cela est schématisé sur la figure 1, l'alimentation azotée du fruit peut agir sur la croissance, la maturation, et l'accumulation des sucres et des acides organiques. On peut s'attendre aussi à un effet sur l'alimentation carbonée et minérale du fruit, conséquence indirecte d'une stimulation du développement végétatif. Enfin, l'effet de l'azote dans les

accidents physiologiques peut s'exprimer dans des interactions avec l'alimentation minérale du fruit ou dans une perturbation directe de la physiologie du fruit.

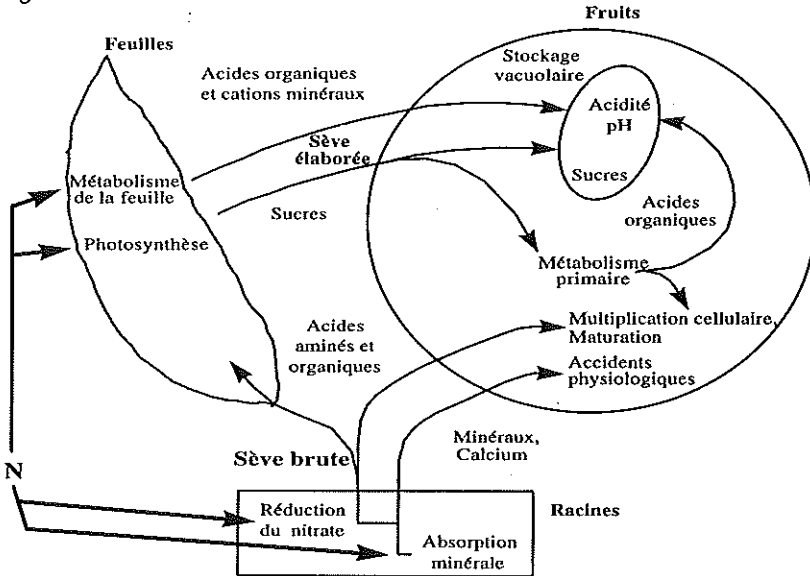


Figure 1 : Relations entre nutrition azotée et élaboration de la qualité chez les fruits.

Croissance du fruit et maturation. Chez l'abricot et la pêche, la fertilisation azotée augmente l'intensité et la durée de la multiplication cellulaire (Albrigo et al., 1965; Reeves et Neufeld, 1959). Nos résultats chez la pêche montrent que l'effet de l'azote sur la croissance du fruit dépend de la période d'apport: appliqué dans l'été précédent la floraison, l'azote favorise la croissance. Par contre l'apport hivernal est sans effet sur le fruit. Ainsi le nombre de cellules du fruit pourrait dépendre d'avantage des conditions de formation des fleurs et des réserves azotées de l'arbre que de la disponibilité en cours de saison.

La croissance végétative des arbres fruitiers augmente avec l'apport d'azote (Huguet et Giraudon, 1976), ce qui se traduit par une augmentation de la surface photosynthétisante. De plus, la teneur en azote des feuilles augmentant avec la fertilisation (Walsh et al., 1989), on peut supposer que celle-ci agit positivement sur la photosynthèse (corrélée à la teneur en azote foliaire). Cependant il semble que la fertilisation azotée affecte relativement peu l'allocation des assimilats aux fruits.

Chez la pêche, la maturité est retardée lorsque la dose d'azote augmente (Stembridge et al., 1962). Une application précoce semble la retarder davantage qu'un apport tardif (Schneider et al., 1957). La poursuite plus tardive de la croissance permet un gain de poids supplémentaire.

Sucres et acides. Schneider et al. (1957), ainsi que Cummings et Reeves (1971), trouvent que la fertilisation provoque une augmentation de l'IR, et Stembridge et al. (1962) trouvent une corrélation positive entre azote foliaire et IR. Cependant, on peut parfois observer un retard dans l'accumulation des sucres, lié au décalage de la maturation (Blake et al., 1931).

En ce qui concerne l'acidité, les observations publiées sont contradictoires et difficiles à interpréter. Par exemple, Carter et al. (1958) trouvent une corrélation positive importante entre azote foliaire et acidité titrable du fruit, tandis que Cummings et Reeves (1971) trouvent que l'application d'azote diminue l'acidité titrable. Nos résultats obtenus chez la pêche suggèrent qu'un apport d'azote en début de saison est sans effet sur l'accumulation de l'acide malique mais retarde celle de l'acide citrique, alors qu'un apport en milieu de saison ralentit la dégradation de l'acide citrique et maintient l'acide malique à un niveau plus élevé, ce qui augmente l'acidité globale des fruits.

Composition minérale des fruits et accidents physiologiques. La teneur en azote (surtout acides aminés) des fruits augmente avec la fertilisation azotée. L'interaction entre la nutrition azotée et l'alimentation calcique a été particulièrement étudiée car le calcium est impliqué dans la prévention de maladies physiologiques de par son rôle dans le maintien de l'intégrité des membranes et parois cellulaires, et dans d'autres processus nécessaires à la vie des cellules. Lorsque la fertilisation azotée est fournie sous forme nitrrique, il se forme, chez les arbres fruitiers tels que le pommier, de l'oxalate qui demande du calcium pour être neutralisé (Faust, 1980). Lorsque l'azote est fourni sous forme ammoniacale il y a interférence avec l'absorption du calcium qui est réduite (Poma Treccani et De Stanchina, 1982). Une gestion adéquate de la fertilisation azotée est ici nécessaire. Chez la pomme on cherchera à obtenir des rapport N/Ca proches de 10.

Plus généralement, la sensibilité à certaines maladies physiologiques (bitter pit, ...) ou parasitaires s'accroît avec les disponibilités en azote (Huguet, 1982). Ainsi, chez la pêche, un fort apport d'azote avant la récolte peut provoquer un gonflement accéléré du fruit, entraînant

l'apparition de microfissures sur l'épiderme, voies d'entrée privilégiée pour les champignons (*Monilia laxa*).

Conclusion

Nous avons vu que les processus de minéralisation, de lessivage et de dénitrification étaient fortement liés aux conditions hydriques et thermiques du sol, elles mêmes sous la dépendance du type de sol, des pratiques culturales et du climat. La complexité des phénomènes abordés limite l'utilisation de mesures in situ pour le pilotage de la fertilisation et rendent nécessaire une approche par modélisation.

Les travaux menés récemment sur la tomate d'industrie dans des situations pédoclimatiques contrastées, montrent que le niveau de fertilisation influe peu sur la qualité technologique de la tomate et qu'il est possible de diminuer les apports. Lorsqu'il est mentionné, l'effet de la fertilisation azotée sur la qualité est souvent contradictoire selon les auteurs. C'est pourquoi une analyse des processus impliqués dans l'élaboration de la qualité telle que celle esquissée dans le cas des arbres fruitiers est nécessaire. Cette analyse est actuellement couplée avec un travail de modélisation.

Bibliographie

- Albrigo L.G., Claypool L.L., Uriu K. 1965. The effect of nitrogen level on development and maturity of Royal Apricot fruits. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 89 : 53-59.
- Blake M.A., Davidson O.W., Addoms R.M., Nightingale G.T. 1931. Development and ripening of peaches as correlated with physical characteristics, chemical composition, and histological structure of the fruit flesh: I. Physical measurement and flesh texture in relation to the market and edible qualities of the fruit. *N. J. Agric. Exp. Stn Bul.* 525 : 1-35.
- Bruckler, L., A.M de Cockborne, P. Renault, Claudot B. 1997. Spatial and Temporal variability of nitrate in irrigated salad crops. *Irrig. Sci.*, 17 : 53-61.
- Carter G.H., Ingalsbe D.W., Neubert A.M., Proebsting E.L. Jr. 1958. Canning quality of elberta peaches as affected by nitrogen fertilisation. *Food Technol.* 12 : 174-179.
- Cummings G.A., Reeves J. 1971. Factors influencing chemical characteristics of peaches. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 96 : 320-322.
- Dubalen, J. 1990. L'hétérogénéité d'apport d'eau liée à l'emploi des matériels et aux phénomènes atmosphériques. Colloq. AFMEX « Exp. Agr.

- Aliment. Eau Plant. », Versailles 25-26 Janvier 1989. AFMEX-ITCF, Paris 1990, 131-138.
- Dumas, Y., Bussières, P. 1992. Mécanisation et réduction des intrants en culture de tomates d'industrie : aspects agronomiques. *P.H.M.-Revue Horticole* 324 : 55-67.
- Dumas, Y., Leoni, C., Portas, C.A.M. Bi eche, B. 1994. Influence of water and nitrogen availability on yield and quality of processing tomato in the European Countries. *Acta Horticulturae* 376 : 185-192.
- Faust M. 1980. Modern concepts in fruit nutrition, 11-16, In : *Mineral nutrition of fruit trees*, D. Atkinson, J.E. Jackson, R.O. Sharples & W.M. Waller (Eds), Studies in the Agricultural and Food Sciences, Butterworths, London-Boston, 435 p.
- Garrison, S.A., Taylor, G.A., Drinkwater, W.O. 1967. The influence of time and rate of nitrogen application on the raw product quality of processing tomatoes. *Proc. of the American Society for Horticultural Science* 91 : 885-893.
- Ham J. M., Kluitenberg G.J. 1994. Modelling the effect of mulch optical properties and mulch-soil contact resistance on soil heating under plastic mulch culture. *Agric. And Forest Meteor.* 71 : 403-424.
- Huguet C. 1982. Relations entre la nutrition de l'arbre et les maladies physiologiques ou de conservation des fruits. 2 eme Colloque sur les Recherches Fruitières-Bordeaux, INRA-CTIFL : 137-149.
- Huguet J.G., Giraudon J. 1976. Effet de la date d'apport de l'azote sur la croissance et le développement de jeunes pêchers cultiv es sur tourbe. *Comptes rendus de l'académie d'agriculture de france* 1113-1123.
- Kaniszewski S., Elkner K., Rumpel J. 1987. Effect of nitrogen fertilization and irrigation on yield, nitrogen status in plants and quality of fruits of direct seeded tomatoes. *Acta Horticulturae* 200 : 195-202.
- Leenhardt D., Lafolie F., Bruckler L. , de Cockborne A.M. 1997. Evaluating irrigation strategies for lettuce in the mediterranean zone by simulation : 2. Nitrogen Budget. (Soumis   *European J. Soil Sci.*)
- Maestrey A., Cardoza H., Chailloux H., Alarcón W. 1987. Extracci on de nutrientes por el tomate de primavera. II. Consumo de nitr ogeno, f osforo y potasio durante el ciclo del cultivo. *Cienc. T ecn. Agric. Suel. Agroq.* 10 : 17-23.
- Nicolardot B., Molina J.A.E. 1994. C and N fluxes between pools of soil organic matter : model calibration with long term field experiment data. *Soil Biol. Biochemistry* 26 : 245-251.

- Pate J.S., Layzell D.B. 1981. Carbon and nitrogen partitioning in the whole plant - A thesis based on empirical modeling. In : Nitrogen and Carbon Metabolism, J.D. Bewley (Ed.), Martinus Nijhoff (Pub.), London, 94-135.
- Patil A.A., Bojappa K.M. 1984. Effects of cultivars and graded levels of nitrogen and phosphorus on certain quality attributes of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). I. TSS, acidity, ascorbic acid and puffiness. *Mysore Journal of Agricultural Sciences* 18 : 35-38.
- Poma Treccani C., De Stanchina G. 1982. Physiological disorders of fruits. Proceedings of the 21st International Horticultural Congress, Hamburg, vol. 1, 310-322.
- Recous, S. 1995. Réponse de matières organiques de sols aux changements globaux. II Effets de la température sur la minéralisation d'un résidu végétal (maïs) et de la matière organique des sols. Actes du séminaire « Ecosystèmes naturels et cultivés et changements globaux » Dourdan France 12-18.
- Reeve R.M., Neufeld C.H.H. 1959. Observations on the histology and texture of elberta peaches from trees of high and low levels of nitrogen nutrition. *Food Res.* 552-563.
- Schneider G.W., Jones I.D., McClung A.C. 1957. Studies of pruning effects, and of time of nitrogen fertilisation on certain chemical and physical characteristics of the peach fruit. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 71 : 110-115.
- Stembridge G.E., Gambrell C.E., Sefick H.J., Van Blaricom L.O. 1962. The effect of high rates of nitrogen and potassium on the yield, quality, and foliar mineral composition of dixigem peaches in the south carolina sandhills. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 81 : 153-161.
- Suniaga Quijada, J. 1991. Nutrition azotée de la tomate de type déterminé, issue de semis. Analyse de la croissance et du développement au stade jeune. Thèse de doctorat, Université de Rennes I. 180 p.
- Thornley J.H.M. 1972. A balanced quantitative model of root : shoot ratio in vegetative plants. *Annals of Botany* 36 : 431-441.
- Walsh C.S., Allnutt F.J., Miller A.N., Thompson A.H. 1989. Nitrogen level and time of mechanized summer shearing influence long-term performance of a high-density "Redskin" peach orchard. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 114 : 373-377.
- Wight, J.R., Lingle, J.C., Flocker, W.J., Leonard, S.J. 1962 The effects of irrigation and nitrogen fertilization treatments on the yield, maturation, and quality of canning tomatoes. *Proc. American Society for Horticultural Science* 81 : 451-457.

Sol, fertilisation et qualité des fourrages

M Duru, G Lemaire (1), A Gibon (2), G Balent (2)

INRA Station d'Agronomie, BP 27, 31326 Castanet

(1) INRA Station d'écophysiologie des plantes fourragères, 86600 Lusignan

(2) INRA URSAD, BP 27, 31326 Castanet

Introduction

La qualité des fourrages recouvre plusieurs composantes : constituants organiques (matière organique, matières azotées, cellulose...) et leur digestibilité, constituants minéraux (phosphore, calcium...). Ces caractéristiques permettent de calculer les valeurs énergétique (unités fourragères) et azotée (protéines digestibles) du fourrage. D'autres critères de qualité sont maintenant considérés. Récemment des recherches ont été entreprises pour savoir s'il y a un effet terroir sur la qualité des laits et plus généralement la saveur des fromages. Il a ainsi été montré dans la zone du Comté une relation étroite entre la partition sensorielle et la partition floristique ; cette dernière étant étroitement liée aux caractéristiques édaphiques du milieu (épaisseur et propriétés hydrologiques du sol...) et aux pratiques (Monnet, 1996). Il est vraisemblable que l'effet milieu sur la qualité des fourrages provienne de l'importance et de la nature de métabolites secondaires comme les terpènes (Grappin et Coulomb, 1996).

Nous nous limiterons ici à l'étude de la valeur nutritive (teneur en protéines calculée à partir de la teneur en azote et digestibilité estimée *in vitro*, par voie enzymatique ou par spectroscopie dans le proche infrarouge). La fertilisation, en particulier l'azote, modifie beaucoup la teneur en protéines des fourrages. Cependant, les effets sont très variables selon les fournitures du sol et les conditions de croissance. L'effet de la fertilisation sur la digestibilité est généralement peu marqué (Demarquilly, 1970, Chestnutt et al., 1977). Cependant, l'effet d'un apport d'azote dépend de la durée de la pousse (Wilman et Daly, 1978) et du type de repousse : feuillue ou avec tiges (Wilman et al., 1977). Pour du dactyle considéré séparément du reste de la végétation de prairies permanentes, il a été observé une moindre digestibilité lorsque les conditions nutritionnelles sont améliorées (Duru, 1994, Fleury, 1994).

Pour préciser les effets directs du milieu ou des pratiques agricoles (disponibilité en éléments minéraux du sol, déficit hydrique) ou bien indirect, lorsque ces caractéristiques modifient la composition botanique des prairies, nous présenterons le principe d'une nouvelle approche, fondée sur la structure de la végétation et non plus uniquement sur l'âge du fourrage. Cette approche sera illustrée à la fois pour des prairies monospécifiques (luzerne, dactyle) et des prairies permanentes.

Modèles pour l'étude des effets du milieu et de la fertilisation sur la teneur en protéines et la digestibilité des fourrages

Une expression des caractéristiques du fourrage en fonction du temps de pousse

Traditionnellement, la digestibilité et la teneur en protéines sont exprimées en fonction du temps de pousse, ou bien en fonction de la phénologie des espèces lorsqu'il s'agit de la pousse de printemps (Demarquilly et al., 1988). Selon ce principe, il a été établi une équation par espèce pour une pousse de printemps et pour les repousses. Ce mode d'expression présente l'avantage de la simplicité pour rendre compte d'un des facteurs importants de l'évolution de la qualité du fourrage, à savoir son "âge", mais il ne permet pas de considérer les effets du milieu et des pratiques comme la fertilisation. En outre, il est mal approprié pour prédire la digestibilité des prairies permanentes dont la composition botanique est très dépendante des caractéristiques du milieu et des pratiques agricoles (Duru et Gibon, 1988 ; Fleury, 1994).

Une nouvelle approche des effets du milieu sur la qualité des fourrages

La biomasse totale (W) est composée de tissus métaboliques (W_m) directement impliqués dans les processus de croissance, et d'une partie structurale (W_s) correspondant aux tissus de soutien. La vitesse de croissance d'une plante est proportionnelle à la taille de son compartiment métabolique $dW/dt = k W_m(t)$, où W_m représente la masse métabolique de la plante. De plus, il existe une relation d'allométrie entre la masse métabolique et la masse totale d'une plante au cours de sa croissance $W_m(t) = k' W^b(t)$, qui se traduit par une diminution ontogénique de la proportion du compartiment métabolique dans la biomasse totale : $W_m/W = k' W^{b-1}$, soit $dW/dt = k k' W^b(t)$, (Lemaire et Gastal, 1997).

Ce modèle permet d'expliquer la décroissance de la teneur en azote du fourrage au cours d'une repousse. Si N_m et N_s représentent les teneurs de W_m et W_s, et si ces teneurs sont constantes au cours d'une repousse, on a : $N\% = (W_m N_m + W_s N_s) / W = (N_m - N_s) W_m / W + N_s = k' (N_m - N_s) W^{b-1} + N_s$. Ce modèle est très voisin de la formulation empirique de la "dilution" de l'azote alors $N\% = \alpha W^{b-1}$ proposée par Lemaire et Salette, (1984). La valeur de N_s proche de 0,8 peut être négligée en première approximation. b-1 est estimé à -0,32. N_s peut être considéré comme indépendant du niveau de nutrition azoté de la prairie. On a alors $N\% = a W^{-0,32}$. Lorsque les conditions de nutrition sont non limitantes, a=4,8. La teneur en azote à un moment donné dépend donc à la fois de la teneur en azote du compartiment métabolique fonction des disponibilités en azote, et de la dilution de l'azote fonction de la croissance de la masse structurale, autrement dit des conditions de croissance (température, rayonnement).

Pour l'étude de la digestibilité, le même formalisme peut être utilisé, D_m et D_s représentant respectivement les digestibilités des compartiments métabolique et structural (Gastal et al., 1996). Si l'on admet que le compartiment métabolique est entièrement digestible ($D_m=1$), on a : $D(t)=a [1-D_s(t)] W(t)^{b-1} + D_s(t)$. On peut ainsi identifier une dynamique d'évolution de la digestibilité dépendant de la croissance du couvert [$W=f(t)$], qui permet de prendre en compte les effets du milieu (nutrition minérale, déficit hydrique...), et une autre liée à la composition biochimique et histologique du compartiment structural au cours de sa croissance [$D_s=g(t)$] ; cette composition biochimique pouvant être différente selon les espèces.

Effets de la fertilisation azotée, des caractéristiques du sol et des conditions de croissance sur la teneur en protéines

Le formalisme présenté ci-dessus permet de rendre compte de la diminution de la teneur en azote de la végétation au cours d'une repousse. Le comportement "normal" étant défini en l'absence de toute déficience en azote, l'écart à la courbe de référence correspondante permet d'établir un diagnostic de nutrition azotée. On vérifie ainsi que l'effet "dilution" résulte des conditions de croissance et non seulement du temps de pousse ou de l'âge du fourrage.

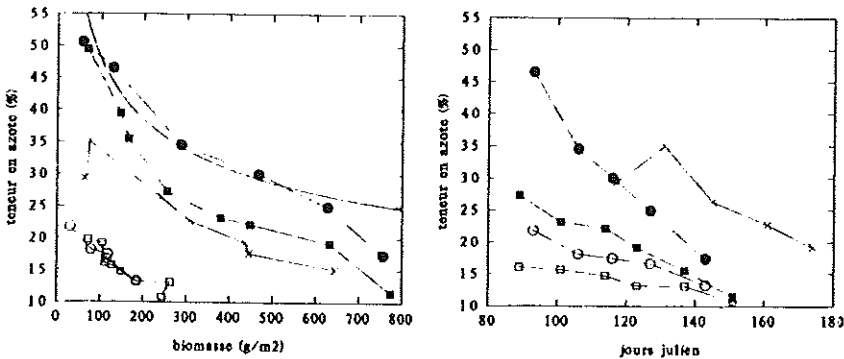


Figure 1 Relation entre la teneur en azote (% MS) pour une pousse de printemps en fonction du temps de pousse ou de la biomasse aérienne. x : prairie permanente (Pyrenées, 1300 m d'altitude). autres symboles : prairie de dactyle (Toulouse). 2 années consécutives (■ □ ● ○) avec apport de 120kg ha⁻¹ (symboles pleins) ou sans apport (symboles vides). - - - courbe de teneur en azote critique %N=4.8 (MS/100)^{0.52}

C'est ainsi que les teneurs en azote d'une prairie de dactyle exprimées en fonction de la biomasse sont similaires entre deux années (Fig 1a), alors qu'elles diffèrent fortement lorsqu'elles sont exprimées en fonction du temps de pousse (Fig 1b). Ceci signifie que les teneurs plus élevées observées l'une des années proviennent seulement d'une moindre croissance. Par contre, le niveau initial (par convention teneur en azote lorsque la biomasse est d'1t/ha), dépend fortement de la fertilisation azotée (comparaison des placettes fertilisées ou non du dactyle, fig. 1a) et des fournitures en

azote par le sol (comparaison des placettes non fertilisées du dactyle et de la prairie permanente). Ces dernières varient en fonction des caractéristiques du sol et du climat. La méthode proposée permet de réaliser un diagnostic a posteriori Dans la mesure où les fournitures en azote dépendent en partie de caractéristiques permanentes du sol, elle méthode permet en outre de classer les situations culturales.

Effet d'un déficit hydrique sur la digestibilité de la luzerne

La luzerne constitue un bon modèle pour utiliser le formalisme présenté dans la mesure où les feuilles peuvent être assimilées au compartiment métabolique (W_m) et les feuilles au compartiment structural (W_s). Le pourcentage de feuilles du fourrage correspond alors au rapport W_m/W .

Les travaux de Lemaire et al., (1989) ont montré que l'effet de la sécheresse sur la digestibilité de la luzerne pouvait s'expliquer par : (i) une réduction de la croissance des tiges se traduisant par une diminution du rapport Feuille/Tige (F/T) au cours de la repousse ; (ii) une augmentation de la digestibilité des tiges liée à leur diminution de croissance en hauteur. Ainsi, la croissance en hauteur des tiges semble être le déterminant principal de l'évolution de la digestibilité d'un couvert de luzerne puisqu'elle détermine à la fois le rapport F/T et la digestibilité des tiges du fourrage récolté. Ceci a pu être confirmé par la comparaison de génotypes (Figure 2).

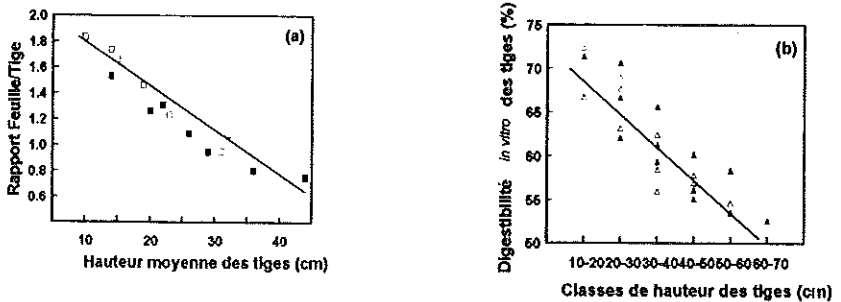


Figure 2 Relation entre la hauteur des tiges et (a) le rapport feuille tige, (b) la digestibilité des tiges de la luzerne (les symboles correspondent à des génotypes différents).

Dynamique de la digestibilité des graminées et effet d'un déficit en azote

L'approche précédente devrait pouvoir être appliquée aux autres dicotylédones pour lesquelles le compartiment feuille est presque entièrement composé de tissus métaboliques. Pour les graminées, les feuilles sont des organes plus complexes comprenant une part plus ou moins importante de tissus de soutien. La distinction des deux compartiments métaboliques (W_m) et structural (W_s) sur une base

morphologique n'est généralement pas valide. Le formalisme présenté ne peut donc être utilisé tel quel, qu'il s'agisse de la pousse de printemps comprenant des tiges ou mêmes des repousses qui sont presque toujours feuillues.

Dynamique de digestibilité pour des repousses végétatives

De nombreuses observations montrent que la digestibilité des feuilles, ou même des limbes, diminue au cours d'une repousse (Fig. 3), d'abord en relation avec l'apparition des 3 ou 4 premières feuilles sur une talle. Mais cette diminution continue quand le nombre de feuilles devient constant et qu'il y a seulement renouvellement des feuilles (Duru et Ducrocq, 1994). En outre, quand le niveau de nutrition azoté est déficient, la digestibilité est d'abord plus faible que celle d'une repousse bien alimentée en azote, mais elle diminue plus lentement au cours du temps, de telle sorte au bout de quelques semaines la hiérarchie peut s'inverser (Duru et al., 1995).

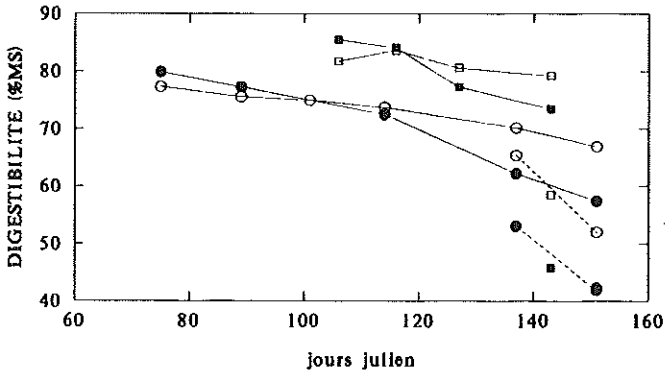


Figure 3 Digestibilité des limbes — et des tiges de dactyle en fonction du temps de pousse pour 2 années consécutives (■ □, ● ○) avec apport de 120kg ha⁻¹ d'azote (symboles pleins) ou sans apport (symboles vides).

Les études conduites à l'échelle de la feuille ont montré que la digestibilité des limbes décroît en fonction de leur rang, en relation avec la proportion de sclérenchyme (Wilson, 1976). A stade équivalent, les limbes ayant juste atteint leur taille adulte sont moins digestibles que ceux apparus antérieurement. En fait, la digestibilité des limbes adultes de différents rangs est corrélée à leur taille adulte et à leur vitesse d'apparition (Duru, en cours). Plus la vitesse d'apparition est lente (temps écoulé entre l'apparition de 2 limbes successifs sur une même talle), plus la longueur du limbe est grande, et plus faible est sa digestibilité. La diminution de la digestibilité ne provient donc pas uniquement du vieillissement des feuilles. Elle dépend d'un effet rang (différences de composition anatomique), ainsi que d'un effet âge (lignification). Ces changements morphogénétiques contribuent vraisemblablement à la diminution de digestibilité après une coupe, ainsi qu'aux différences de rythmes de diminution en fonction du niveau de nutrition azotée. En cas de déficience en azote, les limbes sont d'abord moins digestibles, mais les changements de composition anatomique en fonction de leur rang

sont susceptibles d'être plus lents du fait d'une diminution moins rapide de la vitesse d'apparition des feuilles (Ducrocq, 1996).

Dynamique de digestibilité pour la pousse de printemps

Lorsque les récoltes ont lieu au printemps pour la fauche ou l'ensilage, le compartiment structural est alors composé des tiges et des tissus de soutien des feuilles. La digestibilité des tiges ne devient inférieure à celle des feuilles qu'à partir de la fin de la montaison (Duru et al., 1995). A l'issue de cette phase la contribution des tiges dans la biomasse récoltée augmente rapidement. Toutefois, elle dépend beaucoup du niveau de nutrition azotée qui détermine la proportion de tiges en cours de montaison ou épiées (Tableau 1). Le développement des apex des tiges induites au cours de l'hiver est en effet considérablement ralenti en cas de déficience nutritionnelle. En outre, les tiges sont beaucoup plus courtes (Tableau 1) et plus digestibles (Fig. 3). Tout comme pour la luzerne, on observe une relation négative entre la digestibilité des tiges et leur longueur (Tableau 1).

date	fertilisation azotée	tiges (% biomasse)	talles en cours de montaison ou épiées		
			% en nombre	longueur de la tige (cm)	digestibilité des tiges (%MS)
31/05/95	N1	51	27	64	42,1
	N0	29	9	28	52,1
22/05/96	N1	72	59	51	45,8
	N0	43	17	24	58,4

Tableau 1 Effet de la fertilisation azotée sur la composition d'un couvert de dactyle au printemps.

Ainsi, la digestibilité de la biomasse récoltable en situation de fauche dépend principalement de la proportion de tiges dans la biomasse et de leur digestibilité. La fertilisation azotée ou l'azote fournit par le sol agit sur chacune de ces deux composantes. Son effet est donc d'autant plus marqué que la récolte est tardive.

Dynamique de la digestibilité des prairies permanentes

Spécificités

Les prairies permanentes à flore complexe comprennent généralement un nombre important d'espèces (10 à 40), graminées et dicotylédones, mais l'essentiel de la biomasse récoltée n'est composé que de quelques espèces. La composition botanique dépend principalement des niveaux de nutrition minérale, en relation plus ou moins étroite avec les caractéristiques physico-chimiques du sol, la fertilisation et de l'intensité d'utilisation de l'herbe (herbe récoltée/herbe produite), (Balent, 1987, Fleury, 1994). Les niveaux et les vitesses de diminution de la digestibilité sont très variables selon les prairies permanentes (Duru et Gibon, 1988, Fleury, 1994). Les prairies les moins productives, à base d'une flore diversifiée, sont généralement considérées comme de moindre qualité.

Bases de modélisation pour la période printanière

* *effet des espèces sur la digestibilité du compartiment structural* : les espèces associées à des habitats fertiles ont intrinsèquement des teneurs en azote organique et en minéraux élevées alors que celles associées à des habitats peu fertiles ont des teneurs plus grandes en lignine, en cellulose et en héli-cellulose. En outre, les espèces provenant des habitats les moins fertiles ont une proportion plus élevée de sclérenchyme non veineux (Van Arendonk et Poorter, 1994). Cet effet espèce s'observe aux niveaux de populations (Duru, 1997a), et de communautés, tant pour les feuilles que pour les tiges (Fig. 4, Duru, 1997b). Pour un niveau de nutrition minérale donné, les feuilles et les tiges de dicotylédones sont généralement plus digestibles que celles des graminées (Hacker et Minson, 1980).

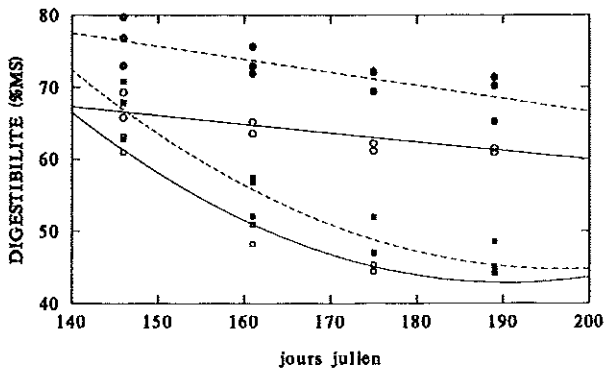


Figure 4 Evolution au printemps de la digestibilité de feuilles (● ○) et de tiges (■ □) de graminées d'habitat fertile (symboles pleins) ou pauvre (symboles vides).

* *effet des conditions de croissance sur la proportion du compartiment métabolique* :

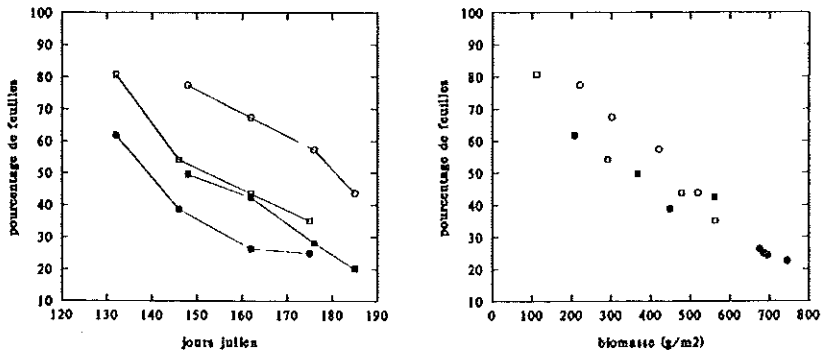


Figure 5 Proportion de feuilles en fonction du temps de pousse (a) et de la biomasse (b) pour 4 communautés végétales où les graminées (■ □) ou les dicotylédones (● ○) sont dominantes et correspondant à des niveaux de nutrition (■ ●) ou faibles (□ ○).

Si on considère que le compartiment métabolique correspond aux limbes des graminées et aux folioles des dicotylédones, ce qui est une approximation dans le cas des graminées, on observe une relation unique entre la proportion de feuille et la biomasse aérienne, quelle que soit la communauté végétale, c'est à dire la combinaison -espèces* niveaux de nutrition minérale- (Fig. 5, Duru, 1994). Cette relation unique résulte du fait que lorsqu'il y a une déficience en minéraux, la croissance des tiges est plus réduite que la croissance des feuilles. D'autre part, la proportion des tiges de graminées qui montent est aussi moins importante.

** type de prairie et digestibilité (Figure 6)*

Compte tenu des dynamiques d'évolution de digestibilité des feuilles et des tiges, ainsi que de leur proportion, la digestibilité du couvert est d'abord plus élevée au stade feuillu pour les prairies régulièrement fertilisées (effet espèce), mais elle diminue plus rapidement en relation avec une réduction plus rapide de la proportion de feuilles.

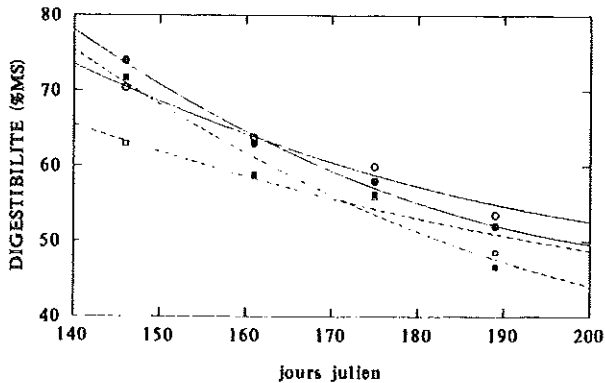


Figure 6 Dynamique de digestibilité au cours de la pousse de printemps pour 4 communautés végétales où les graminées (■ □) ou les dicotylédones (● ○) sont dominantes et correspondant à des niveaux de nutrition (■ ●) ou faibles (□ ○).

On peut ainsi proposer le modèle suivant : $D = D_f - a * T - b * W$ où D_f est la digestibilité des feuilles en début de repousse qui dépend des espèces selon classification proposée ci-dessus, W la biomasse aérienne qui est un indicateur de la proportion de feuilles, T le cumul de températures qui permet de rendre compte de la diminution de digestibilité des tiges en fonction du temps

Conclusion

Les effets du sol et de la fertilisation sur la teneur en protéines sont très importants. Ils tendent à diminuer au cours d'une pousse en relation avec une moindre dilution de l'azote lorsque les disponibilités sont faibles. Les fournitures par le milieu dépendent beaucoup des caractéristiques physico-chimiques du sol et de l'histoire culturale (Duru et Huché, 1997). La méthode de diagnostic présentée permet de classer les situations culturales. Elle contribue aussi à définir la quantité d'azote à apporter pour

atteindre un état nutritionnel donné. Le même formalisme prévalant pour le phosphore, les conclusions seraient similaires (Duru et Huché, 1997).

Quant à la digestibilité, l'intérêt de cette approche est d'avoir un modèle de portée générale permettant de rendre compte et de prédire les effets de variations interannuelles de disponibilités en azote et en eau, soit du fait du milieu, soit du fait des pratiques. Les effets du sol et de la fertilisation sont moins marqués sur la digestibilité qu'ils ne le sont sur la teneur en protéines. Toutefois, deux points méritent d'être soulignés. En premier lieu, les effets de l'azote résultent vraisemblablement de la modification de la structure de la végétation : longueur et proportion de feuilles, digestibilité des tiges. En outre, des valeurs moyennées peu différentes cachent des dynamiques contrastées : effet négatif du manque d'azote en début de pousse après une coupe (exploitation de type pâturage), mais effet généralement positif pour des récoltes tardives, de type fauche par exemple. En second lieu, lorsque les pratiques de fertilisation et les modes d'exploitation se traduisent par des changements durables de composition botanique, elles ont pour effet de modifier la digestibilité et sa dynamique à court terme puisque la croissance permise par la nutrition minérale est elle aussi modifiée. Dans une acception plus large de la qualité, ces pratiques peuvent aussi contribuer à la colonisation des prairies par des espèces indésirables, mal consommées par les animaux (rumex par exemple), ou difficiles à sécher (grandes ombellifères), (Balent et al., 1993).

Les résultats présentés montrent que la plasticité des prairies quant à la qualité de l'herbe est très grande. Il n'y a pas a priori d'optimum. Le choix des pratiques, fertilisation et modes d'exploitation résulte d'un compromis entre les objectifs de production zootechniques et les moyens de production disponibles. A cet effet, les outils de diagnostic élaborés permettent d'aider à choisir les pratiques à mettre en oeuvre en fonction des objectifs et des caractéristiques du milieu (Balent et al., 1997 ; Lemaire et Gastal, 1997).

Références bibliographiques

- Balent, G., 1987 Structure, fonctionnement et évolution d'un système pastoral. Le pâturage vu comme un facteur écologique piloté dans les Pyrénées centrales. Thèse Université de Rennes, 146 p.
- Balent G, Duru M, Magda D 1993 Pratiques de gestion et dynamique de la végétation des prairies permanentes. Une méthode de diagnostic agroécologique, une application aux prairies de l'Aubrac et de la vallée de l'aveyron. *Etudes et recherches sur les systèmes agraires et le développement* 27 283-302.
- Balent G, Duru M, Gibon A, Magda D, Theau JP 1997 Les prairies permanentes de milieu océanique et de montagne humide. Outils de diagnostic agro-écologique, Ed A Gibon, 51p.
- Chestnutt D.M.B., Murdoch J.C., Harrington F.J., Binnie R.C. 1977. The effect of cutting frequency and applied nitrogen on production and digestibility of perennial ryegrass. *J. of the Brit. Gras. Soc.*, 32, 177-183.
- Demarquilly C. 1970 Influence de la fertilisation azotée sur la valeur alimentaire des fourrages verts. *Ann. Zootech.*, 19, 423-437.
- Demarquilly C., Andrieu J., Sauvaut D. 1988. Tableau de la valeur nutritive des aliments. In : *Alimentation des ruminants*. Versailles : INRA Publications, pp. 351-471.
- Ducrocq H, 1996 Croissance des prairies de graminées selon la fertilisation azotée, l'intensité et la

- fréquence de défoliation. Thèse, INAPG, 150p.
- Duru M 1994 Mineral nutrition status botanical composition of pastures. II - Effect on herbage nitrogen content and digestibility. *European Journal of Agronomy* 3 125-133.
- Duru M 1997a Intérêt de la masse surfacique des limbes pour classer les espèces et les communautés prairiales selon leur digestibilité *in vitro*. Fourrages (à paraître)
- Duru M 1997b Leaf and stem *in vitro* digestibility for grasses and dicotyledons of meadow plant communities in spring. *J. Sci. Food Agric* (à paraître).
- Duru M, Gibon A 1988 Prévoir la valeur nutritive des foins et des regains dans les Pyrénées centrales. I Principaux facteurs de variation de la composition chimique. *Fourrages* 114 143-165.
- Duru M Ducrocq H 1994 *In vitro* digestibility of green leaves of *Dactylis glomerata* in relation to leaf demography. In : *Proc of the 15th General Meet. of the Europ. Grassl Soc* June 6-9, 157-161.
- Duru M., Thélier L. 1997. N and P-K status of herbage : use for diagnosis of grasslands. In *Diagnostic procedures for crop N management and decision making*. Sciences Update, ed INRA (sous presse).
- Duru M, Calvière I, Tirilly V 1995. Evolution de la digestibilité *in vitro* du dactyle et de la fétuque élevée au printemps. *Fourrages* 141, 63-74.
- Fleury P. 1994. Le diagnostic agronomique des végétations prairiales et son utilisation dans la gestion des exploitations agricoles. Typologies fondées sur les aptitudes des prairies à remplir des fonctions. Méthode et applications dans les Alpes du Nord. Thèse de Docteur en Sciences agronomiques. INP de Lorraine.
- Gastal F, Durand JL, Varlet-Grancher C, Gautier H, Lemaire G, Tabourel F 1996 Recherches récentes et en cours à la station d'écophysologie des plantes fourragères de Lusignan. *Fourrages* 148, 333-346.
- Grappin P et Coulomb JB 1996 Terroir, lait et fromage : éléments de réflexion. *Rech. Ruminants*, 3, 21-28.
- Hacker J.B. and Minson D.J. 1981. The digestibility of plant parts. *Herb. Abstr.*, 51 : 459-482.
- Lemaire G., Salette J. 1984. Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I - Etude de l'effet du milieu. *agronomie* 4 : 423-430.
- Lemaire G, Gastal F 1997 N uptake and distribution in plant canopies. In *Diagnosis of the nitrogen status in crops*, Springer-Verlag, ed G Lemaire, 3-44.
- Lemaire G, Durand JL, Lila M 1989 Effet de la sécheresse sur la digestibilité *in vitro*, la teneur en ADF et la teneur en azote de la luzerne. *Agronomie* 9 : 841-848.
- Monnet, 1996 Thèse, Université de Franche-Comté.
- Van Arendonk J.J.C.M., Poorter M. 1994. The chemical composition and anatomical structure of leaves of grass species differing in relative growth rate. *Plant, Cell and Environment* 17 : 963-970.
- Wilman D, Riley JA 1993 Potential nutritive value of a wide range of pasture species. *J agric Sci* 120 43-49.
- Wiman D., Daly M. 1978 Nitrogen and Italian ryegrass. 4. Growth up to 14 weeks : proportion and digestibilities of cell wall, cellulose, hemicellulose and lignin. *J. of the Brit. Gras. Soc.*, 33, 181-188.
- Wiman D., Daly M., Koocheki A. et Lwoga A.B. 1977 The effect of interval between harvests and nitrogen application on the proportion and digestibility of cell wall, cellulose, hemicellulose and lignin and on the proportion of lignified tissue in leaf cross-section in two perennial ryegrass varieties. *J. of Agric. Sci.*, 89, 53-63.
- Wilson JR 1976 Variation of leaf characteristics with level of insertion on a grass tiller. II- Anatomy. *Aust J agric Res* 27 355-364.

Contamination des sols et des productions agricoles par les produits phytosanitaires et les micropolluants organiques

M. Schiavon¹, E. Barriuso², E. Lichtfouse¹ et J-L. Morel¹

1 - ENSAIA/INRA - Laboratoire Sols et Environnement - BP 172, 54600 Vandoeuvre

2 - INRA - Unité de Science du Sol - 78850 Thiverval-Grignon

Résumé

Les activités anthropiques, agricoles ou urbaines et industrielles, sont à l'origine d'apports aux sols de pesticides et de divers micropolluants organiques en quantités relativement importantes. Ceci conduit à une pollution inévitable en surface mais également en profondeur. Cette contamination intervient sous deux formes; l'une mesurable (résidus extractibles) et l'autre, non mesurable par les techniques classiques, mais pouvant tout comme la première participer à la contamination des eaux et des produits agricoles par les résidus. L'absorption de pesticides et/ou d'autres micropolluants organiques par les plantes est régulée par différents facteurs qui contrôlent leur biodisponibilité : la concentration du polluant et sa mobilité dans le sol, ses propriétés physico-chimiques (solubilité dans l'eau, K_{ow}), l'exploration du sol par les racines et l'activité de la plante (capacité d'absorption racinaire, intensité du flux xylémien, température, humidité).

1 Introduction

L'utilisation de produits phytosanitaires pour la protection des cultures et de "déchets" comme engrais constituent des pratiques anciennes (Lhoste et Grison, 1989; Lefour, 1840). Il s'agit de tirer parti de ces produits pour simplifier les pratiques culturales, le désherbage par exemple, ou améliorer la production : protection des cultures par fongicides et insecticides et fertilisation par les composés minéraux et organiques des déchets. La pollution des sols, et d'une manière générale du milieu, consécutive à l'utilisation de ces produits, n'est apparue que récemment avec la constatation d'effets néfastes sur les cultures sensibles (signes de phytotoxicité).

Les progrès analytiques réalisés ces dernières années ont permis de montrer que les déchets utilisés en agriculture pouvaient constituer une source de composés organiques étrangers au milieu, au même titre que les pesticides. De plus, le pouvoir épurateur du sol à l'égard de ces produits apparaît limité. Le caractère récalcitrant à la dégradation de ces produits peut conduire à leur accumulation dans le sol et/ou à leur dispersion dans le milieu. Ces deux processus, accumulation et dispersion, conduisent à la pollution du milieu. A l'heure actuelle, la pollution est essentiellement perçue à travers la contamination de l'eau, alors que l'intérêt pour les phénomènes d'accumulation dans le sol et surtout de passage dans la plante reste paradoxalement mineur.

Mais la pollution des sols ne doit pas être considérée de la même manière selon qu'il s'agit de produits phytosanitaires ou des autres micropolluants organiques. En effet, les pesticides sont volontairement appliqués à la surface des sols à des doses contrôlées et ne sont considérés comme des polluants que dans la mesure où ils quittent leur point d'application à l'état dégradé ou non. A l'opposé, les micropolluants organiques tels que hydrocarbures linéaires ou polyaromatiques, solvants, PCBs, conduisent à une pollution diversifiée, involontaire et difficilement appréciable. Dans le cas des sols agricoles, elle

résulte majoritairement de l'utilisation de déchets à teneurs variables en ces constituants mais également de l'ensemble des activités humaines.

Ainsi, même si le devenir de ces différentes molécules organiques relève des mêmes processus, leur comportement dans un milieu donné sera dépendant des doses parvenant au sol de manière ponctuelle ou diffuse et des propriétés bio-physico-chimiques de chacune de ces molécules. Les potentialités des pesticides et des autres micropolluants organiques à contaminer le sol ou à passer dans les plantes doivent donc être examinées séparément.

2 - Les produits phytosanitaires

a - Nature et emploi

Les pesticides homologués en agriculture constituent un ensemble de près de 500 produits différents. Leur consommation en France est estimée à 70 000 tonnes par an, ce qui correspond à l'application d'environ 4 kg de matières actives par hectare (Barriuso *et al.*, 1996). En fonction de leurs propriétés physico-chimiques et biocides, mais aussi de la cible, leur application est effectuée directement sur le sol ou sur la végétation en place. Par rapport à la pollution du sol, ce mode d'application ne modifie que très faiblement les quantités parvenant à sa surface. Suivant l'état de la végétation (densité, taille,...) on estime que seulement 5 à 30 % du produit sont interceptés par le couvert végétal dont une partie est ultérieurement entraînée par les pluvio-lessivats (Legroux *et al.*, 1991). Ainsi, le mode d'application ne modifie pas l'intensité de la pollution du sol.

Par ailleurs, en dehors des différents paramètres qui conditionnent la disponibilité de ces molécules par rapport aux processus qui conduisent à leur minéralisation (Junk *et al.*, 1984; Fournier, 1989; Soulas, 1990) à leur dissipation ou à leur dispersion (Calvet et Jamet, 1979; Schiavon, 1980; Calvet, 1988), ce sont les fortes doses et l'utilisation fréquente de la même molécule qui favorisent l'accumulation dans le sol et/ou dans l'environnement. Un exemple remarquable est donné par l'utilisation systématique de l'atrazine sur culture de maïs. Dans ces situations, le pouvoir épurateur du sol est dépassé et l'assure plus essentiellement qu'un rôle régulateur de la dispersion du produit présent par le biais des interactions sol-pesticide-eau (Calvet, 1989).

b - La pollution apparente des sols

La pollution étant définie comme l'accumulation d'un produit et/ou la dispersion par rapport à la surface d'application, celle-ci n'est envisagée que lorsque la substance tend à persister en surface ou lorsque elle est rencontrée en dehors de la zone traitée. Le premier cas est rare, par contre la présence du produit dans la nappe ou dans les eaux de drainage est plus fréquent. Cela implique sa distribution à des teneurs variables dans l'ensemble des couches de terre traversées par l'eau. Cependant, le dosage des résidus dans les couches profondes du sol est très rarement réalisé (on se limite le plus souvent à déterminer sa répartition dans la couche de labour), car il exige la mise en oeuvre de techniques laborieuses de prélèvement, d'extraction et de purification du pesticide. Par ailleurs ce dosage se révèle souvent infructueux en raison des limites de détection des mesures. Lorsque ce dosage est possible, il permet d'évaluer le stock de résidus disponibles pour un transfert vers les eaux profondes ou superficielles (tableau I). En effet, les résidus présents dans les horizons sous-jacents à la couche de labour et dans le sous-sol, pauvres en matière organique, sont faiblement retenus (Calvet, 1989) et soumis à des processus de dégradation très lents (Cohen *et al.*, 1984; Dictor, 1994). Ils constituent donc une réserve qui peut atteindre plusieurs kg par hectare, disponible pour un transport inéluctable vers la nappe. La vitesse de ce transport en profondeur sera alors essentiellement dépendante de paramètres climatiques (Bailey et White, 1970).

Quoi qu'il en soit, les mesures réalisées par extraction simple ne montrent en général qu'une contamination minimale du sol associée à une faible progression des pesticides vers la profondeur. Ce type d'analyse ne rend pas compte des résidus liés à la matrice, représentant la pollution effective des sols.

c - La pollution réelle des sols

Le dosage des résidus dans le sol par voie physico-chimique suppose la réversibilité des liaisons établies entre les pesticides et les constituants organo-minéraux. L'utilisation de matières actives marquées au ^{14}C a permis de montrer, qu'au cours du temps, une partie notable des résidus devient progressivement non extractible (Schiavon *et al.*, 1977; Barriuso, 1994) échappant ainsi au dosage classique. La pollution réelle des sols est par conséquent très souvent bien supérieure à celle mesurée.

Tableau I.- Profondeurs atteintes par quelques pesticides à des teneurs dosables pour des sols de type sablo-limoneux et des doses appliquées sensiblement courantes.

Table I : Maximal depth for detectable amounts of some pesticides applied at normal rates on sandy loam soils

Pesticides	profondeur (cm)	teneurs ($\mu\text{g kg}^{-1}$)	Auteurs
Atrazine	180	0,26	Wehtje <i>et al.</i> , 1983
Atrazine	230	0,8	Huang et Frink 1989
Alachlore	"	1,6	"
Métolachlore	"	1,2	"
Simazine	"	10,2	"
Dieldrine	135	2,0	Halleberg, 1989
Trifluraline	10		Malterre, 1997

Les travaux menés avec des produits très divers par leur nature chimique tendent à montrer que ce phénomène intéresse toutes les familles de pesticides (tableau II). L'ampleur du phénomène dépend de la réactivité chimique de la matière active et/ou de ses métabolites. Ainsi les anilines et les phénols conduisent à la formation de quantités importantes de résidus non extractibles, tandis que pour les organochlorés, moins réactifs, cette aptitude est faible, et décroît avec le nombre de chlores portés par la molécule (tableau III).

La dégradation de substances telles que les phénylurées, les phénylcarbamates, les phénylanilines conduit à la formation d'amines aromatiques particulièrement réactives avec la matière organique du sol, et à l'établissement de liaisons stables avec formation de "résidus liés" (Adrian *et al.*, 1989; Scheunert *et al.*, 1991). De même, les résidus phénoliques ou quinoniques, issus de la dégradation d'herbicides de la famille des phytohormones (phénoxy-acides), peuvent réagir avec des groupes aminés de la matière organique du sol. Ce type de réaction suppose la perte de l'identité chimique du produit lié et sa possibilité de polymérisation avec les macromolécules organiques (Bartha, 1971). En fait, les résidus non extractibles constituent un ensemble hétérogène à la fois par leur nature chimique et leur mode de rétention.

Tableau II : Exemples de formation de résidus non extractibles (RNE) dans les sols sous conditions naturelles*Table II* : *Exemples of the formation of non extractable residues (RNE) in soils under field conditions. Percentages of the applied doses are given for different durations (in days)*

Matières actives	Texture % C	Durée jours	% RNE (1)	Auteurs
Atrazine	limoneuse (1,4)	45	23	Schiavon <i>et al.</i> , 1990
"	"	180	39	"
"	limoneuse (6,6)	180	46	"
"	argileuse (1,3)	180	30	"
Atrazine	-	3285	50	Capriel <i>et al.</i> , 1985
Metsulfuron-méthyle	limoneuse (1,4)	180	21	Schiavon <i>et al.</i> , 1990
	limoneuse (6,6)	180	14	"
	argileuse (1,3)	180	13	"
Méthabenzthiazuron	-	140	20,8	Kloskowski <i>et al.</i> , 1987
Métamitron	-	140	12	"
Trifluraline	limoneuse	365	50	Golab et Amudson, 1975
Trifluraline	"	1095	38	Golab <i>et al.</i> , 1979
Trifluraline	limono-argileuse (3,9)	63	72	Wheeler <i>et al.</i> , 1979
"	sablo-limoneuse (0,9)	84	51	"
"	argilo-limoneuse (1)	360	11	Malterre, 1997
Trifluraline	limoneuse	210	7	Helling et Krivonak, 1978
Oryzaline	"	365	56	Golab <i>et al.</i> , 1975
Isoproturon	limono-sableuse	42	14	Mudd <i>et al.</i> , 1983
"	"	140	70	Perrin-Ganier <i>et al.</i> , 1995

I : % de la dose appliquée

Tableau III : Effet de la présence d'atomes de chlore sur la molécule dans la formation de résidus non extractibles sous conditions naturelles (d'après Scheunert *et al.*, 1985; 1991).*Table III* : *Effect of chlorine substitutions on the molecule on the formation of non-extractable residues under natural conditions (after Scheunert *et al.*, 1985; 1991).*

Matières actives	Teneur en C (%)	Durée (jours)	% de RNE formés en % de la radioactivité dosée
4-chloroaniline	1,05	140	95,1
3,4-dichloroaniline	"	"	87,5
2,4,6-trichloroaniline	1,8	175	17,1
Trichlorobenzène	-	"	23,0
Pentachlorobenzène	-	"	2,0
Hexachlorobenzène	-	126	0,8

La formation de résidus liés intervient très rapidement après l'application des produits au sol. Cependant, l'intensité du phénomène et sa dynamique dépendent aussi de divers facteurs : concentration du pesticide dans le milieu, température d'incubation, temps de contact avec le sol, activité biologique ou teneur en matière organique du sol (Lichenstein *et al.*, 1977, Scheunert *et al.*, 1985).

Le temps de contact pesticide-sol favorise la formation de résidus liés. Ainsi pour l'atrazine, sous conditions naturelles, elle atteint un taux maximum après 180 jours d'incubation, puis diminue très lentement (tableau IV). De même, cette immobilisation est favorisée par les alternances humectation-dessiccation, en provoquant vraisemblablement une redistribution des pesticides vers des sites à forte énergie d'adsorption ou peu accessibles aux solvants d'extraction. Pour un même pesticide et des conditions identiques d'incubation, la quantité de résidus liés augmente avec la teneur en matière organique du sol (tableau IV) et leur part peut être prépondérante par rapport aux résidus extractibles (figure 1). Enfin, si la matière organique joue un rôle majeur dans la formation de résidus non extractibles, certains auteurs n'excluent pas la formation de liaisons irréversibles avec la fraction minérales (Helling et Krivonak, 1978).

Les quelques exemples présentés montrent combien la pollution peut être d'une manière générale sous estimée lorsqu'elle est évaluée par des méthodes d'analyse classiques. Mais cette immobilisation des résidus dans le sol pourrait être considérée comme un processus contribuant à réduire les risques de contamination de l'eau. Il s'avère cependant, qu'une partie au moins des résidus liés, peut être remobilisée à la faveur des réorganisations des matière organiques et de ce fait participer ultérieurement, sous forme diffuse, à la pollution de l'eau ou des végétaux (Bertin *et al.*, 1990, Demon, 1994).

Tableau IV : Evolution sous conditions naturelles des résidus non extractibles dans trois sols traités à l'atrazine. Résultats exprimés en pourcentage de la dose appliquée (d'après Schiavon *et al.*, 1990)

Table IV : Evolution of non-extractable residues in three soils treated with atrazine under field conditions. Results are expressed in percentage of the applied dose (after Schiavon *et al.*, 1990)

Temps après traitement en jours	Sols et teneurs en carbone organique		
	Argileux (2,2% M.O*.)	Limoneux (2,4% M.O.)	Calcaire (11,4% M.O.)
0	0	11,9	2,3
45	15,6	22,8	26,9
90	23,9	37,0	47,2
180	30,6	38,9	46,8
365	18,4	14,9	33,0

* M.O. : matière organique

Au total, le sol apparaît comme un système complexe et imparfait qui contribue, par ses activités propices à la dégradation biologique ou abiotique, à éliminer les produits phytosanitaires au cours d'une période qui devrait correspondre au mieux à la durée du

cycle végétatif de la plante traitée. Mais, soit parce que ses possibilités de dégradation sont limitées, soit parce qu'interviennent des interactions fortes entre les pesticides et les constituants du sol, il assure le stockage de résidus à disponibilité variable (Barriuso *et al.*, 1994b) et entretient une contamination de l'eau et/ou un passage dans les plantes, certainement permanent.

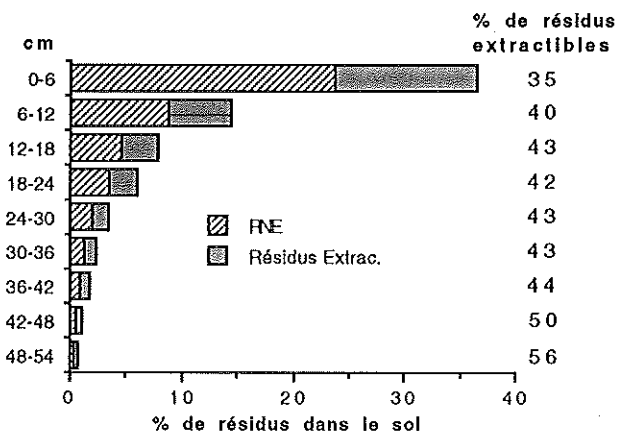


Figure 1 : Distribution des résidus extractibles et non extractibles dans un profil de sol un an après traitement à l'atrazine ^{14}C à la dose de $1,63 \text{ kg ha}^{-1}$ (Schiavon, 1988). (RNE : résidus non extractibles)

Figure 1 : Distribution of extractable (dark) and non extractable residues (rifled) in soil profil one year after treatment with ^{14}C atrazine at $1,63 \text{ kg ha}^{-1}$ A.I.

d - Passage des produits phytosanitaires du sol à la plante

Comme pour l'eau, des normes définissent la teneur maximale admissible en résidus dans et sur les céréales ou les produits d'origine végétale (J. O. de la République française, 1994a, 1994b). De même, des campagnes importantes de suivi des résidus dans les fruits, légumes et agrumes sont entreprises (Kulkarni et Ashoke, 1990). Mais, d'après la littérature, elles concernent essentiellement des produits utilisés en application foliaire. Les travaux entrepris sur le passage du pesticide du sol à la plante par voie racinaire sont par contre peu nombreux. En conditions de terrain, le dosage de résidus dans les plantules de maïs et dans le sol montre que l'absorption réalisée par la culture est de l'ordre de 10 % de la dose appliquée (Tasli, 1995). La plante serait capable d'exercer un effet de concentration considérable pouvant aller jusqu'à 12 fois la teneur en atrazine dans le milieu (Raveon *et al.*, 1997).

Des essais conduits sur modèles expérimentaux indiquent généralement des absorptions plus faibles. Ainsi, sur lysimètres de 62 cm de diamètre et 1 m de profondeur, Schroll *et al.* (1992) observent un prélèvement par le maïs au cours de son cycle végétatif de seulement 0,41 % de la terbutylazine appliquée. Lee *et al.* (1996) retrouvent 1,5 à 2,2 % de la bentazone appliquée dans la paille de riz et 0,012 % dans le grain au cours de l'année qui suit le traitement. En absence d'un nouvel apport, ces quantités chutent considérablement lors des cultures suivantes.

Les résultats présentés dans la littérature tendent à montrer que le prélèvement par la plante est conditionné par la disponibilité des résidus (concentration dans le sol et positionnement par rapport aux racines), par la solubilité dans l'eau et les constituants lipidiques racinaires (Kow) et par les paramètres qui définissent l'activité biologique de la plante (capacité d'absorption, température et humidité) (Scheunert et Parlar, 1992; Schroll *et al.* 1992). Enfin, certains travaux montrent que les résidus liés peuvent contribuer à l'alimentation en pesticides de la plante (Dec *et al.*, 1997; Kloskowski *et al.*, 1992).

3 - Les micropolluants organiques

Une revue détaillée des différents micropolluants organiques pouvant être rencontrés dans les sols est donnée par Barriuso *et al.* (1996). Nous n'aborderons ici, que les aspects concernant les hydrocarbures polyaromatiques.

a - Les sources

Les substances xénobiotiques des sols peuvent provenir de sources naturelles ou anthropiques. Ainsi, alors que la plupart des pesticides de synthèse ont des structures moléculaires témoignant d'une origine anthropique, l'atrazine par exemple, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), substances potentiellement mutagènes et cancérigènes, peuvent être issus à la fois de sources naturelles ou anthropiques (Lichtfouse *et al.*, 1994, 1997). Dans un sol, on peut recenser :

α - les sources naturelles indigènes

Elles sont constituées par les produits d'humification, notamment des triterpènes (Trendel *et al.*, 1989), par les combustibles fossiles résiduels comme le charbon ou le pétrole pour les sols formés sur des roches sédimentaires et par les hydrocarbures produits par la pyrolyse de l'humus pendant les feux naturels de végétation.

β - les sources naturelles exogènes

On peut citer ici les remontées de pétrole vers la surface dans les bassins sédimentaires (Lichtfouse *et al.*, 1994), les feux de végétation spontanés et le dépôt d'aérosols d'origine naturelle (Lipiatou et Saliot, 1991).

γ - les sources anthropiques

Il s'agit de produits de combustion comme les gaz d'échappement, les fumées d'usines et les feux de végétation; le dépôt d'aérosols d'origine anthropique (Lipiatou et Saliot, 1991) notamment à proximité des voies routières ainsi que des combustibles fossiles déversés à l'occasion de pollutions accidentelles sur les sites industriels et les dépôts de carburants enfin les épandages de déchets plus ou moins huileux.

À l'exception des pollutions massives comme la rupture d'un pipeline de pétrole, la distinction entre sources naturelles et anthropiques est difficile car les structures moléculaires sont souvent semblables. En outre, les HAP des aérosols peuvent être transportés sur de longues distances (Lunde et Bjorseth, 1977), favorisant ainsi le mélange de différentes sources. Lors de l'analyse d'HAP à l'état de traces dans des sédiments de surface, Winsdor et Hites (1979) observent néanmoins une augmentation nette des teneurs en HAP avec la proximité d'une agglomération urbaine (Boston), montrant ainsi une corrélation claire entre activité anthropique et pollution. Il semble que la majorité des HAP présents dans les sols proviennent essentiellement de produits de combustion (Youngblood et Blumer, 1975). D'autre part, les combustibles fossiles étant

très appauvris en carbone 14, la datation des HAP s'avère utile pour distinguer une origine moderne d'une origine ancienne. Ainsi, l'âge des HAP à l'état de traces dans un sol cultivé s'élève à plus de 9820 ans, témoignant d'une contribution fossile importante (Lichtfouse *et al.*, 1997). Enfin, il est quelquefois possible de distinguer les sources *pyrolytiques*, ou 'pyrogéniques', c'est à dire des produits de combustion, des sources purement *pétrogéniques* représentée par les combustibles fossiles qui n'ont pas subi de combustion, le pétrole brut, par exemple (Garrigues *et al.*, 1995).

En observant les structures moléculaires on peut aussi distinguer les hydrocarbures aromatiques *biogéniques* de ceux dont la structure n'est pas assez informative pour faire un lien avec un précurseur biologique (Oudot, 1984). Ainsi, alors que les stéroïdes triaromatiques de pétrole proviennent de l'aromatization des stérols des eucaryotes (Mackenzie *et al.*, 1982, Lichtfouse *et al.*, 1990, 1993), le phénanthrène peut être aussi issu d'autres sources comme les produits de combustion.

b - Résidus liés et pollution des sols

Les voies qui conduisent à l'introduction de micropolluants organiques dans les sols sont nombreuses. Environ 44% des HAP atmosphériques sont introduits dans le sol par capture sur les surfaces cireuses des plantes (Simonich et Hites, 1994). Les HAP de haute masse moléculaire étant très peu solubles dans l'eau, il est probable qu'ils sont transportés dans la solution du sol en association avec des colloïdes et des particules organo-minérales (Chaîneau *et al.*, 1996). Les teneurs élevées en HAP des horizons humifères de forêt suggèrent une accumulation de HAP d'origine atmosphérique (Berteigne *et al.*, 1988). Lunde et Bjorseth (1977) démontrent que les HAP peuvent être transportés par les aérosols sur de longues distances.

L'accumulation des HAP dans les sols s'opère vraisemblablement de manière différentielle. Les HAP de haute masse moléculaire, peu solubles, se dégradent moins vite que les HAP légers (Oudot, 1984). Des expériences de dégradation de fuel dans des sols montrent ainsi une décroissance notable d'hydrocarbures aromatiques légers (< 4 cycles) par les micro-organismes (Chaîneau *et al.*, 1995). Une étude d'incubation de HAP marqués au carbone 14 dans des eaux de rivière et des sédiments révèle une dégradation rapide des homologues légers (< 4 cycles) au détriment des HAP supérieurs (4 et 5 cycles) dont la transformation n'a pas été observée de façon irréfutable (Herbes, 1981). La dégradation microbiologique semble plus efficace que la photo-oxydation ou l'auto-oxydation (Smith, 1990, Ellis *et al.*, 1991), quoiqu'il existe peu de travaux établissant une comparaison de ces trois processus dans des conditions semblables. La dégradation d'hydrocarbures aromatiques pétroliers légers (1 cycle) en acides carboxyliques (Smith, 1990) est possible dans les eaux souterraines anoxiques (Cozzarelli *et al.*, 1990). En présence de plante, les HAP se dissipent plus rapidement qu'en sol nu par suite de l'effet favorable induit par les racines sur l'activité dégradante du sol (Chaîneau, 1995). Ce phénomène donne lieu au développement de procédés utilisant les végétaux pour gérer les sols pollués, ou phytoremédiation (Morel *et al.*, 1996).

Les temps de demi-vie des HAP dans les sols varient de 0,3 à 600 jours (Coover et Sims, 1987). Les valeurs rapportées dans la littérature sont cependant très variables avec, par exemple, 91 à 530 jours pour le benzo[a]pyrène (Coover et Sims, 1987). Ceci suggère un effet de matrice important, c'est à dire une capacité des sols à favoriser plus ou moins la dégradation. Ainsi, l'ajout de compost à un sol augmente considérablement la dégradation de HAP marqués au carbone 14 (Kästner et Mahro, 1996). La matrice organique du compost jouerait un rôle prédominant dans la biodégradation par sa capacité à fournir des sites favorables aux micro-organismes.

À l'instar des pesticides, peu d'investigations ont été menées afin d'identifier et de quantifier les autres polluants organiques présents sous forme de résidus liés (Bollag et Loll, 1983). Toutefois, en hydrolysant des substances humiques de sédiment et d'eaux

fluviales avec une base marquée (Na^{18}OH), Michaelis *et al.* (1995) démontrent la présence d'acides chlorobenzoïques et de métabolites de polychlorobiphényles (PCB) liés par des liaisons esters à la matrice organiques. De la même manière, en utilisant des techniques de dégradation chimique, ils mettent en évidence les produits de dégradation des HAP, des acides carboxyliques, dans les substances humiques de sols (Richnow *et al.*, 1994). D'autre part, des incubations d'eau de rivière et de sédiments avec des HAP légers (< 4 cycles) marqués au carbone 14 révèlent une forte proportion de métabolites polaires dans les eaux, et de résidus liés dans les sédiments (Herbes, 1981).

c - Transferts aux végétaux

Les HAP sont phytotoxiques (Currier, 1954) mais ils ne posent pas de problèmes à faible concentration vis-à-vis de la croissance et du développement des plantes cultivées (Chaîneau *et al.*, 1996). La phytotoxicité est d'autant plus élevée que la masse moléculaire est faible et elle dépend de l'espèce végétale.

Des travaux ont démontré que les hydrocarbures peuvent être prélevés par les plantes par voie atmosphérique (Simonich and Hites, 1994). Quant au transfert sol-racine, peu de recherches ont été entreprises jusqu'à présent. A des concentrations compatibles avec la croissance des plantes, aucune accumulation d'hydrocarbures dans la plante n'est observée (Chaîneau *et al.*, 1997). De même, aucun transfert de HAP dans les plantes cultivées n'a été observé à la suite d'apports de boues d'épuration, à l'exception des parties externes des racines de carottes (Chaîneau *et al.*, 1997; Kirchman et Tengsved, 1991; Wild *et al.*, 1992, Wild et Jones, 1992).

4 - Conclusion

Face aux pratiques actuelles de l'agriculture et aux diverses activités anthropiques, le sol apparaît comme un système épurateur aux capacités limitées. De ce fait il devient un lieu de stockage des pesticides et autres micropolluants qu'il reçoit régulièrement. Ceux-ci, en fonction de leurs propriétés physico-chimiques et des conditions de milieu (sol, climat), qui déterminent leur accessibilité et leur biodisponibilité, passeront progressivement dans la solution du sol pour alimenter de manière permanente les eaux et des végétaux et, par conséquent, transiter dans les différentes chaînes alimentaires. Ce constat montre combien il est urgent de poursuivre les recherches permettant une meilleure connaissance du comportement de chaque produit et ses métabolites dans un milieu donné. De plus, en complément des méthodes d'analyse classiques, il est nécessaire de mettre au point des outils de diagnostic utilisables en routine pour apprécier l'état de pollution du milieu. Enfin, pour des pollutions aiguës ou accidentelles, il est impératif de disposer de méthodes de réhabilitation pour lesquelles la biologie peut occuper une place prépondérante.

Références :

Adrian Ph., Andreux F., Viswanathan D., Freitag D., Scheunert I., 1989 - Fate of anilines and related compounds in the environment. A review. Toxicol. and Envir. Chem.; (20-21), 109-120.

Bailey G. W., White J. L., 1970 - Factors influencing the adsorption, desorption and movement of pesticides in soil. Res. Rev., (32), 29-92.

Barriuso E, Calvet R., Schiavon M., Soulas G., 1996 - Les pesticides et les polluants organiques des sols. Transformations et dissipation. Etude et Gestion des Sols, 279-296.

Barriuso E., Benoit P., Bergheaud V., 1994a - Role of soil fractions in retention and stabilisation of pesticides in soils. *In* : Environmental Behaviour of Pesticides and Regulatory Aspects, A. Copin, G. Houins, L. Pussemier, J.F. Salembier, Ed. COST, European Study Service, Rixensart, Belgique. 138-143.

Barriuso E., Gaillardon P., Schiavon M., 1994b - Biodisponibilité des pesticides dans le sol. XXIV^{ème} Congrès du Groupe Français des Pesticides, Bordeaux, 1-11.

Bartha R., 1971 - Fate of herbicide-derived chloroanilines in soil. J. Agr. Food Chem., (2), 385-387.

Berteigne M., Lefevre Y., Rose C., 1988 - Accumulation de polluants organiques (H.P.A.) dans les horizons humifères des sols. Eur. J. For. Path., (18), 310-318.

Bertin G., Schiavon M., Pottier C., 1990 - Plant bioavailability of "natural" and "model" humic acid-bound (¹⁴C) atrazine residue. Toxicol. Environ. Chem., (26), 203-210.

Bollag J.-M., Loll M.J., 1983 - Incorporation of xenobiotics into soil humus. Experientia, (39), 1221-1231.

Calvet R., 1989 - Adsorption of organic chemicals in soils. Environmental Health Perspectives, (83), 145-177.

Calvet R., 1988 - Évaluation des coefficients d'adsorption et prédiction de la mobilité des pesticides dans les sols. Methodological aspects of the study of pesticide behaviour in soil. INRA.Versailles, june 16-17, 1988, 119-126.

Calvet R., Jamet P., 1979 - Données générales sur le transport des pesticides dans les sols. Soc. Pharm.Montp. (39), 275-288.

Capriel P., Haisch A., Khan S. U., 1985 - Distribution and nature of bound (nonextractables) residues of atrazine in a mineral soil nine years after the herbicide application. J. Agric. Food Chem., (33), 567-569.

Chaîneau, C.H., J.L. Morel, and J. Oudot. 1997. Phytotoxicity and plant uptake of fuel oil hydrocarbons. J. Environ. Qual., (26), n° 6 (sous presse).

Chaîneau, C.H., J.L. Morel, and J. Oudot. 1996. Land treatment of oil-based drill cuttings in an agricultural soil. J. Environ. Qual., (4), 858-867.

Chaîneau, C.H., 1995 - Devenir et effets des hydrocarbures dans le cas d'épandage extensif de déblais de forage en agrosystème. Thèse de Doctorat de l'INPL, Nancy, 148 p.

Chaîneau C.H., Morel J.-L., Oudot J., 1995 - Microbial degradation in soil microcosms of fuel oil hydrocarbons from drilling cuttings. Environmental Science & Technology, (29), 1615-1621.

Cohen S. Z., Creeger S. M., Carsel R. F., Enfield C. G., 1984 - Potential for pesticide contamination of groundwater from agricultural uses. *In* : Treatment and disposal of pesticides wastes. ACS Symposium series 259, Am Chem Soc, Washington DC, Kruger RF, Sieber JN (eds), 297-325.

Coover M.P., Sims R.C., 1987 - The effect of temperature on polycyclic aromatic hydrocarbon persistence in an unacclimated agricultural soil. Hazardous Waste & Hazardous Materials, (4), 69-82.

Cozzarelli I.M., Eganhouse R.P., Baedecker M.J., 1990 - transformation of monoaromatic hydrocarbons to organic acids in anoxic groundwater environment. Environ. Geol. Water Sci., (16), 135-141.

Currier, H.B. 1954, Phytotoxicity of hydrocarbons. J. Agr. Sci. 155-172.

Dec J., Haider K., Rangaswamy V., Schäffer A., Fernandes E., Bollag J-M., 1997 - Formation of soil-bound residues of cyprodinil and their plant uptake. J. Agric. Food Chem., (45), 514-520

Demon M., 1994 - Influence des facteurs climatiques et des constituants du sol sur la dynamique de l'atrazine. Thèse INPL Nancy. 111 p.

Dictor M-C., 1994 - Caractérisation de la distribution et comportement métabolique de la microflore indigène dans un profil de sol. Thèse INPL Nancy. 110 p.

Ellis B., Harold P., Kronberg H., 1991 - Bioremediation of a creosote contaminated site. Environmental Technology, (12), 447-459.

Fournier J. C., 1989 - Aspects du comportement de la microflore dégradant les produits phytosanitaires dans le sol. Thèse de Doctorat d'Etat, Univ. Perpignan. 501p.

Garrigues P., Budzinski H., Manitz M.P., Wise S.A., 1995 - Pyrolytic and petrogenic inputs in recent sediments : a definitive signature through phenanthrene and chrysene compound distribution. Polycyclic Aromatic Compounds, (7), 275-284.

Golab T., Althaus W. A., Wooten H. L., 1979 - Fate of [¹⁴C]trifluralin in soil. J. Agric. Food Chem., (27), 163-179.

Golab T., Amundson M. E., 1975 - Degradation of trifluralin, oryzalin, and isopropalin in soil. Environ. Qual. Safety. suppl. III, 258-261.

Halleberg G. R., 1989 - Pesticide pollution of groundwater in the humid United States. Agriculture, Ecosystems and Environnement, (26), 299-367.

Helling C. S., Krivonak A. E., 1978, - Physicochemical characteristics of bound dinitroaniline herbicides in soils. J. Agr. Food Chem., (26), 1156-1163.

Herbes S.E., 1981 - Rates of microbial transformation of polycyclic aromatic hydrocarbons in water and sediments in the vicinity of a coal-coking wastewater discharge. Applied and Environmental Microbiology, (41), 20-28.

Huang L. Q., Frink C. R., 1989 - Distribution of atrazine, simazine, alachlor, and metolachlor in soil profiles in Connecticut. Bull. Environ. Contam. Toxicol., (43), 159-164.

Journal Officiel de la République, 1994a - Arrêté relatif aux teneurs maximales en résidus de pesticides admissibles dans et sur les céréales destinées à la consommation humaine. 10319-10323.

Journal Officiel de la République, 1994b - Arrêté relatif aux teneurs maximales en résidus de pesticides admissibles sur ou dans certains produits d'origine végétale. 10323-10332.

Junk G.A., Richard J.J., Dahm P.A., 1984. - Degradation of pesticides in controlled water-soil systems. *In* : Treatment and disposal of pesticides wastes, American Chemical Society Symposium Series, 259; R.F. Krueger et J.N. Seiber, Eds, (4), 37-67.

Kästner M, Mahro B., 1996 - Microbial degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils affected by the organic matrix of compost. Appl. Microbiol. Biotechnol., (44), 668-675.

Kirchmann, H. and A. Tengsved. 1991 - Organic pollutants in sewage sludge. 2. Analysis of barley grains grown on sludge-fertilized soil. Swed. J. Agr. Res. (21), 115-119.

Kloskowski R., Führ F., Mittelstaedt W., 1992 - Plant availability of bound anilazine residues in a degraded loess soil. J. Environ. Sci. Health, (6), 487-505.

Kloskowski R., Führ F., Mittelstaedt W., 1987 - The uptake of non-extractable soil-bound pesticide residues by roots-standardized experiments with four pesticides. *In* : Pesticide Science and Biotechnology, Greenhalgh et Roberts Ed., 405-410.

Kulkarni A.P., Ashoke M., 1990 - Pesticide contamination of food in the United States. Adv. Environ. Sci. and Technol., 257-293.

Lee J.K., Führ F., Kyung K.S., 1996 - Fate of the herbicide bentazon in rice plant-grown lysimeters over four consecutive cultivation years. J. Environ. Sci. Health, (2), 179-201.

Lefour M., vers 1840 - manuel du cultivateur : Agriculture - sol et engrais. Dusacq, Librairie Agricole de la maison Rustique, 191-195

Legroux P., Portal J.-M., Schiavon M., Andreux F., 1991 - Répartition du flutriafol entre la plante et le sol après traitement et mouvement dans le sol. XXème Congrès du Groupe Français des Pesticides, 22 et 23 mai - Nancy. 379-382.

Lhoste J. et Grison P., 1989 - La phytopharmacie française - Chronique historique. Lavoisier Edit. 280 p.

Lichtenstein E. P., Katan J., Andereg B. N., 1977 - Binding of "persistent" and "nonpersistent" ¹⁴C-labeled insecticides in an agricultural soil. J. Agr. Food Chem., (1), 43-47.

Lichtfouse E., Budzinski H., Garrigues Ph., Eglinton T.I., 1997 - Ancient polycyclic aromatic hydrocarbons in modern soils : ¹³C, ¹⁴C and biomarker evidence. Organic Geochemistry, (26), 353-359.

Lichtfouse E., Albrecht P., Behar F., Hayes J. M., 1994 - A molecular and isotopic study of the organic matter from the Paris Basin, France. Geochimica et Cosmochimica Acta, (58), 209-221.

- Lichtfouse E., Albrecht P., Behar F., 1993 - 3-Methyltriaromatic steroids in sediments, molecular fossils with unknown precursors. Polycyclic Aromatic Compounds, (3), 635-638.
- Lichtfouse E., Riolo J., Albrecht P., 1990 - Occurrence of 2-methyl-, 3-methyl- and 6-methyltriaromatic steroid hydrocarbons in geological samples. Tetrahedron Letters, (31), 3937-3940.
- Lipiatou E., Saliot A., 1991 - Fluxes and transport of anthropogenic and natural polycyclic aromatic hydrocarbons in the western Mediterranean Sea. Marine Chemistry, (32), 51-71.
- Lunde G., Bjorseth A., 1977 - Polycyclic aromatic hydrocarbons in long-range transported aerosols. Nature, (268), 518-519.
- Mackenzie A.S., Brassell S.C., Eglinton G., Maxwell J.R., 1982 - Chemical fossils : the geological fate of steroids. Science, (217), 491-504.
- Malterre F., Grebil G., Pierre J.G., Schiavon M., 1997 - Trifluralin behaviour in soil : a microlysimeter study. Chemosphere, (34), 447-454.
- Morel J.L., Bitton G., Schwartz C., Schiavon M., 1997. Bioremediation of soils and waters contaminated with micropollutants : which role for plants ? In : pp 37-74 Ecotoxicology : Responses, Biomarkers and Risk assessment, Chapter 4, OECD Workshop, (J.T. Zelikoff, ed.), SOS Publications, Fair Haven, NJ.
- Michaelis W., Richnow H.H., Seifert R., 1995 - Chemically bound chlorinated aromatics in humic substances. Naturwissenschaften, (82), 139-142.
- Mudd P. J., Hance R. J., Wright S. J. L., 1983 - The persistence and metabolism of isoproturon in soil. Weed Research, (23), 239-246.
- Oudot, J., 1984. La dégradation microbienne des hydrocarbures : étude du potentiel de biodégradation et de son expression dans le milieu. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Paris VII.
- Perrin-Ganier C., Schiavon M., Portal J-M., Babut M., 1995 - Dégradation de l'isoproturon et disponibilité de ses résidus dans le sol. Weed Research, (35), 257-263.
- Raveton M., Ravanel P., Serre A-M., Nurit F., Tissot M., 1997 - Kinetics of uptake and metabolism of atrazine in model plant systems. Pestic. Sci., (49), 157-163.
- Richnow H.H., Seifert R., Hefter J., Kästner M., Mahro B., Michaelis W., 1994 - Metabolites of xenobiotica and mineral oil constituents linked to macromolecular organic matter in polluted environments. Organic Geochemistry, (22), 671-681.
- Scheunert I., Parlar H., 1992 - Fate of pesticides in plant and in soil fauna. In : Terrestrial behavior of pesticides. Springer-Verlag Ed., 77-103.
- Scheunert I., Mansour M., Adrian Ph., 1991 - Formation of conversion products and bound residues of chlorinated anilines in soil. Toxicol. Environ. Chem., (31,32), 107-112.

Scheunert I., Topp E., Schmitzer J., Klein W., Korte F., 1985 - Formation and fate of bound residues of (^{14}C)benzene and (^{14}C)chlorobenzenes in soil and plant. Ecotoxicol. Environ. Saf. (9), 159-170.

Schiavon M., Barriuso E., Portal J. M., Andreux F., Bastide J., Coste C., Millet A., 1990 - Etude du devenir de deux substances organiques utilisées dans les sols, l'une massivement (l'atrazine) et l'autre à l'état trace (le metsulfuron-méthyl), à l'aide de molécules marquées au ^{14}C . Rapport SRETIE/MERE, 75 p.

Schiavon M., 1988 - Studies of the movement and formation of bound residues of atrazine, of its chlorinated derivatives and of hydroxyatrazine in soil using ^{14}C ring-labeled compounds under outdoor conditions. Ecotoxicol. Environ. Saf. (15), 55-61.

Schiavon M., 1980 - Contribution à l'étude du mouvement et de la dégradation de l'atrazine dans deux sols agricoles drainés. Interaction matière organique-herbicide. Thèse D. Etat Nancy I, pp.193.

Schiavon M., Jacquin F., Goussault C., 1977 - blocage de molécules s-triaziniques par la matière organique. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1977, SM-211/78, 327-332.

Schroll R., Langenbach T., Cao G., Dörfler U., Schneider P., Scheunert I., 1992 - Fate of [^{14}C]terbutylazine in soil-plant systems. The Science of the Total Environment, (123/124), 377-389.

Simonich S.L., Hites R.A., 1994 - Importance of vegetation in removing polycyclic aromatic hydrocarbons from the atmosphere. Nature, (370), 49-51.

Smith M.R., 1990 - The biodegradation of aromatic hydrocarbons by bacteria. Biodegradation, (1), 191-206.

Soulas G., 1990 - Dégradation biologique d'un herbicide, l'acide 2,4-dichlorophénoxy-acétique (2,4-D) dans le sol - Aspects cinétiques. Thèse de Doctorat d'Etat, INPL Nancy, 177 p.

Simonich, S.L., Hites R.A., 1994. Vegetation-atmosphere partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons. Environ.Sci. Technol. 28:939-943.

Tasli S., 1995 - Devnir de l'atrazine en culture de maïs : étude en plein champ - site de la Côte Saint André, Isère, France - et au laboratoire. Thèse Université Grenoble I. 188p.

Trendel J.M., Lohmann F., Kintzinger J.P., Albrecht P., Chiaroni A., Riche C., Cesario M., Guilhem J., Pascard C., 1989 - Identification of Des-A-triterpenoid hydrocarbons occurring in surface sediments. Tetrahedron, (45), 4457-4470.

Wehtje G. R., Spalding R. F., Burnside O. C., Lowry S. R., Leavitt J. R., 1983 - Biological significance and fate of atrazine under aquifer conditions. Weed Sci., (31), 610-618.

White A. W., Barnett A. P., Wright B. G., Holladay J. H., 1967 - Atrazine losses from fallow land caused by runoff and erosion. Environ. Sci. and Technology, (1), 740-744

Wheeler W., Stratton G. D., Twilley R. R., LI-TSE OU, Carlson D. A., 1979 - Trifluralin degradation and binding in soil. J. Agric. Food Chem., (27), 702-706.

Wild, S.R., M. L. Berrow, S.P. McGrath, Jones K. C., 1992 - Polynuclear aromatic hydrocarbons in crops from long-term field experiments amended with sewage sludge. Environ. Pollut. (76), 25-32.

Wild, S.R., Jones K.C., 1992 - Polynuclear aromatic hydrocarbon uptake by carrots grown in sludge-amended soil. J. Environ. Qual. (21), 217-225.

Windsor J.G., Hites R.A.; 1979 - Polycyclic aromatic hydrocarbons in Gulf of Maine sediments and Nova Scotia soils. Geochimica et Cosmochimica Acta, (43), 27-33.

Youngblood W.W., Blumer M., 1975 - Polycyclic aromatic hydrocarbons in the environment : homologous series in soils and recent marine sediments. Geochimica et Cosmochimica Acta, (39), 1303-1314.

CONTAMINATION PAR LES PATHOGENES

M. Legeas, E.N.S.P., Rennes

1. DEFINITION DE LA NOTION D'AGENTS PATHOGENES

Avant de présenter l'état des connaissances en matière de contamination des boues résiduaires et des produits dérivés par les agents pathogènes, il est nécessaire de préciser les sens de ces termes et de circonscrire le champ de l'exposé.

Le terme d'agent pathogène s'applique à toute forme biologique, vivante ou non, capable, après pénétration d'un autre organisme vivant, de s'y développer (ou multiplier) et d'occasionner une maladie. Sous ce terme, il existe donc toute une variété d'agents, allant désormais des protéines (prions) aux vers (helminthes) et champignons, en passant par les virus, les bactéries et les protozoaires !

Ces agents peuvent être pathogènes pour l'Homme et les animaux, mais aussi pour les végétaux. Ces derniers sont souvent négligés, la notion de pathogénicité s'appliquant plutôt intuitivement aux espèces animales.

La Commission d'Homologation des Matières fertilisantes et Supports de culture du Ministère de l'Agriculture a décidé récemment (1997) d'inclure les risques de phyto-pathogénicité dans ses critères d'examen des produits. Cet exposé ne reviendra pas sur les agents phyto-pathogènes (qui se situent en dehors des champs de compétence de l'auteur), mais ils doivent être gardés en mémoire, surtout lorsque la réflexion porte sur des produits introduits dans les sols, en tant que fertilisants.

La notion de pathogénicité doit être elle aussi précisée :

- ne sont pathogènes que certaines souches de micro-organismes appartenant à une espèce (ex. : *Listeria monocytogenes*, qui appartient au groupe des *Listeria* sp); ils sont de plus souvent assez spécifiques d'une espèce cible (ex. : l'hépatite A, qui n'intéresse que l'Homme);
- ces agents, pour pouvoir exprimer leur pouvoir pathogène, doivent avoir conservé un certain nombre de caractéristiques physiologiques, et donc ne pas

avoir trop souffert entre le moment de leur émission et le moment de la rencontre de leur cible; ceci favorisera donc les espèces possédant une forme de résistance (kystes de Giardia par exemple);

- la voie de rencontre entre l'agent pathogène et sa cible doit être biologiquement correcte (ex.: voie pulmonaire pour Aspergillus; voie alimentaire pour Giardia);

- pour que l'infection se déclenche après pénétration du pathogène dans l'espèce cible, il est nécessaire que l'hôte soit lui même dans un état physiologique favorisant l'infection (ex. : personnes immuno-déprimées), et que la quantité d'agents ayant pénétré l'organisme cible soit suffisante (notion de D.Mi. : dose minimale infectante : estimée à 1 pour les parasites et à plus de 10 000 pour certaines bactéries).

Toutes ces conditions sont nécessaires et leur complexité explique qu'il soit très difficile de modéliser d'une façon générale les risques sanitaires liés aux agents pathogènes pouvant être contenus dans les boues résiduaires. Cette difficulté de modélisation est encore accrue par la diversité des origines des agents pathogènes circulant dans l'environnement et par la variabilité des contaminations des produits.

2- ORIGINES DES AGENTS PATHOGENES DANS L'ENVIRONNEMENT

D'une manière générale, les agents pathogènes pour l'Homme et l'animal peuvent provenir des organismes infectés eux-mêmes, ou être d'origine tellurique. Dans ce second cas, ils seront dits pathogènes opportunistes : présents de façon naturelle dans l'environnement, ce sont des conditions particulières (du milieu ou de son usage) qui permettront de les rendre contaminants (listeria ou aeromonas par exemple).

Lorsqu'ils proviennent d'organismes infectés, ces organismes peuvent :

- ne jamais développer la maladie, malgré l'invasion par l'agent pathogène : on parlera dans ce cas de *porteurs sains*; ces porteurs sains seront en général totalement ignorés (pas de signes apparents) et ce portage pourra se faire pendant des mois, voire des années (salmonelles ou staphylocoques par exemple);
- ne pas avoir encore de signes apparent de la maladie (*période d'incubation*); le portage restera ignoré pendant toute la phase de latence, qui dure en général quelques jours et peut parfois atteindre plusieurs semaines (hépatite A par exemple);
- être malades *sans signes extérieurs notables* : c'est le cas des infestation par les helminthes en général (taeniasse par exemple); l'excrétion des agents contaminants pourra alors se faire pendant de longues périodes, allant jusqu'à plusieurs années.

Il découle plusieurs conséquences importantes de ce qui vient d'être dit :

1) les agents pathogènes circulant dans l'environnement peuvent avoir trois origines :

- une origine tellurique,
- une origine « rurale » : animaux d'élevage (via le recyclage de leurs déjections en particulier) et animaux sauvages,
- une origine « urbaine » (réseaux de collecte et de transfert des eaux résiduaires et pluviales) : animaux urbains (domestiques ou apparentés -comme les pigeons- via leurs déjections sur les chaussées et les toitures), établissements de soins (hôpitaux, laboratoires,...), eaux usées domestiques (issues des habitations), eaux résiduaires provenant d'installations agro-alimentaires (abattoirs, équarrissages,...);

certains de ces agents pathogènes peuvent provenir de plusieurs de ces sources (salmonelles par exemple), d'autres, sont issus d'une même espèce animale (bovins par exemple, avec les salmonelles, les cryptosporidies et la taenia);

2) les types et les quantités des agents pathogènes émis peuvent être très variables, d'un endroit à l'autre et d'un moment à l'autre, puisqu'ils dépendent étroitement de l'état sanitaire des populations humaines et animales;

3) pour cette même raison, et du fait des possibilités de portage inapparent, il est pratiquement impossible de prédire (et donc de rechercher par l'analyse) la présence de tel ou tel agent pathogène dans un produit (déjections animales ou boues résiduaires).

Le contrôle de la circulation des agents pathogènes pour l'Homme et l'animal ne peut donc pas être simple : il doit être global. Pour cela, il doit être réalisé soit par agent pathogène (en incluant toutes les sources de cet agent), soit par type d'utilisation des produits (en incluant tous les agents pathogènes possibles issus de l'ensemble des produits apportés).

3) AGENTS PATHOGENES DANS LES SOUS-PRODUITS DE L'ASSAINISSEMENT

Les sous- produits de l'assainissement utilisés en recyclage agricole sont essentiellement les boues résiduaires issues des stations d'épuration collectives et les matières de vidanges issues des dispositifs d'assainissement autonome.

Les données de la littérature relatives à la charge en agents pathogènes dans les eaux et dans les boues résiduaires sont relativement pauvres, fortement hétérogènes et disparates (tableaux 1 et 2). Elles ne concernent jamais les matières de vidange.

Ces données ne prennent généralement en compte que quelques agents potentiellement pathogènes, parmi les plus facilement mesurables, pris comme

Tableau 1 : Principaux agents pathogènes pour l'Homme et/ou l'animal d'intérêt sanitaire, pouvant être retrouvés dans les boues résiduaires (document du groupe de travail du CSHPF, 1996).

Micro-organismes	Pathologie	Espèces cibles	
		Homme	Animal
Virus entériques :			
- Virus de l'hépatite A	hépatite infectieuse	+	-
- Virus de Norwalk et apparentés	gastroentérite	+	-
- Rotavirus	gastroentérite		+
- Entérovirus			
. Poliovirus	poliomyélite	+	-
. Cocksackievirus	m éningite, pneumonie,	+	-
. Echovirus	hépatite	+	-
- Réovirus	méningite, paralysie,	+	+/-
- Astrovirus	diarrhée	+	-
- Calicivirus	infection respiratoire, gastroentérite	+	-
	gastroentérite		
Bactéries :			
- Salmonella sp	salmonellose	+	+++
- Shigella sp	dysentérie bacillaire	+	+/-
- Yersinia sp	gastroentérite	+	+
- Vibrio cholerae	choléra	+	-
- Campylobacter jejuni	gastroentérite	+	+
- Escherichia coli (souches pathogènes)	gastroentérite	+	+++
Parasites :			
• protozoaires :			
- Cryptosporidium sp	gastroentérite	+	+++
- Giardia intestinalis	diarrhée	+	++
- Entamoeba histolytica	dysentérie	+	-
- Balantidium coli	diarrhée et dysentérie	+	+
- Toxoplasma gondii	toxoplasmose	+	+
• helminthes :			
- Ascaris lumbricoïdes	diarrhée, douleurs abdominales	+	-
- Trichuris trichiura		+	-
- Toxocara sp	nervosité, insomnie,	+	+
- Taenia sp	anorexie	+	+++
	nervosité, troubles digestifs, insomnie		
- Hymenolepis	anorexie	+	-

+++ : très sensible; ++ : moyennement sensible; + : faiblement sensible; +/- : sensibilité douteuse; - : non sensible.

paramètres estimatifs d'un risque fécal, tels les salmonelles ou les helminthes. Les données relatives aux charges en coliformes ou streptocoques fécaux sont beaucoup plus nombreuses, mais ne permettent pas de prédire efficacement la présence des pathogènes : les concentrations de ces germes peuvent au mieux, dans le cadre du recyclage des boues résiduaires, indiquer si le produit a subi ou non un minimum de traitement préalable.

Tableau 2 : Données relatives à la charge en micro-organismes de quelques types de boues résiduaires (document ADEME, ENSP, ENVN, 1994).

Type de boues	Micro-organismes	Charge en Ulog
Boues primaires	Coliformes totaux	8-10/l
	Coliformes fécaux	5-7/l
	Streptocoques fécaux	7-9/l
	C.S.R. (clostridies sulfato-réductrices)	7-9/l
	Salmonelles	3/l
	Oeufs de cestodes	0-3/l
	Oeufs de nématodes	1-4/l
	Kystes de Giardia sp	2-4/l
	Virus entériques	3/l
Boues secondaires	Oeufs d'Ascaris	1-2 /kg
	Oeufs de Toxocara sp	0-1 /kg
	Oeufs de Trichuris sp	0-1/kg
	Oeufs d'Hymenolepis sp	0-1/kg
	Oeufs de Taenia sp	0-1/kg
	Virus entériques	2-3 /l
Boues mixtes	Salmonelles sp	3/l
Boues de lagunes	Coliformes fécaux	6-8/l
	Streptocoques fécaux	6-8/l
	Salmonelles sp	1/l
	Aeromonas hydrophila	5-6/l
	Pseudomonas aeruginosa	5-6/l
	Reovirus	4-5/l
	Enterovirus	1-2/l

Les agents pathogènes (essentiellement fécaux, mais pas uniquement) émis dans les systèmes d'assainissement collectifs par les hôtes porteurs, sont d'abord véhiculés dans les eaux résiduaires collectées soit en un seul réseau (on parle alors de collecte unitaire), soit dans deux réseaux (on parle alors de réseau séparatif). Ils sont ensuite très largement retenus avec les matières particulières, au niveau des ouvrages épuratoires. Le premier paramètre qui va influencer sur la

contamination des boues est donc la nature même du système d'assainissement : matières fécales humaines dominantes et/ou animales, relation avec les phénomènes de lessivages des chaussées et des toitures, état des réseaux, ...

Le second facteur de variabilité est le type de système épuratoire mis en oeuvre et surtout le type de conditionnement et d'évacuation des boues résiduaires : les procédés épuratoires (avec ajouts de réactifs ou non), le degré et le mode de stabilisation des boues (aérobie ou non, thermophile ou non), la déshydratation des boues (séchage thermique ou pas), le stockage (sa durée en particulier), l'ajout d'un chaulage ultime, seront autant de facteurs qui modifieront la charge finale des produits en agents pathogènes ayant conservé leur pouvoir infectieux.

Le troisième facteur de variabilité, à la fois en qualité et en quantité de la charge en agents pathogènes, est la taille de l'agglomération : plus celle-ci sera importante plus la probabilité d'avoir à chaque instant des porteurs d'agents pathogènes sera élevée, associée donc à une certaine constance de présence des pathogènes les plus courants; à l'inverse, plus l'agglomération sera petite, plus les concentrations ponctuelles en agents pathogènes seront élevées; enfin, l'agglomération est facteur de variabilité à travers ses composantes socioculturelles (état sanitaire global de la population, facilité d'accès aux soins, importance du nombre de personnes voyageant fréquemment à l'étranger,...).

Le quatrième facteur de variabilité est la nature des activités non domestiques raccordées au réseau de collecte des eaux usées : présence ou non d'activités industrielles agro-alimentaires (laiteries, abattoirs, équarrissages,...) et présence d'activités de soins (hôpitaux, laboratoires,...).

Le dernier facteur explicatif d'une variabilité des observations de présence et de nature des micro-organismes pathogènes est la difficulté de leur recherche et de leur dénombrement dans des milieux aussi complexes que les produits de l'assainissement. Les agents pathogènes sont, par nature, en beaucoup plus faible quantité que les micro-organismes banaux. La composition physico-chimique des boues rend en effet beaucoup de méthodes de mesures difficiles à mettre en oeuvre de façon totalement satisfaisante.

4- FACTEURS DE LIMITATION DES RISQUES SANITAIRES

Un des principaux facteurs qui va permettre de limiter les risques sanitaires liés à la présence d'agents potentiellement pathogènes dans les sous-produits de l'assainissement est la durée de survie de ces agents dans les produits eux-mêmes puis dans l'environnement. Moins les agents seront

susceptibles de survivre longtemps, moins les risques de les voir infecter une cible seront élevés.

Les données de la littérature sur les durées de survies des principaux agents pathogènes connus dans l'environnement (tableau 3), sont encore plus restreintes et surtout plus hétérogènes que celles concernant leurs concentrations dans les produits. Cette hétérogénéité trouve ses sources dans les difficultés de mesures de ces agents et dans les différences de conditions expérimentales utilisées par les auteurs. Deux tendances se dégagent toutefois de ces données : les agents potentiellement pathogènes sont capables de survies relativement longues dans l'environnement; les facteurs affectant cette survie sont la température, l'humidité, la présence de matière organique, le pH et la microflore présente (phénomènes de compétition/prédation).

Tableau 3 : Quelques exemples de données de la littérature relatives aux durées de survie des agents potentiellement pathogènes dans l'environnement (Elissalde, 1992).

Micro-organismes	T ₉₀ *(jours)		
	dans les eaux	sur le sol	sur végétaux
<i>Salmonella typhimurium</i>	8	22	47
<i>Vibrio cholerae</i>	100		3,5
<i>Poliovirus 1</i>	1,3 à 29	1,5 à 42	0,2 à 3
<i>Ascaris lumbricoïdes</i>	300	24 à 1277	15
<i>Entamoeba histolytica</i>	20	3	2,5

* : temps de disparition de 90% des germes initialement présents

Une condition favorable à la diminution des risques sanitaires lors du recyclage agricole des boues résiduelles sera donc la limitation des possibilités de mise en contact des agents potentiellement pathogènes avec leurs espèces cibles : cela passe donc par une maîtrise des procédures du recyclage agricole. Le tableau 4 présente les voies de contamination possibles et les populations cibles qui peuvent leur être associées.

La rupture de ces voies de contamination suppose la réunion :

- de conditions d'hygiène pour les personnes manipulant les produits,
- de limitations des usages des produits,
- de contraintes sur les modalités de l'utilisation des produits,

- de l'utilisation d'éventuels traitements complémentaires de réduction des charges en agents potentiellement pathogènes, procédés qu'il est possible de regrouper sous le terme de procédés d'hygiénisation des boues (définition proposée par le groupe de travail du CSHPF, 1996).

Tableau 4 : Principales voies de contamination et populations cibles associées.

	Voies d'exposition	Populations cibles
Voies directes	alimentation contacts inhalation (aérosols, poussières)	bétail au champ, animaux sauvages, consommateurs de végétaux ramassés en plein champ; préposés de stations d'épuration, transporteurs, agriculteurs, animaux au champ, promeneurs, ramasseurs de végétaux; préposés de stations d'épuration, transporteurs, agriculteurs, population riveraine, animaux au champ;
Voies indirectes	contacts alimentation irrigation eau de consommation eaux de mer réceptrices	particuliers, vecteurs sauvages; Homme et animaux; bétail, consommateurs de végétaux; Hommes et animaux, desservis par de petites unités de distribution, ou par points d'eau particuliers; consommateurs de coquillages, utilisateurs d'eaux de loisirs

Les procédés hygiénisant mettront tous en oeuvre les facteurs connus pour affecter la survie des agents pathogènes. Il s'agira ainsi des techniques utilisant les montées en température et les modifications de pH et la durée : compostage, digestion thermophile (aérobie ou anaérobie), séchage thermique, chaulage, ... L'efficacité de ces procédés dépend aussi fortement de leurs conditions d'exploitation que de leurs performances de laboratoire, ce qui explique la encore l'hétérogénéité des données bibliographiques relatives à ce point (tableau 5).

5- CONCLUSIONS

Les sous- produits de l'assainissement sont susceptibles de contenir une grande variété d'agents potentiellement pathogènes, au même titre que d'autres sous- produits organiques (déjections animales et sous- produits de la filière agro-

alimentaire par exemple). Il sera toujours difficile de mesurer ce danger. Il faut donc considérer qu'il peut être présent et prendre les mesures nécessaires à la limitation de l'exposition des populations cibles. Ceci passe par la maîtrise de la qualité des produits et par la maîtrise de leur utilisation. Au vu des données épidémiologiques disponibles et des travaux de l'US-EPA (1992), l'application de mesures relativement simples, dès lors qu'elle est réelle, permet de maintenir le risque lié aux agents conventionnels dans des limites tout à fait acceptables.

Tableau 5 : Efficacités relatives des différents types de traitement des boues sur les principaux agents pathogènes conventionnels, en vue de leur hygiénisation (ADEME, ENSP, ENVN, 1994).

Traitements efficaces	
Traitement	Conditions minimales
digestion thermophile	55°C, 10j
stabilisation thermophile	55°C, 10j
compostage bien conduit	60°C, 15 à 30j
chaulage fort (chaux vive ou éteinte)	pH 12, 10j
pasteurisation	70°C, 3h
Traitements peu ou moins efficaces	
Traitement	Conditions minimales
digestion froide	20°C, 30j
stabilisation froide	20°C, 30j
compostage à faible température	40°C, 15 à 30j
conditionnement chimique et déshydratation physico-chimique	-

Pour ce qui est des agents non conventionnels (prions), si les possibilités de présences de ces agents dans les sous-produits de l'assainissement urbain semblent particulièrement faibles (Dormont, 1996), leurs durées de survie dans l'environnement et au cours de traitement sont en revanche très élevée (Dormont, 1997). Bien qu'aucune position officielle n'est encore été prise à ce sujet, il semblerait normal de limiter leurs risques de diffusion dans l'environnement, surtout lorsque l'usage des parcelles ayant reçu les produits est l'alimentation des animaux. Ceci imposerait en particulier d'accepter de ne pas recycler en agriculture les produits organiques issus des unités d'abattage ou d'équarrissage (boues résiduares, mais aussi matières stercoraires par exemple).

Références bibliographiques

ADEME, ENSP, ENVN, 1994. Les germes pathogènes dans les boues résiduaires des stations d'épuration urbaines. Guides et Cahiers techniques.

US-EPA, 1992. Environmental regulations and technology. Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge.

DORMONTD., 1996. Les mystérieux prions. Recherche et santé, n°68, pp13-16.

DORMONT D., 1997. Les agents transmissibles non conventionnels ou prions. Virologie, 1, 1, pp 11-22.

ELISSALDE N., 1992. Les risques sanitaires liés à la valorisation agricole des boues de stations d'épuration. Mémoire de fin d'études, ENSA Rennes.

C.S.H.P.F., 1996. Risques sanitaires liés aux boues d'épuration des eaux usées urbaines. Contribution à l'élaboration des recommandations du Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France. Rapport pour la section des eaux.

Interpréter les teneurs totales en micro-polluants minéraux : fonds pédo-géochimiques locaux et contaminations modérées.

Denis BAIZE - Science des Sols - I.N.R.A. - 45160 Orléans-Ardon

Dans le contexte actuel de l'agriculture (concurrence économique exacerbée, exigences croissantes des consommateurs), la qualité des produits agro-alimentaires prend de plus en plus d'importance. Dans le même temps, les volumes de boues générés augmentent rapidement et leur épandage sur les terrains agricoles est considéré comme la solution la plus simple et la moins coûteuse. D'autres déchets de toutes natures sont également susceptibles d'être épandus sur les sols cultivés ou bien l'ont été dans le passé (composts d'ordures ménagères, boues d'industries alimentaires, boues de papeteries, etc.).

C'est pourquoi il est intéressant de pouvoir reconnaître si un sol cultivé est indemne de contamination ou au contraire s'il a gardé la trace d'apports de métaux potentiellement dangereux et de bien distinguer la part de ce qui est naturel et de ce qui est contamination d'origine humaine. Car les métaux des apports anthropiques sont présents sous des formes nettement plus réactives et entraînent de ce fait des risques très supérieurs aux métaux naturels qui sont le plus souvent immobilisés depuis très longtemps sous des formes chimiques inertes (par ex. oxydes et hydroxydes de Fe ou de Mn).

Pour connaître le degré de contamination d'un sol en zone rurale, il ne suffit pas de confronter ses résultats aux valeurs seuils d'une réglementation (en France, la norme AFNOR U 44-041) ou à des références étrangères. Il faut déterminer d'abord le fond pédo-géochimique naturel local et donc prendre en compte la nature du matériau parental et le type de sol.

Certains sols, par exemple issus de roches fortement minéralisées par des processus géologiques de longue durée, montrent des concentrations naturelles en éléments traces très supérieures aux seuils communément admis. En revanche, certaines valeurs mesurées, quoique inférieures à ces seuils, peuvent susciter l'inquiétude car ils résultent de pratiques agricoles incorrectes ou d'épandages excessifs de déchets divers.

Dans le cadre du programme INRA-Aspitet, trois approches à la fois analogiques et pédologiques ont été utilisées avec succès, toutes basées sur l'interprétation des teneurs totales en Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Fe et Mn dans les sols [1].

Notion de teneur totale - Utilité et inconvénients

Pour atteindre des teneurs véritablement totales, il faut que le processus analytique soit capable d'extraire toutes les formes de l'élément chimique que l'on veut doser, y compris celles intégrées dans les réseaux cristallins des minéraux primaires et secondaires silicatés. C'est pourquoi le laboratoire d'analyses des sols de l'INRA à Arras a opté pour l'association d'acide fluorhydrique et d'acide perchlorique ($\text{HF} + \text{HClO}_4$) pour dissoudre totalement la phase minérale. D'autres laboratoires préfèrent utiliser la mise en solution par l'eau régale, jugée moins contraignante à mettre en œuvre et, elle aussi, normalisée AFNOR [2]. En fait, on observe souvent des différences notables entre les résultats de ces deux méthodes, importantes surtout dans le cas d'échantillons riches en minéraux silicatés et touchant principalement le chrome, le zinc et le plomb [3] [4].

La détermination des teneurs totales en tel ou tel élément trace est une mesure d'un stock à un moment donné mais elle ne permet pas de distinguer les formes chimiques présentes. La répétition dans le temps de ces mesures permet un suivi des teneurs et de constater d'éventuels accroissements. Nous allons voir dans cet article que le raisonnement sur les concentrations totales autorise également l'estimation globale du degré de contamination par les activités humaines, à condition d'être capable d'évaluer avec suffisamment de précision le niveau du fond pédo-géochimique naturel local. Rappelons enfin que la plupart des normes européennes, notamment la norme française AFNOR U 44-041, sont actuellement exprimées sous la forme de teneurs totales.

Capable de déterminer la quantité totale d'un élément, ce type d'analyse ne donne malheureusement aucun renseignement sur sa mobilité dans le sol ni sur sa disponibilité ou sa toxicité vis-à-vis des organismes vivants. Mais les teneurs totales sont faciles à obtenir analytiquement et elles ne posent pas de problème d'interprétation, quel que soit le contexte pédologique de l'échantillon (pH, granulométrie, présence de carbonates, d'oxydes, etc.), à la différence des extractions sélectives ou séquentielles [5] [6].

Notion de fond pédo-géochimique naturel local

Le **fond pédogéochimique naturel local** est la concentration d'une substance dans un horizon de sol, résultant uniquement des évolutions géologiques et pédologiques, en absence de tout apport d'origine anthropique [1]. Il résulte de cette définition que les concentrations mesurées aujourd'hui dans les horizons de surface des sols cultivés ne correspondent plus au fond pédo-géochimique naturel local mais ont été plus ou moins augmentées par divers apports agricoles usuels tels que fumiers, engrais, chaulages, etc.

Dans certaines régions françaises, de grosses anomalies pédogéochimiques naturelles (sols issus de roches particulières, paléosols ou minéralisations correspondant à des phénomènes géologiques) ne doivent donc pas être considérées comme des pollutions mais comme un "fond pédogéochimique local" de niveau élevé dont il reste à déterminer les effets sur la qualité des sols, des eaux et des récoltes.

Variabilité des teneurs totales dans les sols français (tableau I)

Tableau I : Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols français. Valeurs en g/kg pour le fer, en mg/kg pour les autres éléments.

(nb valeurs)	Cd (764)	Co (695)	Cr (791)	Cu (787)	Ni (797)	Pb (790)	Zn (804)	Mn (735)	Fe (767)
minimum	0,01	< 1	< 2	< 2	< 2	2,2	< 5	< 5	0,05
1er décile	0,03	3,1	27,5	5,0	8,7	17,2	31	149	1,27
médiane	0,16	14,0	66,3	12,8	31,0	34,1	80	754	3,24
9ème décile	1,06	32,4	118,0	27,2	78,9	91,5	275	3332	6,47
maximum	6,99	148,0	691,0	107,0	478,0	3088,0	3820	24975	19,16

La grande variété des roches et des types de sols sur le territoire français, explique les très larges gammes des valeurs obtenues dans les horizons de sols. Cette population de 815 échantillons rassemble des horizons de surface mais aussi des horizons plus ou moins profonds, provenant de 385 sols très divers, cultivés ou situés sous forêt (32 départements du centre de la France). Une douzaine d'échantillons notoirement contaminés ont été exclus du *tableau I*.

Conditions d'échantillonnage - Recueil d'informations complémentaires

Les démarches qui vont être présentées ci-dessous s'appuient sur les concepts de la pédologie. L'horizon, couche réputée homogène à l'échelle de l'oeil humain, est le volume élémentaire, pour la description des sols, pour le prélèvement et pour la caractérisation analytique. C'est pourquoi le prélèvement doit toujours respecter les limites des horizons, que ceux-ci soient naturels ou qu'ils résultent de pratiques agricoles (horizon labouré). En outre, on ne doit pas se limiter à l'horizon de surface mais acquérir et prendre en compte également des informations sur les horizons sous-jacents, y compris le matériau parental (roche-mère). Le dosage des éléments traces doit être complété par les analyses pédologiques classiques (granulométrie, pH, CEC, calcaire total, fer total, carbone organique). Enfin, l'interprétation finale des données doit être resituée dans le contexte local : lithologie du matériau parental, histoire géologique, type pédogénétique de sol, nature des horizons prélevés, position dans le paysage et fonctionnement hydrique du sol, pratiques agricoles antérieures, etc.

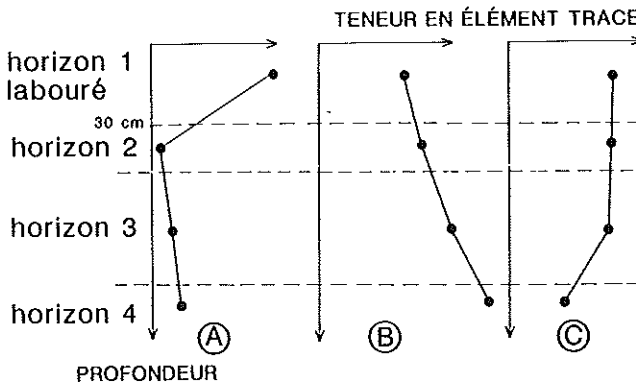
Démarche de comparaison verticale ponctuelle

Il s'agit de comparer les teneurs en éléments traces de l'horizon labouré avec celles des horizons sous-jacents. Lors de cette confrontation, il faut

cependant prendre en compte des différences parfois importantes de teneurs en argile, carbone, fer ou calcaire.

De fortes teneurs en surface contrastant avec des concentrations beaucoup plus faibles mesurées immédiatement en dessous sont plutôt un indice d'apports importants liés aux activités humaines (contamination anthropique - *figure 1 A*). En effet, il n'y a aucune raison pour que cet horizon de surface présente des teneurs en éléments traces beaucoup plus élevées que celles mesurées dans les horizons sous-jacents. Au contraire, dans de nombreux types de sols, les horizons supérieurs sont plutôt appauvris en argile, en fer et en la plupart des éléments traces (Luvisols, Néoluvisols, Planosols). En revanche, de fortes teneurs en surface mais continuant de croître avec la profondeur sont plutôt un argument pour une origine géogène donc naturelle (*figure 1 B*).

Figure 1 : Diagnostic de contamination anthropique par comparaison verticale ponctuelle
A = probabilité d'une contamination de l'horizon de surface. B = profil naturel.



Cette méthode ne nécessite pas de connaissances pédologiques régionales ni générales. Elle est cependant plus délicate pour le plomb et le cadmium car les travaux du programme Aspité [1] ont montré que ces deux éléments sont presque toujours plus abondants dans l'horizon de surface que dans les horizons sous-jacents, sous cultures comme sous forêts. Cela est dû aux affinités particulières de Pb et Cd pour les matières organiques et pour une large part au recyclage bio-géochimique naturel. On notera enfin que cette méthode implique que le contaminant éventuel soit demeuré dans l'horizon de surface, ce qui n'est pas toujours vérifié. Une répartition verticale d'un élément trace telle que sur la *figure 1.C* peut aussi bien correspondre à un état naturel qu'à une contamination ayant migré en profondeur.

Quelques exemples d'application de ces principes à des sols cultivés sont présentés au tableau II. Dans le cas du sol de *Beauvoir*, seule une contamination en cadmium est nettement décelable dans les horizons labourés L1 et L2. Dans le cas du sol GPG2, la teneur en cuivre de l'horizon

de surface est anormalement élevée, résultant d'anciens épandages de produits phytosanitaires sur vignes ou vergers.

Tableau II : Recherche de contamination des sols cultivés par comparaison verticale. Teneurs en éléments traces en mg/kg. Argile et carbone organique en g/100g. CEC en mé/100 g. L1, L2, LE, LS = horizons labourés.

Beauvoir (polder Mont-St-Michel) Cultures légumières. Fertilisation intensive. Sol sableux calcaire.

horizon	Profondeur	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	CEC	A
L1	0-33 cm	0,90	21,5	7,5	6,0	15,2	26	3,4	13,9
L2	33-41 cm	0,57	17,4	3,8	5,2	11,4	20	1,9	6,6
C1	41-69 cm	0,09	15,5	4,6	4,3	16,1	18	1,5	4,5
C2	69-76 cm	0,02	13,5	2,8	3,4	8,7	14	1,0	2,7

GPG2 Environs de Poitiers. Céréaliculture. Sol développé dans des argiles plio-quaternaires, appauvri en surface.

horizon	Profondeur	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	CEC	A
LE	0-25 cm	0,10	22,5	32,1	7,4	20,2	29	4,3	11,0
Sg	40-60 cm	0,17	46,3	8,2	16,1	26,9	38	9,2	32,8
SC	80-100 cm	0,14	49,5	7,1	16,5	26,1	40	10,9	37,0

Vault-de-Lugny (Yonne) – Agriculture. Sol d'altération du calcaire Sinémurien – Quelques kilomètres au nord du Morvan.

horizon	Profondeur	Cd	Cu	Zn	Cr	Ni	Pb	CEC	A
LE	0-26 cm	1,20	18,0	436	71,3	64,5	134	17,0	28,0
EB	26-40 cm	2,50	21,0	783	81,9	78,6	192	23,0	36,0
BTfe	40-58 cm	3,40	23,6	968	89,0	97,1	218	23,7	40,8
BTR	58-90 cm	4,30	25,3	1138	96,2	101,0	245	24,5	42,3

Prévessin Parcelle 1, Pays de Gex (Ain). Calcisol de moraines calcaires [9].

horizon	Profondeur	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	CEC	C	A
LS	0-30 cm	0,21	164	26,3	117	23,3	14,3	2,28	24,5
S	30-60 cm	0,10	175	25,9	126	20,6	9,8	0,75	21,6
S	60-90 cm	0,07	226	34,1	188	23,2	13,3	0,44	32,7

Dans le cas de *Vault-de-Lugny*, le simple constat des teneurs très élevées en Zn, Ni, Pb et Cd de l'horizon labouré ne permet pas de savoir si ce fait résulte d'une contamination par l'homme ou du fond pédogéochimique naturel local. Quand on observe les teneurs des autres horizons, on constate que les teneurs en métaux traces sont de plus en plus élevées avec la profondeur, parallèlement aux teneurs en argile et en fer. Ce fait observé sur un solum est confirmé par la connaissance approfondie de ce type de sol [7]. Il ne s'agit donc pas d'une contamination anthropique mais d'un état naturel.

Enfin, dans le cas du sol du *Pays de Gex*, les fortes teneurs en nickel et chrome de l'horizon labouré LS ne doivent pas être attribuées à une contamination humaine d'autant qu'elles continuent de croître avec la profondeur. Elles sont dues à une anomalie géochimique typique des moraines du plateau Suisse, suite à la présence de minéraux provenant de "roches vertes" ultrabasiques [8] ; [9].

Parmi la population étudiée dans le cadre du programme Aspitet, les quelques contaminations constatées dans les horizons de surface labourés n'ont pas affecté les horizons sous-jacents. Les seuls cas où une migration a pu être décelée sont des sols de vignobles très sableux, très perméables et plusieurs solums du Vexin en ce qui concerne seulement le cadmium.

Démarche de comparaison latérale

Cette approche analogique consiste à comparer l'échantillon sur lequel on s'interroge au même type d'horizon issu du même type de sol, situé sous forêt, à proximité, et censé être intact de contaminations. Encore faut-il vérifier que ce sol forestier de référence n'ait pas été contaminé anciennement par telle ou telle activité humaine (cristallerie, mines). Cette démarche est très proche de celle employée dans les expérimentations agronomiques, qui consiste à comparer une placette ayant reçu tel traitement à une placette voisine n'ayant pas reçu ce traitement et considérée comme "témoin", toutes les autres conditions étant identiques.

Dans un Luvisol Dégradé du sud de l'Aisne, une teneur en Zinc de 162 mg/kg a été mesurée dans l'horizon labouré limoneux. Un sol identique prélevé sous forêt à 800 m de distance présente des teneurs en zinc de 46 mg/kg dans le mince horizon A humifère et 23 mg/kg dans l'horizon Eg immédiatement sous-jacent. La contamination est évidente (épandage excessif de boues d'épuration très chargées en métaux).

A *Iteuil* (Vienne) une expertise a été nécessaire pour comprendre pourquoi on avait dosé 190 mg de Pb/kg et 767 mg de Zn /kg dans l'horizon labouré limono-argileux d'un sol nettement rougeâtre (10 % de fer total dans la terre fine) contenant beaucoup de graviers ferrugineux. Un prélèvement a été réalisé à 100 m de là, sous une futaie de feuillus, entre 10 et 20 cm de profondeur. Il y a été dosé respectivement 145 mg de Pb /kg, et 638 mg de Zn /kg pour une teneur en fer de 8,6 %. Les teneurs en Pb et Zn sont donc plus élevées dans l'horizon labouré que dans celui prélevé sous bois, de même que le taux de fer. Il n'en demeure pas moins que ces valeurs, très élevées et qui pourraient faire penser à une forte contamination anthropique, restent du même ordre de grandeur que celles mesurées sous bois. Dans ce cas, il ne s'agit pas de contaminations mais d'un type de sol extraordinaire (paléosol ferrallitique).

La démarche de comparaison latérale est facile à mettre en oeuvre. Le prélèvement du (ou des) "témoin" est réalisé en même temps que celui de l'horizon à tester. Elle est peu onéreuse (peu de prélèvements et peu d'analyses à faire) mais nécessite d'être capable de reconnaître sur le terrain

type de sol et type d'horizons. Enfin, on peut tester des horizons profonds, pas seulement des horizons de surface.

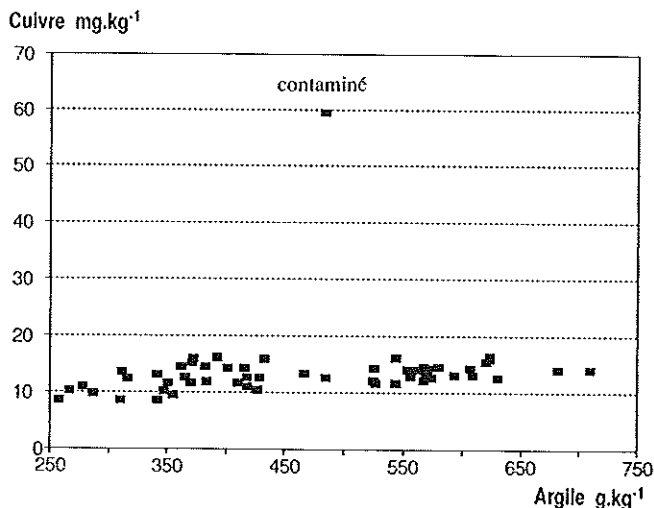
L'approche typologique

Les résultats de l'échantillon à étudier sont comparés avec les données collectées sur le même horizon du même "type de sol" ou "série". Une "série" est définie comme un type de sol existant localement, développé sur une formation géologique précise, et parfaitement caractérisé, aussi bien en ce qui concerne la morphologie du solum (structure, couleur, éléments grossiers, succession et épaisseur des horizons) qu'au plan analytique (granulométrie, pH, CEC, carbone, calcaire, fer). Dans une telle sous-population, très homogène du point de vue pédogéochimique, une faible contamination peut facilement être détectée. Le plus souvent, il suffit d'observer les relations métal/fer ou métal/taux d'argile (*figures 2 à 6*).

Dans les exemples qui vont être proposés ci-dessous, les horizons analysés proviennent de sols cultivés aussi bien que de sols situés sous forêts. Ce sont des horizons de surface mais aussi des horizons semi-profonds (entre 40 et 60 cm), voire très profonds (70 à 120 cm).

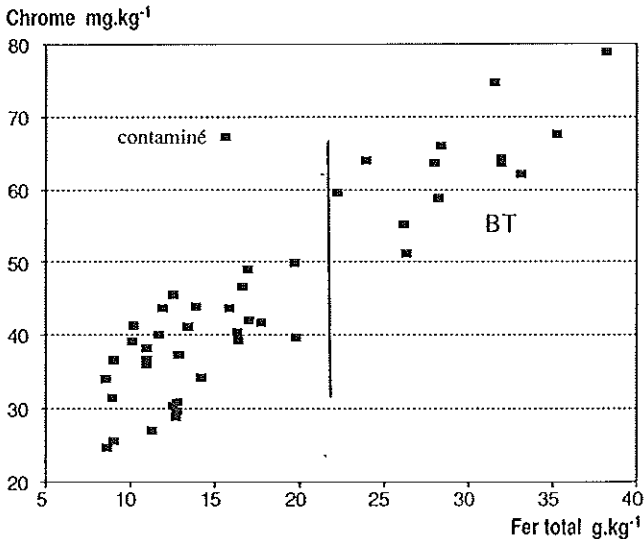
Les "Terres d'Aubues" des Plateaux de Bourgogne sont des sols argileux, rougeâtres, non calcaires, finement structurés, développés à partir des résidus de dissolution des calcaires durs du Dogger. La *figure 2* montre que, parmi les 55 échantillons analysés, un seul se singularise complètement par sa teneur de 59 mg de Cu/kg. Il s'agit d'un horizon de surface labouré, situé à proximité de Chablis, dans un secteur qui portait autrefois des vignes. Bien que la vigne ait disparu depuis plus de 30 ans, l'horizon de surface du sol a gardé la "mémoire" des traitements fongicides par des sels de cuivre !

Figure 2 : Relation fer / cuivre pour 55 horizons de « Terres d'Aubues » des Plateaux de Bourgogne (cultures et forêts - surface et profondeur).



Les Luvisols Dégradés de limons anciens du sud-est du Bassin parisien sont des sols fortement lessivés et qui présentent, en conditions naturelles, des engorgements intenses et durables à faible profondeur et une forte acidité. La *figure 3* montre qu'il existe une excellente relation entre teneurs en chrome et en fer, quel que soit le type d'horizon (éluviés ou illuviaux). Le seul échantillon qui présente une teneur en Cr légèrement plus forte que prévisible (67 mg/kg) correspond à l'horizon de surface d'un essai agronomique d'épandage à fortes doses de boues de station d'épuration [10].

Figure 3 : Relation chrome / fer pour 46 horizons de Luvisols Dégradés de limons anciens du sud-est du Bassin parisien (cultures et forêts - surface et profondeur). Le seuil de 22 g de fer/kg permet de séparer les horizons supérieurs éluviés des horizons BT plus profonds.



Les Luvisols Typiques issus de loess du Vexin ont déjà subi une illuviation notable d'argile et de fer mais ne connaissent pas d'excès d'eau. Les horizons éluviés (appauvris en argile et en fer) ont moins de 25 g/kg de fer et moins de 225 g/kg d'argile. A l'examen de la *figure 4* on voit qu'il existe une assez bonne relation entre Zn et Fe pour tous les horizons mais que 4 ou 5 échantillons présentent des teneurs en zinc plus élevées que ce que la relation générale pouvait laisser prévoir. Après enquête, il s'avère que ces 5 échantillons sont tous des horizons de surface de sols cultivés ayant reçu des épandages de boues ou de composts d'ordures ménagères. Ils se trouvent aujourd'hui plus ou moins contaminés.

La *figure 5* ne montre pas de relation entre concentrations en cadmium et teneurs en argile des horizons. Mais elle permet d'observer que 5 échantillons seulement excèdent 0,50 mg/kg de cadmium. Ce sont tous des horizons de surface labourés et qui ont reçu plusieurs épandages de boues

d'épuration. Pour ce type de sol, des teneurs en Cd supérieures à 1 mg/kg correspondent à une contamination manifeste.

Figure 4 : Relation zinc / fer pour 47 horizons de Luvisols Typiques de loess du Vexin (cultures et forêts, surface et profondeur).

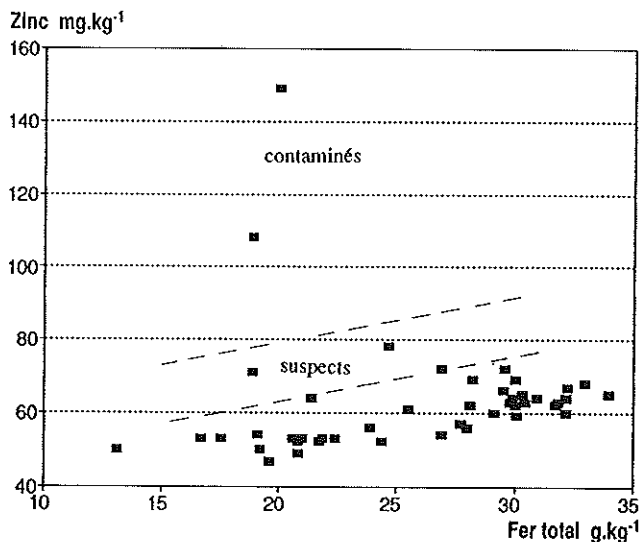
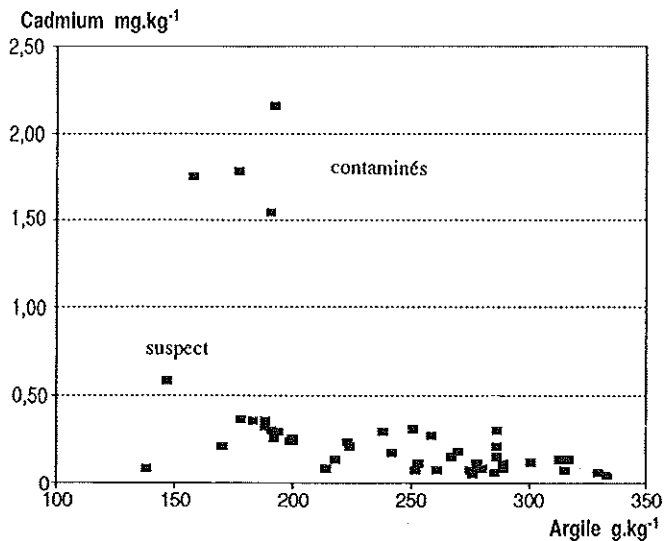
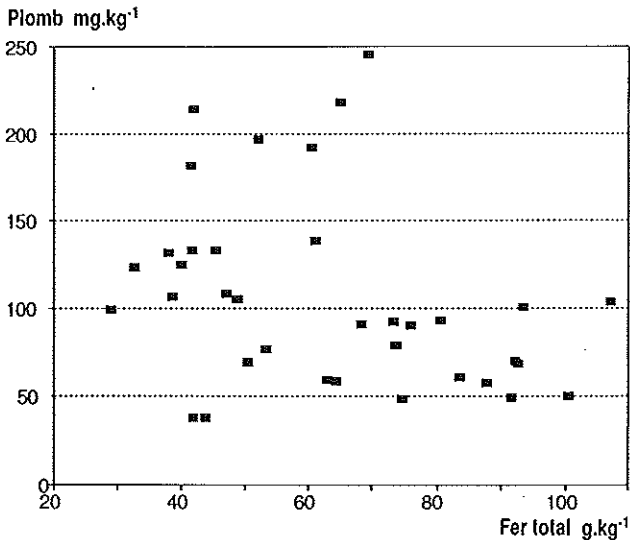


Figure 5 : Diagramme cadmium / taux d'argile pour 47 horizons de Luvisols Typiques de loess du Vexin.



Les "sols marron" sont des sols épais et ferrugineux, développés dans les formations d'altération argileuses du calcaire sinémurien, aux confins nord-est du Morvan [7]. Le calcaire sinémurien sous-jacent a subi des phénomènes de minéralisation très intenses au cours des temps géologiques, sous l'influence de remontées hydrothermales qui se sont produites le long des failles bordant le horst cristallin du Morvan.

Figure 6 : Diagramme plomb / fer pour les « sols marron » de la plate-forme sinémurienne (confins nord du Morvan).



Sur la *figure 6* on observe qu'il n'y a pas de relation entre Pb et Fe. Mais on remarque cependant que les concentrations en Pb sont toutes élevées ou très élevées, variant largement dans une gamme de 40 à 250 mg/kg. Dans cette série de sols particulière, une teneur en Pb de 85 mg/kg n'a rien d'exceptionnel.

Grâce à l'application de cette méthode typologique, on peut affirmer qu'une teneur de 1,55 mg/kg en cadmium dans l'horizon labouré d'un Luvisol Typique du Vexin résulte très probablement d'épandages excessifs de boues d'épuration (*figure 5*); ou bien que 85 mg/kg de Pb dans l'horizon de surface labouré d'un Luvisol rédoxique limoneux de Brie est un indice certain de contamination [11] alors que de telles teneurs mesurées dans un sol « marron » au nord du Morvan sont d'origine naturelle (*figure 6*).

L'approche typologique est la méthode la plus efficace et la plus sensible. Elle présente l'avantage d'être utilisable non seulement pour des horizons de surface mais aussi pour des horizons profonds. Mais elle nécessite de disposer préalablement de bonnes connaissances typologiques et analytiques de chaque "série" à tester, connaissances dont on ne dispose

pas toujours. Il faut être capable de définir le "type de sol" en question par des caractéristiques morphologiques et analytiques précises. Ensuite, sur le terrain, il faut savoir reconnaître que l'on a affaire à tel ou tel type, préalablement défini. Cette approche ne peut donc être employée que par des personnes ayant une bonne formation en pédologie.

Disposer des analyses de 15 à 30 horizons est suffisant (soit un coût de l'ordre de 9 000 à 18 000 F pour 5 à 10 sites distincts). Dans le choix des sites à prélever, outre la vérification qu'il s'agit bien de la "série" de sols désirée, on a intérêt à rechercher les emplacements les moins susceptibles d'avoir été contaminés (même faiblement), d'où la préférence pour des solums forestiers.

Notion de "seuil d'Investigation"

Une valeur seuil de teneur totale fixée dans une norme ayant valeur réglementaire ne peut pas servir pour discriminer héritage naturel d'une part et résultat d'une contamination d'autre part. Elle ne peut servir, au mieux, que de signal d'alerte au dessus duquel des investigations plus détaillées sont nécessaires (cf. ci-dessous). La norme française AFNOR U 44-041 présente plusieurs mérites, entre autres celui d'attirer l'attention des candidats épandeurs sur les propriétés du sol récepteur (notamment le pH) et de limiter les apports de "métaux lourds" dans le temps. Mais les seuils actuellement proposés par la norme AFNOR sont placés en général trop haut pour signaler la plupart des anomalies, qu'elles soient naturelles ou anthropiques.

Les démarches présentées ci-dessus, appliquées dans diverses régions de France, nous ont permis d'élaborer les propositions du *tableau III*. Un **seuil d'investigation** est donc une valeur de teneur totale au-dessus de laquelle une enquête pédologique et agronomique doit être engagée afin de savoir si cette valeur est naturelle ou anthropique et pour évaluer les risques pour la chaîne alimentaire ou l'environnement.

Tableau III : Propositions pour des "seuils d'investigation". Teneurs totales.

	<i>Valeurs seuils de la norme AFNOR U 44-041</i>	<i>"seuils d'investigation" proposés (en mg/kg)</i>
Cd	2,0	0,70
Cr	150	100
Cu	100	35
Ni	50	70
Pb	100	60
Zn	300	150

Évaluation des risques - Études complémentaires - Conclusion

Quand une contamination d'origine humaine est décelée, il faut en évaluer les conséquences. Or il est impossible de fixer une valeur de teneur totale d'un élément qui puisse avoir une signification de risque utilisable pour tous les types de sols, toutes les plantes cultivées, tous les divers usages des sols. La teneur totale considérée seule ne donnant pas une juste idée des

risques encourus, des études complémentaires sont donc indispensables :

- études chimiques et physiques de spéciation ;
- extractions sélectives ou séquentielles "in vitro" censées simuler l'absorption racinaire ou la mobilité ;
- dosage du métal effectivement absorbé dans tel ou tel organe de telle ou telle plante ;
- tests biologiques de toxicité, etc.

Pour utiliser au mieux les trois approches analogiques présentées dans cet article, trois conditions sont nécessaires. 1) L'échantillonnage doit respecter les limites des horizons et ne pas se limiter à l'horizon de surface ; 2) les analyses pédologiques classiques doivent aussi être effectuées, notamment le dosage du fer ; 3) le maximum d'informations doit être collecté à propos du solum étudié (lithologie du matériau parental, type de sol, nature des horizons prélevés, historique de la parcelle, etc.).

Une fois le niveau de contamination estimé et les éléments chimiques en cause détectés, une étude beaucoup plus détaillée pourra être entreprise des formes chimiques présentes et des risques encourus pour tous les compartiments des agrosystèmes (micro-organismes, mésofaune, plantes cultivées, nappes phréatiques).

Références bibliographiques

- 1 Baize D. 1997. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. INRA Éditions, Paris.
- 2 AFNOR, 1996 - Qualité des sols. Recueil de normes françaises. 3ème édition. Paris-La Défense. 534 pages.
- 3 Ciesielski H., 1993 - Problématique du dosage des éléments traces dans les sols. *Chambres d'Agriculture*, numéro spécial "La qualité des sols", supplém. au n° 817, 26-27.
- 4 Baize D., 1997 - Détermination du fond pédogéochimique naturel des sols de la Plaine de la Lys (Nord) et de l'état "normal" des sols agricoles. O.Q.S. Rapport interne.
- 5 Tessier A, Campbell P.G.C. & Bisson N, 1979, *Anal. Chem.*, 51, 844-851.
- 6 Orsini L. et Bermond A., 1993 - Application of a sequential extraction procedure to calcareous soil samples. *Intern. J. Environ. Anal. Chem.* 51, 97-108.
- 7 Baize D. & Chrétien J. 1994 - Les couvertures pédologiques de la plate-forme sinémurienne en Bourgogne. Particularités morphologiques et pédo-géochimiques. *Étude et Gestion des Sols*, 2, 7-27.
- 8 Célarin F., Chatenoux L. et d'Ersu Ph., 1989, *Archives des Sciences*, Genève, 42, 493-498.
- 9 Buatier C. 1994. - Caractérisation et analyse de la mobilité et de la biodisponibilité du nickel dans les sols agricoles. Le cas du Pays de Gex (Ain). ADEME, 180 p.
- 10 Ducaroir J., 1993 - Localisation et état de métaux lourds le long d'un profil de sol soumis à épandage de boues résiduaires. INRA Versailles, 90 p.
- 11 Baize D. et Paquereau H., 1997, - Teneurs totales en éléments traces dans les sols agricoles de Seine-et-Marne. *Étude et Gestion des Sols*, vol. 4, n° 2.

QUALITE DES SOLS ET QUALITE DES PRODUCTIONS AGRICOLES

CONSEQUENCES PRATIQUES POUR LES LABORATOIRES

P. DUC

DIRECTEUR DU CERAAF

(Centre de Recherches et d'analyses agro-alimentaire Franclade)

Résumé

L'approche globale de la production agricole nécessite pour l'agriculteur de cultiver plus économique, plus propre et de fournir aux consommateurs des produits de qualité. Pour obtenir de telles performances, l'agriculteur analysera ses sols et les productions végétales soit en cours de végétation, soit les produits finals.

Le paradoxe des laboratoires sera d'une part de rechercher des éléments, majeurs ou traces, de façon très précise et d'autre part d'accompagner le développement de tests ou d'indicateurs qui permettront une réponse instantanée.

Dans les deux cas, le laboratoire devra mettre en place une démarche assurance qualité - accréditation- pour garantir la fiabilité des résultats. L'accréditation est délivrée par le COFRAC (Comité Français d'Accréditation). La reconnaissance B.P.L. (Bonnes Pratiques de Laboratoire) pourra être aussi recherchée.

I - INTRODUCTION

L'agriculteur développera dans les prochaines années des systèmes de production : (fig. n°1)

- **économiques** car il lui sera nécessaire de produire avec une performance toujours plus élevée pour assurer son revenu.
- **propres** pour fournir aux consommateurs des produits sains, non dangereux pour leur santé (voir dans produits biologiques).
- **favorisant la qualité** du produit , car aujourd'hui, le consommateur recherche non seulement des produits de qualité hygiénique irréprochable, mais encore il veut prendre du plaisir en les consommant, même si les goûts et les couleurs ne se discutent pas.

L'agriculteur a aujourd'hui toutes les cartes pour réussir ce challenge. « L'industriel agricole » qu'il est devenu, ou en train de devenir l'oblige à mettre en place un contrôle qualité, voire même dans certains cas, une démarche d'assurance qualité, bien connue dans l'industrie

- Contrôle de la qualité des sols, et des intrants (boues de station d'épuration), analyses des produits finis ou en cours de végétation.

Pour satisfaire ces exigences, les laboratoires devront être capables de répondre aux attentes des agriculteurs.

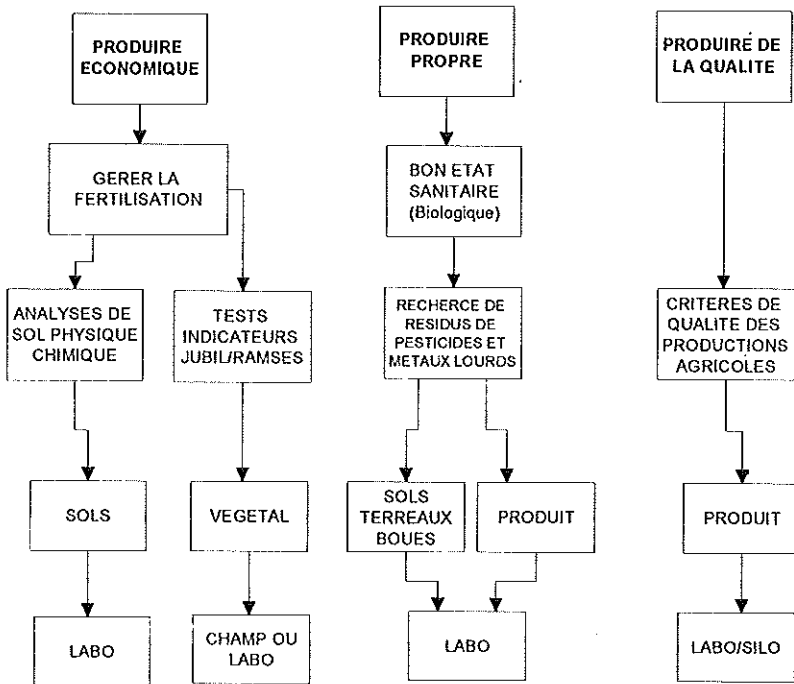


Fig. 1 - L'APPROCHE GLOBALE DE LA PRODUCTION

II - LE PARADOXE DES LABORATOIRES

Ce qui se dessine aujourd'hui, c'est l'apparition de deux exigences formulées par les agriculteurs, la première serait :

- De bénéficier de tests rapides, de type indicateurs de pilotage, donnant des réponses rapides, voire instantanées permettant une correction immédiate de la fertilisation. C'est le cas du pilotage de la gestion des apports d'engrais azotés par les outils **JUBIL** ou **RAMSES**. Mais, pour être crédible, ces outils doivent être fiables.

- La seconde serait d'aller de plus en plus loin dans la recherche de molécules variées même à l'état de trace - analyses des résidus de produits phytosanitaires, recherche de métaux lourds - dans les sols et dans les produits importés tels par exemple les boues de station d'épuration, déchets...

Ces recherches nécessitent en général des moyens analytiques importants et performants, et l'utilisation de techniques de pointe (Torche plasma, Absorption atomique équipée de four, Chromatographie en phase gazeuse ou liquide).

Fournir à l'agriculteur un résultat fiable a toujours été la préoccupation des laboratoires qui, rappelons-le, se sont regroupés, il y a 20 ans, au sein du **GEMAS** (Groupe d'Etude Méthodologique d'Analyses des Sols) pour l'organisation de circuits d'analyses et l'harmonisation des méthodes d'analyses. Ces circuits sont organisés aujourd'hui par le **BIPEA** - Bulletin Interprofessionnel d'Etude Analytique - et servent à l'agrément du Ministère de l'Agriculture.

Mais, aujourd'hui, la recherche permanente dans l'amélioration de la qualité analytique pousse à aller encore plus loin.

La maîtrise de la fiabilité du résultat doit être professionnelle. Elle requiert la mise en place d'un système d'assurance qualité qui peut être sanctionné par l'accréditation **COFRAC** (Comité Français d'Accréditation).

III - L'ASSURANCE QUALITE : C'EST QUOI ?

C'est la mise en place, dans le laboratoire, d'une organisation visant à donner confiance aux clients. C'est leur donner l'assurance que tout sera mis en oeuvre pour que les analyses soient réalisées conformément à leur exigence. L'assurance qualité c'est la volonté de faire bien du premier coup, volonté de limiter les dysfonctionnements et les anomalies : c'est viser le **ZERO DEFAULT**.

Mais, « *faire de la qualité* » c'est pas mal, « *faire savoir qu'on fait de la qualité* » c'est bien, mais « *être reconnu pour faire de la qualité* » c'est mieux.

Or la reconnaissance de la qualité s'établit par la concordance entre des actions préétablies dans le laboratoire et un référentiel (CEN : 45001 pour les laboratoires et le doc 1002 du COFRAC).

Cette concordance est vérifiée par un audit pour s'assurer que les actions préétablies sont conformes aux référentiels et appliqués dans le laboratoire.

La reconnaissance de cette compétence c'est l'accréditation délivrée par le **COFRAC**.

3.1 Présentation rapide du COFRAC

Il existe en France un système unique d'accréditation, eurocompatible, facilitant la reconnaissance des signes de qualité en Europe. L'accréditation permet aux laboratoires d'être crédibles (même à l'échelon international).

Les missions du COFRAC sont :

- d'organiser l'accréditation en France.
- de développer la reconnaissance mutuelle pour éviter que les laboratoires (ou entreprises) exportatrices n'aient à se faire accréditer dans chaque pays où ils sont présents.

- de développer une structure pour la protection, le développement et la promotion des signes de qualité et ainsi développer la confiance des acheteurs.
- enfin, représenter la France dans les instances européennes d'accréditation tel E.A.C. (European Accreditation of Certification) ou E.A.L. (European Accreditation of Laboratory).

3.2 Les signes de reconnaissance

Il existe 3 grands types de signes de reconnaissance :

- l'accréditation et les agréments,
- la certification,
- les labels.

Le label est une marque spéciale, créé par un syndicat ou un groupement professionnel, apposée sur un PRODUIT pour attester l'origine ou les conditions de fabrication. Les laboratoires ne sont pas concernés par ce signe de reconnaissance là.

Les signes les plus utilisés par les laboratoires sont l'ACCREDITATION et les AGREMENTS.

L'accréditation est définie par le COFRAC, les agréments en fonction des organismes de tutelle. Citons par exemple l'agrément du Ministère de l'Agriculture pour les analyses de sols ou la reconnaissance B.P.L (Bonne Pratique du Laboratoire) délivré par le G.I.P.C. (Groupement Interministériel des Produits Chimiques).

3.3 Les référenciels

Les référenciels sont constitués de textes, normatifs, de portée internationale de préférence.

En France, le système d'accréditation est unifié depuis la création du COFRAC. L'accréditation des laboratoires d'analyses relève de la section ESSAIS du COFRAC.

L'accréditation repose sur une double exigence :

- le respect du document 1002 du COFRAC qui reprend et commente la norme CEN 45001. C'est la démarche assurance qualité.
- les exigences techniques du programme d'accréditation pour lequel le laboratoire souhaite la reconnaissance.

En effet, l'accréditation ne reconnaît la compétence technique que pour certaines déterminations définies dans le programme d'accréditation.

En aucun cas l'accréditation porte sur l'ensemble de l'activité du laboratoire. Il existe plus de 120 programmes ; celui portant sur l'analyse de sol est le programme n° 96, celui sur les contaminants porte le numéro 99.

IV - ACCREDITATION : CA CONSISTE EN QUOI ?

Un laboratoire est une entreprise qui fournit à des clients (internes ou externes) une prestation analytique.

Pour que les résultats soient fiables, le laboratoire doit :

- disposer de personnel en permanence bien formé - formation initiale mais aussi formation continue.

- disposer de locaux adaptés où les salles de préparation, d'extraction ou de dosage soient séparés pour éviter toute pollution.

- disposer de matériels contrôlés en bon état de fonctionnement - développement de la maintenance préventive - La métrologie tient une place importante dans la maîtrise des équipements analytiques et des instruments de mesure. C'est un des points les plus difficiles à mettre en oeuvre dans le laboratoire car souvent cet aspect est nouveau.

- disposer de produits chimiques dont la pureté est adaptée à l'analyse mais aussi et surtout qui a fait l'objet d'un contrôle.

Enfin, une organisation qui assure le fonctionnement correct de l'entreprise et l'application des procédures précédemment décrites. La gestion des réclamations clients, des anomalies et dérogations, les revues du système qualité sont autant de facteurs de progrès pour le laboratoire. L'ensemble du système doit être décrit et renseigné ce qui nécessite l'écriture de toutes les procédures d'organisation et de fonctionnement.

Dans un système qualité, il faut prouver ce que l'on fait, et, pour cela, la traçabilité doit être parfaitement assurée, de l'arrivée des échantillons à l'envoi des résultats, ce qui nécessite d'écrire tout ce qui se passe dans le laboratoire. L'ensemble des documents constitue le système documentaire.

Le système documentaire comprend :

- le manuel d'assurance qualité qui décrit l'ensemble de l'organisation et les dispositions générales prises par le laboratoire.

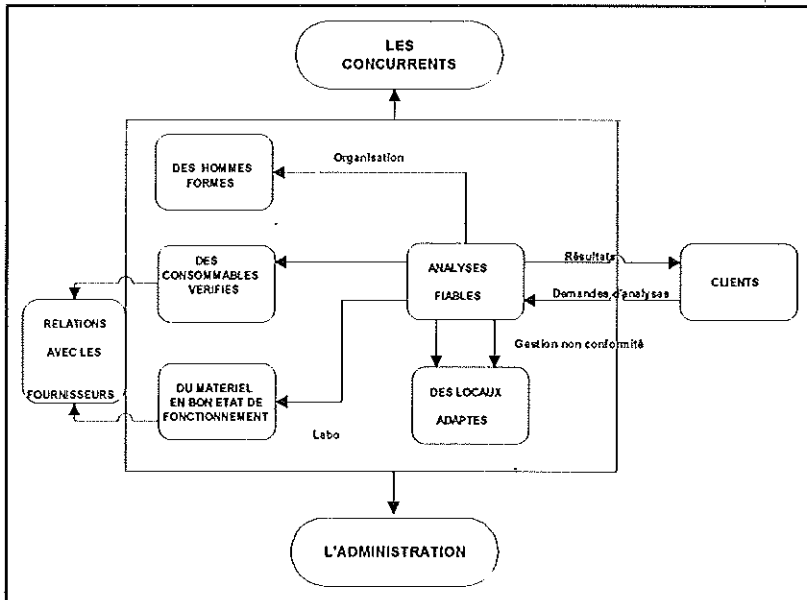
- les plans qualité, documents annonçant les modes opératoires, les ressources, les séquences d'activité, traitement de la demande d'essai.

- les instructions opératoires, qui sont des documents de prescription définissant les modalités de prise en compte de chaque tâches, par exemple mode opératoire.

- les documents d'enregistrement permettant d'assurer la traçabilité des conditions analytiques.

La mise en place du système d'assurance qualité dure de 12 à 18 mois dans la plupart du temps, selon les moyens mis à disposition par la direction.

Fig n°2 : Fonctionnement du laboratoire



L'audit des laboratoires

L'accréditation n'est accordée qu'après un audit. L'audit est un « examen méthodique et indépendant en vue de déterminer si les activités et les résultats relatifs à la qualité satisfont aux dispositions préétablies et si ces dispositions sont mises en oeuvre de façon efficace et apte à atteindre les objectifs ». Ref norme ISO 50.120.

Une équipe d'auditeur, composée d'un qualicien et d'un expert technique, procédera à l'examen méthodique. Ils consulteront, éprouveront, critiqueront les documents : Manuel qualité, Plans qualités, Instructions opératoires, Document d'enregistrement... Ils vérifieront les dispositions décrites écrites et leurs applications, et se prononceront sur la compétence, l'efficacité et l'aptitude du laboratoire à fournir les résultats dignes de confiance.

Un rapport d'audit énoncera les non-conformités relevées et les actions correctives que le laboratoire envisage de mettre en oeuvre. C'est sur ce rapport que la commission sectorielle essais du COFRAC délivrera ou non l'accréditation. L'indépendance des auditeurs du COFRAC garantit l'impartialité du jugement.

Après ce très long parcours, l'accréditation n'est pas pour autant acquise définitivement. La reconnaissance est accordée pour une durée de 3 ans avec un audit de contrôle dès la première année et un audit de renouvellement au bout des 3 ans.

V - L'ASSURANCE QUALITE : A QUOI CA SERT ?

L'accréditation permet d'avoir la confiance des clients (ou des usagers) du laboratoire, c'est aussi un formidable facteur de progrès selon une réaction en chaîne décrite dans la figure n° 3.

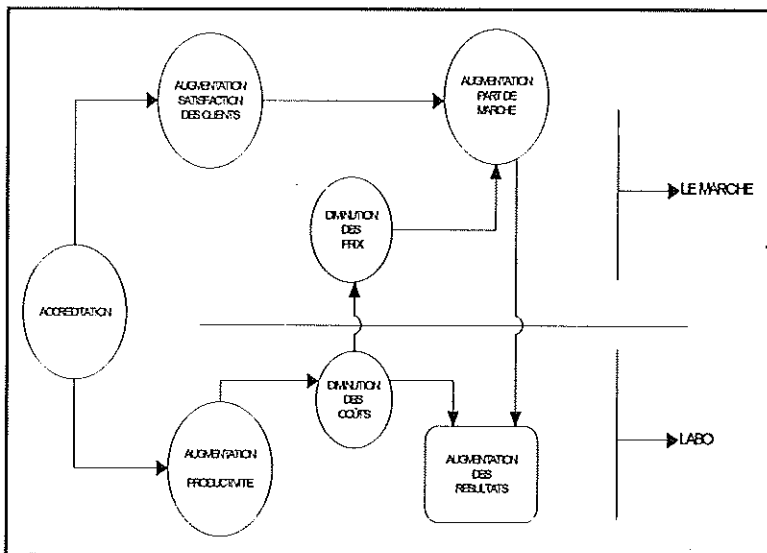


Fig. n°3 - La réaction en chaîne de la qualité.

VI - CONCLUSION

Quelle que soit l'évolution des techniques d'analyses, les laboratoires d'analyses de Terre de demain devront :

- s'adapter à l'ambiguïté apparente, entre la recherche d'analyses de plus en plus pointues et la demande de test in situ, à réponse rapide pour faciliter le pilotage de certaines pratiques de fertilisation.

- développer une politique d'assurance qualité pour que demain encore plus qu'aujourd'hui, la confiance s'établisse avec les clients ou usagers des laboratoires. C'est sûrement sur ce point que les efforts des laboratoires devront être les plus importants.

- enfin, et nous l'avons à peine évoqué dans la première partie sur l'approche globale, ne pas dissocier l'analyse de terre des autres analyses-végétaux, produits pour tenir compte des exigences qualitatives des consommateurs.

BIBLIO

- HIPOCITE. G. 1995 - les signes de reconnaissance de la qualité C.R.
Acad.Agric. Fr, 81, n°6, p.27.

- AFNOR. N.F. 50 120 - qualité et vocabulaire

- Compétences - bulletin COFRAC.

Un exemple de démarche d'expertise agro-environnementale : Les travaux d'Aspach

D. ROBIN, C. BITAUD, B. BOURRIE, J.Y. BALITEAU, L. FAEDY

Pôle Agro-Environnemental d'Aspach, rue de la Station, 68700 ASPACH-LE-BAS

Résumé : La démarche du Pôle d'Aspach pour l'expertise agro-environnementale des sous-produits recyclables en agriculture s'appuie sur trois groupes d'analyses et tests. Dans un premier temps, les produits sont *caractérisés* par une analyse complète et un fractionnement biochimique des matières organiques. Dans un second temps, l'*innocuité* des produits pour l'environnement est évaluée grâce à des tests de lixiviation, de toxicologie et d'écotoxicologie aquatique, de phytotoxicité globale et de bioaccumulation des éléments traces. Des études de bioaccumulation sont également conduites à long terme en plein champ. Enfin, l'*efficacité* agronomique des produits est mesurée par une série de tests en conditions contrôlées et d'études en plein champ permettant de connaître la valeur amendante des produits, la cinétique de minéralisation des éléments nutritifs et leur biodisponibilité pour la culture.

INTRODUCTION

En raison de la diversité des sous-produits résiduels valorisables en agriculture, il convient d'étudier dans chaque cas particulier les caractéristiques des produits en termes de respect de l'environnement et d'efficacité agronomique. La démarche proposée ici pour ce type d'expertise agro-environnementale consiste en une **CARACTERISATION** analytique et biochimique des produits, puis en une évaluation de leur **INNOCUITE** pour l'environnement, la plante et la chaîne alimentaire, et en une mesure de leur **EFFICACITE** agronomique.

1. CARACTERISATION DES PRODUITS

1.1 Connaissance analytique du produit

L'analyse des produits doit être effectuée selon des méthodes normalisées, qui seules permettent d'établir des comparaisons. Toutefois, il convient de souligner que les résultats de ces analyses n'ont de valeur que si l'échantillon est représentatif et s'il n'a subi aucune contamination (notamment micropolluants métalliques ou organiques, organismes pathogènes), en particulier lors de son conditionnement et de son broyage.

L'analyse préalable du produit permet d'apporter un certain nombre d'informations directement exploitables pour les préconisations d'usage, comme la siccité du produit, et d'orienter la suite de l'étude. Ainsi, la mesure du pH est une première indication de la valeur neutralisante ; la teneur en matière organique et son C/N sont une approche de la valeur amendante du produit. De même, la teneur en éléments majeurs permet d'évaluer le potentiel de fourniture d'éléments nutritifs à la plante. Cette information doit être complétée par la connaissance de la cinétique de minéralisation des éléments et de leur biodisponibilité, mais elle permet d'orienter ces études vers le ou les éléments les plus pertinents dans le cas du produit étudié.

1.2 Caractérisation Biochimique de la Matière organique (CBM)

S'inspirant des techniques de fractionnement biochimique décrites par Van Soest et Wine (1963), Djakovitch (1988) et Linères et Djakovitch (1993) proposent de décrire les matières organiques classiquement utilisées en agriculture en fonction de leur composition biochimique, en envisageant quatre classes de composés : fraction soluble, composés hémicellulosiques, composés cellulosiques et composés lignifiés. Elargie et adaptée à l'ensemble des produits utilisables en agriculture, et s'appuyant sur un large référentiel, la caractérisation biochimique des matières organiques (CBM) permet de décrire chaque produit en mesurant la proportion d'éléments labiles (fraction soluble et hémicelluloses) et d'éléments stables (celluloses et lignine). Les éléments labiles peuvent être considérés comme sources à court ou moyen terme d'éléments fertilisants, et les éléments stables sont générateurs d'humus. Cette analyse est ainsi proposée pour la classification des produits en « type engrais organique » ou « type amendement organique ». Elle se révèle particulièrement pertinente pour adapter l'usage aux caractéristiques du produit, notamment pour les produits complexes (mélanges, composts, boues, etc...). Le test CBM permet également d'évaluer le potentiel humique, en s'affranchissant dans une première approche des expérimentations de longue

durée en plein champ classiquement utilisées pour la détermination du coefficient isohumique (Robin, 1997).

On observe (Fig. 1) que les produits organiques d'origine animale et les boues diverses possèdent un potentiel humique plus faible que les produits organiques d'origine végétale. On peut également mettre en évidence l'effet global du compostage sur la composition biochimique des fumiers : cette opération conduit à une augmentation de la proportion de fractions stables par rapport aux fractions labiles. Ces résultats correspondent à des notions déjà bien connues en pratique, mais la méthode proposée permet une quantification et donc un classement des produits sur un critère objectif.

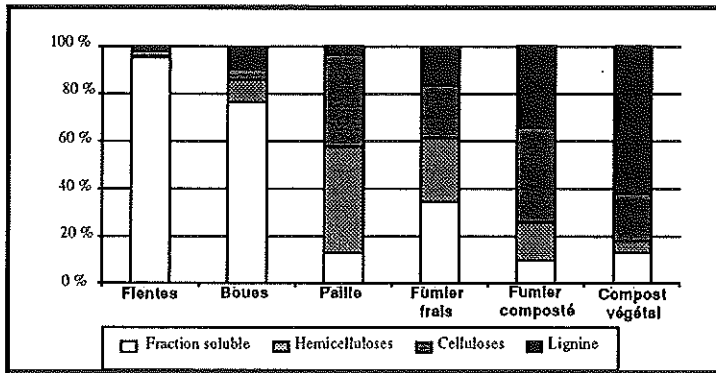


Figure 1 : Caractérisation Biochimique des Matières organiques (CBM) de six produits organiques classiquement utilisés en agriculture.

2. EVALUATION DE L'INNOCUITE DES PRODUITS

2.1 Environnement : sols et eaux

Une première information importante concernant l'innocuité d'un produit pour l'environnement est sa teneur en micropolluants métalliques. Cette mesure permet en particulier de vérifier la conformité du produit à la norme NF U 44-041, mais aussi de préciser les risques de toxicité liés à une abondance particulière de l'un ou l'autre des éléments traces, qu'ils figurent ou non dans la norme.

L'appréciation de l'innocuité d'un produit nécessite la prise en compte des risques d'entraînement d'éléments solubles ou solubilisables, ainsi que des interactions qu'ils peuvent développer avec le sol. Pour cela, on procède à des tests de lixiviation ou de percolation sur colonne. Ces tests mettent en contact l'eau et le produit, en présence ou non de sol selon la technique choisie. Le dosage des éléments étudiés (nitrates, micropolluants organiques ou métalliques) dans les lixiviats extraits ou percolés permet de mesurer la mobilité des éléments toxiques et d'estimer les risques de transfert, notamment vers les nappes phréatiques.

Il est également possible de réaliser différents tests de toxicologie et d'écotoxicologie destinés à vérifier l'innocuité des produits pour le milieu aquatique. Les organismes classiquement étudiés (micro-crustacés, algues, bactéries) correspondent aux premiers maillons de la chaîne trophique. Ce ne sont toutefois pas des organismes édaphiques, et des travaux actuellement en cours dans différents laboratoires devraient permettre de valider des tests écotoxicologiques spécifiquement adaptés aux organismes des sols agricoles.

2.2 Agronomie : phytotoxicité globale

En matière de micropolluants, la norme 44-041 impose l'analyse de certains éléments trace métalliques et de quelques composés organiques. Toutefois, les sous-produits susceptibles d'être valorisés en agriculture peuvent éventuellement contenir d'autres types de micropolluants, pouvant affecter la croissance des plantes. Il convient donc d'effectuer des tests de phytotoxicité globale, permettant de prendre en compte l'ensemble des risques potentiels pour la culture. Les tests présentés ici sont effectués sur orge, préféré au maïs qui semble peu sensible à la toxicité environnementale (Fletcher *et al.* 1985). Les tests sont effectués sur sable afin de maximiser l'effet produit, ou bien sur sol pour prendre en compte le pouvoir tampon d'un substrat spécifique. Plusieurs doses d'apport du produit sont testées, sur la base de une fois, 2,5 fois et 5 fois l'équivalent de la dose épandue au champ, laquelle varie principalement en fonction de la siccité du produit (en général de 10 à 30 t MS par ha).

Le test de germination, adapté de la norme NF X 31-201 pour l'étude des substances chimiques, permet de mettre en évidence d'éventuels effets d'inhibition sur la germination. Le produit est mélangé intimement au substrat (sol ou sable), puis le mélange est laissé au repos 48 h sous hotte aspirante pour permettre un éventuel dégagement d'ammoniac (observé en particulier avec les produits riches en azote). Après le semis (semences certifiées), le dispositif est placé à l'obscurité en conditions contrôlées (phytotron) pendant 4 jours, au terme desquels on effectue un comptage des germinations.

Le test de croissance foliaire, adapté de la norme NF X 31-202, mesure les effets du produit sur le rendement. Les semences non germées à l'issue de la phase de germination sont remplacées à partir de pépinières préparées dans les mêmes conditions (date, température, hygrométrie, doses d'apport du produit) que les enceintes expérimentales. On dispose ainsi pour l'étude de la phase de croissance d'un même nombre de plantules à des stades identiques pour les différentes modalités de traitement du sol. La croissance s'effectue en conditions contrôlées. Après 17 jours, les plantes sont récoltées pour la mesure de la production de biomasse.

Enfin, certaines toxicités affectent prioritairement le système racinaire (Juste, 1983). Le test de croissance racinaire permet de mettre en évidence des effets phytotoxiques susceptibles de perturber le rendement sur un plus long terme. Ce test consiste à mesurer la longueur de la plus longue racine et la matière sèche racinaire totale de plants d'orge prégermés placés en contact avec le produit étudié pendant leur phase de croissance.

2.3 Transfert vers la chaîne alimentaire

Au delà des nécessaires préoccupations concernant la qualité de l'environnement et l'absence d'effet inhibiteur sur la croissance des plantes cultivées, il est également légitime et important d'évaluer les risques de transfert de polluants dans la chaîne alimentaire par des tests de bioaccumulation des éléments traces.

Le test en conditions contrôlées utilise une culture de Ray Grass en serre, avec apport de solution nutritive permettant une croissance optimale des plantes. Trois coupes permettent de simuler sur dix semaines une saison agricole intensive. A chaque coupe, les plantes sont pesées, séchées et analysées. La teneur en éléments étudiés permet de calculer un coefficient apparent de bioaccumulation et d'en suivre l'évolution au cours de la culture.

Conjointement à ces tests, des études plus fondamentales sont conduites avec divers partenaires (Ministère de l'Agriculture, MVAD, ADEME, INRA) pour améliorer la connaissance des effets à long terme en conditions naturelles des apports de micropolluants métalliques. En particulier, un dispositif établi sur le domaine expérimental d'Aspach permet de comparer le rendement et la mobilisation de différents éléments trace métalliques par une culture de maïs, en présence ou non de chaux et de matière organique. Dans le cas du Cadmium, l'apport initial est de 30 kg/ha, correspondant à 3 t MS par ha et par an pendant plus de trois siècles d'une boue légèrement supérieure à la norme.

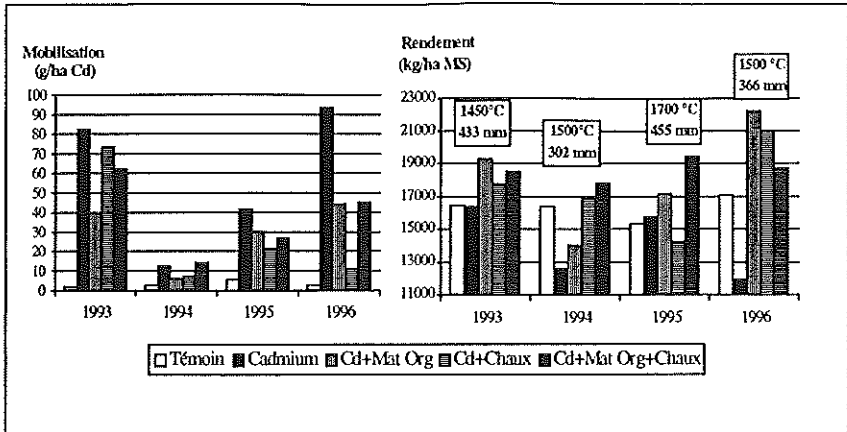


Figure 2 : Culture du maïs en présence de Cadmium : rendement, mobilisation, climat.

Les résultats obtenus au cours des quatre premières années de culture (Fig. 2) montrent que la mobilisation du cadmium varie considérablement selon les années, pouvant atteindre près de 100 g/ha en 1996 contre moins de 20 en 1994, pour le traitement Cd seul. Toutefois, l'effet dépressif sur le rendement ne s'observe qu'en 1994 et 1996, années ayant présenté une pluviométrie particulièrement faible (302 et 366 mm, la moyenne trentenaire étant de 437 mm). La mobilisation de Cd étant faible en 1994 et élevée en 1996, il semblerait que l'expression de la toxicité du cadmium soit liée principalement à la sensibilité de la plante (stress hydrique), plus qu'aux quantités effectivement absorbées. On constate par ailleurs que l'apport de matière organique conduit à une diminution systématique de la mobilisation du Cd, ce qui est conforme aux données générales de la littérature, ainsi qu'à une augmentation du rendement. Les conséquences de l'apport de chaux sont similaires, exception faite de l'année 1995, avec toutefois un effet croissant de l'efficacité du chaulage sur la diminution de la mobilisation.

3. EVALUATION DE L'EFFICACITE DES PRODUITS

3.1 Tests d'efficacité en conditions contrôlées

Dérivé de la technique d'incubation en conditions contrôlées décrite par Recous *et al.* (1995), le test de minéralisation potentielle permet de connaître la cinétique de minéralisation de l'azote d'un produit organique au cours de sa décomposition dans un sol, élément décisif pour le choix de la date

d'épandage du produit dans la perspective d'un raisonnement de la fertilisation azotée. Dans l'exemple présenté (Fig. 3), le compost de déchets verts a un comportement semblable à celui du sol témoin, tandis que la boue de station d'épuration libère d'abord de petites quantités d'azote, puis présente un important arrière effet à partir du 10^{ème} jour d'incubation (20 à 25 jours en conditions réelles pour une température moyenne du sol de 10°C). Le maximum de fourniture d'azote au sol est atteint après 25 jours d'incubation, soit environ 2 mois en plein champ. Ce résultat conduit à proposer un apport sur une culture comme le maïs, dont la courbe de mobilisation indique des besoins importants environ deux mois après le semis (Bourrié, 1995) ; on conseillerait ainsi dans le Nord-Est un épandage vers le 10 Avril pour un semis début Mai.

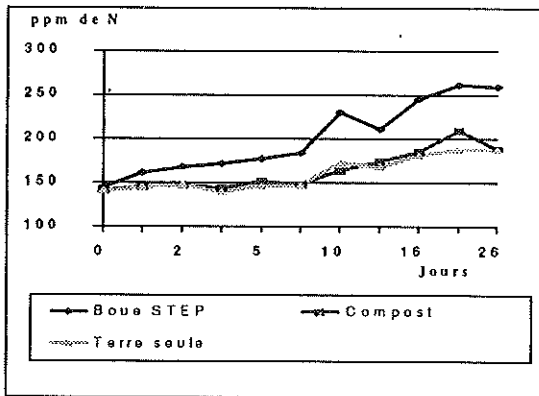


Figure 3 : Minéralisation de l'azote d'un sol et de deux produits organiques.

Le test de biodisponibilité des éléments nutritifs permet, au delà des quantités libérées par le produit, de connaître les quantités d'éléments effectivement disponibles pour la plante. Pour l'azote, il prend ainsi en compte les réorganisations sous couvert végétal par le biais des rhizodépôts. Ce test, utilisable pour les différents éléments majeurs, est directement adapté de la méthode Chaminade pour la mesure de la biodisponibilité des éléments fertilisants (Chaminade, 1964). On peut ainsi par exemple comparer la biodisponibilité du phosphore de différents produits à celle d'un engrais minéral de référence (Fig. 4). On observe une grande variabilité de la disponibilité selon les produits étudiés, ce qui conduit à moduler les conseils de dose d'épandage en fonction du niveau de fertilisation souhaité.

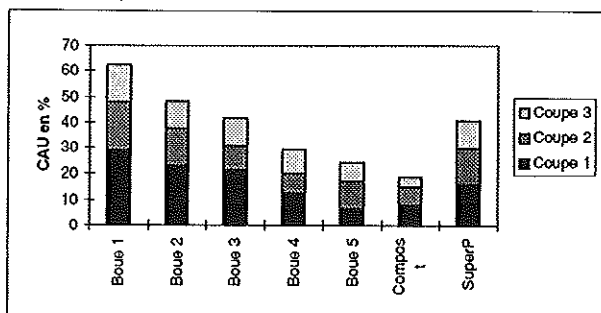


Figure 4 : Evolution des Coefficients Apparents d'Utilisation du phosphore au cours des trois coupes d'une microculture de Ray Grass pour 5 boues, un compost et un engrais minéral.

L'étude de la valeur amendante d'un produit résiduaire stabilisé par un amendement minéral calcique ou calco-magnésien peut être basée sur les analyses classiques des amendements minéraux : CaO total, teneur en CaCO_3 , valeur neutralisante et solubilité carbonique. On peut également mesurer l'effet correctif d'un produit sur le pH d'un sol donné en pratiquant une incubation du sol en présence du produit étudié ; les valeurs sont comparées à l'effet d'amendements minéraux classiques. L'effet sur le pH du sol de la boue présentée ici (Fig. 5) est comparable à celui du CaCO_3 .

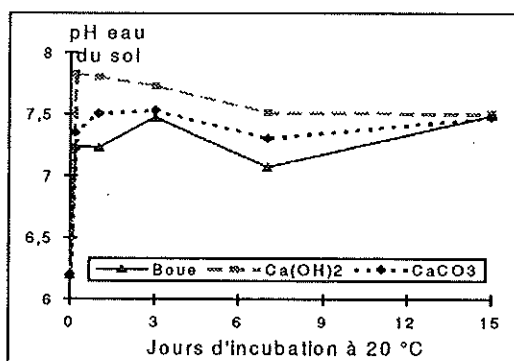


Figure 5 : Effet sur le pH d'un sol d'une boue et de deux amendements minéraux classiques.

3.2 Etudes d'efficacité en plein champ

Les études d'efficacité en plein champ permettent de comparer les effets de la fertilisation organique aux effets de différents niveaux de fertilisation minérale sur des paramètres tels que le rendement, la mobilisation des éléments

nutritifs, leur biodisponibilité. Elles sont effectuées sur différents types de sols et pour plusieurs types de cultures. L'essai présenté ici est mis en place sur un sol argilo-limoneux, à Château-Salins (54), sous culture de maïs ensilage.

Le traitement T1 correspond à un apport de boue de station d'épuration à une dose de 2,5 t MS/ha, couvrant la totalité des besoins théoriques en azote de la culture (200 u). Les trois fertilisations minérales étudiées en comparaison sont : couverture de 50 % (T2), 75 % (T3) et 100 % (T4) des besoins de la culture. A différents stades de la culture, on détermine pour chaque traitement la mobilisation de l'azote (Fig. 6). On constate ici qu'à la récolte, dans les conditions climatiques de 1996 favorables à la minéralisation des matières organiques, la mobilisation de l'azote n'est pas significativement différente d'un traitement à l'autre. On constate par ailleurs que les rendements ne sont pas non plus très différents selon les traitements, ce qui suggère une importante fourniture d'azote par le sol

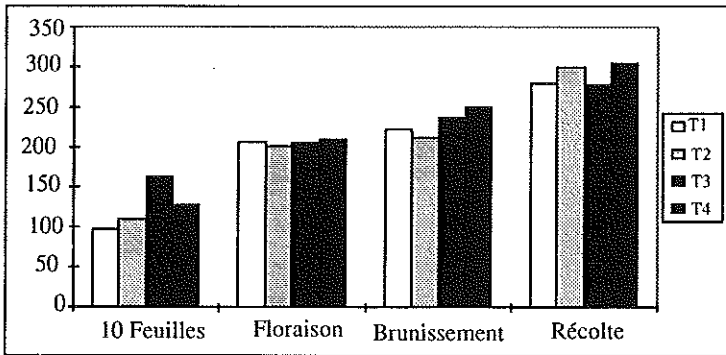


Figure 6 : Mobilisation de l'azote par le maïs pour différents niveaux et modes de fertilisation

Les résultats obtenus en sol de craie en 1995 et 1996 montrent que pour ces deux années, le CAU de l'azote des engrais minéraux peut être inférieur à 20%. Ces variations soulignent l'intérêt de conduire ces études sur plusieurs années et différents types de sols, en considérant plusieurs modèles de rotation (monoculture de maïs, colza-blé-orge, betterave-blé-blé...).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'ensemble des analyses et caractérisations relatives à l'efficacité et à l'innocuité des produits utilisables en agriculture constitue, avec l'expérimentation *in situ* en plein champ, un exemple de démarche complète

et pratique de l'expertise nécessaire dans ce domaine. Cette expertise donne aux utilisateurs des réponses concrètes en termes d'usage, de doses et de risques potentiels pour chaque type de produits. En complément des outils développés au cours des dernières décennies pour raisonner la fertilisation (analyses des sols et des végétaux, diagnostic de carences, etc...), cette démarche permet d'aborder l'utilisation des produits résiduels avec des outils scientifiques issus de la recherche agronomique. Adaptés à l'usage agricole, les tests agro-environnementaux sont appelés à répondre à la fois aux questions posées par l'agriculture moderne et aux questions environnementales relatives au cadre de vie de chaque citoyen. Ces outils doivent être améliorés et développés, notamment dans le domaine de l'impact des matières organiques sur la microflore du sol, sur la structure physique du sol, ainsi que sur la qualité des productions agricoles. Ils nécessitent également un important travail d'harmonisation permettant d'aboutir à une normalisation qui donnera à l'utilisateur les garanties qu'il est en droit d'exiger quant à la pertinence de ces tests.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bourlié B. (1995)** Les courbes d'absorption d'éléments minéraux. Convention tripartite Centre de Recherches SCPA - Ministère de l'Agriculture, Direction Générale de l'Enseignement et de la Recherche - INRA. 27 p.
- Chaminade R. (1964)** Diagnostic des carences minérales du sol par l'expérimentation en petits vases de végétation. *Science du sol*, 2, 157-167
- Djakovitch (1988)** Mise au point d'une méthode de détermination rapide du coefficient isohumique de matériaux utilisables pour l'amendement des sols agricoles. Diplôme d'Ingénieur du CNAM, Bordeaux, 208 p.
- Fletcher J.S., Muhitch M.J., Vann D.R., Mc Farlan J.C., Benenati F.S. (1985).** *Environ. Toxicol. Chem.*, 4, 523-
- Juste C. (1983)** Méthodes d'estimation de la toxicité éventuelle des boues, des composts et des sols. Symposium Protection des sols et devenir des déchets, La Rochelle, Nov. 83.
- Linères M. et Juste C. (1980)** Mise au point de tests agronomiques permettant d'apprécier simultanément la phytotoxicité globale des boues de station d'épuration et la disponibilité pour les plantes des métaux qu'elles contiennent. Convention Ministère de l'Environnement - INRA n° 77-145, 26 p.
- Linères M. et Djakovitch (1993)** Caractérisation de la stabilité biologique des apports organiques par l'analyse biochimique. In *Matières organiques et agriculture*, 4^{ème-5^{ème}} journées de l'analyse de terre (GEMAS) 5^{ème} forum de la fertilisation raisonnée (COMIFER), 16-18 Novembre 1993 (Decraux et Ignazi Ed.), 159-168
- Recous S., Robln D., Darwls D., Mary B. (1995)** Soil inorganic N availability : effect of maize residue decomposition. *Soil Biol. Biochem.*, 27, 1529-1538
- Robln D. (1997)** Intérêt de la caractérisation biochimique pour l'évaluation de la proportion de matière organique stable après décomposition dans le sol et la classification des produits organo-minéraux. *Agronomie*, 17, 1-15
- Van Soest P.J. et Wine R.H. (1963)** Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. VI : Determination of plant cell constituents. *J. Off. Chem.*, 50, 50-55

INTRANTS ET QUALITE DES SOLS

Engrais et amendements

Jack MASSE - Gilles THEVENET (ITCF)

La fertilisation a pour but de satisfaire les besoins des plantes en complétant l'offre du sol en éléments minéraux dans des conditions économiquement rentables. Elle doit prendre en compte les objectifs de rendement et de qualité des récoltes, le maintien du potentiel de production et la protection de l'environnement (1).

Les amendements, qu'ils soient organiques ou minéraux, n'agissent pas directement sur la plante. Ils ont pour objet l'amélioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols et favorisent les interventions culturales ainsi que la croissance et nutrition des plantes.

Par rapport à la qualité des sols, on peut considérer que ces techniques de production doivent conserver l'aptitude à produire du milieu sur lequel elles sont appliquées et ne pas générer de pollutions (du sol, de l'eau percolant hors de portée des racines ou de l'air). Il convient donc de choisir des produits de qualité et de rechercher le meilleur équilibre entre les besoins des plantes, le maintien d'un milieu apte à produire dans la durée et les apports de fertilisants ou amendements. Nous aborderons 2 chapitres : le maintien du potentiel de production du sol dans la durée, la limitation des pollutions.

1. MAINTIEN DU POTENTIEL DE PRODUCTION DU SOL

Le maintien du potentiel de production concerne l'amélioration de l'état physique, chimique et biologique du sol. Il est essentiellement tributaire des amendements minéraux et organiques. Toutefois, les engrais ne sont pas à négliger dans ce maintien notamment ceux que l'on appelle "engrais de fond"

même si on a pu montrer qu'en ce domaine l'enrichissement du sol n'était plus un but à atteindre (1).

1.1. Amendements minéraux et fertilité du sol

Les travaux du Groupe Chaulage du COMIFER (2) ont permis d'aboutir à une synthèse publiée au dernier Colloque GEMAS-COMIFER dont nous reprendrons quelques éléments.

Les amendements minéraux se répartissent en 2 grandes catégories :

- les amendements basiques calciques et/ou magnésiens qui permettent principalement d'augmenter le pH du sol et limiter les conséquences de l'excès d'acidité
- les amendements calciques neutres qui ne permettent pas de relever le pH et de corriger l'acidité du sol mais qui agissent par le rôle flocculant de l'ion calcium sur l'amélioration des propriétés physiques du sol.

1.1.1. Correction de l'acidité du sol

Dans les sols acides, le principal facteur limitant la croissance et le rendement des plantes est la phytotoxicité de l'aluminium et parfois du manganèse. Quand le sol s'acidifie, certains composés aluminiques (minéraux argileux, hydroxydes) sont dissous et libèrent dans la solution de l'aluminium dont certaines formes sont toxiques. Par ailleurs, lorsque cet aluminium est en excès dans la solution du sol il peut limiter la nutrition phosphatée (ou magnésienne) des cultures (formation de précipités). On peut considérer que cette toxicité apparaît lorsque l'aluminium échangeable dépasse 50 mg/kg et pour des pH eau inférieurs à 5,5 (3). La toxicité due au manganèse peut aussi se manifester dans des situations acides. Enfin, signalons que l'acidité excessive peut entraîner un dysfonctionnement des micro-organismes du sol perturbant ainsi la minéralisation des matières organiques et entraînant une réduction de la biodisponibilité en azote, soufre, phosphore. Il en est de même pour le fonctionnement des rhizobiums.

Le recours à des amendements basiques s'avère donc indispensable dans les situations à acidité excessive. Toutefois, il est recommandé de ne pas rechercher des pH trop élevés qui pourraient entraîner des blocages de certains oligo-éléments.

Les préconisations, basées sur le niveau de pH du sol, nous sont données par le COMIFER (2).

pH eau	5,5	5,8	6	6,2	6,5
Prairie permanente	Redressement	Entretien	Apport inutile		
Prairie temporaire céréales-maïs pois-soja-colza- tournesol	Redressement urgent	Redressement	Entretien	Apport inutile	
Orge Luzerne	Redressement urgent	Redressement	Entretien	Apport inutile	

Toutefois le praticien doit prendre en compte la grande variabilité du pH sur les parcelles et réaliser un échantillonnage sérieux. Cette mesure suivie périodiquement permet de faire évoluer les stratégies et de maintenir un pH voisin de 6,2 qui s'avère être le meilleur compromis entre toxicité aluminique et blocage d'oligo-éléments.

Un contrôle régulier du pH et l'application d'une stratégie adaptée d'apports d'amendements permet donc de maintenir l'aptitude du sol à la production.

1.1.2. Amélioration des propriétés physiques du sol

Le calcium possède la propriété de flocculer les colloïdes du sol (humus, argiles) et par conséquent d'améliorer la résistance à la dégradation de la structure du sol. Les sols à structure instable sont principalement les limons (sols à plus de 50 % de limons et teneur en argile de moins de 20 %, faible teneur en matières organiques).

La dégradation structurale a plusieurs conséquences :

- formation d'une croûte de battance qui pénalise la levée des cultures de printemps (betterave par exemple)
- prise en masse de l'horizon labouré sous l'effet de la pluviométrie hivernale importante et qui va entraîner des phénomènes d'engorgement et d'anoxie racinaire
- ressuyage lent limitant le nombre de jours disponibles pour réaliser les opérations culturales.

Certains systèmes de cultures sont plus dégradants que d'autres. Le tableau suivant donne quelques indications.

Systèmes de cultures	Céréaliier "non dégradant" (dominance culture hiver dans la rotation)	Céréaliier "dégradant"	Elevage	Betteravier
Sols limons battants hydromorphes drainés ou non drainés	2	2	1-2 selon taux de matière organique	2
Sols limons battants sains	1	1-2	1	2

Enjeux du chaulage et système de culture : 1 = enjeux faibles 2 = enjeux importants

1.2. Amendements organiques

Les matières organiques participent au cycle de l'azote et contribuent à ce titre à la fertilité biochimique des sols. Nous ne développerons pas ce point qui est largement traité par ailleurs. Mais les matières organiques participent aussi à l'organisation de la structure et au comportement physique du sol et permettent d'assurer une certaine stabilité structurale. C'est surtout dans ce domaine qu'elles participent à l'amélioration de la qualité des sols et qui fera l'objet d'un développement.

1.2.1. Action des matières organiques sur les propriétés physiques du sol

Les matières organiques des sols regroupent une grande diversité de produits selon leur degré d'évolution et les comportements qu'elles induisent au niveau du sol. On distingue :

- les matières organiques libres constituées de produits récents et peu évolués
- les matières organiques humifiées qui sont liées principalement à la phase argileuse et représentent la fraction la plus importante. Cette fraction est relativement stable et peu modifiable par les pratiques culturales, au moins sur le court terme
- les matières organiques transitoires issues des processus de biotransformation microbienne constituent un pool de taille et durée variables.

Ces matières organiques peuvent avoir des effets variables (4) sur le comportement mécanique du sol : cohésion (résistance mécanique à la charge), comportement au compactage.

La structure du sol est le fait de la disposition dans l'espace des particules solides, constitutives du matériau, et des liaisons mécaniques existantes entre ces particules. On distingue 2 types d'organisation :

- texturale résultant de l'assemblage des particules élémentaires (argiles, limons, sables) et à l'origine de la microporosité intra-agrégats
- structurale issue de l'effet du travail du sol, climat et de l'activité de la faune sont à l'origine de la macroporosité inter-agrégats.

A cela ajoutons l'organisation du profil cultural qui découle de la distribution spatiale dans la couche travaillée et liée aux opérations culturales successives.

1.2.1.1. Résistance mécanique texturale

L'effet des matières organiques dépend de la nature de celles-ci et de la texture du matériau. Les matières organiques libres, de faible taille, se comportent comme des éléments de squelette et génèrent des points de faiblesse dans l'architecture texturale et diminuent de ce fait la résistance

mécanique, cependant que les matières organiques humifiées ont tendance, dans la plupart des cas et notamment dans les sols pauvres en argile, à accroître cette résistance.

Les variations de teneurs en matières organiques induites par les pratiques culturales (restitution de résidus de culture, ...) sur le moyen terme concernent essentiellement les matières organiques libres et ont donc tendance à diminuer la résistance mécanique texturale.

1.2.1.2. Compactage d'éléments texturaux

Le comportement mécanique du sol est défini par le couple pression x teneur en eau. Les teneurs en eau caractéristiques dépendent de la constitution du matériau et de sa teneur en argile.

Les matières organiques interviennent de façon variable selon leur localisation, taille, degré d'évolution et état hydrique du sol.

Des fragments peu décomposés et de taille centimétrique (pailles), localisés dans l'espace poral structural, diminuent la compacité et possèdent un effet protecteur vis-à-vis du compactage. Mais des fragments de taille micrométrique (matières organiques libres) provoquent une augmentation de la compressibilité du matériau et ont un effet aggravant dans les phénomènes de compactage textural.

1.2.1.3. Matières organiques et dégradation structurale

La désagrégation de l'eau est le phénomène essentiel d'apparition de la battance dont les conséquences sont déterminantes pour la phase de germination et de levée des plantes (betterave par exemple), ainsi que pour le déclenchement du ruissellement. Le phénomène de battance a été décrit largement par BOIFFIN (5). Pour la réussite de la levée, l'agriculture a intérêt à ce que ce phénomène se passe le plus tard possible après le semis. La battance résulte de la quantité de particules fines mobilisées à la surface du sol et susceptible de colmater les interstices.

Les matières organiques peuvent avoir un effet positif ou nul selon les conditions d'arrivée de ce phénomène. Avec l'arrivée de pluies sur un sol sec (plus propice à l'éclatement), les matières organiques confèrent une stabilité au matériau certainement à cause de leur caractère hydrophobe (ralentissement d'inhibition), cependant qu'en situations humides (absence d'éclatement) le rôle des matières organiques est faible : c'est l'effet de l'argile qui prédomine.

1.2.2. Amendements organiques

L'incorporation des pailles ou l'apport de fumier, de composts peut constituer un apport de matières organiques intéressant dès lors que leur répartition est homogène au niveau du sol. Les autres résidus végétaux ou les engrais verts, d'évolution rapide, ne contribuent pas ou très peu au stock de matières organiques dans le sol.

Les produits extérieurs à l'exploitation sont nombreux et d'origines variées (composts, boues, ...) et leur composition très fluctuante. Il est donc indispensable, avant toute utilisation, d'en avoir une analyse précise. Celle-ci peut concerner les éléments minéraux (notamment leur biodisponibilité) mais aussi leur composition organique (taux d'humification, C/N, ...). L'impact de ces apports sur les sols (matières organiques, amélioration de structure, ...) peut être évaluée sur des dispositifs longue durée au champ ; ce qui demande plusieurs années pour appréhender la valeur agronomique d'un produit. Des méthodes plus rapides ont été mises au point pour déterminer la stabilité biologique (6) d'un produit et connaître ainsi plus rapidement son action possible sur le sol. Enfin, il est indispensable de connaître la teneur en certains éléments indésirables (ETM, ETO, ...) susceptibles d'altérer durablement la qualité des sols.

Toutefois, compte tenu de leur coût et des quantités qu'il faudrait apporter pour améliorer le comportement physique du sol, ces produits sont peu utilisés dans les systèmes grandes cultures. On a montré dans le dispositif des 42 parcelles de Versailles que la stabilité du sol était améliorée avec 100 t de fumier par an. De tels apports sont incompatibles avec la pratique agricole, les contraintes économiques et environnementales (libération de grosses quantités d'azote).

1.3. Engrais

Destinés à satisfaire les besoins des plantes en complétant l'offre du sol, les engrais contribuent au maintien du potentiel de production du milieu. De part son effet direct, important sur la croissance et le rendement des végétaux (coefficient réel d'utilisation élevé comparé aux autres éléments), l'impact des engrais azotés ne sera pas évoqué ici même s'il intervient fortement dans les processus biologique et chimique du sol. Nous centrerons notre propos essentiellement sur les autres fertilisants fournissant du phosphore, potassium, dont les coefficients réels d'utilisation par les plantes l'année de l'apport sont particulièrement faibles (généralement inférieurs à 20 %) ; ce qui implique une forte interférence avec les autres constituants du sol.

1.3.1. Phosphore, potasse et biodisponibilité (1)

Le prélèvement de phosphore et de potassium par les racines n'a lieu que sous forme d'ions orthophosphates ou potassium.

Le phosphore organique doit subir une minéralisation mais celle-ci est généralement rapide si bien qu'on considère que son efficacité est équivalente à celle des engrais minéraux. Il en est de même pour le potassium contenu dans les résidus.

Le faible coefficient réel d'utilisation du P et du K des engrais l'année qui suit l'apport a pour origine l'intense compétition existant entre le sol et la plante. Lorsque ces éléments sont ajoutés au sol par les engrais, ils réagissent avec les constituants du sol et une partie d'entre eux perd une fraction de ses possibilités de déplacement vers les plantes (notion de pouvoir fixateur ou pouvoir tampon).

Ce phénomène a 2 conséquences :

- plus le temps de contact entre un engrais et la terre est long, plus le coefficient réel d'utilisation après l'apport est faible. C'est ainsi que la notion de vieillissement de l'engrais est prise en compte dans l'approche actuelle de la fertilisation
- dans les situations où les apports sont significativement supérieurs aux exportations dues aux récoltes, le pouvoir fixateur influence la constitution des réserves biodisponibles. Ainsi avec ou sans apport d'engrais P et/ou K, 70 à 80 % du P et du K présent dans la culture provient des réserves biodisponibles.

Ces réserves ne constituent pas un ensemble homogène et se trouvent dans des systèmes complexes à plusieurs compartiments dont les possibilités de transfert vers la phase liquide sont très variables en durée.

On voit dans ce qui précède que des apports d'engrais importants contribuent à enrichir la réserve biodisponible mais que la durée de contact entre l'engrais et le sol tend à allonger la durée de mise à disposition de l'élément considéré pour la nutrition des plantes. Ces constats, issus des travaux basés sur l'utilisation d'isotopes et associés aux réponses des cultures à la fertilisation, battent en brèche "l'effet vieille grasse" et montrent qu'il ne sert à rien "d'enrichir" exagérément le sol.

1.3.2. Contrôle de la biodisponibilité du P et K

L'appréciation de la biodisponibilité à partir d'analyses de terre n'est pas chose aisée. Les méthodes de laboratoires ne peuvent donner accès qu'au facteur quantité ou plutôt à son appréciation variable selon le réactif utilisé. Le réactif

idéal serait tel qu'il permettrait d'extraire des quantités en parfaite corrélation avec celles prélevées par la plante. Ce qui n'est pas le cas avec les méthodes conventionnelles. Aussi pour apprécier la biodisponibilité, on associe à l'analyse classique d'autres critères comme le passé de fertilisation, l'importance des restitutions organiques ou l'exigence des plantes (plus ou moins grande capacité d'extraction des ions par les racines).

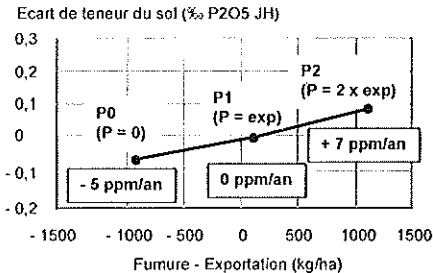
1.3.3. Evolution des réserves et apports d'engrais

Les apports pratiqués sous forme biodisponible (phosphates solubles eau ou citrate d'ammonium neutre) et en quantités supérieures aux exportations par les récoltes entraînent un accroissement de la quantité des réserves biodisponibles et de leur biodisponibilité ; mais les engrais P et K ajoutés quittent en grande partie la phase liquide pour rejoindre la phase solide et ses différents compartiments pour lesquels la vitesse de retour vers la phase liquide est inférieure à la vitesse d'entrée.

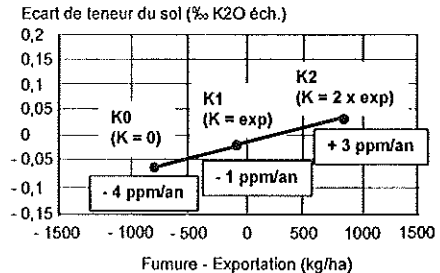
Une restitution voisine des exportations peut se traduire par un maintien ou une lente diminution du niveau de biodisponibilité.

Figure 1 - Evolution des teneurs du sol au bout de 14 ans : essai de Guichainville (27) (GRCEA Evreucin, SAS, ITCF). Limon profond, rotation pois-blé-blé avec résidus enfouis

P2O5



K2O



Dans le cas des engrais phosphatés, l'accroissement des réserves observé après un apport effectué sous forme soluble eau ou citrate d'ammonium neutre est toujours supérieur ou égal à celui observé avec des formes solubles dans les autres réactifs conventionnels. Ceci est lié à la grande différence de solubilité de ces phosphates apportés par rapport aux phosphates des sols.

2. LIMITATION DES POLLUTIONS

L'utilisation excessive d'amendements ou d'engrais ou bien encore l'apport de substances indésirables avec ces produits est susceptible d'entraîner des pollutions des sols et de l'eau issues du ruissellement et/ou du drainage.

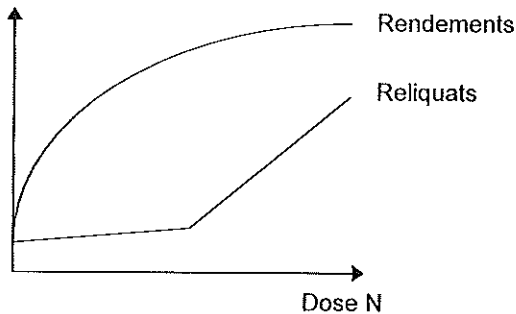
2.1. Engrais

Les deux éléments fertilisants susceptibles d'altérer le milieu sont d'une part l'azote d'autre part le phosphore.

Concernant l'azote, il s'agit essentiellement de phénomènes de lessivage durant la phase hivernale. Celui-ci est dû à la minéralisation automnale mais aussi à l'inadéquation entre les doses d'engrais apportées et les besoins du peuplement végétal. Un bon ajustement grâce à la méthode du bilan, voire par l'utilisation d'outils de pilotages tels que Jubil[®] est le premier élément à prendre en compte pour limiter les risques.

Les expérimentations montrent que les reliquats en azote du sol post-récolte (indicateur kg d'N/ha ou kg d'N/m^2) ne sont pas significativement diminués lorsqu'on applique des doses d'azote restrictives (figure 2).

Figure 2 - Relation dose d'azote - rendements - reliquats post-récolte



Avec les différentes formes d'azote, il n'y a pas à notre connaissance d'impact au niveau des pollutions de l'eau. Toutefois, pour atteindre l'optimum de rendement, le recours à des solutions azotées nécessite des quantités d'engrais plus élevées qu'avec des formes solides. La différence étant due à la volatilisation ammoniacale principalement (7).

En ce qui concerne le phosphore, celui-ci peut être à l'origine de l'eutrophisation. Il est principalement entraîné par ruissellement, notamment dans les matières en suspension lors d'épisodes pluvieux. Un enrichissement

important en surface peut être source de risque de pollution. Toutefois les engrais ne présentent pas un risque supplémentaire par rapport aux autres sources de phosphore au niveau agricole. On peut considérer que les conseils de fertilisation raisonnée, parce qu'ils n'ont plus pour objectif d'accroître la teneur du sol, permettent de réduire les risques. Leur généralisation notamment dans les situations à risques et où les apports d'effluents d'élevage sont abondants est donc à développer. Dans ces situations, le raisonnement devrait amener une diminution des teneurs en P₂O₅ de la couche labourée. Les quantités de phosphore entraînées par drainage sont faibles (généralement moins de 3 kg/ha/an) (8).

Les engrais phosphatés contiennent du cadmium issu des roches dont ils sont extraits. Cet élément ne fait pas l'objet d'une limitation lors des procédures de normalisation. Une étude menée par l'APAO (9) en collaboration avec la FAO, portant sur 100 sols fertilisés régulièrement en phosphates sur une longue période, a montré que les teneurs en cadmium des sols en France étaient de 0,22 ppm. En 1989, une étude commandée par la CEE a mis en évidence que l'apport de cadmium au sol via les engrais phosphatés correspondait à 6 % des apports totaux loin derrière les rejets industriels ou les déchets domestiques. Il ne semble donc pas, qu'avec les quantités actuellement apportées (en baisse importante et constante depuis 1973) et les teneurs en cadmium rencontrées, que les fertilisants phosphatés soient à l'origine d'un accroissement des teneurs en cadmium dans les sols puisqu'on estime qu'ils apportent par an en moyenne une concentration de 0,001 ppm en Europe.

2.2. Amendements

Concernant les amendements destinés à corriger le pH, il ne semble pas qu'un impact sur l'environnement soit mis en évidence compte tenu de la nature et la composition des produits apportés. On notera cependant que des apports importants de calcium pour augmenter de manière trop élevée le pH ne se justifient pas toujours et que celui apporté en excès peut être entraîné par les pluies. On estime à environ 200 à 400 kg de CaO/ha lessivés par an (variable avec le type de sol et le régime pluviométrique).

Les risques vis-à-vis du milieu peuvent provenir beaucoup plus de l'utilisation d'amendements organiques qu'ils soient d'origine urbaine ou agricole d'une part parce qu'on connaît mal et ne maîtrise pas la libération de minéraux par ces produits : minéralisation de l'azote et du phosphore notamment et d'autre part parce qu'ils peuvent contenir des éléments indésirables : micropolluants métalliques, organiques ou agents pathogènes. C'est donc sur ces points qu'il faudra être vigilant et disposer d'une analyse aussi complète que possible avant de prendre toute décision.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) COMIFER, 1993. Aide au diagnostic et à la prescription de la fertilisation phosphatée et potassique des grandes cultures. COMIFER 1993, 28 p + annexes.
- (2) COMIFER Groupe Chaulage, 1995. Comment bien fertiliser en grandes cultures : les amendements minéraux, In : Analyser et fertiliser en toutes connaissances, pp 135-148, Ignazi et Riou éditeurs. Rencontres COMIFER-GEMAS, BLOIS 1995.
- (3) ITCF, 1997. Chaulage et fertilisation magnésienne. Brochure 44 p. Editions ITCF.
- (4) GUERIF, J., BOIFFIN, J., 1993. Matières organiques et sensibilité des sols à la battance et au compostage. In : Matières organiques et agricultures, pp 39-57, Decroux et Ignazi éditeurs. Rencontres COMIFER-GEMAS, BLOIS 1993.
- (5) BOIFFIN, J., 1984. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse D.I. INAPG, 320 p.
- (6) LINERES, M., DJAKOVITCH, J.L., 1993. Caractérisation de la stabilité biologique des apports organiques par l'analyse biochimique. In : Matières organiques et agricultures, pp 159-168, Decroux et Ignazi éditeurs. Rencontres COMIFER-GEMAS, BLOIS 1993.
- (7) LE SOUDER, C., TAUREAU, J.C., 1997. Formes d'engrais azotés sur blé tendre : des différences à prendre en compte. Perspectives Agricoles n° 221, février 1997, pp 63-74.
- (8) VEILLAUX, R., 1995. Risques agronomiques liés à l'accumulation du phosphore dans les sols. Etude bibliographique. Agence de l'Eau Loire-Bretagne. 22 p + annexes.
- (9) APAO, 1992. Phosphates and Cadmium : soil, crops, health. 24 p.

LES EFFLUENTS D'ELEVAGE

P. PLET CRA de BRETAGNE
C. CHEVERRY ENSA de RENNES

Les deux colloques précédents du COMIFER-GEMAS avaient permis de faire le point sur « l'optimisation de l'utilisation des lisiers et fumiers » (GUILLONNEAU et al. 1993), puis sur les « effluents d'élevage » (P.PLET, 1995). La première présentation était plutôt d'ordre analytique, puisqu'elle insistait sur l'état des connaissances quant à la composition, aux modalités de transformation dans le sol, aux pertes d'azote, et enfin aux pratiques d'épandage des lisiers et des fumiers, ces deux effluents étant étudiés séparément. Le second exposé insistait davantage sur les enjeux et la problématique, soulignant au passage le regard nouveau imposé par les préoccupations environnementales et hiérarchisant les leviers d'action prioritaires pour progresser. Dans les deux cas, il s'agissait bien entendu de privilégier une fertilisation rationnelle basée sur ces produits organo-minéraux complexes et évolutifs au sein du sol, avant leur absorption par les plantes. L'azote était l'élément privilégié.

Lors de cette présentation 1997, nous insisterons sur deux points :

- ◆ la présentation de quelques résultats récents touchant au devenir dans les sols et les paysages des éléments apportés par les effluents, sans se limiter à l'azote. Phosphore, potassium, métaux lourds (cuivre, zinc..) et germes pathogènes sont également en jeu. L'approche restera ici assez analytique.
- ◆ une présentation plus globale du problème, en tenant compte des systèmes d'exploitations concernés et du contexte réglementaire.

Une question restera toujours en toile de fond : l'utilisation des effluents améliore t-elle, ou au contraire dégrade t-elle, la « qualité des sols » ? Ce concept de « qualité des sols » a d'ailleurs fait récemment l'objet de publications synthétiques, d'une part dans un numéro spécial de la revue « Etude et Gestion des Sols (1996), d'autre part dans un rapport d'expertise confié à BORNAND (1997).

I. - QUELQUES DONNEES RECENTES SUR LES EFFLUENTS D'ELEVAGE

I.1. Les connaissances nouvelles en matière de carbone et d'azote

Ces deux éléments chimiques restent les éléments clefs de la gestion des effluents. Des connaissances nouvelles ont été acquises dans quatre grands domaines :

- sur le cycle de l'azote et du carbone dans les sols (recherches assez « fondamentales »)
- sur un poste particulier de cycle : les pertes d'azote
- sur l'évaluation des différents termes de l'équation de bilan, le terme Mha en particulier
- dans tous ces thèmes, on note un gros effort récent en termes de modélisation.

Dans cette présentation non exhaustive de travaux récents, on se limitera évidemment à ceux mettant en jeu les effluents d'élevage. Certains aspects, comme le rôle des intercultures, ne seront pas évoqués.

I.1.1. L'étude du déterminisme de la décomposition des matières organiques dans le sol a bénéficié du large développement dans les laboratoires de recherche (INRA-Laon par exemple) de la méthode des isotopes stables ^{13}C et ^{15}N , avec notamment la mise au point d'une chambre de culture automatisée en atmosphère contrôlée. Cet outil complète l'approche basée sur les variations d'abondance naturelle ^{13}C qui existent entre les plantes C3 ou C4. On peut désormais estimer de manière indépendante les flux de minéralisation brute et d'organisation brute, dont dépend la minéralisation nette d'azote.

Dans l'étude des **facteurs contrôlant la décomposition des produits organiques**, les principaux progrès récents ont porté sur l'analyse des caractéristiques biochimiques des résidus, sur le rôle de la température, facteurs que l'on peut désormais prendre en compte dans les modèles de décomposition type CANTIS ou NCSOIL, et par ailleurs sur l'effet de l'environnement physique des résidus dans le sol (INRA Versailles/Laon). On peut désormais espérer à court terme modéliser en conditions de champ les flux bruts de minéralisation et d'organisation de l'azote provenant des effluents.

I.1.2. L'étude des pertes d'azote a fait l'objet de progrès assez différenciés :

Les pertes d'azote sous forme de lessivage de nitrates en profondeur sont toujours appréciées par le même type de dispositif expérimental (bougies poreuses) et de modèle (BURNS « restant à la mode »). Les résultats significatifs récents sont de divers ordres :

- meilleure connaissance des pertes dans certains systèmes cultureux particuliers sous prairies pâturées par exemple. Les essais menés à Kerlavic en Bretagne (ITCF, CA BRETAGNE, EDE BRETAGNE, 1996) confirment notamment le rôle du mode de fractionnement des apports sur le niveau de perte résultant, mais aussi

que les associations de RGA-trèfle blanc ont les mêmes niveaux de pertes d'azote par lessivage que des prairies de Ray-Grass fertilisées à hauteur de 150 à 200 kg N/ha.

- définition des pertes moyennes selon les couverts végétaux et les pratiques d'utilisation d'effluents d'élevage associées (INRA- Mirecourt), ce qui constitue un progrès significatif, car en croisant ces données avec des données spatiales (images satellitaires, photo-interprétation, enquêtes), on peut désormais raisonner la qualité de l'eau issue d'un bassin d'alimentation.

Les pertes d'azote par **volatilisation** ont fait quelques progrès significatifs, notamment grâce aux travaux de MOAL (MARTINEZ et MOAL, 1995). La fourchette habituellement très large évoquée (20 à 80% de l'azote total introduit pourraient être perdus) semble pouvoir être resserrée à 15-30%. Les principaux facteurs déterminant le taux de volatilisation de NH₃ semblent par ordre décroissant d'importance : la température, le pH, la teneur en matière sèche du produit (en acide gras en particulier) et la dose d'azote ammoniacal total apportée par le lisier.

Dans l'étude des pertes par **dénitrification**, on retiendra les perspectives de modélisation ouvertes par HENAULT (1993), qui sont actuellement testées dans le contexte breton.

I.1.3. Les travaux sur une meilleure estimation des postes de l'équation de bilan de l'azote ont porté en particulier

- sur le poste Mha : minéralisation due aux arrière-effets, dans le cas d'épandages répétés chaque année. Basés initialement sur des expérimentations menées en Loire-Atlantique (ZIEGLER, 1992), ces travaux confirment que la valeur du terme Mha est susceptible de varier de façon significative à moyen terme (10 ans), avec une grande variabilité interannuelle. Le modèle des « decay-series » a été appliqué par T.MORVAN (1995).
- sur la prise en compte, à partir de données expérimentales, des apports météoriques non symbiotiques. Les quelques mesures ponctuelles réalisées en Bretagne indiquent des niveaux de restitution autour de 15,35 et 50 kgN/ha/an selon la proximité de la mer, les vents dominants et l'existence d'ateliers hors-sol.

I.1.4. La période récente a vu fleurir un grand nombre de modèles, conceptuels, empiriques, « intégrateurs » (modèle STICS par exemple) dont on retiendra, outre ceux précédemment évoqués, les suivants dans l'optique particulière de cette présentation :

- le **modèle fonctionnel LIXIM**, basé pro parte sur celui de BURNS déjà cité, simule les transferts d'eau et de solutés et la minéralisation d'azote en sol nu.. La vitesse de minéralisation est le produit d'une vitesse potentielle (relative à des conditions d'incubation au laboratoire) et des fonctions température et humidité. Il devrait pouvoir être utilisé à court terme avec des effluents d'élevage. Un modèle empirique d'évaluation du risque de lessivage des apports d'automne a été par ailleurs proposé par V. HOUBEN (in CRAB, 1997).

- **la modélisation des matières organiques du sol à long terme a vu deux types d'amélioration du modèle ancien de HENIN-DUPUIS :**
 - d'abord par l'application et la validation de ce modèle dans des contextes régionaux divers, notamment dans un contexte d'apports réguliers d'effluents d'élevage (V. HOUBEN, in CRAB, 1997, volume 2) ;
 - ensuite par la mise au point d'un modèle à deux compartiments, qui considère l'existence d'une fraction « active » et d'une fraction stable de matière organique (MARY et al., 1994). L'enjeu est d'autant plus important que la mise au point de BALESSENT (1996) confirme bien le constat de baisses locales des taux de matière organique des sols cultivés français, dans les dernières décennies.
- **la modélisation a également porté sur l'introduction de changements de pratiques tels que le compostage des fumiers permettant un épandage à plus faible dose, et une meilleure répartition spatiale entre les parcelles de l'exploitation, en privilégiant les apports sur les prairies.**

I.2. Problématique des autres éléments contenus dans les effluents d'élevage.

Si des progrès substantiels ont été obtenus en matière de composition des effluents en **phosphore**, notamment en fonction du type d'alimentation (multiphasés ou non : cf nouvelles normes CORPEN), les travaux sur le devenir de ces éléments dans le sol sont plus rares. L'expérience SOLEPUR (CEMAGREF) , avec des doses très fortes de lisier, a le mérite de mieux évaluer les risques de passage dans les nappes peu profondes du phosphore et du **potassium**. Les méthodes préconisées par FARDEAU (CEA-Cadarche) sur la compartimentation du phosphore s'appliquent bien aux effluents épandus. Mais le conseil de fertilisation reste délicat : dans des zones en excédent structurel d'effluents, on observe un enrichissement marqué des horizons superficiels du sol en phosphore. Faut-il pour autant décommander systématiquement toute fertilisation minérale complémentaire, même si la culture envisagée est exigeante et même s'il n'y a eu aucun apport depuis deux ans ? La question est posée.

Les risques de pollution à terme des sols par un phénomène de phytotoxicité liée à l'accumulation de cuivre et de zinc, ont été réévoqués (TROLARD et al., 1995). Les durées pour atteindre les doses limites (120 ppm) à partir desquelles on considère qu'il y a phytotoxicité seraient de l'ordre de 50 à 70 ans pour le cuivre, et de 30 à 50 ans pour le zinc, dans le contexte de cette étude (sols du Finistère). Quelques autres données, plus ponctuelles ont été obtenues sur les cations accompagnateurs des nitrates (SIMON, 1995) et sur les germes pathogènes.

Ces données scientifiques bénéficient donc des progrès méthodologiques (poids croissant de la modélisation prédictive) et technologiques (isotopes...) récents. On note par ailleurs le poids croissant des données obtenues à l'échelle des unités paysagiques (bassins versants,...) et la volonté forte d'approches géochimiques et biologiques qui soient intégrées et qui n'isolent pas l'élément azote des autres

éléments. Le concept de « qualité biologique d'un sol » prend d'ailleurs du poids (CHAUSSOD,1996).

II. - LA GESTION RAISONNEE DES EFFLUENTS D'ELEVAGE.

Les données précédemment rappelées vont peu à peu être intégrées dans les raisonnements préalables à la mise en oeuvre de nouvelles pratiques, mais, à court terme, c'est l'évolution du contexte réglementaire qui va d'abord induire les changements de pratiques les plus spectaculaires en termes d'utilisation des effluents d'élevage :

- premiers programmes d'action de la directive nitrates
- programme de maîtrise des pollutions d'origine agricole (PMPOA).

Des connaissances déjà anciennes et les données plus récentes citées ci-dessus montrent que l'utilisation des effluents d'élevage présente des effets favorables mais aussi des risques potentiels pour la qualité des sols (tableau I). Pour les régions d'élevage, c'est notamment en confrontant les pratiques actuelles d'utilisation des effluents et les éléments de connaissances portant sur les risques de pollution de l'eau par les nitrates qu'ont été élaborées les premiers programmes d'action de la directive nitrates.

Partant des principaux éléments proposés par ces programmes d'action qui constituent désormais les bases de la réglementation en zones vulnérables, il est intéressant d'examiner :

- les conséquences envisageables sur la qualité des sols, de ces modifications liées à l'utilisation des effluents d'élevage,
 - les questions qui restent posées,
 - les conseils qui peuvent être préconisés,
- en se plaçant dans le contexte de quelques systèmes de productions animales types (CRAB, 1997, volumes 1, 2, 3 et 5).

**Tableau I : Effluents d'élevage
(à des doses raisonnables)**

Aspects	Effets favorables	Risques
<i>Physiques</i>	Taux de matière organique (à long terme) Stabilité structurable	Ruissellement
<i>Chimiques</i>	Fertilité minérale (N,P,K)	Accumulation (P) et toxicité (Cu,Zn) Lessivage d'azote Pertes d'azote dans l'atmosphère
<i>Biologiques</i>	Activité biologique (source de carbone et d'azote pour un certain nombre de populations)	Contamination pathogène

II.1. La résorption pour les exploitations en excédent structurel

Le déséquilibre entre les effluents d'élevage produits sur une exploitation agricole et les capacités de gestion offertes par les sols de l'exploitation constitue le premier facteur limitant la gestion correcte de l'azote des effluents d'élevage.

Ces situations d'excédent structurel se rencontrent dans :

- la plupart des élevages mono-atelier dits « hors sols »
- de nombreuses exploitations « mixtes » associant des ateliers de bovins (viande et/ou lait) et des ateliers « hors sols ».

Les différentes solutions de résorption proposées (SOGREAH, 1996) qui vont de l'alimentation animale (réduction à la source) à l'élimination de l'azote (différents procédés de traitements d'effluents) ont été réfléchies dans un objectif d'amélioration de la gestion de l'azote.

Outre le fait qu'en deçà du repère réglementaire actuel des 170 uN/ha, les apports d'effluents d'élevage méritent d'être adaptés à chaque système d'exploitation (en fonction des potentiels d'exportations par les végétaux), si on veut aboutir à une gestion agronomique correcte, la plupart des solutions de transformation et/ou de traitement des effluents proposées révèlent des risques de déséquilibre entre éléments (carbone/azote - phosphore/azote - métaux lourds/azote) qui peuvent :

- limiter les conditions de généralisation d'une technique à l'échelle régionale (solutions nécessitant des apports carbonés : production de porcs sur paille, compostage d'effluents)
- induire à terme des déséquilibres de fertilisation sur les exploitations (solutions éliminant une partie de l'azote et concentrant du phosphore et/ou des métaux lourds : traitements des effluents par voie biologique)
- accélérer les processus d'appauvrissement en matière organique et de diminution de l'activité biologique des sols de certaines exploitations (solutions d'exportation hors exploitations productrices d'excédents d'effluents à C/N assez faibles sur la base des 170 uN/ha)

Par ailleurs, en ce qui concerne les solutions de résorption qui font appel au transport d'effluents (échanges paille-fumier, exportations à distance) des questions restent posées en terme d'accroissement du risque pathogène ; les précautions qui doivent être prises dans ce domaine nécessitent donc la mise en place de dispositif de gestion rigoureuse des effluents (traçabilité des effluents du producteur à l'utilisateur).

En tout état de cause les solutions qu'il faut prioritairement encourager concernent :

- l'alimentation animale (notamment avec l'objectif de renforcement de la production d'aliments sur l'exploitation)
- l'augmentation des surfaces épandables sur les terres en propre (notamment au travers d'adoption de techniques simples de transformation des déjections et d'utilisation de matériels d'épandage mieux adaptés).

II.2. Le respect d'un calendrier d'épandage et la mise en oeuvre de capacités nouvelles d'épandage.

Dans de nombreuses exploitations d'élevage (lait, viande, mixte lait + hors sol, hors sol volailles), la faiblesse des capacités de stockage en égard aux quantités d'effluents à gérer constitue souvent le deuxième facteur limitant la gestion correcte de l'azote des effluents d'élevage.

La diminution du risque de pollution par lessivage de l'azote passe par l'accroissement de ces capacités de stockage et se traduit en pratique par l'allongement de la durée de stockage et la concentration de la majorité des épandages d'effluents sur une courte période (sortie hiver - printemps). Mais ces pratiques satisfaisantes sur le plan de l'azote peuvent alors augmenter les risques en matière de :

- contamination pathogène, si l'accroissement des volumes stockés se fait par l'accroissement des volumes des unités de stockages plutôt que par la multiplication des unités (ex : l'utilisation de lisier issu d'une grande fosse réalimentée en permanence par du lisier frais accroît le risque de contamination par les salmonelles)

- dégradation (tassement) des sols du fait d'épandages réalisés dans des conditions d'humidité limites si l'équipement n'est pas adapté en conséquence (ex : pneus basse pression et essieux suiveurs indispensables pour les épandeurs de lisier avec rampes).

II.3. L'apport de la dose azotée optimale à partir d'effluents d'élevage

La composition particulière des effluents d'élevage (présence de différentes formes organiques et minérales de l'azote) complexifie le raisonnement à mettre en oeuvre pour déterminer la quantité idéale de produit à apporter en vue de couvrir la dose prévisionnelle azotée optimale.

Pour les exploitations disposant d'effluents à coefficient d'utilisation élevé et à faible arrière-effet (lisiers de porcs, fientes de volailles), l'optimisation des apports en fonction des besoins des plantes est plus aisée ; mais la richesse de ces effluents en éléments fertilisants (N,P) exige souvent de disposer d'un matériel adapté pour réaliser des apports qui soient en pratique compatibles avec les quantités préconisées. Par ailleurs, la présentation de ces produits limite les possibilités d'apports en végétation et impose alors également certaines spécificités dans le matériel utilisé afin de :

- garantir une bonne régularité d'apport,
- limiter les risques de ruissellement.

Le devenir du statut organique des sols des exploitations qui pérenniseront l'usage de ces produits, dans les limites prévues par la directive nitrates, reste d'autant plus posé que dans un passé récent de doses plus élevées, certaines régions ont déjà vu chuter leurs taux de matière organique (WALTER et al., 1995).

Pour les exploitations disposant d'effluents à coefficient d'utilisation faible et à fort arrière-effet (fumiers de bovins), l'optimisation des apports en fonction des besoins des plantes est impossible.

Par ailleurs, l'utilisation de ces produits impose de réduire le risque de lessivage d'azote en période d'interculture par la mise en place de cultures intermédiaires (CORPEN, 1992 et MARY B., 1992).

La préservation du statut organique des sols des exploitations qui pérenniseront l'usage de ces produits dans les limites prévues par la directive nitrates semble assurée, mais le déphasage souvent constaté entre les périodes de disponibilité de l'azote issu de ces produits et les besoins des cultures est quasi systématique et conduit notamment à des consommations supplémentaires d'engrais minéraux à action rapide pour assurer les rendements.

Pour les exploitations restituant directement les déjections animales sur pâturage, outre les hétérogénéités de répartition spatiale constatées qui induisent des hétérogénéités de fertilité minérale, il est clair que le risque de lessivage d'azote lié aux périodes de pâturage à risque (automne) est loin d'être négligeable et qu'il est

souvent égal, voire supérieur à celui constaté sous culture (ITCF, CA BRETAGNE, EDE BRETAGNE, 1996).

Sur ces pâtures, la présence de légumineuses en association avec les graminées, si elle dispense en règle générale de l'apport d'engrais azotés, rajoute un paramètre de minéralisation difficilement maîtrisable (CASTILLON P. et al., 1996) qui contribue également à un certain déphasage entre les périodes de disponibilité de l'azote et les besoins des plantes.

Enfin, bien que les expérimentations réalisées sur ce thème ne soient qu'à leur début (DECAU M.L., SALETTE J., 1993), le risque de lessivage d'azote lié à la minéralisation après destruction de pâture paraît potentiellement très important et difficile à maîtriser.

III. - CONCLUSION

Bien que des éléments de connaissance restent encore à maîtriser, les bases de raisonnement qui permettent de gérer l'azote des effluents d'élevage dans un objectif de préservation de la qualité des sols et des eaux se sont considérablement améliorées :

- On est désormais en mesure de « revenir » à des problèmes environnementaux du type « simulation des pertes par lessivage générées par des pratiques » de manière beaucoup plus synthétique et de modéliser les conséquences de tel ou tel changement à l'échelle de la parcelle, mais aussi à celle du territoire (bassin versant).
- On dispose d'éléments techniques d'intervention envisageables, dans différentes situations d'exploitations (résorption d'excédents, gestion de l'azote en zone vulnérable).

A l'échelle de l'exploitation, il est cependant important de noter que le raisonnement de la gestion des effluents d'élevage imposée par la directive nitrate se heurte à des éléments contradictoires.

Dans un système de production donnée, il n'est pas toujours évident de trouver le juste équilibre permettant de concilier utilisation des effluents d'élevage et préservation des différents paramètres de qualité des sols (tableau II).

**Tableau II : Incidence vraisemblable de l'utilisation des différents effluents
d'élevage sur la qualité des sols
(apports pérennisés à des doses compatibles avec la directive nitrates)**

II a : Amélioration d'un certain nombre de caractéristiques du sol

Type de production animale	Type d'effluents	Tx de MO	Stab. Struct.	Fertilité min.			Act. biol.
				N	P	K	
LAIT	pissats et bouses	+	+/-	++	+/-	+/-	+
	fumier	++	++	+/-	+	++	++
	lisier	+	+	+	+	+/-	+
VIANDE BOVINE	pissats et bouses	+	+/-	++	+/-	+/-	+
	fumier	++	++	+/-	+	++	++
	lisier	+	+	+	+	+/-	+
PORCS	fumier	+	?	+	+	++	+
	lisier	-	+/-	+	+	+	+/-
	issus de trait. biolog.	+/-	?	+	++	+	+
POULES PONDEUSES	fientes humides	+/-	?	+	+	+/-	+/-
	fientes sèches	+/-	?	++	++	+	+
VOLAILLES DE CHAIR	fumier	+	+/-	+	++	++	+
	fumier composté	++	?	++	++	++	+

II b : Risques de phénomènes de dégradation de la qualité des sols et des eaux liées

Type de production animale	Type d'effluents	Ruissel.	Accumulation		Less. N	Patho
			P	Cu, Zn		
LAIT	pissats et bouses	+	-	-	++	+/-
	fumier	-	-	-	+	+/-
	lisier	-	-	-	+/-	+/-
VIANDE BOVINE	pissats et bouses	?	-	-	++	+/-
	fumier	-	-	-	+	+/-
	lisier	-	-	-	+/-	+/-
PORCS	fumier	-	+/-	+	+	+
	lisier	+/-	+	++	-	+
	issus de trait. biolog.	?	+	++	+/-	+/-
POULES PONDEUSES	fientes humides	?	+	+	-	++
	fientes sèches	?	+	+	-	++
VOLAILLES DE CHAIR	fumier	-	+	+	+/-	++
	fumier composté	-	+	+	-	+/-

Par ailleurs l'amélioration de la gestion des effluents d'élevage en vue d'une meilleure préservation de la qualité des sols nécessite parfois des changements importants non seulement dans les pratiques et dans l'équipement, mais éventuellement dans les bases même des systèmes de production (mode d'alimentation des animaux, systèmes fourragers,...).

Des programmes techniques d'action ne peuvent s'envisager avec réalisme qu'en intégrant ces nécessités de changement et en mobilisant les moyens d'accompagnement nécessaires (information, formation, aides financières, conseils techniques,...).

BIBLIOGRAPHIE.

BALESDENT J., 1996. Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols en France. *Etude et Gestion des sols*, 3,4, 245-260.

BENOIT M., 1994. Risques de pollution des eaux sous prairie et sous culture. Influence des pratiques d'apport d'engrais de ferme. *Fourrages*, 140 : p.407-420.

BENOIT M., LE HOUEROU B., GODDEN B., 1994. Farmyard manure management for enhanced sustainability. In : « recherches-système en agriculture et développement rural ». Symposium international de l'AFSRE, Montpellier, 21-25 Novembre 1994, pp. 827-833.

BODET J.M., THEVENOT N., 1996. Valorisation agronomique des effluents d'élevage maîtrisés: état des connaissances. 79 p.

BORNAND M., 1997. Connaissance et suivi de la qualité des sols en France. Rapport d'expertise demandé par les Ministères de l'Agriculture et de l'Environnement, et par l'INRA., 176 p.

CASTILLON P., LE GALL A., CABARET MM., 1996. Calcul de la fertilisation azotée des prairies. Journée « Prairies Azote Grand Ouest » note 5 p.

CEMAGREF, 1995. DIALSTO PORCS, l'outil de gestion des déjections porcines. Plaquette de présentation

CHAMBRE REGIONALE D'AGRICULTURE DE BRETAGNE, 1997. Elaboration des programmes d'action de la directive nitrate en Bretagne- Elements de diagnostic et de préconisations. 5 volumes.

CHAUSSOD R., 1996. La qualité biologique des sols. Evaluation et implication. *Etude et gestion des sols*, 3, 4, 261-278.

COMIFER, 1996. Calcul de la fertilisation azotée des cultures annuelles. Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales, 59 p.

COPPENET M., GOLVEN J., SIMON J.C., LE CORRE L., LE ROY M., 1993. Evolution chimique des sols en exploitations d'élevage intensif : exemple du Finistère. Agronomie 13.

CORPEN, 1992. Interculture. Gérer l'interculture pour limiter les fuites de nitrates vers les eaux. 40 p.

DECAU M.L., SALETTE J., 1993 - Retournements de prairie et évolution consécutive de l'azote minéral du sol. Colloque GEMAB - COMIFER

Etude et Gestion des Sols 1996. Numéro spécial de cette revue consacré au « sol, un patrimoine menacé ? », 3; 4, p. 223 à 343.

FARRUGIA S., SIMON J.C., 1994. Déjections et fertilisation organique au pâturage. Fourrages, 139, p.231-253.

GUILLONEAU A., MORVAN T., BOUTHIER A., DESVIGNES P., 1993. Optimisation de l'utilisation des lisiers et fumiers. Colloque GEMA, Blois 16-18 Novembre 1993, p. 93-113.

HABIB Z., 1995. La régularité transversale et longitudinale des nouveaux matériels d'épandage de déjections animales. Ed: FNCUMA et DERF, 47 p.+ annexes.

INSTITUT DE L'ELEVAGE, ITAVI, CEMAGREF, 1996. Bâtiments d'élevage bovin, porcin et avicole- Réglementation et préconisations relatives à l'environnement, 140 p.

ITAVI, 1995. Les déjections avicoles des engrais riches à valoriser. Ensemble de 10 fiches.

ITCF, CA BRETAGNE, EDE BRETAGNE, 1995. Influence de la fertilisation azotée de la prairie pâturée sur la production d'herbe et sur la lixiviation des nitrates. Résultat de l'expérience de Kerlavic menée de 1991 à 1995, 40 p.

MARY B., 1992. Gérer l'interculture pour maîtriser la pollution nitrique. Journée d'étude Interculture et nitrates. CORPEN Actes pp 5 à 18.

MARY B., GUERIF J., 1994. Intérêts et limites des modèles de prévision de l'évolution des matières organiques et de l'azote dans le sol. Cahiers Agricultures, 3, 247-257.

MIGNOLET C., SAINTOT D., BENOIT M., 1996. Livestock farming system diversity and groundwater quality modelling at a regional scale. Comm. orale au IV^o Intern. Livestock Farming System Symposium, Foulum (Danemark), 22-23 Aout 1996, 6 p.

MOAL J.F., 1994. Volatilisation de l'azote ammoniacal des lisiers après épandage : quantification et étude des facteurs d'influence. Thèse Université Perpignan-CEMAGREF ed., 230 p.

MORVAN T., LETERME P., MARY B., 1996. Quantification des flux d'azote consécutifs à un épandage de lisier de porc sur triticales en automne par marquage isotopique 15N. *Agronomie*, 16, 541-552.

MORVAN T., LETERME P., ARSENE GG., MARY B., 1996. Nitrogen transformations after pig slurry spreading on bare soil and rye grass using 15N labelled NH₄2SO₄. 4^o Congress of the European Society of Agronomy. wageningen (NL), 1996/06, 362-363.

PEYRAUD J.L., DELABY L., 1995. Alimentation, niveau de production et rejets azotés des vaches laitières- Fourrages, 142, p.135-140.

PLET P., 1995. Les effluents d'élevage. Colloque GEMAS- Blois. Novembre 1995.

SIMON J.C., 1995. Lessivage de l'azote nitrique et des cations accompagnateurs. Une situation de référence: le climat atlantique très pluvieux; quelques éléments de comparaison avec les autres situations françaises. *C.R. Acad. Agric.Fr.*, 81,4, p.55-70.

SOGREAH, 1996. Etude de validation des procédés de traitements des déjections animales, 151 p.

TROLARD F. et al, 1995. Mise au point d'une typologie des milieux réducteurs naturels en relation avec le potentiel dénitrifiant des sols. Contrat de recherche INRA - Ministère de l'Environnement, subv. 93/303, 84 p., + annexes

UGPVB, 1996. Guide environnement (partie sur les engrais de ferme).

WALTER C., BOUEDO T., AUROUSSEAU P., 1995 - Cartographie communale des teneurs en matière organique des sols bretons et analyse de leur évolution temporelle de 1980 à 1995. Rapport CORPEP - ENSAR, 30 p.

DECHETS URBAINS : IMPACTS SUR LA QUALITE DES SOLS ET DES PRODUITS.

CHAUSSOD R.⁽¹⁾, LINERES M.⁽²⁾, TERCE M.⁽³⁾, CHASSIN P.⁽²⁾

(1) INRA - Laboratoire de Microbiologie des Sols, BV 1540, 21034 DIJON Cedex

(2) INRA - Station d'Agronomie, BP 81, 33881 VILLENAVE D'ORNON Cedex

(3) INRA - Station de Science du Sol, route de St Cyr, 78026 VERSAILLES Cedex

Introduction :

L'agriculture recycle des volumes considérables de produits résiduels, qu'ils soient d'origine agricole (effluents d'élevage), urbaine (boues résiduelles de stations d'épuration, composts urbains) ou industrielle (eaux résiduelles, boues, sous-produits des industries agro-alimentaires). Ces produits résiduels ont souvent une valeur fertilisante ainsi qu'une valeur en tant qu'amendement organique ou calcique. Leur épandage en domaine agricole est principalement motivé par l'attente d'une amélioration des propriétés physiques, chimiques ou biologiques des sols.

Les déchets urbains tiennent toutefois une place à part. Ils soulèvent actuellement des débats passionnés en raison de leur origine non-agricole, de leur composition variable, et de la présence possible d'éléments indésirables (micropolluants organiques, éléments traces métalliques, germes pathogènes) susceptibles de porter atteinte à la qualité des produits ou de l'environnement.

Parmi les nombreuses questions soulevées, on retiendra (au plan scientifique) les suivantes :

1. L'épandage des déchets altère-t-il la qualité des sols ? Les effets potentiellement négatifs liés à la présence d'éléments traces métalliques ou de micropolluants organiques contrebalancent-ils les effets positifs (valeur amendement organique, calcique, etc.) au point de restreindre, voire d'annuler leur intérêt agronomique ?

2. Peut-on obtenir des produits agricoles de qualité en utilisant des déchets urbains ? Y a-t-il des risques pour la santé humaine ? La gestion de la qualité (traçabilité, image de qualité des produits) peut-elle s'accommoder de l'utilisation de déchets ?

Nous tentons ici d'apporter quelques éléments d'information concernant principalement l'impact des déchets urbains sur les sols et les productions agricoles végétales.

1) Déchets urbains en agriculture : produits, volumes, flux.

Boues résiduares urbaines : Les 13.000 stations d'épuration françaises produisent annuellement environ 850.000 tonnes de boues (matière sèche), soit près de 10 millions de tonnes de produit brut. D'après les chiffres donnés par le Ministère de l'Environnement pour 1995, 60% des boues produites sont épanchées en agriculture, 15% sont incinérés, le reste étant mis en décharge. Le déversement en mer n'est pas pratiqué en France. Il sera interdit en Europe à partir de 1998. Les quantités de boues produites sont appelées à s'accroître dans le futur, en raison de l'assainissement généralisé des petites communes et du développement des traitements tertiaires. Les quantités proposées à l'épandage agricole pourraient augmenter suite à la loi du 13 Juillet 1992, qui interdit la mise en décharge de déchets "non-ultimes" tels que les déchets urbains à partir de 2002.

L'épandage des boues résiduares urbaines concerne chaque année une surface de l'ordre de 200.000 hectares. Une proportion croissante des épandages fait l'objet d'un suivi par des conseillers techniques spécialisés, notamment dans le cadre des « Missions Déchets » qui couvrent la moitié des départements français. En amont, les efforts des gestionnaires des réseaux et des stations d'épuration ont permis d'améliorer considérablement la qualité des boues produites (Wiat & Reveillère, 1995).

Composts d'ordures ménagères : Sur les 20,5 millions de tonnes d'ordures ménagères produites annuellement en France, environ 1,5 millions de tonnes sont compostées et fournissent environ 500.000 tonnes de compost. Cette production stagne en raison d'une qualité jugée insuffisante par les utilisateurs potentiels.

Composts de déchets verts et composts mixtes : Les déchets verts des villes (élagage, tonte de pelouses, etc.) représentent potentiellement 3,4 millions de tonnes par an. Environ 400.000 tonnes sont traitées pour donner 130.000 tonnes de compost. Enfin, une trentaine de plates-formes de co-compostage produisent des composts mixtes, à partir de déchets verts, de boues résiduares

et d'autres déchets organiques. Cette filière semble appelée à se développer car une vingtaine de plates-formes sont en projet.

2) Réglementation.

La législation concernant l'utilisation agricole de déchets urbains était jusqu'ici relativement complexe et souvent incomplète. Sous l'égide des ministères de l'Environnement, de l'Agriculture et de la Santé, différentes instances se sont penchées sur les problèmes associés à l'épandage des déchets urbains en domaine agricole : le Conseil Supérieur d'Hygiène publique de France (CSHPF, 1996), la Commission Matières Fertilisantes et Supports de Culture, etc. Les pouvoirs publics et la profession agricole travaillent également à l'élaboration d'une "charte" d'utilisation des boues.

La nouvelle réglementation, qui se met actuellement en place, a le souci d'efficacité et de simplification, mais aussi de rigueur (Deneuvy, 1996). L'approche est en effet basée sur les connaissances les plus récentes et a pour objectif de limiter les risques, afin que ces derniers ne soient pas supérieurs à ceux générés par les pratiques agricoles courantes.

En ce qui concerne les boues de stations d'épuration, la réglementation ne considère plus ces produits comme des "matières fertilisantes", mais comme des déchets. En application de la directive européenne 278 du 12 Juin 1986, relative à la protection de l'environnement, un décret concernant l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées a été élaboré. Il est complété par un arrêté fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles. L'objectif principal de cette réglementation est de protéger encore davantage les sols en cas d'utilisation de boues d'épuration en limitant les flux de micropolluants. Les teneurs limites des boues en micropolluants minéraux ont été divisées par deux, les quantités maximales de boues pouvant être épandues ont été fixées à 30 tonnes de matière sèche par hectare sur une période de 10 ans, et enfin un flux maximum cumulé sur une durée de 10 ans a été établi pour les principaux micropolluants minéraux et organiques. Ainsi par exemple, il ne pourra être apporté plus de 300 g de cadmium par hectare sur une période de 10 ans, cette valeur étant ramenée à 150 g à partir de 2001. Le projet d'arrêté traite également des modalités de surveillance des épandages et des sols, fixant les valeurs limites en éléments traces métalliques dans les sols.

Pour les composts urbains, les composts de déchets verts et les composts mixtes, il s'agissait jusqu'ici de produits "normalisés" et, à ce titre, dispensés de la procédure d'homologation. Les composts relèvent de la norme NF-U 44-051 (9 Juin 1975) concernant les amendements organiques. Or il n'est pas possible de juger de l'innocuité des produits comme l'exige la loi du 13 Juillet 1979 car cette norme ne fait pas mention de valeurs limites pour les contaminants. La Commission des Matières Fertilisantes et Supports de Culture a donc proposé d'étendre à ces produits le principe de l'homologation, en précisant

qu'elle "ne peut être accordée qu'aux produits qui ont fait l'objet d'un examen destiné à vérifier leur efficacité et leur innocuité à l'égard de l'homme, des animaux et de leur environnement, dans les conditions d'emploi prescrites ou normales". L'efficacité recouvre l'efficacité intrinsèque (liée à la composition du produit : teneur en matière organique, en éléments fertilisants) et l'efficacité potentielle (évaluée dans les conditions d'emploi préconisées) d'amélioration de la production végétale en quantité ou en qualité, ou d'amélioration des qualités du sol ou du milieu de culture susceptibles d'entraîner des améliorations de production. L'innocuité fait référence à une composition (analyses) et à l'absence de phytotoxicité ou d'écotoxicité. L'innocuité du produit est basée également sur une limitation des flux. La sous-commission d'étude de la toxicité estime que le flux de cadmium, par exemple, ne devait pas dépasser 15 g par hectare et par an. Pour le cuivre, il est recommandé de ne pas apporter plus de 12 kg/ha de Cu sur 10 ans (ce qui est nettement inférieur aux 4 kg/ha/an appliqués en moyenne sur vigne par les apports de bouillie bordelaise). On notera que les préconisations du Comité Européen de Normalisation TC 223 / WG2 sont encore plus sévères, avec un maximum de 0,8 kg/ha/an de cuivre métal. Les produits résiduels qui, pour une raison ou pour une autre, ne pourraient satisfaire à la procédure d'homologation relèveraient d'une procédure particulière apportant au moins autant de garanties (plan d'épandage, suivi des sols, etc.).

Ce dispositif, administrativement cohérent est-il suffisant ? On ne peut s'empêcher de penser que, homologué ou non, tout produit d'origine résiduel devrait faire l'objet de contrôles stricts lors de son utilisation (suivi d'épandage), ne serait-ce que pour s'assurer que les préconisations d'utilisation (doses, cultures) sont bien respectées et qu'il y a une adéquation entre le type de sol, le produit et les pratiques agricoles. L'objection à cette attitude maximaliste est que l'agriculteur est responsable de ses pratiques et qu'il n'est pas forcément plus justifié de contrôler l'épandage de déchets urbains que d'autres pratiques "courantes" comme l'épandage d'effluents d'élevage ou des traitements pesticides générant des risques environnementaux comparables...

3) Impacts sur la qualité des sols.

3.1) Amélioration des propriétés physico-chimiques des sols.

Riches en matière organique, parfois en chaux ainsi qu'en certains éléments fertilisants, les déchets urbains sont potentiellement intéressants pour améliorer les propriétés des sols (Khaleel *et al.*, 1981).

Il y a une dizaine d'années, c'était essentiellement la valeur fertilisante azotée et phosphatée des boues résiduelles qui motivait leur utilisation. C'est maintenant surtout leur teneur en matière organique (40 à 70% de la matière

sèche) qui intéresse les agriculteurs, confrontés à d'inquiétantes diminutions des stocks organiques dans plusieurs régions. Si de nombreuses interrogations subsistent sur les valeurs de "coefficient isohumique" à appliquer aux boues résiduelles (et même sur la pertinence de cette notion pour les boues), il semble qu'une amélioration de certaines propriétés physico-chimiques et biologiques des sols soit attribuable aux apports de matière organique (Chaussod & Nouaïm, 1996). En outre, les boues chaulées représentent un amendement calcique appréciable. De plus en plus de stations d'épuration pratiquent le chaulage des boues car il s'agit d'un traitement efficace tant pour l'hygiénisation que pour la stabilisation de ces produits, d'où une réduction importante des odeurs et des risques liés aux pathogènes.

Les composts urbains, les composts de déchets verts et les composts mixtes représentent également une source intéressante de matière organique, bien que la qualité (et les prix) varie considérablement d'un produit à l'autre. Les composts épanchés en mulch dans les vignobles ont été utilisés avec succès pour lutter contre l'érosion (Ballif & Here, 1988) et restent potentiellement intéressants à cet égard même si, pour d'autres raisons, cet usage est actuellement en régression. L'utilisation de compost à forte dose a permis de réhabiliter des sols dégradés, notamment en zone méditerranéenne (Albaladejo *et al.*, 1994). Des apports massifs de composts (50 à 150 t/ha) ont également été utilisés avec succès pour réhabiliter des sols contaminés par des éléments tels que le cuivre. C'est le cas par exemple d'anciens sols de vignes des costières du Gard pour l'implantation de vergers de pêcheurs. L'effet complexant de la matière organique et neutralisant des carbonates présents dans ces composts sont invoqués. Enfin, des quantités considérables de déchets organiques sont utilisés avec satisfaction pour la revégétalisation de sols après travaux (talus d'auto-route, carrières, etc.).

3.2) Risques de contamination des sols

Les déchets urbains peuvent contenir des contaminants (micropolluants minéraux ou organiques, germes pathogènes) à des niveaux plus ou moins importants selon la nature du déchet et la filière de traitement, ce qui représente des risques potentiels pour le sol et pour les productions agricoles. Aussi convient-il de faire en sorte que ces niveaux ne dépassent pas les limites acceptables en termes de risque pour la santé humaine et l'environnement. Pour cela, il faut non seulement contrôler la qualité des produits épanchés, mais également limiter les flux et surveiller les teneurs dans les sols.

À cet égard, les conséquences des épandages doivent être comparées aux risques liés aux pratiques agricoles courantes (utilisation d'engrais, de produits phytosanitaires, d'effluents d'élevage), afin que l'utilisation de déchets ne présente pas plus de risques "environnementaux" que ces pratiques traditionnelles et si possible plutôt moins. Cela est possible en suivant les recommanda-

tions et préconisations d'emploi prenant en compte les spécificités des produits résiduels, des productions agricoles et des sols. Le contrôle de l'impact des épandages sur la qualité des sols (avec un suivi diachronique des propriétés) représente déjà un progrès considérable.

- Micropolluants minéraux.

La nature des préoccupations est quelque peu différente selon les éléments : le plomb, le cadmium, le mercure posent des problèmes de contamination de la chaîne alimentaire et de santé humaine (Conseil Supérieur de l'Hygiène Publique de France, 1996). Le zinc, le nickel, le cuivre, le cadmium peuvent provoquer des symptômes de phytotoxicité. Enfin, le cuivre, l'argent, et éventuellement le zinc et le nickel, sont susceptibles de perturber le fonctionnement biologique du sol.

Pour la plupart de ces éléments, les limites sont fixées principalement par rapport aux risques pour la santé humaine *via* la contamination des chaînes alimentaires. La directive européenne de 1986 sur la protection de l'environnement, a proposé des limites d'application annuelles quelle que soit l'origine de la contamination (Sauerbeck, 1987 ; CEC Directive, 1986). Exprimées en kg/ha/an, elles sont de :

Hg = 0,1 ; Cd = 0,15 ; Ni = 3 ; Cu = 12 ; Pb = 15 ; Zn = 30

Ces valeurs sont en cohérence avec la pratique agricole. Ainsi, Bourgeois et Michelin (1997) ont fait le bilan de 8 années d'utilisation de boues liquides à Grignon : les 4 apports effectués représentent 24 t/ha de matière sèche, 0,086 kg de cadmium, 12 kg de cuivre, 3 kg de plomb et 20 kg de zinc. Les teneurs en cadmium et en zinc du sol ont augmenté respectivement de 0,02 et de 4,8 mg.kg⁻¹. En ce qui concerne le cadmium, il est important de considérer que l'épandage de boues permet de réduire l'apport d'engrais phosphatés contenant cet élément. Dans les expérimentations de Huet et Rouy (1997) à Ensisheim, il est montré que 20 tonnes brutes de boues (respectivement 3,6 et 3 tonnes de M.S. pour les deux boues étudiées) apportent environ 200 unités de P₂O₅. Compte tenu des teneurs en cadmium des boues (2 mg.kg⁻¹) et de l'engrais utilisé (30 mg.kg⁻¹), les flux de cadmium sont plus faibles dans les traitements "boues" (8 et 13 g en 3 ans) que dans le traitement "engrais minéral" (14,5 g en 3 ans), pour des quantités équivalentes de phosphore apporté.

Plus généralement, c'est le rapport Cd / P qui devrait être considéré, l'objectif étant d'apporter le minimum de cadmium avec la fertilisation phosphatée, que celle-ci soit minérale ou organique (résiduelle). Dans l'exemple ci-dessus, les boues apportent respectivement 36 et 44 mg de Cd par kg de P, contre 68 mg de Cd par kg de P pour l'engrais. Les engrais analysés par Singh (1991) titraient de 32 à 224 mg Cd par kg de P. Cette approche relativise l'inté-

rêt des boues en fonction de leur teneur en cadmium et en phosphore, ainsi qu'en fonction de la disponibilité de cet élément (l'efficacité du P des boues est de 60 à 80% de celui du phosphate monocalcique, excepté pour les boues traitées thermiquement dont l'efficacité du P ne dépasse pas 30 à 40 %). Il convient également à ne pas enrichir inutilement les sols en phosphore, c'est à dire au delà des besoins des cultures, en raisons des risques pour l'environnement (eutrophisation des eaux superficielles).

Il est clair que la contamination des sols par les éléments traces métalliques n'est pas due exclusivement aux déchets. Pour en rester à l'exemple du cadmium, les apports minimum retenus par Singh (1991) pour la Norvège sont de 1 g/ha/an ; les exportations étant estimées de l'ordre de 0,2 g/ha/an, il y a manifestement un enrichissement net. En France, les apports de cadmium aux sols agricoles sont estimés à 3 g/ha/an. Dans l'essai "Dehérain" à Grignon, les mesures dans la parcelle "NPK depuis 1902" (40 kg P/ha/an) montrent un enrichissement de l'ordre de 200 g en 40 ans, soit 5 g/ha/an, cette valeur incluant les apports atmosphériques. Ces chiffres sont à rapprocher du flux de 15 g/ha/an considéré par la Sous-Commission des Toxiques (Ministère de l'Agriculture) comme une valeur à ne pas dépasser lors de l'utilisation de produits homologués.

- Micropolluants organiques.

Les boues résiduaire contiennent une grande variété de micropolluants organiques, la plupart à l'état de traces (Jauzein *et al.*, 1995). La future réglementation a prévu de fixer des teneurs limites pour deux familles de micropolluants organiques, les PCB (Poly-Chloro-Biphényles) et les HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques). Cependant, les méthodes d'extraction et de dosages ne semblent pas encore parfaitement au point, des résultats divergents étant fournis par des laboratoires différents analysant le même produit... Nous avons là un exemple où la législation est en avance sur les connaissances scientifiques et techniques, ce qui risque de poser des problèmes d'application. Ceci doit en tous cas inciter les chercheurs à redoubler d'efforts aussi bien en matière analytique qu'en matière d'écotoxicologie et d'épidémiologie. Pour sa part, le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France n'a proposé de limites que pour les HAP, et a insisté sur la nécessité de poursuivre des recherches en ce domaine avant de conclure. Il a estimé qu'un délai de 4 ans était nécessaire avant de fixer valablement les valeurs limites et les modalités d'application. Enfin, les esters de phtalate ou les nonylphénols (dérivés des détergents non-ioniques de type nonylphénol-polyéthoxylate) ne sont pas mentionnés dans les projets de réglementation, en dépit des suspicions (notamment d'effets endocriniens) à leur égard.

Le devenir de ces produits dans le sol reste incertain. Bien que plusieurs d'entre eux soient réputés récalcitrants à la biodégradation, le développement

de microflores dégradantes spécialisées (dont certaines apportées par les boues elles-mêmes) pourraient empêcher leur accumulation dans le sol.

- Pathogènes.

Pour éviter toute contamination des sols, il est nécessaire que les produits résiduels subissent une stabilisation suffisante et si possible une hygiénisation (compostage, chaulage, etc.). Les conditions régnant habituellement dans les sols de nos régions ne sont pas favorables au développement des germes potentiellement pathogènes apportés par les déchets. Certains cependant (oeufs d'helminthes en particulier) peuvent survivre quelques semaines à quelques mois. Il convient donc de suivre scrupuleusement les recommandations en matière sanitaire (délai de 6 semaines avant mise à l'herbe des animaux, et de 12 mois pour la culture de légumes destinés à la consommation humaine). La surveillance épidémiologique n'a jamais mis en évidence de problème sanitaire lié à une utilisation "normale" des déchets urbains. Le seul cas observé en France où les boues sont suspectées d'être à l'origine d'un événement sanitaire (mort d'un animal) est lié à des pratiques "hors normes" (Elissalde *et al.*, 1994). Les règles en vigueur s'avèrent suffisantes pour limiter les risques sanitaires à des niveaux nettement inférieurs à ce qui est observé avec les pratiques agricoles classiques d'épandage d'effluents d'élevage.

3.3) Effets sur les caractéristiques biologiques des sols.

Il est légitime de chercher à connaître les effets des pratiques culturales sur la « qualité biologique » des sols (Chaussod, 1996) car les activités biologiques sont à la base de nombreux processus d'intérêt agronomique. En particulier, l'étude de fonctions et populations microbiennes permet d'évaluer la réponse de l'écosystème-sol à une perturbation telle que l'épandage de déchets.

La matière organique apportée par les déchets entraîne une stimulation de la biomasse microbienne et de ses activités, de façon plus ou moins intense et plus ou moins durable selon la nature et la dose des apports (Linères *et al.*, 1989). Sur le long terme, c'est à dire 22 ans après un apport de 125 t/ha (matière sèche), Chander & Brookes (1991) n'ont pas observé d'effet négatif sur la biomasse microbienne pour des teneurs du sol en éléments-traces métalliques inférieures aux normes européennes. En revanche, des apports massifs ou continus de boues fortement contaminées ont provoqué des modifications quantitatives et qualitatives de la microflore des sols. Par exemple, Chaudri *et al.* (1992) ont observé que des souches de *Rhizobium* capables de noduler le trèfle, issues de parcelles très contaminées par des boues résiduelles, avaient acquis une résistance aux métaux lourds mais avaient perdu leur aptitude à fixer l'azote. Les germes fixateurs d'azote (libres ou symbiotiques) pourraient être utilisés pour évaluer les risques écotoxicologiques liés à l'utilisation de pro-

duits tels que les boues résiduaires. Martensson & Torstensson (1996) ont ainsi montré que le cuivre, l'argent et le nonylphénol étaient potentiellement toxiques pour les fixateurs libres d'azote ; toutefois, de fortes teneurs en ammonium provoquent également une diminution de la fixation libre d'azote.

En raison de la diversité des micro-organismes et de leurs comportements, ainsi que de la complexité des interactions avec le milieu ou avec les plantes, il apparaît aujourd'hui nécessaire de documenter davantage les limites d'utilisation des boues dans différents contextes pédoclimatiques, pour mieux protéger la qualité et les potentialités des sols agricoles.

4) Impacts sur la qualité des productions agricoles.

4.1) Epannage de déchets et qualité intrinsèque des produits.

En matière de production agricole, et indépendamment de la gestion des déchets, il est bien entendu de la plus haute importance de prendre en compte la composition du produit récolté et les risques pour la santé humaine ou animale, et non pas uniquement la phytotoxicité. Les conséquences de l'utilisation de déchets urbains sur la composition des végétaux font donc naturellement l'objet d'études.

Chumbley & Unwin (1982) ont étudié 172 couples sol / plante concernant 11 légumes cultivés sur des sols ayant reçu des boues résiduaires. Les pH des sols sont compris entre 5,0 et 8,1, les teneurs en M.O. variant de 0,9 à 9,1%. Ces auteurs n'ont pas observé de relation entre les teneurs en Pb dans les légumes et dans les sols. En revanche, il existe des corrélations significatives entre les teneurs en Cd dans les plantes et les sols. Les réponses sont très différentes selon les plantes, les facteurs de concentration variant de 0,07 pour le chou à 1 pour l'épinard. En fait, l'absorption des éléments traces métalliques par la plante dépend au moins autant des propriétés physico-chimiques du sol, en particulier du pH, que de la teneur totale de ces éléments dans le sol. Les résultats de Narwal *et al.* (1983), rapportés dans le tableau ci-dessous, illustrent le fait que le pH du sol est au moins aussi important pour la teneur en cadmium (mg.kg^{-1} de m.s.) des plantes que les quantités de Cd apportées par les boues :

	pH 5,6	pH 6,0	pH 7,0
Témoin	0,16 a	0,05 d	0,02 g
Boues 50 t/ha	0,13 b	0,08 e	0,06 d
Boues 100 t/ha	0,18 c	0,10 f	0,08 e

Les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes.

Il n'en reste pas moins vrai que, à l'exception peut-être du cuivre, les éléments traces métalliques apportés par les déchets urbains sont plus biodisponibles que ceux préexistants dans le sol. L'épandage de boues chargées en Cd augmente généralement la teneur des récoltes en cet élément (Naylor & Loehr, 1981). En partant de données épidémiologiques, ces auteurs concluent que les apports cumulés de cadmium dans les sols agricoles ne devraient pas dépasser 5 kg/ha et que la teneur des boues en cet élément ne devrait pas dépasser 25 mg.kg⁻¹ en cas d'application sur des plantes accumulatrices. Actuellement aux USA, l'Agence pour la Protection de l'Environnement (EPA) limite à 18,4 kg/ha la quantité cumulée de cadmium qui peut être épandue en domaine agricole sur grandes cultures, la teneur des boues en cadmium devant être inférieure à 39 mg.kg⁻¹.

Pour les autres éléments, l'effet est généralement très peu marqué, comme le montre la composition du blé récolté dans des parcelles ayant reçu pendant 6 ans des boues résiduelles (Baffi *et al.*, 1995). Dans cette expérimentation au champ, des boues ont été apportées 6 années de suite, de 1988 à 1993, à raison de 15 tonnes de matière sèche par hectare et par an sur un sol limoneux calcaire (pH 7,8 - CEC 13,8 mEq/100g - 1,6 % M.O.). Les quantités cumulées correspondantes d'éléments traces métalliques apportés par les boues ont été, par hectare, de 23,6 kg Zn, 14 kg Cu, 1,8 kg Pb et 3,3 kg Ni. Les teneurs observées (tableau ci-dessous) sont sensiblement plus élevées dans les plantes provenant des parcelles ayant reçu des boues, mais se situent dans la "normale" pour le cuivre et le zinc (Coïc & Coppenet, 1989). En revanche, pour le plomb, les valeurs observées dans le grain sont supérieures à la normale, y compris pour le témoin.

		Témoin	Boues
Zn	grain	31,9	37,2
	paille	11,5	14,6
Cu	grain	3,51	3,83
	paille	1,75	2,97
Ni	grain	0,33	0,61
	paille	1,04	0,93
Pb	grain	1,27	2,40
	paille	2,45	2,63

Les valeurs sont exprimées en mg.kg⁻¹ de matière sèche

Ce type de résultat n'est pas rare : nombreuses sont les expérimentations mises en place pour étudier l'effet des boues résiduelles et dont un résultat aussi important qu'inattendu a été la constatation d'un dépassement des normes en vigueur dans le traitement "témoin" pour au moins un élément, dans le sol ou dans la plante.

En France, une étude récente (ECOMET, 1997) a porté sur l'accumulation d'éléments traces métalliques dans le blé consécutive ou non à l'épandage de boues de stations d'épuration des eaux urbaines sur des parcelles agricoles dans le Vexin français. Le sol retenu est un sol brun lessivé sur limons (Néoluvisol), représentatif d'une large proportion de la surface agricole française. Après une enquête auprès de 19 agriculteurs visant à connaître l'historique de leurs parcelles, trois d'entre elles ont été retenues. La première, située sur la commune de Chaussy, n'a pas reçu de boues urbaines. La seconde, localisée sur la commune de Gouzangrez, a reçu un seul épandage de boues allemandes. La troisième, située sur la commune de Vélannes-la-Ville a reçu quatre épandages de boues depuis 1978 dont trois de la station d'Achères et un d'une station allemande.

La figure 1 présente la variation de la concentration en 6 éléments traces métalliques dans les grains de blé en fonction de la concentration totale en métal dans l'horizon superficiel des 3 sols. Sauf dans le cas du zinc, il n'y a pas de corrélation entre la teneur du métal dans le sol et dans le grain. Les grains de blé de la parcelle de Vélannes-la-Ville (4 épandages) sont les plus riches en métaux. Un cas particulier est à noter pour le cadmium : bien que les concentrations en Cd soient du même ordre de grandeur dans les sols des parcelles de Chaussy et de Gouzangrez, les concentrations dans les grains de blé de Chaussy sont aussi élevées que dans ceux de Vélannes-la-Ville. L'historique de la parcelle de Chaussy révèle une fertilisation en phosphate naturel et l'usage d'amendement calcaire contenant du cadmium plus disponible que celui des boues.

Un autre facteur à prendre en considération est le temps écoulé entre les apports de "métaux lourds" et la culture. Les éléments traces métalliques, et en particulier le cadmium, évolueraient progressivement vers des formes de plus en plus stables, sous l'influence de processus physico-chimiques (et probablement biologiques). Ils deviendraient de moins en moins extractibles (Morel & Guckert, 1984 ; Bell *et al.*, 1991) et de moins en moins mobilisables par les plantes. Hinesly *et al.* (1979) ont montré qu'après 3 ans d'apport de boues très chargées en cadmium (232 tonnes de boues et 58 kg Cd), la teneur en Cd du maïs grain était de 0,44 mg.kg⁻¹ ppm, alors que 4 ans après la cessation des apports la teneur en Cd du grain était redescendue à 0,07 mg.kg⁻¹ ppm, valeur comparable à celle observée dans le traitement sans boues.

Pour tenir compte des facteurs sol et temps, il serait souhaitable de disposer de tests capable de prévoir la biodisponibilité des éléments traces métalliques. Les tests classiques à l'EDTA ou au DTPA sont généralement inopérants car en fait inadaptés à cette problématique (O'Connor, 1988). En revanche, l'extraction au CaCl₂ 0,1M a donné des résultats intéressants. La validité de la méthode proposée par Sauerbeck & Styperek (1984) pour le zinc et le cadmium a été confirmée par les travaux de Sanders *et al.* (1987) pour le zinc, le nickel et le cuivre. Toutefois, pour le cuivre, quand la teneur "sol" augmente, la teneur

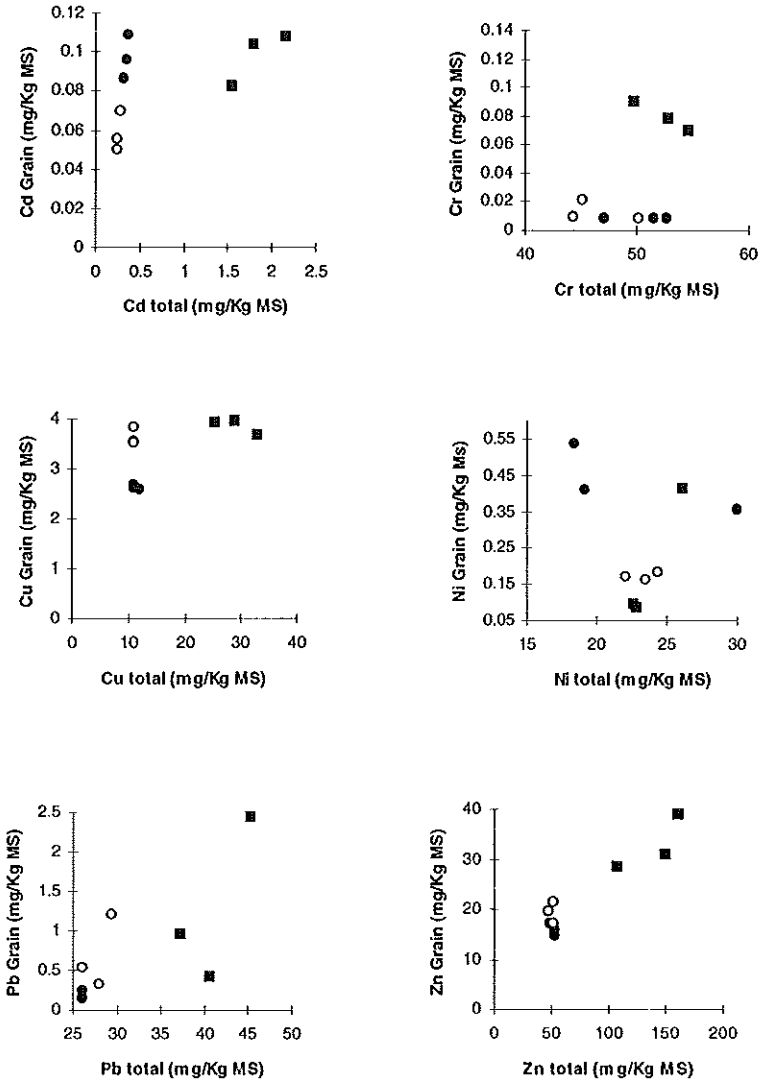


Figure 1 : Concentration en métal dans le grain de blé en fonction de sa concentration totale dans l'horizon de sol 0 - 30 cm.

● : parcelle de Chaussy ○ : parcelle de Gouzangrez ■ : parcelle de Vélannes-la-Ville

"plante" change peu. L'extraction au CaCl_2 présente l'avantage de dépendre à la fois de la concentration en élément total, du pH et de la CEC du sol. L'étude de Lebourg *et al.* (1996) a montré que l'extraction au CaCl_2 0,01N est biologiquement la plus pertinente, c'est à dire la mieux à même de prévoir la biodisponibilité des éléments traces métalliques.

Ces déterminations chimiques ne permettent cependant pas de tenir compte des antagonismes entre éléments, tel que le rapport Cd / Zn qui intervient aussi bien pour l'absorption du cadmium par les plantes que par l'homme et les animaux (CSHPF, 1996). De même, des interactions sont à prévoir avec la valeur fertilisante des produits : par un phénomène de dilution, on peut observer une diminution en concentration de certains éléments traces, même si en valeur absolue les quantités prélevées augmentent.

En conclusion, il n'est pas exagéré de dire que la teneur en éléments-traces métalliques dans la récolte dépend souvent davantage du contexte pédo-climatique que des apports de déchets. Il s'avère indispensable de dresser en France un « état des lieux » concernant les teneurs en éléments-traces métalliques dans les sols et les principales productions agricoles, et ceci indépendamment de l'épandage ou non de boues résiduaires. Un « référentiel sol / plantes » (Chassin *et al.*, 1997), mettant en relation la teneur observée dans une plante modèle (blé, épinard) avec les principales caractéristiques et la teneur observée dans le sol sur lequel elle a poussé, serait particulièrement utile pour modéliser la qualité potentielle des productions par type de sol et leur sensibilité à des apports d'éléments-traces par les engrais, les amendements ou les déchets.

4.2) Épandage de déchets et « image-qualité » des produits.

Le problème de la compatibilité entre l'image qualité des produits et l'épandage de déchets urbains a été soulevé par quelques industriels, et en particulier par la Société Bonduelle qui produit des légumes surgelés et de conserve sur un créneau commercial de haut de gamme. La "charte Bonduelle" (Couteau, 1997) est motivée par des préoccupations commerciales, liées à la valeur "santé" des produits commercialisés, ainsi que par une démarche qualité industrielle classique, soucieuse en particulier de la "traçabilité" des intrants (dont les boues, en cas d'épandage) et d'une totale innocuité. Concrètement, l'épandage des boues n'est pas interdit par la charte, mais sérieusement encadré, en ce qui concerne l'origine, la mise en oeuvre et la composition des produits résiduaires. Ainsi par exemple, les teneurs limites en éléments traces métalliques des produits pouvant être épandus sont nettement plus basses que celles de la nouvelle réglementation française (voir tableau page suivante).

Cette démarche, qui vise à renforcer les contrôles et les contraintes (notamment au niveau de la "qualité" des produits résiduaires) a le mérite de

réintroduire le rationnel dans un domaine très sensible. Elle ne ferme pas la porte à une voie d'élimination des déchets qui reste souvent irremplaçable pour la société, mais elle peut contribuer au contraire à la prise de conscience que toute activité agricole doit s'inscrire dans une "démarche qualité" globale concernant les sols, les intrants, les pratiques, les produits.

Elément	France		Allemagne	Charte Bonduelle	
	limite	moyenne (*)		limite	référence
Cd	20	5,3	5	6	3
Hg	10	2,7	8	4	2
Pb	800	133	900	200	100
Ni	200	39	200	180	90
Cr	1000	80	900	300	150
Cu	1000	334	800	800	400
Zn	3000	921	2000	2500	1250

(*) Valeurs moyennes observées en France, Wiart & Revellère (1995).
Toutes les valeurs sont exprimées en mg.kg⁻¹ de M.S.

Conclusion :

Nos sociétés génèrent des volumes considérables de déchets qu'il faut éliminer. Or, il n'existe pas de réelle "élimination" au sens où ils disparaîtraient. On essaie plutôt de s'en débarrasser (mise en décharge, épandage agricole, incinération) en minimisant les risques environnementaux (contamination des sols, des eaux, perturbation des écosystèmes) et les risques concernant la santé humaine (qualité des produits / nutrition, qualité de l'air...). Avec la fermeture des décharge en 2002 pour les déchets non ultimes (tels les déchets urbains), il ne reste que l'incinération ou l'épandage. Le choix de l'une ou l'autre de ces deux filières doit être raisonné d'abord en termes de bilan environnemental et de risques, ensuite en termes économiques et d'acceptation sociale. Si l'épandage en domaine agricole ne paraît pas souhaitable *a priori*, l'incinération présente aussi des inconvénients (notamment un impact plus important sur la santé humaine). Il ne semble pas, à l'heure actuelle, qu'une filière s'impose par rapport à l'autre : le poids du contexte local (type de déchet et niveau de contamination, disponibilités en espaces d'épandage, types de sols et systèmes de culture) demeure prépondérant. Des recherches restent nécessaires dans différents domaines pour rendre les réponses fiables en terme de maîtrise du risque et anticiper sur les évolutions à long terme. Il faut en particulier se donner les moyens de prévoir le devenir des micropolluants des déchets en fonction des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. En tous cas, une certaine forme de pérennisation de la filière agricole passe par des exigences connues et énoncées de longue date (Catroux, 1983) mais dont la mise en application reste beaucoup trop lente. Le problème aujourd'hui n'est peut être pas d'être "pour" ou "contre" l'épandage agricole, mais d'imposer les conditions

pour que, si épandage il y a, toutes les garanties soient réunies, tant pour la qualité des sols (patrimoine de production) que pour la qualité des produits. L'approche la plus rationnelle consiste à resituer l'épandage agricole des déchets dans le cadre plus général des pratiques agricoles : les déchets urbains ne doivent pas être utilisés en domaine agricole s'ils présentent des risques supérieurs aux pratiques agricoles courantes. L'attitude consistant à incriminer les déchets et la pratique de leur épandage en domaine agricole est hasardeuse car un effet boomerang serait à craindre si l'on s'apercevait que des pratiques agricoles "traditionnelles" s'avèrent en fait plus dangereuses.

Les flux d'éléments traces métalliques dans les sols ont tendance à diminuer, qu'il s'agisse du plomb et du cadmium des retombées atmosphériques, du cadmium apporté par les engrais phosphatés, du cuivre utilisé en viticulture (passé de 12 à 4 kg/ha/an en 25 ans). Il y a aujourd'hui de 2 à 10 fois moins de "métaux lourds" dans les boues qu'il y a une quinzaine d'années et les épandages sont de mieux en mieux contrôlés et encadrés. La qualité de nos aliments est meilleure aujourd'hui qu'hier, et l'espérance de vie de la population augmente. Il n'y a pas de raison objective de s'alarmer. Pourtant la perception qu'en ont nos concitoyens est à l'opposé. S'agit-il uniquement d'un problème de communication ? Ou bien de façon plus profonde s'agit-il d'un fait de société, le citoyen revendiquant le "risque zéro" ?

Notre mode de vie génère de plus en plus de déchets. Il faut, individuellement et collectivement, rechercher tous les moyens de réduire les flux d'éléments potentiellement dangereux et en optimiser la gestion au plan environnemental. Ne négligeons pas non plus le fait que cela peut générer des emplois !

Bibliographie :

- ALBALADEJO J., STOCKING M., DIAZ E. and CASTILLO V. 1994. Land rehabilitation by refuse amendments in a semi-arid environment : effect on soil chemical properties. *Soil technology*, 7, pp 249-260.
- BAFFI C., SILVA S. and BOTTESCHI G. 1995. Bioavailability of sludge-borne zinc, copper, nickel and lead in a cropland site: a field study. 25th annual meeting ESNA, Piacenza (It.)15-19/09/95
- BALLIF J.L. et HERRE C. 1988. Contribution à l'étude du ruissellement des sols viticoles en Champagne. Effets d'une couverture de compost urbain. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 74, pp 105-110.
- BELL P.F., JAMES B.R. and CHANEY R.L. 1991. Heavy metal extractability in long-term sewage sludge and metal salt-amended soils. *Journal of Environmental Quality*, 20, pp 481-486.
- BOURGEOIS S. et MICHELIN J. 1997. Essai de Grignon sur la valorisation des boues. Evolution des teneurs en éléments-traces métalliques des sols. In : Aspects sanitai-

- res et environnementaux de l'épandage des boues d'épuration urbaines. Journées Techniques ADEME, Paris 5-6/06/97, 4 p.
- CATROUX G. 1983. Qualitative and economical criteria for sewage sludge use in agriculture. In : Disinfection of sewage sludge : technical, economic and microbiological aspects. Proceedings E.E.C. Workshop, Zürich, 11-13/05/82, A.M. Bruce, A.H. Havelaar & P. L'Hermite, Eds., pp 127-138.
- CEC Directive 1986. Council directive of 12 June 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture. Official Journal of the European Communities n° L181/6-12 (4 July 1986).
- CHANDER K. and BROOKES P.C. 1991. Effects of heavy metals from past application of sewage sludge on microbial biomass and organic matter accumulation in a sandy loam and silty loam U.K. soil. *Soil Biology and Biochemistry*, **23**, pp 927-932.
- CHASSIN P., MENCH M. et BAIZE D. 1997. Qualité des produits végétaux récoltés et éléments-traces métalliques - Nécessité d'une base de données de références sol-plante ? In : Aspects sanitaires et environnementaux de l'épandage des boues d'épuration urbaines. Journées Techniques ADEME, Paris 5-6/06/97, pp 135-141.
- CHAUDRI A.M., McGRATH S.P. and GILLER K.E. 1992. Metal tolerance of *Rhizobium leguminosarum* biovar trifolii from soil contaminated by past applications of sewage sludge. *Soil Biology and Biochemistry*, **24**, pp 83-88.
- CHAUSSOD R. 1996. La qualité biologique des sols : évaluation et implications. *Etude et gestion des Sols*, **3**, pp 261-277.
- CHAUSSOD R. et NOUAIM R. 1996. La valeur organique des boues d'épuration. Caractéristiques et évolution dans le sol. Effets sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. In : Valeur fertilisante des boues d'épuration ; journées techniques ADEME, Paris 4-5/12/96, ADEME Editions, pp 23-30.
- CHUMBLEY C.G. and UNWIN R.J. 1982. Cadmium and lead content of vegetable crops grown on land with a history of sewage sludge application. *Environmental Pollution (series B)*, **4**, pp 231-237.
- COÏC Y. et COPPENET M. 1989. Les oligo-éléments en agriculture et en élevage. Incidences sur la nutrition humaine. INRA Editions (Paris), 114 p.
- COUTEAU A. 1997. Comment intégrer l'épandage des boues dans le cahier des charges de qualité des productions végétales ? (Charte Bonduelle). In : Epandage des boues résiduaires - Aspects sanitaires et Environnementaux. Journées Techniques de l'ADEME, Paris 5-6/06/97, 10 p.
- CSHPF (Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France) 1996. Plomb, cadmium et mercure dans l'alimentation : évaluation et gestion du risque. Lavoisier Tec & Doc (Paris), 237 p.
- DENEUVY J.-P. 1996. Rénovation de la réglementation relative à l'épandage des boues de stations d'épuration urbaines. Document interne, Ministère de l'Environnement, 45 p.
- ECOMET 1997. Elaboration d'une stratégie d'étude et de suivi de la qualité d'un agrosystème sous contrainte d'apports d'éléments-traces métalliques. Rapport final d'AIP INRA "Ecodynamique des substances à caractère polluant", J.L. Morel, coordinateur, 50 p.
- ELISALDE N., GANIERE J.P., L'HOSTIS M., LEGEAS M., DEMILLAC R. et CARRE J. 1994. Les germes pathogènes dans les boues résiduaires des stations d'épuration urbaines. Collection Valorisation Agricole des Boues d'Épuration, ADEME, 90 p.

- HINESLY T.D., ZIEGLER E.L. and BARRETT G.L. 1979. Residual effects of irrigating corn with digested sewage sludge. *Journal of Environmental Quality*, **8**, pp 35-38.
- HUET S. et ROUY N. 1997. Comportement de certains micro-polluants métalliques dans le sol et les produits agricoles après épandage de boues urbaines. In : Aspects sanitaires et environnementaux de l'épandage des boues d'épuration urbaines. Journées Techniques ADEME, Paris 5-6/06/97, 4 p.
- JAUZEIN M., FEIX I. et WIART J. 1995. Les micro-polluants organiques dans les boues résiduares de stations urbaines. Collection Valorisation Agricole des Boues d'Épuration, ADEME, 224 p.
- KHALEEL R., REDDY K.R. and OVERCASH M.R. 1981. Changes in soil physical properties due to organic waste application: a review. *Journal of Environmental Quality*, **10**, pp 133-141.
- LEBOURG A., STERCKEMAN T., CIESIELSKI H et PROIX N. 1996. Intérêt de différents réactifs d'extraction chimique pour l'évaluation de la biodisponibilité des métaux en traces du sol. *Agronomie*, **16**, pp 201-215.
- LINERES M., CHAUSSOD R., JUSTE C. and SOLDA P. 1989. Microbial biomass and biological activities in an acid sandy soil treated with sewage sludge or farm yard manure in a long-term field experiment. In : Int. Symp. "Sewage sludge treatment and use", Dirkzwager & L'Hermite, Eds., pp 517-520.
- MARTENSSON A.M. and TORSTENSSON L. 1996. Monitoring sewage sludge using heterotrophic nitrogen fixing microorganisms. *Soil Biology and Biochemistry*, **28**, pp 1621-1630.
- MOREL J.L. et GUCKERT A. 1984. Evolution en plein champ de la solubilité dans DTPA des métaux lourds du sol introduits par des épandages de boues urbaines chaulées. *Agronomie*, **4**, pp 377-386.
- NARWAL R.P., SINGH B.R. and PANHWAR A.R. 1983. Plant availability of heavy metals in a sludge-treated soil. I : effect of sewage sludge and soil pH on the yield and chemical composition of rape. *Journal of Environmental Quality*, **12**, pp 358-365.
- NAYLOR L.M. and LOEHR R.C. 1981. Increase in dietary cadmium as a result of application of sewage sludge to agricultural land. *Environmental Science and Technology*, **15**, pp 881-886.
- O'CONNOR G.A. 1988. Use and misuse of the DTPA soil test. *Journal of Environmental Quality*, **17**, pp 715-718.
- SANDERS J.R., McGRATH S.P. and ADAMS T. McM. 1987. Zinc, copper and nickel concentrations in soil extracts and crops grown on four soils treated with metal-loaded sewage sludges. *Environmental Pollution*, **44**, pp 193-210.
- SAUERBECK D.R. 1987. Effects of agricultural practices on the physical, chemical and biological properties of soils : Use of sewage sludge and agricultural wastes. In : Scientific basis for soil protection in the european community. Barth and L'Hermite, Eds., Elsevier Applied Science (London, U.K.), pp 181-210.
- SAUERBECK D.R. and STYPEREK P. 1984. Predicting the cadmium availability from different soils by CaCl_2 -extraction. In : Processing and Use of sewage sludge, 3rd CEC Int. Symp. Brighton (UK) 27-30/09/83. Reidel Publ. Comp. (NL), pp 431-434.
- SINGH B.R. 1991. Unwanted components of commercial fertilizers and their agricultural effects. *Proceedings of the Fertilizer Society (London)*, **312**, 28 p.
- WIART J. et REVEILLERE M. 1995. La teneur en éléments-traces métalliques des boues résiduares des stations d'épuration urbaines françaises. *T.S.M.*, **12**, pp 913-922.

RECYCLAGE AGRICOLE DE DECHETS INDUSTRIELS ET QUALITE DES SOLS - SITUATION EN HAUTE NORMANDIE -

En Haute Normandie, le bilan des épandages de déchets industriels en agriculture s'établit à 83 000 Tonnes de matière sèche pour l'année 1996. Cet inventaire exclut 5 000 T MS de poussières de lin recyclées dans la fabrication de terreau, 45 000 T MS d'écumes de sucrerie (amendement calcique normalisé) dont le mode de distribution en agriculture s'apparente à un circuit commercial et 200 000 T MS « d'eaux » ou de « terres » de sucrerie épandues en agriculture ou utilisées en reconstitution de sols.

Répartition en fonction de l'origine du déchet industriel

7 Papeteries ou industries du coton	62 100 T MS/an	75 %
20 Industries agro-alimentaires	8 600 T MS/an	10 %
4 Unités de décalcification des eaux de forage produisant des amendements calciques normalisés	6 700 T MS/an	8 %
8 Industries chimiques ou assimilées	5 500 T MS/an	7 %

Le flux d'épandage de déchets industriels (dans le sens strictement défini précédemment) peut être comparé aux autres flux d'épandage :

- L'azote organique des déchets industriels représentent 50 % de l'azote des boues résiduaire urbaines (production potentielle à la capacité nominale des stations d'épuration) et 2,5 % de l'azote des effluents d'élevage.

- Les déchets industriels participent à la fertilisation P et K à hauteur respectivement de 0,6 et 0,2 % de la fertilisation minérale et organique.

- Les déchets industriels constituant des amendements calciques permettent la satisfaction de 7 % des besoins d'entretien calcique des terres labourables.

- La matière organique des déchets industriels représente 4 % de celle des effluents d'élevage.

Flux comparés des apports d'éléments fertilisants et d'amendements :

Tonnage annuel	T MS	T N	T P ₂ O ₅	T K ₂ O	T CaO	T MO
Ecumes sucrerie	45 000				17 000	
Effluents sucrerie	100 000	32	15	177		
Boues d'Achères	24 000		1 300		6 000	
Boues urbaines	18 000	1 000	800		1 700	
<i>Production potentielle à la capacité nominale des stations d'épuration avec un rendement optimisé, ce qui correspond environ au double de la production de boues actuellement épandues</i>						
Compost OM	8 800		60	70		3 400
Déchets industriels	83 000	530	330	190	14 500	23 100
Effluents d'élevage	827 000	22 000	21 500	49 200		580 000
N minéral (campagne 93/94) ⇐		80 000				
P ₂ O ₅ minéral (campagne 93/94) ⇐			30 500			
K ₂ O minéral (campagne 93/94) ⇐				58 000		
Besoin d'entretien des Terres Labourables ⇐					220 000	
						sans réserve calcique

Ce document vise à dresser un bilan de l'impact des épandages de déchets sur la qualité des sols, au travers des flux d'épandage d'éléments-traces métalliques et à présenter la procédure adoptée en Haute Normandie pour l'instruction des dossiers d'Autorisation des épandages de déchets industriels.

Teneurs en éléments-traces métalliques des déchets industriels et impact des épandages sur la qualité des sols :

On dispose de références concernant les teneurs en éléments-traces métalliques pour la quasi totalité des opérations d'épandage de déchets issus des papeteries ou des industries chimiques (ou assimilées) et pour la moitié environ des opérations d'épandage de déchets issus de l'industrie agro-alimentaire.

On situera les épandages par rapport aux préconisations du projet d'arrêté « boues », qui impose les contraintes les plus importantes :

- les valeurs limites et les flux de métaux autorisés sont divisés par 2, par 4 pour le Cadmium (à partir de 2001) par rapport à la Norme NF U 44 041.
- la « norme sols » reste inchangée.

Les risques d'accumulation des métaux dans les sols sont mesurés en comparant les flux d'apport par les déchets et les teneurs « naturelles » des sols. Pour simplifier, à ce niveau d'approche, il n'a pas été tenu compte des pertes par érosion.

Les teneurs en éléments-traces métalliques des déchets et les flux d'épandage correspondant aux doses agronomiques maximales sont présentés dans les tableaux suivants :

Moyenne des teneurs en éléments-traces métalliques des déchets en fonction de leur origine et/ou du traitement (Haute Normandie) :

en mg/Kg MS	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Boues de décalcification des eaux de forage	< 1	7	7	0,19	7	15	30
Déchets des IAA	< 1	21	34	0,60	16	8	215
Déchets des Papeteries	< 1	22	59	0,42	20	14	300
Déchets Industries chimiques ou assimilées	1,4	30	75	0,40	29	18	171
Cendres IAA + charbon	1,0	70	198	0,27	60	19	136
Références BONDUELLE	3	150	400	2	90	100	1250
Boues urbaines	2,8	46	292	1,70	23	128	902
Cendres Papeteries	3,9	117	292	0,24	57	195	656
Références NF U 44 041	20	1000	1000	10	200	800	3000
Limites proj. arrêté 2001	10	1000	1000	10	200	800	3000
Boues d'Achères	12,1	121	533	6,00	51	434	1807

**Maxima des apports moyens en éléments-traces métalliques
par les épandages de déchets (Haute Normandie) :**

en Kg/ha/10 ans	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Boues de décalcification des eaux de forage		0,17	0,15	0,003	0,12	0,47	0,7
Déchets des IAA	0,01	0,6	0,8	0,01	0,43	0,33	4
Déchets Industries chimiques ou assimilées	0,02	0,5	2,8	0,01	0,5	0,5	4
Boues urbaines	0,03	0,5	3	0,02	0,2	1,3	9
Déchets des Papeteries	0,05	1,6	5,3	0,06	1,4	1,3	9 (35)
Cendres IAA + charbon	0,02	2,1	6,3	0,01	2	1,2	4,5
Cendres Papeteries	0,12	3,5	8,8	0,007	1,7	5,9	35
Limites proj. arrêté 2001	0,15	15	15	0,15	3	12	45
Boues d'Achères	0,3	2,9	12,7	0,14	1,22	10,4	43
Limites NF U 44 041	0,6	30	30	0,3	6	24	90

**Teneurs moyennes en éléments traces métalliques
des sols de Haute Normandie**

en mg/ Kg MS de sol	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Sols de Haute Normandie	0,26	37	11	0,064	15	24	52
Limites NF U 44 041	2	150	100	1	50	100	300

⊙ Les boues de décalcification des eaux de forage, qui sont des amendements calciques normalisés, ont des teneurs en éléments-traces métalliques négligeables.

⊙ Les déchets des industries agro-alimentaires présentent de faibles teneurs en éléments-traces métalliques, toujours en dessous de 8 % des valeurs limites du projet d'arrêté. Les déchets des industries agro-alimentaires sont toujours compatibles avec la charte « Bonduelle ».

Les flux d'apport de métaux, correspondant à la dose d'apport maximal déterminée sur les valeurs agronomiques, sont toujours inférieurs à 15 % du flux autorisé.

Par rapport aux teneurs « naturelles » des sols de Haute Normandie, les apports moyens annuels représentent moins de 0,25 % des teneurs des sols, sauf pour le Mercure de certaines boues de laiteries où les apports peuvent

représenter un maximum de 0,75 %. Il faudrait environ, dans le cas le plus limitant, 2000 ans pour atteindre dans les sols les valeurs limites.

⊙ Les boues et sous-produits des industries chimiques ont des teneurs en éléments-traces métalliques en moyenne situées en dessous de 15 % des valeurs limites. Ces teneurs sont en dessous des valeurs de référence de la charte « Bonduelle », sauf pour la teneur en Cadmium des catalyseurs phosphoriques usés.

Les flux d'apport de métaux, correspondant à la dose d'apport maximal déterminée sur les valeurs agronomiques, sont toujours inférieurs à 20 % du flux autorisé.

Le flux maximal annuel de métaux représente moins de 1 % des teneurs naturelles moyennes des sols et dans 80 % des cas moins de 0,1 %. Il faudrait 2000 ans ou plus pour atteindre dans les sols les valeurs limites, 1000 ans pour les apports en Cuivre dans le cadre d'une opération d'épandage de boues de savonnerie.

⊙ Les sous-produits des papeteries présentent des teneurs en éléments-traces métalliques en moyenne situées en dessous de 10 % des valeurs limites. Les valeurs moyennes, pour chaque opération, sont en dessous des valeurs de référence de la charte « Bonduelle », sauf pour la teneur en Zinc d'une boue de papeterie.

Les doses d'épandage peuvent être très élevées pour certains sous-produits de papeteries recyclés comme amendements organiques. Les flux d'apport de métaux, correspondant à la dose d'apport maximal déterminée sur les valeurs agronomiques, sont en général inférieurs à 50 % du flux autorisé (sauf 80 % pour le Zinc sur une opération d'épandage de boues de papeterie).

Le flux maximal annuel de métaux représente au maximum 2 % des teneurs naturelles moyennes des sols. Il faudrait environ, dans les cas les plus limitants, plus de 500 ans pour atteindre dans les sols les valeurs limites (200 ans pour le cas particulier d'une boue riche en Zinc).

⊙ Les cendres issues de l'incinération de sous-produits de l'industrie du café (en mélange avec du charbon) ou de papeterie montrent des teneurs en éléments-traces métalliques toujours situées en dessous de 30 % des valeurs limites. Les cendres de papeterie sont au dessus des valeurs de référence de la charte « Bonduelle » pour le Plomb et de Cadmium.

Les doses d'épandage, en moyenne de 3 tonnes de matière sèche par hectare et par an, sont assez élevées. Les flux d'apport de métaux, correspondant à la dose d'apport maximal déterminée sur les valeurs agronomiques, peuvent atteindre :

- 80 % pour le Cadmium et sont supérieurs à 40 % pour cinq des sept métaux du projet d'arrêté, concernant les cendres de papeterie,
- 70 % pour le Nickel, 40 % pour le Cuivre et sont inférieurs à 15 % pour le reste des métaux, concernant les cendres de déchets de café et charbon.

Le flux maximal annuel de métaux représente au maximum 2,6 % des teneurs naturelles moyennes des sols. Il faudrait environ, dans le cas le plus limitant du Cuivre, 300 ou 400 ans pour atteindre dans les sols les valeurs limites.

En conclusion, les apports d'éléments-traces métalliques dans les sols sur les opérations d'épandage de déchets industriels en Haute Normandie sont conformes au projet de réglementation (projet d'arrêté).

Les opérations d'épandage de cendres représentent un apport non négligeable de métaux dans les sols. Sur chacune des opérations d'épandage de cendres, le bilan des suivis agronomiques mis en place devra rapidement préciser la valeur agronomique des cendres (disponibilité des éléments fertilisants et valeur neutralisante) et permettra d'établir la faisabilité de reconduction de la filière « épandage agricole ».

Les épandages de certaines boues de stations d'épuration de papeteries, réalisés à dose importante lorsqu'elles constituent un amendement organique, génèrent des flux d'apports de métaux notables en Zinc, Cuivre et Nickel. On dispose de peu d'analyse sur ces boues (opérations mises en place récemment), le suivi de ces opérations devrait intégrer un suivi analytique des boues et un observatoire de la qualité des sols du périmètre.

Les épandages de sous-produits de l'industrie agro-alimentaire pour lesquels on dispose d'un suivi analytique des boues (environ la moitié des opérations d'épandage) ont un impact faible sur l'accumulation des éléments-traces métalliques dans les sols.

Encadrement des opérations d'épandage de déchets Industriels en Haute Normandie :

Statut réglementaire des opérations d'épandage de déchets industriels en Haute Normandie (hors sucrerie) :

17 opérations ont fait l'objet d'un arrêté préfectoral	57 700 T MS/an	69 %
5 opérations pour lesquelles le déchet épandu a fait l'objet d'une homologation, il y a plus de 10 ans (*)	15 500 T MS/an	19 %
5 opérations concernent des produits normalisés	6 800 T MS/an	8 %
19 opérations ne sont pas encadrées de façon spécifique	3 000 T MS/an	4 %

(*) L'homologation, au titre des matières fertilisantes, doit être renouvelée au bout de 10 ans. La régularisation des épandages au titre des Installations Classées est engagée pour 3 déchets homologués depuis plus de 10 ans.

L'encadrement réglementaire des épandages de déchets industriels non normalisés se fait, de façon la plus courante aujourd'hui, par arrêté préfectoral au titre des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement.

En Haute Normandie, dans le cadre du Plan Régional d'Élimination des Déchets Industriels Spéciaux, une démarche a été adoptée pour réglementer les épandages agricoles de déchets industriels :

⇒ un Comité Départemental de Valorisation Agricole de Déchets Industriels a été constitué dans chacun des départements haut-normands. Il est réuni par la DRIRE et regroupe l'ensemble des organismes ou services de l'Etat concernés par les épandages (DRIRE, DSV, DDAF, DDASS, DDE, DIREN, Agence de l'Eau, Ademe, Chambre d'Agriculture, MIRSPAA). Le comité donne un avis technique au cas par cas sur chaque dossier d'épandage :

- Il se réunit, si besoin, en amont du projet pour déterminer la faisabilité des épandages et préciser le cahier des charges de l'étude du plan d'épandage.
- Dans tous les cas, avant le passage au Comité Départemental d'Hygiène, il valide le plan d'épandage (y compris le protocole de suivi) et élabore les prescriptions de l'arrêté d'Autorisation.

⇒ un cahier des charges pour les épandages de déchets industriels a été élaboré, intégrant un protocole d'étude de faisabilité des épandages qui comprend les étapes décrites ci-après.

→ Caractérisation du déchet

L'origine du déchet doit être établie le plus finement possible pour appréhender sa composition, la présence éventuelle de toxiques ou d'indésirables et sa variabilité.

Une analyse de caractérisation devra permettre par l'analyse fonctionnelle de déterminer le 100 % de la matière sèche.

La qualité physique (stabilité, tenue en tas, aptitude à l'épandage...) du déchet conditionne l'efficacité de l'opération d'épandage. Tout risque de présence d'éléments indésirables dans les déchets (inertes, verre, cailloux, plastiques...) doit être écarté. Une étude de filière de traitement du déchet doit permettre d'optimiser l'intérêt agronomique de l'opération de recyclage.

→ Innocuité

En fonction du schéma d'obtention du déchet, peuvent être réalisées des analyses de micro-polluants organiques et/ou métalliques, et éventuellement microbiologiques.

Concernant les éléments-traces métalliques, le respect de la norme est vérifié (en teneur et en flux). Pour tous les métaux, intégrés ou non dans la norme, dosés en quantité non négligeable, les flux d'apports seront comparés aux teneurs « naturelles » des sols pour apprécier les risques d'accumulation dans les sols (exemple de l'aluminium dans certains sous-produits de

papeterie, du manganèse dans des cendres de papeterie). Cette approche est également préconisée sur les éléments P et Mg non biodisponibles à court terme.

Lorsque l'on ne dispose pas d'informations permettant de caractériser très précisément le déchet (cas des déchets issus de process complexe ou des boues de stations d'épuration industrielles) ou que les références manquent pour interpréter les résultats d'analyse (cas des micro-polluants organiques), une étude d'écotoxicité est réalisée. Le travail actuellement entrepris par l'ADEME sur l'élaboration d'une méthodologie pour l'évaluation des risques écotoxicologiques liés au recyclage agricole des déchets est très attendu.

→ Valeur agronomique

On procède, dans une première étape, par une analyse de l'ensemble des paramètres agronomiques. Des analyses complémentaires sont réalisées pour préciser l'efficacité du déchet recyclable comme fertilisant ou amendement :

- Caractérisation des fertilisants azotés organiques pour approcher la vitesse de minéralisation de l'azote : Nik , NH_4 , C/N... (Le critère du rapport C/N est quelquefois inadapté pour déterminer la valeur agronomique des produits riches en graisse ou en carbone « soluble » comme les marcs de café)
- Caractérisation biochimique de la matière organique
- Solubilité du Ca et Valeur neutralisante
- Solubilité des oligo-éléments (Zinc, Cuivre, Bore, Manganèse, Soufre ...)
- Solubilité dans l'eau ou dans des acides faibles pour P, K et Mg (mais il faut noter le manque de référence pour l'interprétation des résultats analytiques - par exemple : le phosphore des boues résiduelles urbaines est « réputé » disponible à 70 %, le phosphore « Olsen » ou « soluble eau » des boues est, sur les quelques analyses disponibles à la MIRSPAA, inférieur à 10 % du phosphore total).

Compte tenu de la difficulté, à partir de l'analyse, de présager de l'efficacité du déchet comme fertilisant ou amendement, des tests de biodisponibilité peuvent être recommandés et un protocole d'acquisition de références sur la valeur du déchet est intégré dans le suivi des épandages.

→ Potentialités locales de recyclage

Un bilan des épandages est disponible sur la Haute Normandie : il établit, au niveau cantonal, le niveau de saturation des potentialités de recyclage des déchets en fonction de leur valeur agronomique. Cet état des lieux permet d'orienter les nouvelles opérations d'épandage de déchets vers les secteurs les plus favorables. Dans la pratique, c'est le recyclage de déchets comme amendement calcique qui est le plus important, il a un impact non négligeable sur le marché des amendements calciques, mais on ne rencontre pas de

situation de saturation. Le recyclage des éléments P et K et de la matière organique a un impact globalement négligeable sur l'agriculture régionale. Par contre les capacités d'accueil des zones d'élevage, pour les déchets constituant des fertilisants azotés organiques, sont quelquefois très réduites.

Lorsque la faisabilité du recyclage agricole est démontrée, une étude de plan d'épandage est réalisée. Elle comprend :

→ **une étude du périmètre d'épandage :**

- Préconisations d'emploi (dose, interculture ou culture en place, intégration dans le plan de fumure ou d'entretien calcique ou humique, précautions sanitaires...)
- Aptitude du parcellaire à l'épandage (contraintes topographiques, pédologiques, hydrogéologiques, environnementales, de protection de la ressource en eau, d'urbanisation...)
- Potentialités de recyclage du périmètre par un bilan apports/exportations (N, P, K, Ca, Mg, MO...) et un calendrier prévisionnel d'épandage (prise en compte des effluents d'élevage ou d'autres sous-produits épandus sur le même périmètre)

→ **un schéma d'organisation des épandages :**

- Description et justification des modalités de stockage, de transport, d'épandage et éventuellement d'enfouissement (modalités techniques et désignation des prestataires)
- Conventions signées entre les agriculteurs et le producteur et/ou son représentant

→ **un protocole de suivi des épandages :**

- Suivi analytique du déchet
- Dépouillement annuel du cahier d'épandage et vérification de la conformité des pratiques aux préconisations de l'étude du périmètre d'épandage
- Suivi des sols adapté à chaque opération d'épandage, en fonction des caractéristiques du déchet :
 - réseau de parcelles de référence pour le contrôle du niveau de fertilité des sols (suivi métaux, matière organique et fertilité chimique)
 - suivi de la fertilisation azotée pour les déchets riches en azote organique
 - essai pour l'acquisition de références sur l'efficacité agronomique du déchet
 - suivi de l'écotoxicité des sols
 - suivi de la qualité des eaux sur le bassin hydrogéologique concerné par le périmètre d'épandage...
 - Modalités de l'appui technique aux agriculteurs du périmètre et dispositif de transparence et de traçabilité.

La démarche mise au point en Haute Normandie vise à concilier l'importance du débouché agricole (environ 7 % de la SAU de Haute Normandie) pour les déchets industriels et le respect du milieu récepteur : l'épandage doit se faire dans des conditions assurant à la fois l'innocuité du déchet et son intérêt agronomique. Elle instaure également une concertation entre les différents services intervenant sur les dossiers d'épandage agricole, ce qui garantit un bon encadrement de la filière (avec l'appui indispensable d'une « Mission Déchets » fonctionnant sur le modèle d'une mission de « Service Public ») et des possibilités d'adaptation des procédures en fonction de l'évolution des connaissances et de la réglementation.

Dominique FRELET

M.I.R.S.P.A.A

B.P. : 59 - 76232 BOIS GUILLAUME Cedex

Téléphone : 02 35 59 47 66 - Télécopie : 02 35 59 47 70

Bibliographie :

- Le recyclage agricole des sous-produits industriels et urbains - Situation en Haute Normandie - ADEME - Janvier 1996
- Epandage agricole de déchets et sous-produits urbains et industriels : Etat des lieux / Seine Maritime / Eure - MIRSPAA - Janvier 1997
- Guide méthodologique pour la valorisation agricole des déchets industriels - Plan Régional pour l'Elimination des Déchets Industriels Spéciaux en Haute Normandie - Février 1994
- Cahier des charges : dossiers de déclaration et d'autorisation des épandages de boues résiduaires de stations d'épuration urbaines - CDH de Seine Maritime - Décembre 1993
- Cahier des charges des épandages des boues résiduaires de stations d'épuration urbaines - CDH de l'Eure - Juin 1995

VALORISATION AGRONOMIQUE EN AVAL DE LA SUCRERIE

L. AFFRET¹ et J.P. LESCURE²

¹BÉGHIN-SAY, Service Agronomique, Sucrerie de Châlons-en-Champagne, F-51510 Fagnières,
FRANCE

²SNFS, Service Environnement, B.P. 39, F-59651 Villeneuve d'Ascq Cédex, FRANCE

INTRODUCTION

Les principaux problèmes environnementaux générés par le traitement de la betterave proviennent des déséquilibres qui accompagnent la concentration et le traitement d'un flux important de matières végétales sur les lieux de transformation. Ils sont liés :

- aux pertes inévitables de matières, végétaux, jus sucrés ou produits séparés au cours du process et leurs dégradations biologiques, soit essentiellement des matières organiques biodégradables dont une légère fraction protéique;
- à la séparation des terres entraînées avec les racines au cours des arrachages et transportées sur les lieux de fabrication; elles constituent surtout une charge minérale inerte, mais extraites de la rhizosphère, elles sont particulièrement riches en tous les éléments indispensables au développement de la biomasse, en particulier la matière organique azotée.

La restitution au sol de ces matières les réintroduit dans le cycle de la vie et permet d'éviter les intrants de synthèse. Par une gestion rigoureuse, ce système permet de profiter de l'énorme pouvoir épurateur du sol, d'éviter les accumulations nuisibles de fertilisants et de protéger efficacement les nappes en réduisant au maximum les pertes par drainage.

ÉTUDE DE ZONE

Les sucreries françaises sont placées sous la surveillance des autorités administratives. L'épandage doit faire l'objet d'une étude d'impact. Il doit concilier l'intérêt des usagers de l'environnement, celui des agriculteurs et l'intérêt de l'industriel. A cet effet, on rassemblera des données sur les produits épandus, sur le contexte et sur les conditions pratiques de l'épandage, à l'intérieur du périmètre d'épandage, visant à déterminer les meilleures conditions possibles.

Données sur les produits épandus. Il est indispensable de bien connaître l'effluent envoyé à l'épandage, à savoir :

- **Nature des effluents** : eaux boueuses, eaux décantées, avec mélange des eaux de pressage des herbes ou avec les herbes elles-mêmes, éventuellement complétées avec des écumes, etc...
- **Composition des effluents** : un ordre de grandeur des éléments à déterminer est indiqué dans le tableau N° 1. Les méthodes d'analyses sont conformes, autant que peut se faire, aux normes AFNOR lorsqu'elles existent, sinon on choisit les méthodes les plus couramment pratiquées.

Tableau n°1
Sucreries de Champagne : Fourchettes de variation en 1992

Déterminations	Unité	Eau brute	Eau filtrée	Solides
Matières en suspension :				
totales	g/L	150 - 250		
mat. organique	%			déc-15
mat. minérale	%			85 - 88
Densité		1,09 - 1,13		
pH		7,6 - 8,6		
Conductivité	mS cm ⁻¹		3,8 - 6,75	
Calcaire total	CO ₃ Ca g/L			76 - 121
Calcaire actif	CO ₃ Ca g/L			45 - 65
D.C.O.	mg/L		11 600-13 600	
Carbone organique	C mg/L			7 000 - 10 600
Azote total Kjeldahl	N mg/L		100 - 120	600 - 980
Composés oxydés de l'Azote	N mg/L		1,1 - 1,4	
Chlorures	Cl mg/L		240 - 310	
Soufre total	S mg/L		17 - 37	310 - 630
Phosphates	P ₂ O ₅ mg/L		0,4 - 7,5	630 - 980
Calcium	Ca mg/L		800 - 1 800	3 200 - 4 000
Magnésium	Mg mg/L		50 - 350	230 - 270
Potassium	K mg/L		500 - 620	270 - 340
Sodium	Na mg/L		45 - 65	16 - 25
Ammonium	N mg/L		6-28	

Données environnementales. L'étude doit permettre de délimiter les zones sensibles à exclure. Elle concerne la situation géographique, le climat en fonction des données météorologiques régionales, le contenu hydrogéologique — infrastructure existante ou piézomètres — et le contenu

Tableau n°2
Aptitude des sols

FORMATION	TYPE DE SOL	ÉPAISSEUR (cm)	RU ¹ (mm)	CEC ² (mmol %)	DOSE MAXI m ³ /ha	APTITUDE À L'ÉPANDAGE	SYMBOLE CARTE
Limon de recouvrement	Sol brun lessivé	100	200	7	1500	Très bonne	L ₁
	Sol brun calcique	80	160	10	1200	Bonne	L ₂
Limon soliflué	Sol brun calcaire	80	160	10	1200	Bonne	E ₁
		60	120	10	1000	Assez bonne	E ₂
Colluvions de plateau	Sol brun	100	200	7	1500	Très bonne	V ₁
	Sol brun calcaire	100	200	7	1500	Très bonne	V ₂
Craie	Sol brun calcaire	60	120	10	1000	Assez bonne	C ₁
	Rendzine	40	80	10	600	Faible	C ₂
Alluvions	Sol brun hydromorphe	100	200	10	-	Nulle	W
Argile à silex	Sol brun Eutrophe	80	120	15	800	Passable	X

Sols présentant une TRÈS BONNE APTITUDE

Ce sont les sols limoneux les plus épais, dérivés de la couverture de limon de recouvrement ainsi que des formations colluviales correspondantes; ils présentent un pouvoir auto-épurateur satisfaisant et un pouvoir de rétention très élevé.

Les épandages d'eau boueuse peuvent être pratiqués sans restriction.

Sols présentant une BONNE APTITUDE

Ce sont les sols limoneux d'épaisseur moyenne, dérivés de la couverture limon de recouvrement et, en continuité, de limons soliflués : ils présentent un pouvoir auto-épurateur satisfaisant et un pouvoir de rétention assez élevé.

Les épandages d'eau boueuse peuvent encore y être couramment pratiqués.

Sols présentant une ASSEZ BONNE APTITUDE

Ce sont les sols limoneux les plus épais, dérivés des limons soliflués, et, en continuité les sols limono-calcaires dérivés des craies les plus profondément altérées par gélifraction ; ils présentent un pouvoir autoépurateur satisfaisant mais un pouvoir de rétention médiocre.

Les épandages d'eau boueuse peuvent y être pratiqués dans une limite d'une infiltration maximale un peu plus réduite.

Sols présentant une APTITUDE PASSABLE

Ce sont des sols argilo-caillouteux, moyennement épais, dérivés des argiles à silex caractérisant les alluvions anciennes; ils présentent un pouvoir auto-épurateur modéré, lié à sa faible perméabilité, et un pouvoir de rétention très élevé.

Les épandages d'eau boueuse peuvent y être pratiqués, de préférence en début de campagne.

Sols présentant une APTITUDE FAIBLE

Ce sont les sols limono-calcaires caillouteux les plus superficiels, dérivés des craies les plus superficielles; ils présentent un pouvoir auto-épurateur limité, lié à sa perméabilité excessive, et un pouvoir de rétention faible. Les épandages d'eau boueuse peuvent y être pratiqués, avec des procédures adaptées : faibles lame d'eau, nécessitant plusieurs passages.

Sols présentant une APTITUDE NULLE

Ce sont les sols alluviaux hydromorphes, saisonnièrement inondables et soumis à une nappe peu profonde.

¹ RU = réserve utile

² CEC = Capacité d'échange cationique

pédologique en précisant les caractères suivants : succession d'horizons, texture de l'horizon de surface, degré d'hydromorphie, substrat et degré d'altération, profondeur du sol, charge et nature des cailloux

Les données recueillies sont rassemblées dans un document cartographique qui délimite les zones d'aptitudes différentes à l'épandage (tableau N°2), en excluant certains secteurs pour des raisons de protection (captage, cours d'eau), et ceux qui sont déconseillés pour éviter certaines nuisance (zones habitées).

Les données pratiques de l'épandage. On tient compte des cultures pratiquées sur le périmètre ainsi que les fumures et rendements habituels, la destination des résidus de culture et le pourcentage de superficie consacrée à chaque culture grâce à une enquête auprès des agriculteurs afin d'estimer les exportations. Les valeurs d'exportations sont réactualisées au fur et à mesure de l'approfondissement des connaissances dans ce domaine.

Selon un raisonnement agronomique, on calcule les doses d'effluents qui sont compatibles avec la culture et le type de sol, tant au niveau hydrique qu'au niveau des apports de fertilisants. Certains éléments vont être fixés par le sol, d'autres risquent de migrer en profondeur. L'azote organique, apporté essentiellement dans l'apport tellurique, ne sera disponible pour la plante qu'après minéralisation.

Les apports en azote mobilisable (minéralisation de l'azote du sol, minéralisation des engrais organiques et fumures minérales) doivent équilibrer les besoins de la culture et les pertes inévitables. Ils fixent la dose admissible en m^3/ha . Un suivi rigoureux tiendra encore compte des arrières effets sur les cultures suivantes. On calcule les quantités correspondantes d'autres éléments apportés, elles seront confrontées ensuite avec les besoins des cultures et les types de sol : l'étude de zone aboutit donc à déterminer pour chaque compartiment, et pour les différentes cultures pratiquées la dose annuelle admissible, le fractionnement nécessaire de cette dose annuelle, la fréquence de retour possible sur une même parcelle et l'intensité maximale d'arrosage admissible (en mm/h).

LES TECHNIQUES

Épandage des eaux avec les boues. L'arrosage peut se faire de plusieurs façons :

- *L'épandage des eaux boueuses sur champs billonnés* est une technique déjà ancienne qui s'est beaucoup développée dans les sols profonds. L'écoulement gravitaire se fait en évitant la classification des matériaux.

- *L'épandage par aéro-aspersion au canon ou avec rampe* améliore encore l'uniformité et assure une pluviométrie instantanée très faible. Suivant la nature des terrains et les effets recherchés, on peut procéder soit sur sol spécialement préparé, soit sur sol nu. La réussite de l'opération est liée à une bonne alimentation des cultures qui dépend largement de l'humidité du sol, de la densité de l'enracinement et du bon fonctionnement des racines. La juste répartition et le maintien des structures du sol à l'épandage font donc nécessairement partie de l'ensemble des techniques culturales.

Épandage des eaux décantées. Les eaux sont épandues après décantation, soit directement pendant la campagne betteravière, soit après stockage dans un bassin oxygéné par brassage pour limiter les odeurs.

Irrigation. La valorisation après le 15 avril est une irrigation, souvent faite sous la responsabilité directe des exploitants agricoles qui ont passé un accord avec la sucrerie. Cette dernière leur fournit les eaux, les études et suivis agronomiques et le plus souvent toute l'infrastructure, lorsqu'elle doit être créée de toute pièce.

SUIVI AGRONOMIQUE

La notion d'épuration s'évalue par une approche, type bilan et la valorisation agricole des effluents permet d'optimiser la production des surfaces concernées. Les eaux sont régulièrement analysées. Ces analyses permettent de déterminer les apports fertilisants et la bonne gestion de la fertilisation, mais ne sont connues qu'*a posteriori*. La maîtrise et à la régularité de l'apport d'eau sur les champs, sont le gage de la réussite de la fertilisation complémentaire et de l'épuration des eaux. Cette démarche permet de donner un conseil de fertilisation, individualisé à chaque parcelle, remis aux agriculteurs concernés, sous forme de plan de fumure pour quatre ans sur deux types de rotation en fonction des quantités apportées sur la parcelle (tableau N°3). Certaines parcelles font l'objet d'un suivi agronomique complet afin de vérifier le bien-fondé des hypothèses prises quant aux éléments majeurs (N, P, K, Mg) apportés par les eaux de sucreries. L'opération ne peut être réussie que grâce à un dialogue constructif entre maître d'œuvre et exploitants agriculteurs.

Un suivi hydrogéologique permet de contrôler l'efficacité du système en suivant l'évolution de la chimie des eaux souterraines sous les champs d'épandage.

Tableau N°3
Conseil Individualisé de fertilisation

VALEUR FERTILISANTE DES EAUX			
ÉLÉMENTS	PHASE	Valeur fertilisante en Uha	
		Pour 100 mm	Pour 40 mm
N	Liquide	29	106
	Solide	235	
P2O5	Liquide	7	394
	Solide	979	
K2O	Liquide	555	313
	Solide	363	
MgO	Liquide	579	402
	Solide	425	

ÉPANDAGE DE LA CAMPAGNE

MONSIEUR

Lieu dit de la parcelle épandue : Parcelle N° 1

Surface : 10 ha

Lame d'eau épandue : 40 mm

CONSEIL DE COMPLÉMENT DE FUMURE

1ère année				2de année				3ème année				4ème année							
BETTERAVE				BLÉ				POIS ou LUZERNE				BLÉ ou LUZERNE							
N	P	K	Mg	N	P	K	Mg	P	K	Mg	P	K	Mg	P	K	Mg	P	K	Mg
70	0	0	0	190	0	0	0	0	40	0	0	250	0	0	70	0	0	350	0
FUMURE CONSEILLÉE HORS ÉPANDAGE :																			
150	150	300	120	220	0	0	0	80	120	0	100	350	120	70	70	0	50	350	0

ÉTUDES PARTICULIÈRES

Rappel bibliographique et historique. L'épuration des matières organiques dissoutes a été étudiée par Kramer (1960). Cependant les capacités du sol, correctement exploitées, sont infiniment supérieures à la seule action des micro-organismes agissant dans l'épuration classique : le complexe sol-culture est un système qui peut conduire à une épuration de tous les éléments minéraux contenus dans les eaux.

Cas particulier de l'azote. Il est essentiel de connaître le comportement global du sol après épandage, en particulier la vitesse de minéralisation de l'azote sous toutes ses formes.

Le sol est un milieu vivant qui contient une réserve d'azote importante et qui peut libérer entre 25 et 70 kg N/an pour les cultures sous l'action des micro-organismes. On cherche à l'évaluer par différents procédés (étuve, méthode Hébert ou méthode EUF). L'épandage des eaux terreuses apporte une supplémentation azotée sous deux formes différentes :

- La fraction solide : sa teneur en azote est très voisine de celle de la rhizosphère (environ 2 % des matières solides) ;
- La fraction liquide : l'azote y est, soit sous forme minérale (ammoniacque produit par saponification en fabrication), soit sous forme d'acides aminés.

Les matières organiques stimulent le développement des micro-organismes qui fixent rapidement les formes libres de l'azote.

Les études lysimétriques. Des dispositifs lysimétriques ont montré que si les éléments solubles comme les chlorures sont très rapidement exportés par drainage, il n'en est rien en ce qui concerne l'azote. Les pertes par drainage sont du même ordre ou même inférieures à celles rencontrées avec une fertilisation normale : Catroux et coll. (1974), Dutil et Muller (1979), Remy et Machet (1982).

Dans tous ces essais, comme dans les épandages industriels, l'azote total Kjeldahl est souvent en concentration assez élevée, mais avec des teneurs variables, 300 à 1 000 mg/litre, en fonction des sites et des années. Jusqu'à une période récente, suite aux travaux de DUTIL et MULLER (1979) on estimait que la minéralisation était de 25 % sur les 12 mois qui suivent l'apport par épandage.

La minéralisation de l'azote en place. La part prépondérante des apports d'azote par les eaux terreuses a une origine tellurique .

Pour actualiser les connaissances, la profession sucrière et 5 sucreries qui pratiquent l'épandage ont participé à une étude, organisée en 1993, par le Centre d'Analyse et de Valorisation Industrielle des Substrats Agricoles (CAVISA), associant plusieurs professions agro-alimentaires, et confiée à la station agronomique de l'INRA de Châlons-Fagnières. Il s'agit d'un essai comparatif avec répétition, sur sol nu la première année, avec culture de colza la deuxième année. Une comparaison systématique est réalisée à partir des analyses de sol et d'un calcul prévisionnel selon un modèle mathématique mis au point à l'INRA de Laon.

En ce qui concerne les eaux de sucreries, l'étude montre que, contrairement aux observations antérieures, la minéralisation de l'azote des parcelles arrosées avec des eaux terreuses de sucrerie n'est pas sensiblement différente de celle des parcelles de référence avec une incertitude de ± 15 %. Dans les conditions classiques de l'épandage avant culture de printemps ce même essai a montré une mobilisation supplémentaire d'azote par la culture suivante, permettant de réduire d'autant la fertilisation complémentaire (AZOBIL). L'INRA attribue ces changements à une meilleure séparation des feuilles au lavage et à une meilleure gestion de l'azote dans la culture de la betterave.

CONCLUSION

Il existe plusieurs manières de traiter les problèmes d'environnement. La technologie industrielle proposée par les éco-industries est souvent la seule mise en exergue. Nous venons de voir que la voie agronomique, qui applique des règles strictes pour concilier les intérêts de l'environnement de l'agriculture et des sucreries, s'avère encore plus performante que les biotechnologies, car le cycle de vie, poussé beaucoup plus à fond dans un sol cultivé, exporte aussi les éléments minéraux.

Les nombreuses études effectuées, la multiplicité des contrôles et les résultats obtenus permettent de la présenter comme l'une des **milleures technologies disponibles**. Pour pallier le vocabulaire insuffisant qui ne distingue pas l'utilisation empirique du sol et l'acquis technologique issu de fructueuses rencontres entre l'agriculture, la recherche agronomique et l'industrie agro-alimentaire, nous proposons de l'appeler la **fertil irrigation**.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 Catroux G., Germont J.C., Heitz F. et Bidan P. , 1974, "L'épandage des eaux résiduaires de sucrerie" - Ann. agron., 25, 307-337
- 2 Dutil P. et Muller J., 1979, "L'épandage des eaux résiduaires des industries agricoles en Champagne crayeuse", Travaux de la Station de Science du Sol de Châlons-sur-Marne, Publication N° 69
- 3 Dutil P. et Muller J.C., 1979, "L'épandage des eaux résiduaires des industries agricoles en Champagne crayeuse", C.R. de l'Acad. d'Agr., 12, 989-1005
- 4 Kramer G., 1960, "Die Reinigung der Abwässer von Zuckerfabriken im Boden, Zucker, 436-441.
- 5 Rémy J.C., Machet J.M., 1982, "Utilisation des eaux boueuses de sucrerie en épandage sur sol de limon", Etude INRA Station agronomique de Laon, Agence Financière de Bassin Seine-Normandie.

ELEMENTS DE CONCLUSION

Marion GUILLOU
Ministère de l'Agriculture, de la
Pêche et de l'Alimentation

En France, peut-être encore plus qu'ailleurs, nous avons profondément conscience du fait que la qualité des sols est intimement liée à la qualité des productions agricoles qui sont cultivées sur ces sols. La notion de terroir, plus particulièrement dans le domaine viticole, en est un exemple patent. Chacun est bien convaincu qu'un grand cru ne peut provenir que de la petite portion de sol qui en a fait la renommée, et encore faut-il que les soins dont il a bénéficié soient aussi à la hauteur de cette renommée. Alliée à un savoir faire parfois ancestral, cette notion de terroir est à la base du système des appellations d'origine, qui dépasse maintenant largement le cadre de ce domaine viticole.

Connaître le sol, ses qualités mais aussi ses défauts afin d'être en mesure de les corriger, est un préalable indispensable. Il convient de souligner ici le rôle essentiel joué par le GEMAS (Groupe d'Etudes Méthodologiques pour l'Analyse des Sols) dans ce domaine. Les outils et les méthodes de caractérisation des sols sont en pleine évolution. Il est possible de déceler la présence de plus en plus d'éléments ou de substances pouvant présenter des risques et de suivre leur évolution dans le temps.

Il importe que le sol ne soit pas, du fait de la présence de ces éléments ou substances indésirables ou simplement en excès par rapport aux conditions habituelles, un facteur de contamination des plantes et des récoltes.

De même, il ne doit pas contribuer à la contamination de l'environnement, en particulier des eaux. Maîtriser la qualité et la quantité des intrants dans le sol est également indispensable. Le CORPEN (Comité d'Orientation pour la Réduction de la Pollution des Eaux par les Nitrates, les Phosphates et les produits Phytosanitaires provenant des Activités Agricoles) a un rôle déterminant dans ce domaine.

En ce qui concerne les matières fertilisantes, souvent nécessaires pour assurer un niveau de production satisfaisant, le principe de base est, comme pour les produits antiparasitaires, qu'elles doivent être, dans les conditions d'emploi prescrites ou normales, efficaces et ne pas présenter de toxicité ou d'effets néfastes. Elles ne doivent pas compromettre la qualité du sol, ni celle des récoltes, aussi bien à court terme qu'à long terme. Ceci vaut pour les produits homologués ou sous autorisation provisoire de vente, mais aussi pour ceux qui sont conformes à une norme rendue d'application obligatoire et pour ceux utilisés dans le cadre de plans d'épandage autorisés au titre de la loi sur l'eau ou de la loi sur les installations classées.

L'utilisation des matières fertilisantes par les producteurs agricoles doit être raisonnée. Le manque, tout comme l'excès, est préjudiciable. L'apport doit être réalisé au bon moment, adapté à la situation. Dans ce domaine, le rôle du COMIFER (Comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée) est essentiel.

La qualité des sols et la qualité de tous les produits qui sont apportés sur ces sols, associée à la maîtrise de ces apports, constituent un préalable indispensable à la qualité des récoltes. Bien entendu d'autres facteurs peuvent également intervenir, comme les conditions climatiques ou le choix des cultures et des variétés. Cette maîtrise de la qualité, du sol aux productions agricoles, et même jusqu'à l'assiette du consommateur, doit être, au delà des nécessaires contrôles à effectuer, le souci constant de tous les partenaires concernés.