

**DISCOURS DE MONSIEUR ABDELAZIZ MEZIANE BELFKIH  
MINISTRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA REFORME AGRAIRE  
LORS DE L'OUVERTURE DU COLLOQUE INTERNATIONAL  
SUR LES APPORTS DES SCIENCES DU SOL AU DEVELOPPEMENT**

**MONSIEUR LE PRESIDENT,  
MESDAMES ET MESSIEURS,**

C'est un honneur pour moi de procéder, aujourd'hui, à l'ouverture de ce Colloque sur les apports des sciences du sol au développement, colloque qui vient enrichir le débat actuel sur l'utilisation efficace et rationnelle des ressources naturelles dont le sol occupe une place privilégiée.

Comme vous le savez, le sol, à la fois épurateur, récepteur et générateur de pollution, voit l'évolution de sa qualité dépendre de ses caractéristiques intrinsèques et dynamiques ainsi que de son mode d'exploitation.

En effet, les processus de modernisation et d'intensification de l'agriculture que connaît notre pays peuvent entraîner des problèmes de dégradation des terres si des pratiques adéquates d'exploitation et de conservation du sol ne sont pas adoptées.

Parmi ces problèmes, l'érosion, sous ses deux formes hydrique et éolienne, constitue un fléau qui menace à des degrés variables certaines de nos régions. Les pertes de sol agricole, comme l'a rappelé "SA MAJESTE LE ROI HASSAN II" dans son Discours consacré au développement des Provinces du Nord, touchent annuellement 60.000 hectares. A ce

fléau d'érosion, vient s'ajouter le phénomène de désertification qui résulte des actions conjuguées de la sécheresse et de l'utilisation inappropriée du sol.

Par ailleurs, les périmètres irrigués, dont les résultats bénéfiques au niveau du développement du secteur agricole et de l'autosuffisance alimentaire sont indéniables, demeurent menacés par des problèmes de salinisation et de détérioration de la structure du sol en raison de l'intensification de la production associée à la non maîtrise des techniques d'irrigation et du drainage.

Dans ce cadre il est également important de souligner que les problèmes de la pollution des eaux souterraines par les nitrates et les pesticides, posés avec acuité dans certains pays occidentaux, ne sont pas absents dans certaines régions de notre pays.

**MESDAMES ET MESSIEURS,**

Il ressort de ce qui précède qu'il appartient à tous les intervenants dans ce domaine, Administration, Agriculteurs, Chercheurs de conjuguer leurs efforts en vue de conserver l'environnement et d'assurer la pérennité de notre agriculture.

Il s'agit, tout en adaptant nos investigations aux exigen-

ces d'une agriculture moderne, d'adopter des techniques et pratiques culturales permettant une meilleure utilisation des eaux d'irrigation et de pluie, ainsi que de préserver les sols contre les problèmes de dégradation, de salinisation et d'érosion.

Entre outre, nous devons profiter de la sonnette d'alarme tirée dans les pays occidentaux pour éviter la pollution des eaux de surface ou souterraines, induite par l'utilisation irrationnelle des engrais et des pesticides. Pour ce faire des études et des évaluations sur les sources actuelles et potentielles de cette pollution devront être menées afin d'identifier les mesures à prendre dans ce cadre.

Par ailleurs, la gestion rationnelle et la conservation des sols nécessitent la connaissance de la nature et de la distribution spatiale de ces sols à l'échelle nationale. Les méthodes de cartographie numérique et les nouveaux développements dans le traitement des données par satellites offrent actuellement des possibilités d'économie de temps et de moyens, pour un inventaire des ressources en sol. Le travail concernant la normalisation de la légende des cartes pédologiques entrepris par la Direction de la Conservation Foncière et les Travaux Topographiques et la Direction de la Production Végétale peut cons-

tituer un point de départ en la matière.

L'utilisation de ces données pédologiques ne se limite pas au seul domaine agricole, des applications diverses sont possibles en génie civil et en urbanisme.

C'est pour vous dire, Mesdames et Messieurs, que tous les intervenants en général, et les spécialistes en sciences du sol en particulier, sont appelés à conjuguer leurs efforts pour l'établissement d'un système d'évaluation des potentialités des terres pour, d'une part rationaliser leur utilisation, et d'autre part, atteindre l'objectif national

tracé par "SA MAJESTE LE ROI" pour le développement harmonieux et durable de notre agriculture.

### MESDAMES ET MESSIEURS,

Les thèmes qui seront abordés dans ce colloque couvrent plusieurs de ces aspects et montrent l'importance que revêt la quantification des relations entre le sol et les pratiques culturelles pour une mise en valeur agricole judicieuse.

Le nombre important de participants à ce colloque témoigne de l'intérêt accordé par les chercheurs dans le domaines des

sciences du sol et par les autres spécialistes utilisateurs de cette discipline.

Avant de clore, je tiens à remercier et souhaiter la bienvenue aux participants venus des pays amis qui ont bien voulu s'associer à nous pour enrichir cette manifestation par leurs expériences dans ce domaine.

Enfin, j'applaudis les efforts louables déployés par l'Association Marocaine des Sciences du Sol pour l'organisation de ce colloque auquel je souhaite plein succès.

Je vous remercie.



## INSERTION DES LAUREATS DE SCIENCES DU SOL DANS LA VIE PROFESSIONNELLE AU MAROC.

M. STITOU <sup>(1)</sup>

### INTRODUCTION :

La formation a été lancée à l'IAV HASSAN II en 1966 et la première promotion est sortie en Juillet 1972 avec 11 lauréats.

En ce temps le seul employeur potentiel était l'Etat puisque les lauréats étaient liés par un contrat de huit ans. L'équation posait par l'adéquation Formation-Emploi était à priori résolue. En effet les responsables de l'époque en question ont même imposé le doublement du nombre des lauréats. Ce fût chose faite. Malheureusement quelques années après cette décision intervint la sécheresse. Cette dernière devint chronique et remis en question les prévisions en matière d'emploi par les structures étatiques. L'état n'était plus en mesure d'employer tous les lauréats de l'IAV HASSAN II malgré que les besoins soient loin d'être satisfaits. L'adéquation de l'équation Formation-Emploi était de facto remise en cause. Bien entendu l'inertie inhérente à la nature humaine a pleinement jouée. La conséquence de tout cela actuellement est le problème de l'emploi d'une manière générale pour tous les lauréats de l'IAV HASSAN II. Nous nous intéresseront ici particulièrement aux lauréats spécialisés en Sciences du Sol.

### QU'EST CE QU'UN AGRONOME SPECIALISTE EN SCIENCES DU SOL?

Nous essayerons de mettre en exergue les points forts de l'Ingénieur Agronome spécialisé en Sciences du Sol. Il s'agit de la formation en Agronomie générale, de la formation en tant que spécialiste en Sciences du Sol et enfin la personne en tant que cadre de haut niveau qui a fait une préparation aux grandes écoles.

Ainsi le spécialiste en Sciences du Sol diplômé de l'IAV HASSAN II est avant tout un agronome. En effet le deuxième cycle d'agronomie lui donne tous les enseignements nécessaires pour cela y compris le côté pratique. Il a donc des connaissances dans les différents domaines de l'Agronomie générale : céréaliculture, cultures industrielles, Techniques culturales, Phytiairie, Productions animales, Cultures maraîchères, arboriculture, Fertilisation, Irrigation... En liaison avec ces cours l'Ingénieur a fait des stages dans des fermes et une étude sur un problème régional. Donc s'il manque d'expériences on ne peut pas dire qu'il n'a qu'une formation théorique. Il a même été sensibilisé aux aspects sociologiques.

C'est un spécialiste en Sciences du Sol car au cours du troisième cycle il reçoit des cours spécialisés tels Fertilité,

Microbiologie du sol, Classification théorique et pratique des sols, Hydrologie, Conservation des sols, Minéralogie, Physique et physico-chimie, Géomorphologie... L'objectif de cette formation spécialisée est d'avoir tous les éléments de base nécessaires à un aménagement adéquat et rationnel des sols se basant sur leurs caractéristiques propres.

C'est un cadre de haut niveau car il a prouvé par le biais du cycle de préparation (le premier cycle) qu'il avait des capacités d'analyse et de synthèse et des connaissances en Informatique et Statistiques.

Rappelons qu'historiquement on parlait de "Pédologues" dont les points forts étaient la cartographie et la caractérisation analytique des sols car l'objectif était l'équipement des périmètres. Actuellement on forme des "Sciences du Sols dont les points forts sont le suivi de l'évolution des sols (Salinité, destruction de structures, pollution, perte de matières organiques...) suite à leur mise en valeur.

### TENTATIVE D'EVALUATION.

Ce système nous a donné des Ingénieurs qui sont actuellement en activité dans pratiquement toutes les Directions du

MARA et les ORMVA et même quelques DPA. Les échos qui nous reviennent du secteur privé au Maroc et de l'extérieur du Maroc sont plutôt flatteurs.

La machine serait donc globalement bonne. Des réajustements devraient être obligatoirement réalisés pour tenir compte des nouvelles données. En effet l'employeur ou plus exactement le service attendu n'est plus facile à identifier. Au départ l'employeur était l'Etat et le service attendu était bien défini et correspondait aux type de spécialisations en troisième cycle. Actuellement l'employeur c'est l'Etat, les collectivités locales, le privé structuré, le privé non structuré et enfin soi-même en tant que jeune promoteur potentiel. Par privé structuré il faut comprendre des privés constitués en société.

## QUE FAIRE POUR AMELIORER L'EMPLOI?

Pour être équitable il faudrait demander aux trois protagonistes ou acteurs (formateur, étudiant et employeur) de faire des efforts d'adaptation.

Il faudrait donc repenser la formation pour éviter des pertes d'énergies et d'argent. En effet des stages complémentaires, après le troisième cycle, à l'étranger de l'ordre d'un an ou plus ne représente pas la meilleure solution car elle prolonge la vision initiale de la formation et le diplômé doublé du stagiaire se retrouve à la case de départ c-à-d demandeur d'emploi. Repenser la formation cela signifierait être prêt à accepter des changements substantiels et non

des retouches superficielles pour coller aux nouvelles caractéristiques de l'emploi. Cela déboucherait automatiquement sur des remaniements transdépartementaux puisque la structure de base de l'IAV HASSAN II est le département. On comprend qu'une réflexion approfondie s'impose.

Le deuxième volet de cette réflexion se situerait dans le camp de l'étudiant. Les choses se passeraient pour lui un peu de la même façon que pour l'agriculteur. L'état se désengage partiellement et lui donne plus de responsabilité dans la réalisation de sa carrière professionnelle. L'attitude défaitiste proclamant qu'il n'y a pas de travail est inacceptable quand on regarde le vide à combler dans l'encadrement du secteur agricole productif privé.

Comme nous l'avons présenté ci-dessus le lauréat ne doit plus se présenter comme un spécialiste en Sciences du Sol mais comme un Ingénieur Agronome ayant une forte teinte de Sciences du Sol. Cette attitude est un héritage du passé où l'employeur (l'Etat) définissait une tâche pointue qui valorisait le troisième cycle. Bien entendu rien n'empêche le diplômé en Sciences du Sol de valoriser son troisième cycle chaque fois que l'opportunité se présenterait (Ex. demande potentielle exprimée par le LPEE). En dehors de cette situation les possibilités d'emploi sont énormes. La preuve en est qu'à ce jour aucun diplômé en Sciences du Sol n'est sans emploi. L'encadrement actuellement réalisé dans

le secteur agricole privé est assuré en majeure partie par les anciens lauréats des écoles d'adjoints techniques. Ces derniers font de l'excellent travail mais ne satisfont pas toute la demande. Ainsi une demande potentielle du secteur privé en cadre de moyen et haut niveaux existe et une étude d'évaluation de ce potentiel est très souhaitable pour donner plus de nerfs à nos étudiants. Nous pensons à toutes les unités équipées de pivots, aux nouvelles plantations de rosacées et à la floriculture à titre d'exemple.

Ensuite nous aimerions souligner un fait d'une importance capitale et qui est passé sous silence. Il s'agit des caractéristiques intrinsèques de l'étudiant en dehors du curriculum réalisé pendant son séjour à l'IAV HASSAN II. Nous pensons à la personnalité, à l'ambition, à la persévérance, à la capacité d'adaptation entre autres. Ce sont ces paramètres qui font la différence aux yeux des employeurs.

Le troisième volet de cette réflexion se situerait dans le camp de l'employeur privé marocain. Des efforts devraient être faits pour que l'obstacle numéro 1 soit surmonté à savoir le manque d'expérience du diplômé. On pourrait répliquer que tant que ce dernier ne travaillera pas il ne pourra pas cumuler de l'expérience et c'est en fait la réalité.

Mr DEMNATI Othman, ancien ministre du MARA, lança en 1990-91 une opération qui avait un double objectif; l'amélioration de la pratique de la langue française en plus de l'acqui-

sition d'expérience par l'étudiant qui va entamer sa deuxième année. Ce stage dura cinq mois en France. Les résultats de l'évaluation après le premier essai furent très encourageants et l'opération fût reconduite avec un souci d'améliorer l'efficacité.

### *Les acquis des étudiants furent multiples :*

- Amélioration de l'expression orale et écrite en langue française.
- Acquisition pratique de techniques de production très avancées en matières de productions agricoles. Cet aspect n'a été possible que parce que l'étudiant a vécu dans une exploitation où le propriétaire, sa femme et ses enfants réalisaient presque la totalité des travaux. Notons que la population agricole française ne compte que 7 % de salariés. L'étudiant ne pouvait en aucun rechigner au travail sachant que le propriétaire lui-même faisait les mêmes travaux. Partant de là, la pompe a été amorcée et l'étudiant en est arrivé à éprouver de la fierté concernant le travail qu'il réalisait. En effet la plupart avaient réussi à forcer le respect de la part des exploitants. Il faut aussi préciser que la majorité des exploitants étaient d'anciens diplômés des lycées agricoles.
- La barrière psychologique était définitivement rompue puisque désormais l'étudiant sait ce qui se passe de l'autre côté. il ne s'agit plus d'un domaine nébuleux difficile à

imaginer mais plutôt d'un milieu accessible.

- Les retombées pédagogiques sont difficiles à évaluer mais évidentes en ce sens que l'étudiant sera plus réceptif aux cours théoriques car il en a palpe directement la finalité.
- Cette expérience a montré que l'étudiant était apte à acquérir l'expérience quand on lui donnait une opportunité réelle.
- Désormais l'étudiant a un contact en France et rien ne l'empêche de le maintenir et le valoriser le cas échéant. On pourrait pousser la réflexion plus loin et dire que les étudiants pourraient mûrir

leur choix en tant que jeunes promoteurs.

on peut donc conclure que le secteur agricole privé au Maroc devrait modifier son attitude vis-à-vis des diplômés en agronomie de manière générale et des spécialistes en Sciences du Sol en particulier. En ce sens qu'il devrait être plus ouvert et accepter les trois premiers mois comme une période de contact devant déboucher sur une définition de la tâche à accomplir.

### POSSIBILITES D'EMPLOI ?

Tel que nous l'avons défini ci-dessus le diplômé en Sciences du Sol voit son champs d'action très ouvert.

TYPES DE FORMATION ET CATEGORIES D'EMPLOIEURS	
<b>FORMATION :</b>	<b>PERIODE 1971-1984</b> + Cartographie des sols ("Pédologues"). + Physico-chimiste.
<b>EMPLOYEURS :</b>	MARA , ORMVA , INRA.
<b>FORMATION :</b>	<b>PERIODE 1985-1993</b> + Cartographie des sols. + Physico-chimiste des sols. + Aménagement des sols. + Conservation des sols. + Microbiologie des sols. + Salinité des sols.
<b>EMPLOYEURS :</b>	MARA , ORMVA , INRA, Bureaux d'études, SASMA.
<b>FORMATION :</b>	<b>PERIODE 1993</b> + Agronomie générale. + Cartographie des sols. + Physico-chimiste. + Aménagement des bassins versants. + Conservation des sols. + Microbiologie des sols. + Salinité des sols.
<b>EMPLOYEURS :</b>	MARA , ORMVA , INRA , Bureaux d'études , SASMA. Producteurs privés , Cabinets d'expertises agréés auprès des tribunaux, Crédit agricole , Assureurs des risques en agriculture.

Quand la demande s'exprime en tant que spécialiste en Sciences du Sol, il est en zone de monopole et donc sa situation est assurée: bureau d'étude privé, ORMVA, MARA, LPEE, SASMA, Enseignement.

Quand la demande s'exprime en tant que technicien des productions agricoles il entre de plein droit en compétition avec les autres spécialistes car la confrontation se fait non pas sur les connaissances acquises en troisième cycle mais sur celles acquises aux premier et deuxième cycles. Il est bien armé car la réalisation des productions agricoles ne nécessite pas des connaissances techniques très poussées puisque des adjoints techniques arrivent à le faire.

Il serait donc logique de conclure que tout étudiant de fin de quatrième année est théoriquement capable de réaliser des productions agricoles mais non pas de démarrer une nouvelle unité de production.

Les employeurs potentiels sont: les S.A. dont l'activité principale est la production agricole, le producteur privé non structuré, le Crédit Agricole, les Banques qui couvrent les risques agricoles, la création de cabinets d'expertises agricoles agréés auprès des Tribunaux, les laboratoires d'analyses.

Quand la demande s'exprime en tant que cadre de haut

niveau alors là le champ d'action est encore plus ouvert puisqu'il dépasse le secteur agricole. Le diplômé en Sciences du Sol est appelé à valoriser surtout son premier cycle, ses connaissances en langues étrangères, en statistiques et en informatique et par dessus tout ses capacités d'analyse et de synthèse et ses caractéristiques intrinsèques.

DIPLOME DE 3 <sup>ème</sup> CYCLE SCIENCES DU SOL.	
FORMATION	DOMAINE D'EMPLOI POTENTIEL
<b>1<sup>er</sup> Cycle :</b>  Mathématiques. Statistiques. Informatique. Caractéristiques intrinsèques.	Domaine intra et extra agricole
<b>2<sup>ème</sup> Cycle :</b>  Agronomie générale	Producteurs privés. Crédit Agricole. Création de cabinet d'expertise.
<b>3<sup>ème</sup> Cycle :</b>  Cours et travaux spécialisés en Sciences du Sol	Domaines bien délimités demandant des connaissances approfondies en Sciences du Sol.

## ASSOCIATION MAROCAINE DES SCIENCES DU SOL

**A.M.S.SOL**



Siège de l'association  
**INSTITUT AGRONOMIQUE ET  
 VETERINAIRE HASSAN II - RABAT**

Boite Postale 6202

**RABAT - INSTITUTS**

Tel : 77 - 17 - 58/59

Fax : 775838/771285

## EFFET DE LA SALINITE SUR LE DEVELOPPEMENT DES MALADIES DES PLANTES

M. BESRI <sup>(1)</sup>

## I. INTRODUCTION

Dans les régions arides et semi-arides, les plantes doivent être irriguées afin de garantir les cultures et d'augmenter la production. Dans ces régions, la mauvaise qualité des eaux d'irrigation accompagnée d'un drainage insuffisant entraînent souvent une accumulation de sels dans le sol. La physiologie des plantes poussant dans des sols salés est ainsi altérée, ce qui réduit leur croissance et leur rendement.

De nombreuses recherches ont été effectuées sur l'influence de la salinité sur la physiologie et la morphologie des plantes. Par contre, nos connaissances sur les effets de ces perturbations sur la prédisposition des plantes aux attaques parasitaires sont encore rudimentaires. La menace provoquée par l'augmentation de la salinité dans plusieurs régions irriguées du globe ainsi que les quelques observations effectuées au champ ont motivé les recherches sur les interactions entre le stress salin et le développement des maladies des plantes. Cependant, le nombre de ces recherches reste limité. Celles-ci ont été conduites particulièrement au Maroc sur les trachéomycoses de la tomate dues à *Fusarium oxysporum* f.sp.*lycopersici* et à *Verticillium dahliae* et aux U.S.A. sur certains *Phytophthora*. Quelques chercheurs ont travaillé

également sur les relations existant entre la salinité et les mycorrhizes vésiculaires et arbusculaires.

## II. INFLUENCE DE LA SALINITE SUR LA FUSARIOSE VASCULAIRE DE LA TOMATE (*Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*)

*Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* passe la première partie de son cycle vital dans le sol, la seconde dans les tissus vasculaires de la plante et enfin, la troisième à la surface des plantes mortes. Le parasite est donc exposé à plusieurs types d'environnement, environnements qui sont caractérisés par plusieurs facteurs dont la salinité du sol, des eaux d'irrigation, de la sève et de la surface des plantes. Le parasite infecte les racines, pénètre dans les tissus vasculaires et s'y multiplie sous forme de microconidies. Après le flétrissement et la mort des plantes, il sporule à leur surface. Les macroconidies et les microconidies tombent sur le sol et sont transformées en chlamydo-spores.

Le long du littoral atlantique marocain, les champs de tomate sont exposés aux embruns marins et sont irrigués avec de l'eau salée. Il a été démontré que la quantité de sel apportée par les embruns est de 300 kg/ha/an et que l'irrigation des parcelles avec de l'eau salée

augmente considérablement la salinité du sol. Par conséquent, les salinités du sol où l'agent pathogène se conserve sous forme de chlamydo-spores, des tissus vasculaires dans lesquels il se développe et se multiplie et enfin de la surface des plantes où il sporule subissent de grandes variations tout au long du cycle de la culture.

La salinité du sol et de l'eau d'irrigation ont un grand effet sur la population du *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici*.

Le parasite tolère des salinités élevées et sporule abondamment dans un environnement salin. Des irrigations répétées avec des eaux à différentes salinités augmentent d'autant plus la population de l'agent pathogène que la concentration en sel de l'eau utilisée est élevée.

Le niveau de salinité de la sève brute varie avec celui de l'eau d'irrigation. Il a été démontré que *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici* supporte des pressions osmotiques très faibles, de l'ordre de -144 bars. A 35°C, la croissance de l'agent pathogène est arrêtée. Cependant, lorsque du NaCl est ajouté au milieu de culture, le parasite reprend sa croissance. Cette corrélation positive entre la température et la salinité explique pourquoi l'incidence de l'agent pathogène reste élevée même par temps très chaud.

La sporulation du parasite dans les tissus vasculaires augmente avec la salinité de l'eau d'irrigation, ce qui augmente par conséquent la sévérité de la maladie.

Après le flétrissement et la mort des plantes, *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici* sporule à la surface des feuilles. Les macroconidies formées tombent sur le sol et sont transformées en chlamydospores. Or les embruns marins augmentent la salinité au niveau des surfaces foliaires. Il a été démontré expérimentalement que l'augmentation de la salinité d'un milieu de culture entraîne celle du nombre de macroconidies et des chlamydospores formées et par conséquent, le taux d'inoculum du parasite dans le sol.

La salinité a un effet non seulement sur la biologie et les différentes étapes du cycle de l'agent pathogène, mais également sur la sensibilité des plantes au parasite. Il a ainsi été démontré que la sévérité de la maladie augmente avec la teneur en NaCl des eaux d'irrigation. De même, lorsque la salinité des eaux d'irrigation augmente, on observe une cassure de la résistance des variétés résistantes aux races 1 et 2 de l'agent pathogène.

### III. INFLUENCE DE LA SALINITE SUR LE DEVELOPPEMENT DE LA VERTICILLIOSE VASCULAIRE DE LA TOMATE

Au Maroc, les hybrides de tomate résistants à *V. dahliae*

race 1 sont largement utilisés pour contrôler la Verticilliose. Cependant, et malgré la culture de variétés résistantes, la maladie continue à provoquer des dégâts considérables, particulièrement sur tomate cultivée sous abris serre. Il a été démontré que les cultivars résistants à la race 1 sont attaqués non seulement par la race 2 mais également par la race 1 contre laquelle ils sont normalement résistants. Des recherches récentes ont montré que la salinité du sol et des eaux d'irrigation influent d'une part, sur la virulence de l'agent pathogène, d'autre part sur la sensibilité des plantes. En effet, lorsque la salinité du milieu augmente, la croissance mycélienne du parasite et la formation des conidies et celles des microsclérotés de l'agent pathogène sont stimulées.

*V. dahliae* infecte les plantes par les racines, atteint les tissus vasculaires et s'y multiplie. Par conséquent, le développement du champignon au sein de la plante et la sévérité de la maladie augmentent avec la salinité des eaux d'irrigation. A la fin de la saison, *V. dahliae* se conserve dans le sol sous forme de microsclérotés. La sévérité de la maladie sur les cultures de tomate à venir est conditionnée par plusieurs facteurs dont le taux d'inoculum du parasite dans le sol. Or, ce taux est d'autant plus élevé que la salinité du sol et celle de l'eau d'irrigation est élevée.

La salinité du sol et de l'eau d'irrigation augmente également la sensibilité de la tomate au *Verticillium*. Des plan-

tules de tomate, irriguées avec de l'eau contenant 2 g de NaCl/l sont plus sensibles à l'agent pathogène que des tomates irriguées avec des eaux non salées. Nous pouvons donc conclure que l'irrigation des pépinières avec des eaux salées augmentent la sensibilité des plantes repiquées sur un sol infesté par *V. dahliae*. La salinité des eaux d'irrigation peut donc prédisposer les plants de tomate à l'infection par *V. dahliae*.

Les variétés de tomate résistantes à la race 1 de l'agent pathogène ne sont pas infectées lorsqu'elles sont cultivées dans des sols non salés et irrigués avec des eaux également non salées. Cependant, lorsque du NaCl est ajouté au substrat de culture et à l'eau d'irrigation, ces variétés deviennent sensibles au parasite. La salinité du sol et des eaux d'irrigation sont donc capables de casser la résistance des variétés possédant le gène *Ve* de résistance.

### IV. CONCLUSION

Les recherches portant sur l'effet de la salinité sur le développement des maladies des plantes sont à leur début et méritent d'être développées particulièrement sous nos conditions. De nombreux programmes sont actuellement conduits pour sélectionner des variétés par exemple de palmier-dattier résistant au Bayoud, de porte-greffe d'agrumes résistant à la gommose. Or ces cultures se rencontrent dans des régions où le problème de salinité est réel. Ces programmes doivent donc prendre en considération non seulement la tolérance des variétés à la salinité mais égale-

ment l'effet de la salinité sur le développement des principales maladies sur ces cultures. Que se passerait-il si par exemple, après de nombreuses années de recherches pour développer une variété de palmier-dattier résistante au Bayoud, cette variété se révèle être sensible une fois plantée dans des terrains salés.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Afailal, A. 1987.** Manifestation de la Verticilliose sur les tomates sensibles et résistantes. Effets de la salinité sur le développement des deux races de *Verticillium dahliae* Kleb, et sur la réaction des plantes à l'agent pathogène. Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, Faculté des Sciences de Rabat, 127 pp.
- Bernstein, L. 1969.** Salinity factors and their limits for citrus culture. Proc. Int. Citrus Symp. Ist. 3 : 1779-1782.
- Bernstein, L. 1975.** Effects of salinity and sodicity on plant growth. Ann. Rev. Phytopathol., 13 : 295-312.
- Besri, M. 1980.** Influence du potentiel osmotique de l'eau sur la croissance de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* et de *Verticillium dahliae*. Phytopath. Z. 99 : 18.
- Besri, M. 1981a.** Influence de la salinité du sol et des eaux d'irrigation sur la population de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. Phytopath. Medit. 20 : 101-106.
- Besri, M. 1981b.** Qualité des sols et des eaux d'irrigation et manifestation des trachéomycoses de la tomate au Maroc. Phytopath. Medit. 20 : 107-111.
- Besri, M. Zrouri, M et Beye, I. 1984.** Appartenance raciale et pathogénie comparée de quelques isolats de *Verticillium dahliae* (Kleb.).
- Blaker, N.S. & MacDonald, J.D. 1985.** Effect of soil salinity on the formation of sporangia and zoospores by three isolates on *Phytophthora*. Phytopathology 75 : 270-274.
- Blaker, N.S. & Mac Donald, J.D. 1986.** The role of salinity in the development of *Phytophthora* root rot of citrus. Phytopathology 76 : 970-975.
- Davet, P., Messiaen, C.M. & Rieuf, P. 1966.** Interprétation des manifestations hivernales de la Fusariose de la tomate en Afrique du Nord favorisées par la présence de sels dans les eaux d'irrigation. 1<sup>er</sup> Congrès de l'Union Phytopathologique méditerranéenne, Bari-Naples, pp. 407-416.
- Kirkpatrick, J.D. & Bitters, W.P. 1969.** Physiological response of various citrus root stocks to salinity. Proc. Int. Citrus Symp. 1st. 1 : 391-399.
- MacDonald, J.D. 1982.** Effect of salinity stress on the development of *Phytophthora* root rot of chrysanthemum. Phytopathology 72 : 214-219.
- MacDonald, J.D. 1984.** Salinity effects on the susceptibility of chrysanthemum roots to *Phytophthora cryptogea*. Phytopathology 74 : 621-624.
- Mougenot, F. 1972.** L'eau et le sel dans l'agriculture marocaine. Hommes, Terre et Eaux. 3 : 51-64.

SOCIETE COOPERATIVE AGRICOLE MAROCAINE

" S.C.A.M. "

**STOCKAGE  
DES  
CEREALES**

ROUTE DE L'OASIS BP 8.116 - CASABLANCA  
Tél. : 25.31.96 / 25.31.98 - Fax : 25.31.96- Télex : 23.072

## LE TASSEMENT DU SOL PRODUCTION ET PRODUCTIVITE

M. OUSSIBLE <sup>(1)</sup>

### I. INTRODUCTION

Au Maroc, le développement rapide des superficies irriguées de (65000 ha en 1955 à environ 900 000 ha actuellement) et leur mise en valeur, se sont traduits par une intensification de plusieurs cultures : céréales, cultures sucrières, cultures horticoles, cultures oléagineuses, cultures fourragères, coton, riz, etc... Ceci a entraîné entre autres, la mécanisation des préparations du sol et l'utilisation de grands engins et de nouvelles grandes machines agricoles.

La circulation de ces engins lourds (Récolteuses et remorques d'accompagnement, épandeurs, pulvérisateurs faucheuses etc...) sur les parcelles cultivées en conditions humides (par exemple lors de la récolte des cultures industrielles : canne à sucre, betterave à sucre, coton...) ou la coupe mécanique des cultures fourragères) a provoqué une compression du sol. Cette compression exercée par la pression des roues de ces engins se propage dans le profil à partir de la surface du sol. D'un autre côté, l'utilisation intensive et très fréquente des mêmes outils de travail du sol tel que les disques (cas de 95 % des superficies travaillées mécaniquement) aussi bien pour les labours que pour les préparations superficielles en conditions édaphiques inadéquates a conduit à

la création de tassement au niveau du profil cultural via la pression exercée par les pièces travaillantes de ces outils. Ces situations sont aggravées par l'utilisation de l'irrigation gravitaire (inondation des parcelles) combinée à l'intensification des systèmes de cultures (cultures dérobées) et à la sensibilité texturale de certains sols (Mathieu, 1977 : Bryssine, 1961 et Oussible, 1986).

Du fait de l'existence de plus en plus fréquente de ces facteurs et conditions défavorables, dans les sols irrigués du Maroc, plusieurs études ont été entreprises dans différents périmètres pour :

- la caractérisation quantitative de ces états structuraux défavorables créés à différents niveaux du profil.
- la détermination de la réaction des principales cultures à ces états de tassement du sol.

L'objectif de la présente étude est :

- a. caractériser quantitativement l'importance de ce problème pédo-agronomique existant dans les zones irriguées à l'échelle nationale ; et
- b. déterminer les effets consécutifs sur la productivité des sols, et la production des principales cultures en rotation dans ces périmètres.

### II. LE TASSEMENT ET LA PRODUCTIVITE DES SOLS IRRIGUES

La productivité d'un sol réside dans sa capacité de mettre à la disposition des espèces cultivées des facteurs et conditions optimum pour leur croissance et développement, et ce via sa fertilité physique, chimique et biologique. On dira qu'un sol est fertile - en - partie quand il ne présente pas d'obstacles à la pénétration et à la fonction du système racinaire ; et quand l'infiltration des eaux ainsi que les échanges d'air et d'énergie avec l'atmosphère ne sont pas altérés. Un sol fertile est connu aussi par une "bonne" capacité de rétention d'eau, une "bonne" capacité d'échange cationique, et une bonne activité biologique.

Le tassement du sol, quand il atteint des niveaux préjudiciables, peut altérer ces caractéristiques de productivité. Plusieurs paramètres sont utilisés pour la mesure des modifications subies par ces caractéristiques sous l'effet du tassement. Nous pouvons en citer : la densité apparente, la résistance mécanique à la pénétration, et les porosités (totale et de l'air) qui sont les plus fréquemment utilisées dans les expérimentations au champ. D'autres paramètres tels que le taux d'infiltration, la conductivité hydraulique, les humidités caractéristiques, ainsi que la distribution de la taille

(1)Professeur, Département d'Agronomie et d'Amélioration des Plantes. Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II B.P. 6202, Rabat, Maroc.

des pores, la tortuosité et la continuité des systèmes de porosité sont également utilisées pour investiguer l'effet du tassement sur la productivité des sols agricoles.

Dans les études présentées ci-dessous, nous avons utilisé les paramètres suivants : la densité apparente, la résistance mécanique à la pénétration, et les porosités.

## 2.1 Au Gharb

La carte pédologique de cette région (projet Sebou) montre une mosaïque de types de sols qui va des textures les plus fines qui constituent la majorité, jusqu'aux textures grossières qu'on trouve sur la zone côtière et sous la forêt Maamora.

A la suite d'un diagnostic agronomique entrepris en 1976 par le Département d'Agronomie et d'Amélioration des Plantes (DAAP) à l'I.A.V Hassan II, deux types de profils tassés ont été mis en évidence dans la région sur des sols argileux, argilo-limoneux et limono-argileux dont l'activité structurale est variable. Un profil tassé à partir de la surface résultant de passages d'engins de récolte et de transport sur les parcelles en conditions humides (0,27 à 0,29 Kg/Kg). Un deuxième type de profil tassé en profondeur créé par des passages d'outils de labour (charrue à disques) et de reprise (pulvérisateur à disques), également en conditions humides (0,26 à 0,28 Kg/Kg).

Ces deux types de profils tassés ont fait l'objet d'études

expérimentales au champ. De 1976 à 1978 sur un sol argileux (Oussible, 1977 ; Aminata Bâ, 1978) ; de 1983 à 1985 sur un sol limono-argileux (Oussible et Thiam, 1984 ; Belfqih, 1985) ; et de 1984 à 1988 sur un sol argilo-limoneux (Belfqih et al., 1992).

Le tassement provoqué par la circulation des engins agricoles sur les parcelles a conduit à la création de zone compacte entre 0 et 0,20 m de profondeur. L'intensité et la profondeur de ce tassement dépendent de l'humidité du sol, du nombre de passages des engins et de la charge totale de l'engin. L'expérimentation conduite en 1976 a montré qu'un seul passage d'une charge de 7 tonnes sur un sol ayant une humidité comprise entre 0,27 et 0,29 kg/kg (tableau 1) est suffisant pour créer une zone compacte dont la densité volumique a dépassé 1.50 Mg/m<sup>3</sup> et une macroporosité inférieure à 0,06 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> (Jouve et Oussible, 1979).

En 1979, différentes mesures ont été effectuées après passages de différents types de récolteuses de canne à sucre ayant des charges allant de 5 à 10 tonnes, et à différentes humidités du sol (de 0,20 à 0,28 kg/kg). Ces passages ont provoqué

un tassement sous les roues sur une profondeur allant jusqu'à 0.30 m de profondeur.

Les densités apparentes enregistrées ont varié de 1.43 à 1.68 Mg/m<sup>3</sup>, et la porosité totale a atteint des valeurs inférieures à 0.37 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> (Oussible, 1979).

Les modifications structurales résultantes du tassement provoqué par l'utilisation des outils de travail du sol (surtout les disques), ont été également variables en fonction de l'humidité du sol, du type de disque, du poids de l'outil et de l'état structural de la parcelle au moment du passage de l'outil. Les différentes études entreprises sur les différents types de sols (Tableau 1) ont révélé la création de zones compactes à différentes profondeurs du profil travaillé (Oussible, 1977), (Oussible et Thiam 1984 ; Belfqih et al., 1992). Cependant, quelque soit la profondeur, et le type de sol, les outils à disques surtout la charrue et le pulvérisateur lourd (Stubble Plow) utilisés à des humidités du sol supérieures à 0.20 kg/kg ont provoqué un tassement du sol qui a entraîné des modifications notables dans certaines caractéristiques physiques du sol (Tableau 1). La densité

Tableau 1 : Caractéristiques physiques de différents profils ayant subi le tassement dans la région irriguée du Gharb.

Caractéristiques physiques	Durée de l'étude et type de sol		
	1976-1978	1983-1985	1984-1988
	Argileux	Limono-Argileux	argilo-limoneux
Densité apparente Mg/m <sup>3</sup>	1,46-1,50	1,60-1,70	1,47-1,53
Porosité totale m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	< 0,40	< 0,40	< 0,40
Porosité de l'air m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	-	-	< 0,04
Macroporosité m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	< 0,06	-	-
Résistance mécanique à la pénétration MPa	-	2,0-3,0	2,0

apparente a atteint des valeurs allant de 1.47 à 1.70 Mg/m<sup>3</sup>. La résistance mécanique à la pénétration a dépassé 2 MPa, la porosité totale et la porosité de l'air ont atteint des valeurs respectivement inférieures à 0,40 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> et 0,04 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.

## 2.2 Tadla

Dans cette région à climat aride et où l'irrigation par gravitaire est la plus dominante, les 2 types de sols : Châtain et brun couvrent plus de 80 % des superficies cultivées. Ces sols sont bien drainés, profonds et homogènes : mais ils présentent une sensibilité au tassement à cause d'une texture fine (Limonos-argileuse) mélangée à des graviers fins dont la concentration augmente avec la profondeur (Oussible, 1985). C'est la région qui a connu les premiers travaux qui ont mis en évidence les problèmes de dégradation de la structure au niveau du profil (Bryssine, 1946 ; 61 ).

En 1975, un diagnostic agronomique qui a été entrepris par le DAAP dans cette région, a révélé l'existence de problèmes pédo-technico agronomiques qui limitent sérieusement les préparations de sols (Hanrion et Lelièvre, 1976 ; Berrada, 1976). Le type des outils (surtout les disques), les conditions de leur utilisation, l'intensification des systèmes de cultures, l'utilisation de la pré-irrigation (Demkel) et la nature texturale des sols se sont combinés pour favoriser la création d'un tassement en profondeur du profil (Oussible, 1985 ; Oussible et Crookston, 1987 ; et Oussible et

al., 1992).

Juste après l'identification de ce problème, différentes études ont été entreprises dans la région pour déterminer si ce tassement constitue ou non un obstacle agronomique et une limite réelle à la productivité de ces sols très fertiles. Les premiers travaux ont commencé en 1976 (Berrada, 1976) et ont continué jusqu'à 1990 (Oussible et al., 1992 ). Durant cette période, différentes investigations ont été conduites à l'échelle de l'exploitation, et de nombreuses études expérimentales ont été accomplies en station sur les 2 types de sols les plus dominants dans la région.

Toutes ces enquêtes culturelles et études expérimentales ont mis en évidence l'existence de zones compactes situées entre 0,15 et 0,38 m de profondeur (Oussible, 1985). L'épaisseur, l'intensité et la profondeur de telles zones tassées dépendent en grande partie de l'outil utilisé, de l'humidité du sol au moment du travail, de la fréquence des irrigations estivales (cultures dérobées) et la fréquence de travail profond (sous-solage) durant l'histoire culturelle de la parcelle.

La caractérisation physique de ces horizons compacts (Belhadfa, 1978 ; Ben Laghli, 1982 ; Mâataoui, 1983 ; Oussible, 1985 Haddioui, 1989 ; Ouirzzad, 1992 ; et Oussible et al., 1992) a montré qu'il s'agit d'une couche tassée formant une discontinuité structurale entre l'horizon travaillé et repris et l'horizon travaillé non repris

avec un taux de matière organique généralement inférieur à 1%. La densité apparente au niveau de cette zone compacte varie de 1,45 à 1,70 Mg/m<sup>3</sup>, ce qui correspond à une porosité totale inférieure à 0,40 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, la résistance mécanique dépasse 3 à 4 MPa et la porosité de l'air est généralement inférieure à 0,18 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.

## 2.3 Doukkala

La carte pédologique de cette région montre également une mosaïque de types de sols. Parmi les études entreprises dans la région, deux investigations se sont intéressées entre autres à la caractérisation du profil structural des principaux sols de la région. Il s'agit de l'enquête culturelle conduite en 1984 (Yamini, 1984) et l'étude pédo-agronomique entreprise dans la région en 1988. (SASMA, 1987 et 1988). Ces deux études ont mis en évidence l'existence d'horizons tassés en profondeur du profil qui forment des discontinuités structurales sous forme de semelles de labour, de couches très tassées, et de fonds de labour compacts (SASMA, 1987 et 1988).

## 2.4 Moulouya

C'est une des régions qui, avec le Tadla ont connu les premiers travaux de recherche qui se sont intéressés aux problèmes pédologiques liés à l'évolution de la structure sous l'effet des techniques de l'irrigation et des préparations du sol (Ruellan, 1959 et 1962 ; Mathieu, 1977 et 1978).

Récemment, un diagnostic agronomique au niveau des exploitations agricoles a été conduit en 1988 dans les zones irriguées de cette région, cette étude a confirmé les résultats déjà trouvés et qui mettent en évidence l'existence d'horizons compacts situés à différentes profondeurs du profil (0,10 à 0,30 m). L'intensité, l'épaisseur et la profondeur de tels horizons dépendent, surtout de l'histoire culturale de la parcelle et plus particulièrement de la date sa mise en irrigation, de l'intensification des systèmes de cultures, de la nature et conditions d'utilisation des outils de préparation du sol. Des mesures de densités volumiques au niveau de ces couches compactes, ont révélé des valeurs qui dépassent 1,50 Mg/m<sup>3</sup>.

De même, des observations microscopiques d'unités structurales ont révélé des réarrangements et modifications structurales qui démontrent l'existence de discontinuités au niveau des systèmes de porosités (Mathieu 1978 et 1981).

### III. LE TASSEMENT ET LA PRODUCTION

Le tassement du sol limite sévèrement la productivité des sols aussi bien en conditions d'excès d'eau (périodes pluvieuses au Gharb) qu'en conditions arides et semi-arides (Tadla, Doukkala, Moulouya et Gharb en été). Cette réduction dans la productivité des sols se répercute automatiquement sur l'expression du potentiel de production des cultures (effet de l'asphyxie, effet du stress hydrique, etc.).

D'un autre côté, ces conditions créées par le tassement peuvent directement affecter les performances de la production de certaines cultures. Par exemple, les densités élevées, et les fortes résistances mécaniques à la pénétration entravent sérieusement la pénétration, la croissance et le fonctionnement du système racinaire. Ceci représente une contrainte pour une bonne alimentation minérale et hydrique des plantes, qui est à l'origine d'une réduction dans la production des cultures (Wittsell et Hobbs, 1964 ; Voorhees, 1977 ; Tomar et al., 1981 ; Oussible et al., 1992 ; Voorhees et al., 1989).

#### 3.1 Les Céréales

Les céréales (blé tendre, blé dur et orge) constituent des composantes importantes dans tous les assolements pratiqués dans les différents périmètres irrigués quelque soit l'intensification des systèmes de cultures. Dès l'identification des profils tassés dans ces régions, de nombreuses études ont été entreprises pour déterminer l'effet de ce tassement sur la production des céréales.

Pour quantifier l'effet de ce tassement sur la production des céréales, nous avons procédé à une série d'expérimentations au champ en utilisant le sous-solage comme une situation améliorée à laquelle le tassement (situation témoin) sera comparé. Le sous-solage a été en effet entrepris pour briser la zone compacte et établir de nouveau une continuité structurale sur tout le profil.

Les différentes études entreprises au Tadla durant la décennie 1981-1990, dans différents milieux (différents types de sols et différentes années climatiques) ont montré que le tassement en profondeur du sol a eu de manière consistante un effet généralement significatif sur la production du blé (Tableau 2). Les rendements en grains et en paille ont été réduits sur toute la durée de l'étude de 9 à 63 % et de 3 à 31 % respectivement. Il apparaît que le tassement a affecté beaucoup plus la production en grains que celle de la paille quelque soit l'année climatique et les conditions de conduite de l'expérimentation.

**Tableau 2 : Effet du tassement sur le sol et conséquence sur la production du blé au Tadla (1981-1990).**

Campagne agricole	Différence entre les traitements : tassé et non tassé (%)			
	Résistance mécanique à la pénétration	Densité de longueur racinaire	Rendement en gains	Rendement en paille
1981-82	30	19	23	20
1982-83	46	12	32	31
1983-84	41	13	63	24
1984-87	40	19	44	21
1987-88	18	28	9	3
1989-90	40	35	17	4

Nous avons démontré (résultats non présentés) que cette réduction dans les rendements en grains est une conséquence directe de la réduction consistante dans les différentes composantes du rendement, surtout le nombre d'épis par unité de surface. Les mauvaises conditions de croissance que subit le système racinaire dans les profils tassés (Tableau 2) sont à l'origine de la réduction enregistrée dans les composantes du rendement. Différentes corrélations négatives (de l'ordre de  $r = - 0,9$ ) ont été relevées entre l'intensité du tassement, exprimée par la résistance mécanique à la pénétration et la densité de longueur racinaire (Oussible, 1985 ; Oussible et al., 1992).

Malgré la consistance de l'effet du tassement sur la production en grains du blé, il apparaît que cet effet a été variable de 9 à 63 % sur la durée de l'étude. L'analyse des facteurs extérieurs : climat, sol, techniques de conduite, matériel génétique, a montré que la variabilité de l'effet du tassement est en général liée à la variabilité climatique surtout les précipitations par leur quantité et leur répartition. En effet, durant les années relativement pluvieuses comme l'année 1987-88 avec une pluviométrie de 292 mm, l'effet du tassement sur le rendement en grains a été de 9% ; alors que durant l'année 1983- 84 avec une pluviométrie de 178 mm l'effet enregistré était plus important (63%). Ceci révèle le lien étroit entre le tassement et la conservation de l'eau.

## 3.2 Les cultures sucrières

Les deux cultures : la canne à sucre et la betterave à sucre produisent environ les 2/3 des besoins du Maroc en sucre. La canne à sucre qui a été réintroduite en grande culture en 1973, couvre environ 18 à 20 000 ha réparties dans le Gharb, le Loukos et la Moulouya. La betterave à sucre qui est également cultivée dans ces 3 régions en plus du Tadla et des Doukkala, couvre environ 60 000 ha. Ces 2 cultures sont à la base des assolements pratiqués dans ces périmètres.

### 3.2.1 La canne à sucre

Pour investiguer, l'effet du tassement sur la production de la canne à sucre, un programme de recherche a été entrepris de 1976 à 1990.

Comme pour le blé, nous avons relevé des corrélations entre certaines caractéristiques physiques du profil tassé et certaines caractéristiques de croissance du système racinaire de la canne à sucre. Nous avons trouvé une corrélation positive entre la macroporosité et le nombre de racines avec  $r = + 0,857$  ; et une corrélation négative entre la densité volumique et le nombre de racines avec  $r = - 0,819$ .

Ceci traduit la sensibilité de la croissance du système racinaire de la canne à sucre aux conditions créées par le tassement au niveau du profil (tableau 1). Cette sensibilité se répercute au niveau de la partie aérienne de la culture pour ainsi affecter négativement les rendements. La production quantitative et qualitative de la canne à sucre a été réduite surtout durant le cycle vierge de la canne.

L'effet du tassement sur la production de la canne à sucre tend à diminuer avec le nombre des repousses. Le rendement en cannes usinables a été réduit de 11 à 48% et le rendement en sucre a été diminué de 14 à 60 % (tableau 3). Cette variabilité de l'effet du tassement dépend en grande partie du climat (surtout la pluviométrie et la température), de la fréquence des irrigations en été, et des conditions de conduite de l'expérimentation (surtout l'alimentation minérale).

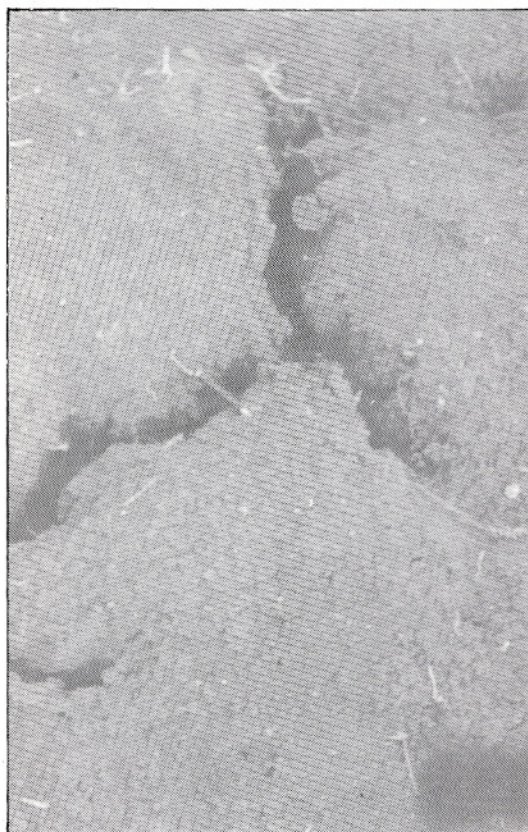
### 3.2.2 La betterave à sucre

L'effet du tassement du sol sur la production de la betterave à sucre a fait l'objet de nombreuses études au Gharb, Tadla et Moulouya (Mathieu, 1981 ; Berrada, 1976 ; Belhadfa, 1978 ; Ouirzzad, 1992 ; Oussible, 1992 ; et Siaida, 1992).

Tableau 3 : Effet du tassement du sol sur la production de la canne à sucre au Gharb (1976-1990).

Expérimentation	Croissance de l'enracinement (%)	Différence les traitements : tassé et non tassé (%)	
		Rendement (%)	
		Cannes usinables	Sucre
1976-78	50	11 à 48	60
1983-85	25	38	46
1984-92	26	15	14

En général, ces études ont montré une relation étroite entre l'effet structural du profil (densité, porosité et résistance mécanique à la pénétration), et certaines caractéristiques de la croissance du système racinaire de la betterave à sucre. Aussi bien, la morphologie (forme, longueur, fourchage) que le poids et le nombre de racines par catégorie de poids ont été corrélés à différentes intensités et profondeurs (au niveau du profil) du tassement. A la suite d'opérations de sous-solage de profils tassés entrepris au champ, une amélioration nette de rendements en racines (20 à 23 %) et en sucre extractible (environ 14 à 17 %) a été enregistrée (Belhadfa, 1978 ; Oussible, 1992 ; Ouirzzad, 1992).



Cette amélioration dans la production qui confirme l'effet préjudiciable du tassement existant dans ces sols, est la résultante d'une amélioration dans les conditions de croissance et de développement du système racinaire (pénétrabilité, alimentation minérale et hydrique...) au niveau des profils améliorés par le sous-solage. L'analyse fréquentielle en poids et en nombre de racines, ainsi que la typologie des betteraves, ont montré qu'au niveau des profils tassés, il y eut significativement plus de petites betteraves (< 1 kg) qui sont plus importantes en nombre et en poids dans le rendement final. Cette composante du rendement (nombre élevé de petites racines) était également à la base de la réduction du rendement en sucre causée par le tassement.

Il est à noter que le tassement n'a pas eu d'effet significatif sur la richesse en sucre. Par contre, la qualité technologique de la betterave au niveau de l'usine pourrait être négativement affectée du fait du volume de terre collé aux racines fourchues transportées à l'usine. Généralement ces terres collées entre les grosses racines secondaires ne facilitent pas leur nettoyage à l'usine.

### 3.2.3 Autres cultures

Parmi les autres cultures ayant fait l'objet d'investigations scientifiques récentes pour quantifier leur réaction au tassement du sol, il y a le coton et la luzerne. Il s'agit de 2 espèces ayant un système racinaire non fasciculé montrant une certaine sensibilité aux obstacles structuraux du profil

cultural. Au Tadla, ces 2 cultures sont économiquement importantes par leur superficie et leur place dans les assolements et les successions culturales.

Les observations au champ de l'état structural ont montré une sensibilité du système racinaire de la luzerne aux accidents structuraux : zones compactes ayant une faible porosité et une forte résistance mécanique à la pénétration. Nous avons relevé des "coudages" des "fourchages", et une faible colonisation par les racines de ces horizons fortement tassés. On assiste à une importante concentration racinaire au dessus de cette zone compacte. Il semble que quand l'alimentation hydrique n'est pas limitante (irrigations plus fréquentes), la partie aérienne ne montre pas de symptômes de déficit de croissance.

Pour ce qui est du coton, l'intensité de tassement enregistré au Tadla (Tableau 1) dépasse de loin l'optimum structural (densité apparente 1,20 Mg/m<sup>3</sup>) pour une bonne production de cette culture (Zakirov et Sleimanov, 1987 ; Taylor et Gardner, 1963). La sensibilité du coton à ces conditions de tassement a été confirmée par sa réaction très favorable à l'amélioration du profil par le sous-solage (Ouirzzad, 1992). L'amélioration structurale du profil s'est traduite sur la fructification du coton par une amélioration aussi bien du nombre de capsules formées que celui des capsules récoltées. Cette réaction positive s'est manifestée à la récolte par un gain de

2.46 qt/ha en coton brut soit une différence de 17% entre les 2 traitements : tassé et non tassé.

## IV. SYNTHÈSE : TASSEMENT, PRODUCTION, ENVIRONNEMENT.

Le tassement des sols irrigués a provoqué des modifications structurales critiques pour la croissance et le développement de plusieurs espèces cultivées (Humbert, 1961 ; Trousse et Humbert, 1968 Oussible, 1977 ; Belhadfa, 1978 ; Taylor, 1979 ; Zakirov et Sleimanov, 1987 ; Oussible et al., 1992).

Les différentes études ont clairement montré que l'état actuel de la discontinuité structurale caractérisée par de fortes densités et résistances mécaniques à la pénétration, et par de faibles porosités, a des répercussions significatives sur la productivité de ces sols, et sur la production des espèces cultivées dans ce milieu. Par son effet sur la porosité, surtout la proportion des macropores responsables de l'aération et du drainage, le tassement réduit l'infiltration des eaux qui s'accompagne d'une augmentation du taux de ruissellement. Par conséquent, la capacité de stockage de l'eau se trouve ainsi réduite, rendant ces sols vulnérables à la sécheresse.

- Quand la discontinuité se trouve en surface du profil, (cas de passages d'engins agricoles), l'augmentation du ruissellement favorise les risques d'érosion, ainsi que le lessivage des produits d'entretien et de pro-

tection. C'est le cas des apports d'azote sous forme de nitrates et l'application des pesticides tels que les atrazines, les monurons et les alachlors (Rzozzi ; communication orale). Le ruissellement de ces produits chimiques les entraîne en général dans des cours d'eau et/ou dans des nappes sous-terraines qui seront ainsi pollués et/ou contaminés.

- Quand la discontinuité se trouve en profondeur du profil, la faible perméabilité et l'insuffisance du drainage provoquent une stagnation d'eau, et des conditions réductrices et asphyxiantes (cas du Gharb durant les mois pluvieux) causant ainsi la dénitrification et la perte de fertilisants. Ce qui également contribue à la pollution des ressources en eaux de surface ou sous-terraines.

L'examen de l'effet du tassement sur la production des cultures montre que cet effet se fait d'abord par la réaction de ces cultures au changement dans la productivité des sols. Cette réaction se traduit en général par une sensibilité des plantes au déficit hydrique en milieu aride, et à la stagnation des eaux en milieu humide. Parallèlement, le tassement affecte la plante par action directe sur la morphologie, l'anatomie, la croissance et le fonctionnement du système racinaire. Ceci se traduit par une insuffisance dans l'alimentation hydrique et minérale durant le cycle de production des cultures, affectant ainsi l'élaboration du rendement et par conséquent

il y a réduction dans la production. En effet, les rendements des céréales ont été réduits de 9 à 63 %, ceux de la betterave à sucre de 20 à 25 %, Ceux de la canne à sucre de 11 à 48 % et celui du coton d'environ 17 %. La qualité de ces productions ne sont pas souvent épargnées.

## V. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**Aminata, Bâ. 1978.** Contribution à l'étude du tassement du sol et ses effets sur la production de la canne à sucre au Gharb. Mémoire de fin d'étude, E.N.A Meknès, Maroc.

**Belfqih, A. 1985.** Recherche sur les besoins de la canne à sucre en matière de travail du sol au le Gharb. Mémoire de fin d'étude. I.A.V. Hassan II Rabat, Maroc.

**Belfqih, A ; M. Oussible ; J. Enahari ; et A. Madrane. 1992.** Effet de différentes préparations du sol sur l'état physique du sol, l'enracinement et la production de la canne à sucre au Maroc. Proceedings International Seminar of the 3d section of the International Commission of Agricultural Engineering. "Tillage in arid and Semi arid areas." p.71 86 CIGR/ANAFID, Rabat, Morocco.

**Belhadfa, H. 1978.** Réaction de l'enracinement de la betterave à sucre à différents états du profil cultural. Mémoire de fin d'étude. I.A.V Hassan II Rabat, Maroc.

**Benlaghli, M. 1982.** Etude de la croissance et du tallage chez le blé dur et le blé tendre en fonction des états structuraux du sol. Mémoire de fin d'étude, Maroc.

**Berrada, A. 1976.** Analyse des problèmes agronomiques liées au travail du sol dans les beni Moussa (cas de la bet-

terave à sucre) Mémoire de fin d'étude, I.A.V Hassan II Rabat, Maroc.

**Bryssine, G. 1946.** Rapport préliminaire sur les sols de la région des Triffa. Service de la Recherche Agronomique d'Oujda. pp 11 18. Rabat, Maroc.

**Bryssine, G. 1961.** Etude sur l'évolution des sols des Beni-Amir, et de leur salure, sous l'effet des irrigations. Cahiers de la Recherche Agronomique N° 12 pp 77 109. Rabat, Maroc.

**Haddioui, A. 1990.** Effet du sous solage sur la croissance et le rendement du blé tendre au Tadla. Mémoire de fin d'étude I.A.V. Hassan II. Rabat, Maroc.

**Hanrion, M. et F. Lelièvre. 1976.** Quelques aspects des problèmes liés au travail du sol. Diagnostic Agronomique dans le périmètre des Beni Moussa au Tadla. I.A.V Hassan II. Rabat, Maroc.

**Humbert, P.R. 1968.** The growing of sugarcane. Elsevier Publishing Co. N.Y.

**Jouve, Ph., et M. Oussible. 1979.** Conséquences du tassement du sol sur l'enracinement et la production de plantations de canne à sucre dans le Gharb. Hommes Terres et Eaux Bull. de l'Ass Nation. Amel. Fonc. Irrig Drain. 9(32) : 69 82 Rabat. Maroc.

**Maataoui, A. 1983.** Effet de profils différenciés sur le peuplement épi et le rendement du blé tendre au Tadla Mémoire de fin d'étude. I.A.V Hassan II Rabat. Maroc.

**MARA, 1991.** Mécanisation du travail du sol au Maroc MARA, DPV DCLF Rabat Maroc.

**Mathieu, C. 1977.** Etude des relations entre les organisations du sol et le développement d'une culture de betterave en condition d'irrigation gravitaire. ORMVA de Moulouya. Texte Roneo. 46 pp. Berkane. Maroc.

**Mathieu, C. 1978.** Influence de l'irrigation sur quelques caractères fondamentaux des sols argileux des plaines du Maroc Oriental Aspects morpholo-

giques. Bull.de l'Assoc. Française pour l'étude du sol. No 2 pp. 95-112. Versailles. France.

**Mathieu, C. 1981.** Evolution morphologique des sols soumis à l'irrigation gravitaire en Basse Moulouya (Maroc Oriental). Thèse Es Sciences Géologiques et Minéralogiques. Faculté des Sciences de Liège. Belgique.

**Oussible, M. 1977.** Etude de l'effet du tassement du sol sur l'enracinement de la production de la canne à sucre au Gharb. Mémoire de fin d'étude I.A.V. Hassan II Rabat, Maroc.

**Oussible, M. and A. Thiam. 1984.** Contribution à la recherche des besoins de la canne à sucre en matière de travail du sol au Gharb. Communication aux Journées Plantes Sucrières. Institut National de la Recherche Agronomique, Rabat, Morocco.

**Oussible, M. 1985.** Effect of subsurface compaction on the nitrogen uptake, growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). Ph.D. Thesis, Un. of MN. St. Paul, MN U.S.A.

**Oussible, M. 1986.** Le travail réalisé par les outils à disques. Conséquences de certaines conditions de leur utilisation au Maroc. Hommes, Terres et Eaux. Vol 16 ; 84 : 48 51.

**Oussible, M. and R.K. Crookston, 1987.** Effect of subsolling a compacted clay loam soil on growth, yield and yield components of wheat. Agron. J. 79.882 886.

**Oussible, M. 1992 :** Action de l'amélioration du profil cultural sur la production des céréales et la betterave à sucre au Tadla. Proceedings International Seminar of the 3d section of the International Commission of Agricultural Engineering. "Tillage in arid and Semi arid areas. p. 109 125 CIGR/ANAFID, Rabat, Morocco.

**Oussible, M. ; R.K. Crookston ; and W.E. Larson. 1992.** Subsurface compaction affects the root and shoot growth and yield of wheat. Agron. J. 84 : 34 38.

**Ouirzzad, A. 1992.** Evaluation de la pérennité de l'effet du sous solage au

Tadla : Réaction de trois cultures en rotation : Betterave à sucre, blé tendre et coton au sous solage entrepris juste avant l'installation des cultures. Mémoire e fin d'Etude. I.A.V. Hassan II, Rabat, Maroc.

**Ruellan, A. 1959.** Etude pédologique d'une partie des terrains collectifs de la plaine de Zebra. Organisme de Recherches Scientifiques et Techniques Outre Mer/Direction de mise en Valeur. Texte roneo ; 92 pp.Berkane. Maroc.

**Ruellan. A. 1962.** Note sur les Méthodes d'Irrigation. Office National d'Irrigation/ MEG Texte Roneo. 10 pp Berkane. Maroc.

**Siaida, B. 1993.** Effet de différents systèmes de préparation du sol sur l'état structural et ses conséquences sur l'élaboration du rendement de la betterave à sucre au Gharb. Mémoire de fin d'étude. I.A.V Hassan II Rabat, Maroc/.

**SASMA, 1987.** Caractérisation des sols dans le secteur Tramé de Sidi Bennour, SASMA. Casablanca. Maroc.

**SASMA, 1988.** Caractérisation des sols et mise au point des formules d'engrais pour la betterave à sucre dans les secteurs 20,21 et 22 de Zemamra. SASMA. Casablanca. Maroc.

**Taylor, H.M. and H.R. Gardner. 1963.** Pénétration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content and strength of soil. Soil Sci. 96 : 153 156.

**Tomar, S.S. ; M.B. Russel and A.S. Tomar. 1981.** Effect of subsurface compaction on root distribution and growth of wheat. J. Agron. and crop Sci. 150 : 62 70.

**Trouse, A.c. and R.P. Humbert. 1961.** Some effects of soil compaction on the development of sugarcane roots. Soil Sci. 91 : 208 218.

**Taylor, H. M. 1979.** Mechanical impedance to root growth. Paper presented at International Symposium : 'Priorities for alleviating soil related constraints to food production in the Tro-

pics'. IRRI Los Banos. Philippines.

**Voorhees, W.B. 1977.** Soil compaction : How it influences moisture, Temperature, yield, root growth. Crops and Soils magazine 39(6) : 7 10.

**Voorhees, W.B. ; J.F. Johnson, G.W. Randall and W.W. Nelson.**

**1989** Corn growth and yield as affected by surface and subsoil compaction. Agron. J. 81 : 294 302.

**Willsell, L.E and J.A. Hobbs. 1964.** Soil compaction effects on field plant growth. Agron. J. 57 : 534 537.

**Yamini, B. 1986.** Mécanisation de la

betterave sucrière dans la région des Doukkala (Travail du sol et technique de récolte). Mémoire de fin d'étude I.A.V Hassan II Rabat, Maroc.

**Zakirov, A. and S. Sleimanov. 1987** : Soil density and cotton yield. Khlopkovodstvo. n° 9 96 29 Russie.

## LA PREVOYANCE... C'EST BON A SEMER



**MAMDA, la bonne graine d'assurance**

### NOS BUREAUX REGIONAUX

<b>MAROC NORD ASSURANCES</b> 16, Rue Abou Inane, Rabat	<b>MAROC SUD ASSURANCES</b> 80, Bd. La Résistance, Casablanca
<b>MAROC SUD ASSURANCES</b> 40, Rue Mansour Eddahbi, Marrakech	<b>MAROC SUD ASSURANCES</b> Quartier Industriel, Beni Mellal
<b>MAROC CENTRAL ASSURANCES</b> 08, Zenkat Tetoan, Meknes	<b>FES TAZA ASSURANCES</b> Place Florence, Fès
<b>ASSURANCES MUTUELLES DU SOUSS</b> Av. Général El Kettani, Agadir	<b>MAROC ORIENTAL ASSURANCES</b> 11 Bis, Zerktoni, Oujda
<b>MUTUELLE AGRICOLE MNE. D'ASS</b> Av. Bir Inzarane, Sidi Slimane	<b>BUREAU DE KHEMISSSET</b> 38, AV. MED V. Khemisset
<b>BUREAU DE TANGER</b> 25, Bd. Med V. Tanger	<b>BUREAU DE TETOUAN</b> 11, Place El Jalaal, Tetouan
<b>BUREAU DE LARACHE</b> 2, AV. Zerktoni, Larache	<b>BUREAU DE NADOR</b> BP. 555, P. Amgala Rued 7 n° 19/21, Nador
<b>BUREAU DE BERKANE</b> 183, Bd. Hassan II, Berkane	<b>BUREAU DE SAFI</b> 26, P. de l'Indépendance B.P. 466, Safi
<b>BUREAU DE TAOURIAT</b> Bd. Med V. Taourirt	

## ANALYSES DE SOLS ET RECOMMANDATIONS DES ENGRAIS

Patrick VILLEMIN <sup>(1)</sup>

### Introduction

Pourquoi fertiliser ? C'est bien la question que doit se poser l'agriculteur avant de faire un apport d'engrais. La réponse est tout à la fois agronomique et économique : on fertilise pour s'assurer d'une biodisponibilité des éléments minéraux en accord avec les objectifs de rendement et de qualité fixés, dans des conditions économiques données. La première partie de cette proposition demande une connaissance approfondie du sol et des relations sol - plante. Elle permet de mettre en place le raisonnement objectif de la fertilisation. C'est essentiellement l'objet de cet article. L'acte économique sous-jacent dans le second terme de la proposition doit être présent pour valider le diagnostic de fertilité et le transformer en un conseil de fertilisation rentable pour l'agriculteur. Pour être complet, le conseil doit tenir compte, en outre, des éventuelles contraintes environnementales.

Au cours de son cycle, une culture extrait du sol les éléments dont elle a besoin. Elle doit y trouver les quantités nécessaires à sa croissance dans des conditions de disponibilité suffisantes pour éviter tout stress nutritionnel, notamment aux périodes les plus sensibles de sa croissance. Diagnostic et conseil vont ainsi tenir compte des caractéristiques de la plante, exigences et besoins [CASTILLON, 1993] et des propriétés du sol vis-à-vis de l'élément considéré : quantité disponible, flux de mise à disposition pour la plante, ... La connaissance de toutes ces données est nécessaire pour moduler le raisonnement de la fertilisation qui s'appuie sur les résultats des champs d'essais de longue durée.

### I. Estimation de la biodisponibilité des éléments nutritifs : exemple du potassium

Depuis plus d'un siècle, les agronomes ont cherché à estimer la biodisponibilité du potassium. Ce terme, indiquant globalement que les ions potassium biodisponibles ont la possibilité d'être absorbés par le végétal au cours d'un cycle cultural

[COMIFER, 1993a], recouvre en fait deux notions. L'une est quantitative : le sol dispose-t-il d'un compartiment de potassium suffisant par rapport aux quantités qui seront finalement prélevées par la culture au cours de son cycle ? L'autre est qualitative : le potassium de ce compartiment est-il mis à la disposition de la plante dans des conditions telles qu'il ne soit en aucun cas un facteur limitant la croissance de la culture ?

### 1.1. Estimation quantitative

#### 1.1.1. K échangeable

Dans la pratique courante, la biodisponibilité est estimée par la mesure du potassium échangeable, pratiquée partout dans le monde avec une grande standardisation. Le terme même de potassium échangeable (noté ensuite K éch.) fait bien apparaître son origine analytique : échangeable par l'ammonium dans des conditions bien déterminées. Cette méthode est d'une mise en oeuvre simple pour l'analyste. Elle est en outre robuste : elle donne un résultat fini, peu sensible aux conditions opératoires. Le compartiment de potassium estimé par cette mesure correspond grosso-modo à la solution du sol ainsi qu'aux sites d'échanges externes des argiles où le potassium peut être désorbé par l'ammonium. Les sites d'échanges internes ne sont que très peu concernés, l'ammonium ne permettant pas une poursuite de l'échange des ions situés en position interfoliaire [QUEMENER et BOSCH, 1988].

La simplicité analytique de cette détermination n'exclut pas de nombreuses difficultés d'interprétation. Si l'on peut considérer l'erreur due au laboratoire comme négligeable, la variabilité des résultats provient de diverses sources : pré-

(1) Centre de Recherches SCPA - F 68700 Aspach le Bas

cédent cultural, à cause des différences de bilan cultural, périodes de prélèvement et conditions climatiques car l'on sait que K éch. est sensible aux variations du passé hydrique, ... Néanmoins, même si les prélèvements sont effectués en suivant rigoureusement les recommandations des prescripteurs (mêmes périodes du cycle d'une même culture, dans des conditions climatiques proches) le suivi de la biodisponibilité du K à l'aide de K éch. reste soumis à la variabilité intrinsèque de cette donnée au champ et nécessite le mélange d'un nombre important de carottes individuelles.

## 1.1.2. K échangeable minimal

Très tôt, on a montré que K éch. n'était souvent pas identique au potassium utilisé par la plante.

D'une part, en régime d'épuisement, une certaine quantité de K éch. reste présente dans le sol, même lorsque la plante souffre de carence aiguë voire létale en potassium. Cette quantité résiduelle, appelée K éch. minimal, semble être une caractéristique intrinsèque d'un sol donné, quelque soit l'historique de fertilisation. Elle peut être mise en évidence par le biais d'essais d'épuisement en pots ou par l'extrapolation de courbes de pouvoir tampon [SCHNEIDER, 1993]. A titre d'exemple, sur une large population de Terres de Craie de Champagne, K éch. minimal se situe aux environs de 70 ppm, valeur confirmée sur des essais au champ et retrouvée sur des sols "vierges" sur lesquels les niveaux se sont stabi-

lisés au cours des temps sans apport exogènes de potassium.

Sur ces mêmes sols, cultivés et régulièrement fertilisés depuis longtemps, le niveau de K éch. mesuré est très nettement supérieur à cette valeur de K éch. minimal qui constitue alors une ordonnée à l'origine, quelquefois importante dont on ne se préoccupe pas lors du diagnostic de fertilité [VILLEMIN et QUEMENER, 1986 ; VILLEMIN et al, 1990].

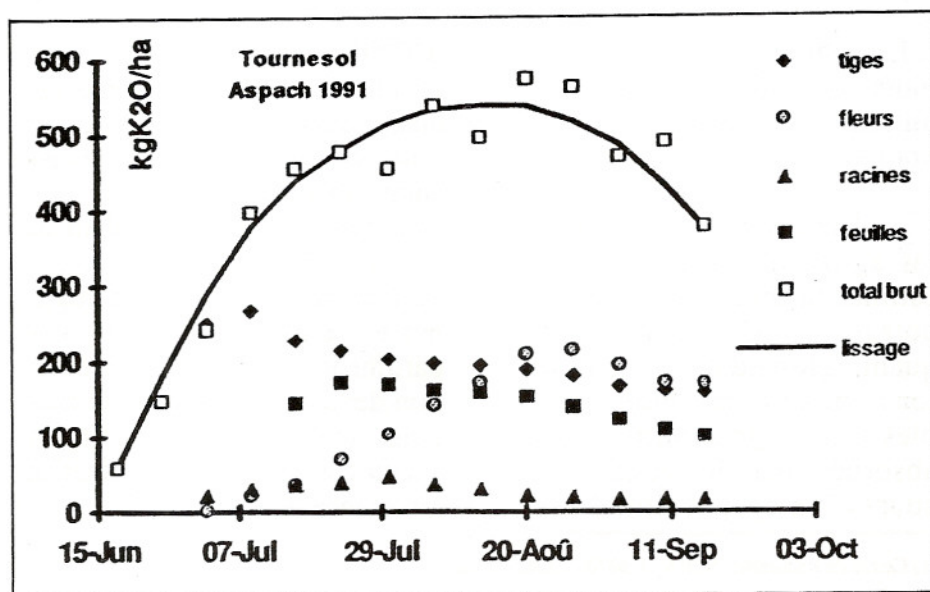
En revanche, dans les systèmes peu intensifiés, dans les sols à faible teneur en minéraux phylliteux, dans des conditions économiques difficiles, toutes situations où l'on ne peut ou ne veut pas capitaliser du potassium dans les sols, la notion de K éch. minimal devrait être prise en considération. En particulier, le conseil, soit de réduction progressive de fumure, soit d'impasse contrôlée par un suivi analytique, devrait impérativement prendre en compte cette valeur de K. éch. minimal. Elle pourrait alors être

considérée comme un indicateur de risque pris. Ceci est tout particulièrement vrai lorsque ces réductions sont préconisées sur des sols modérément pourvus comme c'est le cas sur cultures peu exigeantes. Malgré certains travaux originaux réalisés au cours de ces dernières années [DAKLIA, 1991], ce mode de raisonnement n'est, à ce jour, pris en compte dans aucun système de diagnostic et de conseil.

## 1.1.3. K intermédiaire

A l'inverse, dès que les besoins d'une culture en potassium s'accroissent au cours des phases de croissance, une partie de potassium est extraite d'un compartiment intermédiaire non échangeable. Ce prélèvement est bien mis en évidence par la confrontation des bilans culturaux, égaux à la différence (Apports de fertilisants - Exportations par la plante) et des bilans analytiques en K éch. (fig. 1). Là encore, les cultures en pots apportent une aide pour l'estimation de ce compartiment de

Fig 1 : Evolution comparée des bilans agricole et analytiques au cours d'un cycle cultural.



potassium libérable sous l'action de la culture. Elles sont cependant trop difficiles à mettre en oeuvre en semi-routine. Selon les pays, l'estimation de ce compartiment intermédiaire dans lequel peuvent s'alimenter les plantes est réalisée par diverses méthodes : électro-ultra filtration, extraction à l'acide nitrique dilué, extraction au tétraphénylborate de sodium (NaTPB),...[QUEMENER, 1988]

## 1.1.4. Fixation de K

Après une fertilisation, l'augmentation du K éch. est toujours inférieure à celle calculée par la dilution de l'apport d'engrais dans la masse de terre analysée. Une partition de l'apport s'opère entre les compartiments K éch. et K intermédiaire. La part de la fumure passant en position non échangeable, ou intermédiaire, est considérée comme fixée, par rapport à l'indicateur retenu, K éch. En sol où la biodisponibilité est non limitante, cette part de potassium fixée est totalement, ou presque, libérée sous l'action de la plante au cours d'un cycle cultural (fig. 1). Peu de travaux ont été consacrés à l'étude de la réversibilité de la fixation et de la libération, ces phénomènes ayant généralement été étudiés avec des méthodes différentes.

Contrairement au cas du phosphore où le départ de la solution du P des apports vers d'autres compartiments est un phénomène chimique, la fixation du K résulte d'un piégeage des ions potassium dans les cavités hexagonales des argiles. Dans le premier cas, il y a transformation des ions phosphates

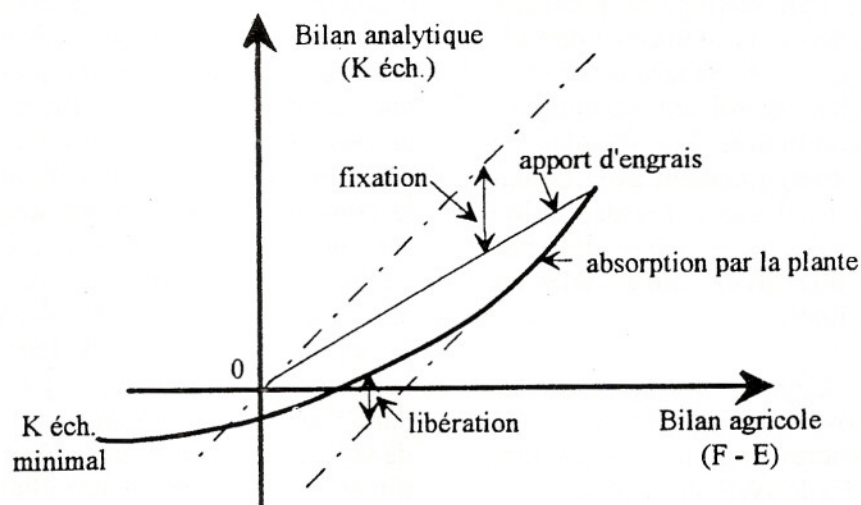
en composés de solubilité plus faible, voire beaucoup plus faible [FARDEAU, 1993]. Le potassium est, quant à lui, soumis à l'échange d'ions. Aussi, les termes de fixation doivent-ils être utilisés avec un sens, et partant des propriétés, bien définis selon l'élément considéré.

Une approche originale a récemment utilisé la plante pour estimer la part de K apporté qui n'est pas réutilisé par la plante au cours de son cycle [DAKLIA, 1991]. On détermine ainsi un pouvoir fixateur plante, plus faible que le pouvoir fixateur à l'ammonium. Cette notion pourrait être introduite dans l'interprétation de l'analyse de terre, pour moduler le risque que prend l'agriculteur lors du calcul d'apports supérieurs aux exportations.

## 1.2. Estimation qualitative

L'observation d'une courbe de prélèvements en K fait ressortir l'énorme variation des quantités extraites par une plante au cours du cycle (fig. 2). Ainsi, de pratiquement rien à la sortie de l'hiver, ces quantités peuvent monter jusqu'à plus de 15 kg  $K_2O$  par hectare et par jour. Ces quantités sont extraites de la solution du sol qui ne contient généralement à un moment donné que l'équivalent de quelques kilos de K. La solution du sol doit ainsi être réapprovisionnée quelquefois plusieurs fois par jour, pour satisfaire la demande de la plante. Ceci est réalisé à partir du K éch., puis, soit directement soit par l'intermédiaire du K éch., à partir du K intermédiaire. Cela montre les limites de l'analyse du K conte-

Fig 2 : Courbe d'absorption du potassium par le tournesol.



nu dans la solution du sol comme indicateur prédictif de la biodisponibilité.

Dans cette chaîne d'alimentation de la plante, les quantités de potassium mises en évidence par la méthode simplissime d'échange à l'ammonium n'apportent pas une connaissance suffisante pour porter un diagnostic rigoureux de fertilité. Elles ne permettent pas de s'assurer qu'à l'interface racinaire l'adéquation est réalisée entre un flux potentiel d'entrée de K dans la plante et le flux réel de fourniture du sol en cet élément. Celui-ci est estimé par le pouvoir tampon dont quelques caractéristiques sont communes à tous les sols. Plus on fertilise un sol, plus on augmente la teneur de la solution du sol et plus on diminue le pouvoir tampon. L'alimentation de la plante en est améliorée mais perd de sa stabilité sous l'effet d'une forte demande culturale.

Ces notions bousculent le schéma un peu simpliste d'un potassium découpé en plusieurs tranches sans relations entre elles. Les ions potassium contenus dans un sol se trouvent dans un continuum, liés de plus en plus énergiquement avec la matrice argileuse à mesure qu'on passe des faces planes des cristaux aux cavités ditrigonales les plus internes.

Cependant, l'agronome ne dispose que de méthodes très grossières pour traquer les ions K dans le système sol-plante. Le flux entre K adsorbé sur les argiles, assimilable dans la pratique à K éch., et K de la solution

est soumis au pouvoir tampon [SCHNEIDER, 1993]. Entre K intermédiaire et K adsorbé, une estimation du flux pourrait être par exemple la pente de la courbe de désorption de K intermédiaire par NaTPB.

Pour des raisons de simplification, les besoins en éléments fertilisants ont toujours été considérés en termes quantitatifs en effectuant sur la durée du cycle cultural un bilan des entrées et sorties. Jusqu'à ces dernières années, un bilan négatif était aisément corrigé par un apport peu coûteux, donc généralement rentable, d'engrais. Les contraintes économiques apparues très récemment donnent toute leur valeur à la connaissance approfondie de la dynamique du potassium. Les éléments minéraux, et le potassium en particulier, ne doivent pas être raisonnés en termes simplement comptables.

Malheureusement, ces caractéristiques qualitatives de la biodisponibilité, de même d'ailleurs que les méthodes évoquées plus haut, ne peuvent être estimées que par des techniques onéreuses et difficiles à mettre en oeuvre en routine. Outre leur difficulté d'interprétation pour le conseiller de terrain, ce sont sans doute les raisons pour lesquelles ces techniques ne sont pas intégrées directement dans les systèmes de conseil de fertilisation. Une ouverture cependant : au sein d'un même type de sol, ces différentes caractéristiques sont très liées entre elles et à la CEC (capacité d'échange cationique), très facile à mesurer en routine [QUEMENER,

1986]. Cette remarque a conduit à la mise en place de modulations régionales comme explicité plus loin.

### 1.3. Estimation globale

Parallèlement à ces considérations physico-chimiques, l'agronome a pensé obtenir une estimation globale de la biodisponibilité, à la fois sous ses aspects qualitatifs et quantitatifs. Les essais au champ de longue durée apportent partiellement cette réponse. On compare en effet la satisfaction des besoins d'une culture, exprimée par sa réponse en termes de rendement, sur des situations où la biodisponibilité, contrôlée par K éch., a été artificiellement fixée à plusieurs niveaux par des apports d'engrais ou par des pratiques d'épuisement [VILLEMIN, 1987a, AIT HOUSSA, 1989 ; LAURENT et al., 1993]. L'essai au champ intègre de plus les interactions de la dynamique de K avec les autres facteurs de production : travail du sol, autres éléments fertilisants, régime hydrique, climatologie, ... et ce, dans la situation régionale retenue. L'essai au champ peut alors sembler à certains la référence absolue sur laquelle s'appuyer pour donner le conseil.

Il ne faut pas se leurrer ! L'essai au champ ne peut donner que ce qu'il a. Le champ n'est pas un milieu fini. Il est impossible de contrôler tous les facteurs culturels et les résultats montrent fréquemment une dispersion désespérante [BARBIER, 1984].

## II. Apports de la connaissance de la dynamique de K au raisonnement général de la fertilisation : les modulations

Compléter l'offre du sol par un apport d'engrais est la base même du raisonnement de la fertilisation. Il se divise en deux étapes. En premier lieu, l'agronome doit porter un jugement sur l'état de la biodisponibilité du K du sol : la connaissance de la dynamique de cet élément va l'y aider. Dans un deuxième temps, selon le diagnostic, il conseillera la fumure la mieux adaptée aux objectifs de rentabilité de l'exploitation.

### 2.1. Diagnostic de biodisponibilité

#### 2.1.1. Bases du diagnostic

Le diagnostic de biodisponibilité du K s'appuie de façon très pragmatique sur les résultats des essais au champ [VILLEMIN, 1987b ; LAURENT et al, 1993]. On juge si la biodisponibilité, estimée en routine par l'indicateur K éch., est compatible avec l'alimentation des cultures. En dessous d'un seuil, appelé norme, variable selon les cultures, les sols et les pratiques culturales, la biodisponibilité est insuffisante et doit être complétée. Au dessus de ce seuil, la biodisponibilité est correcte, voire élevée et la pratique de fertilisation qui s'ensuit consiste à la maintenir à son niveau optimal. Un second seuil, issu lui aussi des essais, permet de proposer une stratégie de réduction de fumure, voire d'impasse.

La norme peut être établie selon deux démarches complémentaires.

- la norme est définie sur un essai et les conclusions sont restreintes au sol particulier portant l'essai ou à des sols extrêmement proches. Le risque est grand d'utiliser un tel résultat fragmentaire dans des situations fort éloignées des conditions d'obtention : sols et climats très différents, cultures d'exigence et/ou de besoins bien différenciés,... ou même simplement avec un effet année très important.
- la norme est établie statistiquement à partir des probabilités de réponse des cultures. De nombreux travaux menés au cours de la dernière décennie se sont appuyés sur cette approche et ont conduit à proposer la mise au point de normes d'interprétation de K éch. Cette démarche statistique, si elle est menée sans discernement, n'est pas exempte de critiques [VILLEMIN, 1987a].

Cependant, cette seconde approche est généralement retenue dans la pratique car elle gomme quelque peu les variabilités inhérentes à l'expérimentation au champ. C'est une base moyenne sur laquelle on greffe des modulations qui expriment l'écart de chaque situation rencontrée par rapport à cette moyenne. Quelques exemples, dont la plupart issus de la connaissance de la dynamique du K, illustrent cette démarche [VILLEMIN, 1988 ; VILLEMIN et QUEMENER,

1986 ; 1988 ; VILLEMIN et FLORENTIN, 1988].

#### 2.1.2. Modulations

- modulation en fonction de la masse de terre : le chiffre moyen de 3000 t/ha de terre fine implique une modulation à la hausse de l'offre potentielle sur les sols squelettiques très caillouteux qui réduisent le volume disponible que peuvent prospecter les racines. La modulation est en revanche à la baisse sur les sols très profonds (sur limons par exemple). Les racines ne prospectant de toute façon qu'une partie du sol, les modulations ne sont pas proportionnelles au rapport des poids de terre. Cependant, aucune étude exhaustive ne permet de définir avec certitude des coefficients de modulation.
- modulation en fonction de la taille du compartiment de K intermédiaire : à K éch. identique, l'ampleur du compartiment intermédiaire dans lequel peuvent s'alimenter les cultures fournit fréquemment une explication aux différences de croissance. Sur un même type de sol, le rapport entre ces deux grandeurs est peu variable contrairement à ce qu'on observe entre types de sols différenciés [COLLIN et al, 1991]. S'il est plus grand que le rapport observé sur le cas général issu de l'exploitation globale des essais, on pourra introduire une modulation à la baisse du niveau souhaitable. Et inversement. Ce type de modulation est opérationnel

depuis plusieurs années dans le logiciel d'interprétation des analyses de terre, IPAS<sup>®</sup>. Avec l'expérience, il apparaît que le poids donné à cette modulation est trop important, là encore à cause du fait que l'ensemble du volume de sol n'est pas exploré par les racines.

- autres modulations : ainsi qu'on l'a évoqué plus haut, d'autres caractéristiques des sols pourraient être des indicateurs pertinents de la gestion de la fertilisation. Les récents travaux menés sur des populations représentatives d'un type de sol donné, en particulier pour ce qui concerne le pouvoir tampon et la concentration de la solution du sol ou K éch. minimal, n'ont cependant pas encore abouti en vue de proposer en routine une modulation du diagnostic (par exemple les travaux en cours sur les Terreforts du Sud-Ouest, les sols sur schistes briovériens de l'Ouest, etc...)

## 2.2. Conseil de fertilisation

### 2.2.1. bases du raisonnement

Un fait est certain : tout prélèvement d'éléments fertilisants d'un sol par une culture se traduit inéluctablement par une diminution de la biodisponibilité de l'élément dans le sol.

- dans le cas de sols très bien pourvus, soit naturellement, soit à la suite de pratiques de fertilisation excessives, on peut admettre d'utiliser les

réserves du sol tant que la baisse concomitante de biodisponibilité n'est pas préjudiciable à l'obtention des objectifs de rendement fixés.

- lorsque la biodisponibilité est à son niveau souhaitable, la fumure doit compenser les pertes afin d'éviter une quelconque diminution de celle-ci.
- en dernier lieu, si le sol ne permet pas d'alimenter correctement les plantes, il est impératif de leur fournir ce dont elles ont besoin, c'est à dire en améliorant la biodisponibilité [COMIFER 1993b].

Dans le cas général, la base du conseil de fertilisation est donc la compensation des pertes apparues au cours du cycle : exportations par les plantes et lessivage pour l'essentiel. Les exportations sont calculées à partir du produit des objectifs de rendement par les teneurs des parties exportées, celles-ci provenant de tables maintenant largement diffusées. Ces exportations prévisionnelles peuvent éventuellement être corrigées en fonction du bilan réel de la culture précédente, en particulier en cas de chute importante de rendement par rapport aux objectifs à la suite de problèmes en culture (sécheresse, mauvaise protection phytosanitaire,...)

Le lessivage est une donnée éminemment variable : selon le type de sol, sa topographie, le couvert végétal, le régime pluviométrique, la richesse en éléments...[VILLEMIN et al,

1993] Aussi prend-on généralement des valeurs moyennes, synthèses des nombreuses études menées en lysimètres.

### 2.2.2. Modulations

A partir de ce schéma très simple, diverses modulations sont appliquées. On ne présente ici que celles qui sont issues des travaux sur le comportement du K dans le sol et déjà évoquées plus haut.

- rajeunissement du potassium : les céréales à fort rendement prélèvent dans le sol des quantités importantes de potassium : jusqu'à 300 kg K<sub>2</sub>O/ha au moment de la floraison pour des rendements de 80 q/ha. Si les pailles sont laissées au champ, ce sont au moins 250 kg de potassium qui retournent au sol, dans l'horizon superficiel et sous forme assimilable. Une part de ce potassium, prélevé dans les horizons inférieurs à la zone analysée ou dans le compartiment intermédiaire, contribue ainsi à augmenter le niveau de K éch. sans apports extérieurs. Ce phénomène de "rajeunissement du potassium" contribue à réduire, voire éliminer, les réponses qu'on aurait habituellement observées sur les cultures suivantes. Il induit l'introduction dans le conseil d'une modulation de la répartition des doses apportées sur la rotation, en attirant cependant l'attention de l'utilisateur sur le fait que ce rajeunissement est en fait un transfert de K entre compartiments et horizons et que

tôt ou tard, la biodisponibilité du K en souffrira.

- fixation du potassium : à l'autre bout de l'échelle, les cultures exigeantes doivent recevoir au minimum une fumure d'entretien permettant de maintenir la biodisponibilité à son niveau actuel. En outre, si celle-ci est un peu faible, un renforcement de la fumure est préconisé. Il peut être calculé à l'aide d'un coefficient multiplicateur de l'entretien d'autant plus élevé que la biodisponibilité est plus éloignée du niveau souhaitable [COMIFER, 1993b] ou, plus classiquement en estimant la dose nécessaire à remonter le niveau du sol à la norme. Dans ce dernier cas, la connaissance du pouvoir fixateur est nécessaire.

### III. Référentiel

L'utilisation adéquate des différentes caractéristiques de la dynamique du potassium évoquées ci-dessus implique l'affectation précise de l'échantillon de terre à un référentiel. Cette affectation peut être faite à savoir d'expert lorsque l'agriculteur ou plus généralement le préleveur connaît parfaitement sa région. Plus souvent c'est au moment de l'interprétation qu'on combine plusieurs paramètres pour affecter l'échantillon, avec le risque d'erreur minimal à une unité de sol qui orientera vers les modulations du diagnostic et du conseil issues des travaux de recherche. Des résul-

tats très prometteurs ont été obtenus en combinant petite région agricole et plusieurs paramètres stables de l'analyse : CEC ou taux d'argiles, calcaire total, éventuellement pH ou matières organiques,...[VILLEMIN et COLLIN, 1993]

## IV. Conseil de fumure et gestion de la fertilisation

### 4.1. Conseil agronomique

Le conseil agronomique de fertilisation, tel qu'exposé plus haut, est individuel. Il s'adresse à une parcelle donnée de l'agriculteur, pour une culture ou un ensemble restreint de cultures, sur un type de sol particulier. Il est maintenant donné en s'aidant systématiquement de logiciels qui s'appuient sur l'ensemble des données d'expert évoquées plus haut. Le rôle du conseiller de l'agriculteur consiste alors à intégrer dans le conseil final d'autres considérations plus difficiles à quantifier ou inconnues du laboratoire d'analyses : données économiques locales, situation de la trésorerie de l'agriculteur, voire données psychologiques... Un exemple de tel logiciel est présenté ici (fig. 3) : IPAS<sup>®</sup>, développé depuis 1983 en routine par le Centre de Recherches de la SCPA à Aspach le Bas en relation étroite avec le laboratoire d'analyses SADEF.

### 4.2. Conseil en produits commerciaux

Pour l'agriculteur, le conseil de fumure en éléments N, P, K, Mg,... n'est pas suffisant.

D'autres contraintes doivent être prises en compte : adéquation de la forme d'engrais au sol considéré ou aux conditions d'épandage, disponibilité de la forme souhaitée chez le distributeur,...

A partir du conseil en éléments et de données relatives aux conditions optimales d'utilisation des engrais, un logiciel tel que le "Point Potasse"<sup>®</sup> réalise l'adéquation entre les besoins de l'agriculteur et les disponibilités du distributeur. Le conseil final est alors exprimé en produits commerciaux, sur l'ensemble des parcelles de l'exploitation. D'autres informations touchant aux apports d'oligo-fertilisants, de matières organiques sont également fournies. Les résultats peuvent, à la demande, prendre jusqu'à la forme d'un bon de livraison [CRONENBERGER et al, 1992].

### 4.3. Synthèses d'analyses de terre

Outil d'approche de la fertilité des sols, les synthèses d'analyses de terre [SCPA 1992 ; 1993] sont fréquemment intégrées dans une approche plus globale des potentialités d'une région. Elles sont un complément au conseil individuel tant pour l'agriculteur ou son conseiller que pour le fournisseur d'engrais. Les synthèses permettent au premier de se situer dans un ensemble cohérent : c'est un outil de formation. Pour le second, elles sont une source d'information irremplaçable pour orienter une politique commerciale tant au niveau de la



# ANALYSE DE TERRE



## REFERENCES

Prescript année dépt rég. INSEE commune N° expédition Code sol  
412 93 10 015 34 0 01 201

Numéro laboratoire: 043661  
 Numéro feuille de renseignements: 235001  
 Nom de l'échantillon: PETITE HAIE  
 Coordonnées Lambert: 1234, 56 / 1357, 67  
 Surface parcelle: 10 ha  
 Prélevé en: MAI 93  
 reçu le : 03/05

Date: 19/ 05/ 93

CLAUDE MICHEL.  
 LA GRANDE FERME  
 10120 SAINT GERMAIN

## FERTILITE

	Teneur DU SOL		Niveau souhaitable (g/kg)	Trés faible	Faible	Un peu faible	Satisfaisant	Élevé
	(MÉ/KG)	(G/KG)						
. pH eau	6,5		(7,5)	*****	*****			
. Matière organique (C.Org. x 1,73)	(*)	26	19	*****	*****			
Azot total		1,5		*****	*****			
C/N	9,8			*****	*****			
. Phosphore assimilable (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	OLSEN	0,250	0,050					
	DYER	0,45						
. C.E.C.	METSON	120						
. Cations échangeables								
Potassium (K <sub>2</sub> O)	4,2	0,20	0,17	*****	*****			
Magnésium (MgO)	4,4	0,09	0,08	*****	*****			
Calcium (CaO)	89,9	2,52	4,36	*****	*****			
Sodim (Na <sub>2</sub> O)	4,6	0,05		*****	*****			
. Taux de saturation		<b>84%</b>						
. Oligoéléments		(mg/kg)	(mg/kg)					Excessif
Fer (Fe) DIPA		26	20	*****	*****			
Manganèse (Mn) DIPA		21,0	8,0	*****	*****			
Cuivre (Cu) DIPA		0,2	0,4	*****	*****			
Zinc (Zn) DIPA		0,6	0,9	*****	*****			
Bore (B) S.EAU		0,5	0,37	*****	*****			

## ETAT PHYSIQUE (%)

5 fractions (C<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> NON DÉTRUIT) + M.O. + Humidité résiduelle = 100

. Carbonates totaux (CaO <sub>3</sub> )	0
. Argile : < 0,002 mm	21,3
Limon fin : 0,002 - 0,02 mm	27
Limon grossier : 0,02 - 0,05 mm	30,2
Sable fin : 0,05 - 0,2 mm	13,2
Sable grossier : 0,2 - 2mm	5,3

La CEC ou Capacité d'échange en Cations (milli-équivalents /kg ) caractérise la capacité du sol à stocker et à restituer les éléments minéraux. valeurs extrêmes: Sables 30 mé/kg. Argiles 400 mé/kg.

LIMON ARGILEUX

## AUTRES DÉTERMINATIONS ET OBSERVATIONS

Tous les résultats sont exprimés par rapport à la lettre fine sèche

SADEF Laboratoire agréé par le Ministère de l'Agriculture

Rue de la Station - 68700 ASPACH-LE-BAS - Tél: .89.48.91.67 - Télécopie 89.48.79.03



## CONSEILS DE FUMURE pour la succession de cultures (unités d'éléments fertilisants par hectare)

Cultures envisagées sur 4 ans	COLZA			BLE TENDRE			MAIS GRAIN			BLE TENDRE		
Résidus Objectifs de rendements	ENFOUIS 32 q / ha			ENFOUIS 75 q / ha			ENFOUIS 95 q / ha			Exportes 75 q / ha		
Fumure azotée Exportations de soufre (SO <sub>3</sub> )	130			55			50			80		
Anhydre phosphorique Oxydes de potassium et de Magnésium -Exportations	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO
-Fixations à l'entretien	50	30	15	75	45	1	70	50	15	90	160	25
- Lessivages	10	0	0	15	0	0	15	0	0	20	10	0
- Total	0	10	20	0	10	20	0	10	20	0	10	20
Total fumure d'entretien (E)	60	40	35	90	55	35	85	60	35	110	180	45
Réductions de fumure ou Redressement (R)	-30	0	0	-90	-30	-20	-85	0	0	-110	-90	-25
TOTAL (E) + (R)	30	40	35	0	25	15	0	60	35	0	90	20
Autre répartition possible sur la succession												

## COMMENTAIRES

**FUMURE POTASSIQUE ET MAGNÉSIENNE** : Malgré un niveau satisfaisant, une modulation de la fumure d'entretien est conseillée en fonction de l'exigence des cultures.

**ANHYDRIDE PHOSPHORIQUE**: La fumure conseillée (TOTAL ) tient compte de l'exigence des plantes .

**CHAULAGE** : Apposer 7400 unités/ha de CaO ou équivalent pour atteindre le Calcium échangeable de 4,36 g/kg.  
En cas d'utilisation de produits cuits, consulter votre technicien pour un fractionnement éventuel.

**CUIVRE** : Faire un apport de correction en appliquant 1 kg de cuivre (Cu) au sol, ou 100 à 200 g/ha de Cuivre en application foliaire.

**ZINC** : Faire un apport de correction en appliquant 3 Kg/h de zinc (Zn) au sol ou 250 g en pulvérisation foliaire.



**SOUFFLET AGRICULTURE**

Quat Sarraill - B.P. 12, 10400 NOGENT -SUR- SEINE  
Tél. 25 39 41 11 - Télécopieur 25 39 00 87  
Refaire une analyse de contrôle dans quatre ans \*

promotion que d'une approche produit mieux adaptée aux conditions régionales.

## V. Conclusion

Le sol est une interface obligatoire entre la plante et les engrais. Aussi un bon conseil de fumure passera-t-il par une connaissance approfondie de la dynamique du sol. La science du sol doit ainsi jouer un rôle primordial autour duquel s'articulent l'agronomie, la physiologie et en fin de compte l'économie.

## BIBLIOGRAPHIE

**AIT HOUSSA A., 1989** : Etude du potassium dans divers types de sols et systèmes de culture au Maroc. Thèse Dr. es Sc. Agro., IA V Hassan II, Rabat

**BARBER P., 1984** : Fertilisation PK Nord et Bassin Parisien. Mémoire ESITPA Le Vaudreuil

**CASTILLON P., 1993** : Exigence des cultures en phosphore et potassium : des inégalités criantes. Perspectives Agricoles, Juin

**COLLIN D., VILLEMEN P., KOLLER R., 1991** : Variabilité régionale et interrégionale des caractéristiques analytiques concernant le potassium. Dossiers Agronomiques d'Aspach le Bas, n°4. Centre de Recherches SCPA, F 68700 Aspach le Bas

**COMIFER, 1993a** : Glossaire de la fertilisation N, P, K (à paraître novembre)

**COMIFER, 1993b** : Aide au diagnostic et à la prescription de la fertilisation phosphatée et potassique des grandes cultures (à paraître novembre)

**CRONENBERGER J.L., VILLEMEN P., COLLIN D., 1992** : Un logi-

ciel d'aide au choix des engrais. Dossiers Agronomiques d'Aspach le Bas, n°5. Centre de Recherches SCPA, F 68700 Aspach le Bas

**DAKLIA N., 1991** : Libération-fixation du potassium dans les sols cultivés du Nord de la France. Thèse Docteur de l'Université Paris VI. Spécialité Pédologie

**FARDEAU J.C., 1993** : Le phosphore assimilable des sols : sa représentation par un modèle fonctionnel à plusieurs compartiments. Agronomie (sous presse)

**LAURENT F., COLOMB B., PLET P., 1993** : Analyses de terre : questions nouvelles, nouvelles normes. Perspectives Agricoles, Juin

**QUEMENER J., 1986** : Quelques facteurs importants du bilan du potassium. Dossiers Agronomiques d'Aspach le Bas, n°1. Centre de Recherches SCPA, F 68700 Aspach le Bas

**QUEMENER J., 1988** : Commentaires sur l'extraction du potassium des sols par le Tétraphénylborate de sodium. INRA, Phosphore et Potassium dans les relations sol-plante : conséquences sur la fertilisation

**QUEMENER J., BOSCH M., 1988** : Remarques sur la détermination du potassium échangeable. INRA, Phosphore et Potassium dans les relations sol-plante : conséquences sur la fertilisation

**SCHNEIDER A., 1993** : Mesure du pouvoir tampon des sols vis-à-vis du potassium (à paraître)

**SCPA, 1992** : La Dordogne vue à travers 6700 analyses de terre. Centre de Recherches SCPA, F 68700 Aspach le Bas

**SCPA, 1993** : Les sols du Cantal : exploitation d'une banque de données d'analyses de terre 1983-1990. Centre de Recherches SCPA, F 68700 Aspach le Bas

**VILLEMEN P., QUEMENER J., 1986** : Dynamique du potassium et fertilisation potassique en terres de craie :

dynamique du potassium. Dossiers Agronomiques d'Aspach le Bas, n°1. Centre de Recherches SCPA, F 68700 Aspach le Bas

**VILLEMEN P., 1987a** : Diagnostic de la fertilité phosphatée des sols. GE-MAS, Premières journées de l'analyse de terre, Blois

**VILLEMEN P., 1987b** : Translation of laboratory K-data into K fertiliser recommendations. Proceedings of the 20th coll. of the IIP, Baden bei Wien

**VILLEMEN P., 1988** : Quelques caractéristiques potassiques des rendzines grises de Champagne Charentaise. Dossiers Agronomiques d'Aspach le Bas, n°3. Centre de Recherches SCPA, F 68700 Aspach le Bas

**VILLEMEN P., FLORENTIN L., 1988** : Quelques caractéristiques potassiques des sols du Plateau Lorrain Sud. Dossiers Agronomiques d'Aspach le Bas, n°3. Centre de Recherches SCPA, F 68700 Aspach le Bas

**VILLEMEN P., QUEMENER J., 1988** : Dynamique du potassium et fertilisation potassique en terres de craie : fertilisation potassique. Dossiers Agronomiques d'Aspach le Bas, n°3. Centre de Recherches SCPA, F 68700 Aspach le Bas

**VILLEMEN P., BALLIF J.L., LEFEVRE F., 1990** : La fertilisation potassique en terres de craie. Centre de Recherches SCPA, F 68700 Aspach le Bas.

**VILLEMEN P., CALVET R., BOSCH M., 1993** : Actualisation du raisonnement de la fumure potassique en grande culture. (à paraître INRA)

**VILLEMEN P., COLLIN D., 1993** : Affectation automatique d'un échantillon de terre à une unité de sol de référence. (à paraître)

## Comment le facteur SOL peut être pris en compte dans une entreprise agricole. L'exemple des Domaines Royaux.

Ait Houssa A, Sqalli A.J, Soldini J <sup>(1)</sup>

### Résumé

Le terrain idéal dont rêve chaque producteur n'existe pas !! c'est à dire celui qui n'a aucun défaut à se faire reprocher et qui ne produit que ce qui est le plus demandé sur le marché, abondamment, et à moindres frais. Des sols érodés, aux sols caillouteux, aux sols salés, aux hydromorphes,... aux Dehs, aux Tirs, quand une entreprise de production est en face d'une telle variété de milieux aussi contrastés, elle doit forcément les coter à sa manière, en fonction de leurs qualités ou leurs défauts, afin d'en faire un usage adéquat. Aux Domaines Royaux, d'après leur gestion, les sols sont classés implicitement en 3 grands groupes selon leur productivité:

- groupe (1) des sols à défaut irrémédiable sans valeur agricole significative dans lequel figurent les sols érodés, les sols rocheux, certains sols trop salés, les sols des zones excessivement arides non irrigables....
- groupe (2) des sols à défaut direct ou indirect corrigible, productifs sous conditions figurent les sols des zones arides irrigables, certains sols hydromorphes, certains sols salés, les sols en mauvais état pathologique...Tels quels, leur productivité est sans intérêt, mais il suffit de leur assurer, selon le cas, l'irrigation, le drainage, le lessivage des sels, ou la désinfection qu'il faut, pour que cette productivité augmente et s'établisse à un niveau élevé.
- groupe (3) des sols sans contrainte particulière ni sur le plan topographique, ni sur le plan physico-chimique ou pathologique donnant de hautes productivités relatives. Il comprend les terres irriguées, les bonnes terres bien arrosées et certaines terres ayant fait l'objet d'un aménagement particulier comme l'hors-sol.

### Introduction

Expliquer au monde extérieur à notre entreprise comment le facteur SOL est pris en compte aux Domaines Royaux, revient à développer une approche de gestion pratique des terres qui n'a jamais fait l'objet de publication et que nous tentons donc pour la première fois d'écrire pour le public. Mais

promettre au lecteur que cet exposé sera exhaustif, sur un sujet aussi vaste que le SOL, dans une entreprise ou l'on retrouve l'importance de ce facteur à tous les niveaux de décision, serait commettre une faute envers lui. D'une part, comme on vient de le dire, le sujet n'a jamais été traité auparavant par notre équipe ; une équipe trop restreinte et souvent plus accaparée par les réalisations de terrain

que par les écrits scientifiques, et, d'autre part, nous n'avons été consultés que très peu de temps avant l'organisation de ce colloque. La démarche que nous vous présentons, notons-le d'emblée, sera donc forcément incomplète, grossière, voire même déplacée aux yeux de certaines catégories de lecteurs, comme ceux, trop chimistes, qui pouvaient attendre de nous, qu'on leur parlent, par exemple, de notre manière de traiter les sols à forte CEC ou à fort pouvoir fixateur vis à vis de la potasse ou du phosphore. Ce n'est pas l'objet de cette communication pratique, et ce n'est pas ce qui nous a été demandé de présenter en tant qu'entreprise de production.

Il n'y a pas de production agricole sans sol. Même dans les systèmes dits d'élevage hors-sol ou de production végétale hors-sol, ce dernier reste en fait indispensable à la production, ne serait-ce qu'en tant que plate forme pour la construction des ateliers comme en industrie : il faudrait bien disposer du sol (du terrain) pour pouvoir monter une étable pour abriter les animaux ou un projet de serres !! Dire qu'un élevage produit en hors-sol ne signifie nullement que celui-ci n'a pas besoin de sol pour produire, mais simplement que le lien juridique entre l'étable qui fait la production et le sol d'où proviennent les aliments a changé. Dans un éle-

1. Direction des Domaines Royaux-40 rue Ibn Tournert-Casablanca-Maroc.

vage classique, l'éleveur est à la fois propriétaire de l'étable et du sol où sont produits les fourrages, alors que dans le cas d'un élevage hors-sol, ce lien juridique devient purement commercial, puisque ce sont les fermes de personnes tierces ou un intermédiaire (une usine par exemple) qui fournissent les aliments à l'étable. Mais toujours est-il que les aliments pour l'élevage viennent bien d'un sol qui se situe quelque part !! Le même raisonnement s'applique, à peu de choses près, aux cultures hors-sol où le substrat provient de carrières qui, juridiquement parlant, n'ont rien à avoir avec les serres où se fait la production, si ce n'est le lien commercial vendeur-acheteur.

## II Que représente une terre aux yeux d'une entreprise privée de production ?

Avant d'aller plus loin, précisons tout d'abord que la notion de terrain est une notion beaucoup plus large que celle de sol ou de terre (Monnier, 1965 ; Marin-Lafèche, 1972). Cette précision étant apportée, dans la suite de l'exposé on utilisera indifféremment l'une ou l'autre de ces notions selon le besoin. Chaque terre a son nom pédologique ou vernaculaire, ses caractéristiques spécifiques, ses qualités et ses défauts qui sont liés à sa situation géographique, favorable ou non, sa topographie, ses propriétés physiques, chimiques, voire pathologiques. Mais pour un producteur, ce qui importe c'est le jugement d'ensemble (le plus souvent d'ordre économique), sur la productivité d'une terre ou plus exactement

sur sa rentabilité ramenée à l'investissement engagé : si, toutes choses égales, nous définissons la productivité aisément mobilisable du sol  $P_m$  (ou rentabilité plus exactement) comme étant la fraction de productivité (ou de rentabilité), que l'on peut tirer d'une terre avec un Investissement unitaire l'on peut alors proposer une échelle économique de classement des sols comme c'est indiqué sur la figure ci-dessous :

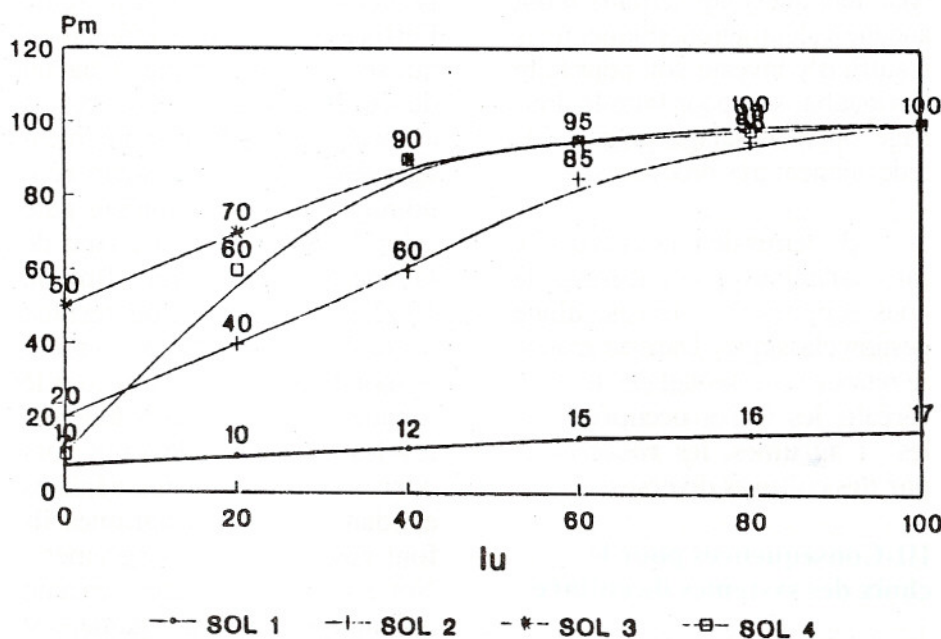
La figure montre que dans le sol (1), il ne sert à rien d'investir ;  $\forall I_u$  la valeur de  $P_m$  s'établit à un niveau faible et n'augmente presque pas, alors que les sols (2) et (3) répondent bien à l'investissement ; quand  $I_u \uparrow P_m \uparrow$  aussi avec, bien sûr, des pentes différentes traduisant la différence entre les 2 sols. Le sol (4) est un cas particulier de

situation où la productivité sans investissement  $P^0$  est très faible, mais il suffit d'y investir pour voir celle-ci augmenter de façon exponentielle et s'établir rapidement à un niveau élevé.

La figure que nous venons de présenter, n'a pas un but théorique, même si elle en donne l'impression à première vue ; elle reflète exactement la situation des terres que nous gérons aux Domaines Royaux à ce jour. Sans s'étaler sur le problème de leurs surfaces respectives, qui sont sans intérêt pour cet exposé, et que le lecteur pourra consulter par ailleurs [Al-Ard,1992], voici le genre de classement de première approximation que l'on peut réaliser avec ces terres :

1 - terres marginales de type (1) à contraintes irrémédiables soit techniquement, soit par

Figure 1. Relation entre investissement  $I_u$  & productivité  $P_m$  selon le type de sol.



suite des frais inabordables qu'elles demandent pour être (re) mises en valeur : sols rocheux, sols de pente fortement érodés, sols fortement salés, . . . On trouve ces sols aux Domaines Royaux, dans des régions comme Ouled Abbou, à Elouata, certaines parcelles du Gharb et à Dakhla. Donc, à l'inverse de ce que certains donnent l'impression de croire, lorsqu'ils font le procès des relatives productivités élevées obtenues dans les fermes Royales, nous nous gérons pas que des terres de qualité, mais aussi des terres parfois plus mauvaises que nos voisins du public ou privés.

2 - terres marginales de type (4) à contraintes corrigibles : dans ce groupe on peut ranger les sols des zones arides (ex Tadla), les sols de bonne qualité physique mais reposant sur une nappe d'eau proche de la surface qui en limite la productivité (ex Dehs de Merja du Gharb), les sols inondés, les sols salés mais perméables, tels quels ces terrains n'ont aucune valeur agronomique, mais il suffit d'y investir soit pour faire l'irrigation, soit pour faire le drainage ou le désalage pour qu'ils redeviennent très productifs.

3 - terres de types (2) et (3), sans contraintes particulières : là nous sommes dans le cas d'une gestion classique. Dans ce groupe se retrouve l'essentiel des terres à **céréale, les terres occupées par les agrumes, les rosacées et par des cultures diverses.**

### III-Conséquences pour le choix des systèmes de culture.

Le classement des sols

qu'on vient de présenter, en groupe non productif, productif sous conditions et productifs tout cours, soulève pour une entreprise de production la question de savoir quels systèmes de culture choisir pour chacun de ces groupes. Voici de façon un peu plus détaillée par rapport au classement schématique ci-dessus, comment la situation se présente en pratique sur le terrain:

D'une manière générale, les sols à haut potentiel de production sont affectés aux cultures dites à fort produit brut (ici agrumes, maraîchage, rosacées fruitières, céréales irriguées, . . .) et les sols marginaux aux cultures et aux activités récréatives ou marginales (ici chasse, parcours, eucalyptus, amandier ; céréales en extensif. . .).

Il ne faudrait pas accrédi-ter dans les esprits la confusion que ce choix date d'hier ou qu'il est spécifique à une entreprise particulière qui en a payé seule l'effort. C'est une affectation qui se fait d'elle même. Chacun de ces systèmes de culture est associé à son environnement agro-pédologique et socio-économique défini de longue date selon le principe bien connu de la vocation des terres [Breton, 1962]. Il s'agit là du résultat d'une évolution générale où tout le monde a travaillé pour tout le monde : dans les fiefs à céréales les Domaines Royaux font donc aussi surtout des céréales et (dans les fiefs à agrumes ils font aussi surtout les agrumes. Notre rôle " charnière " en tant qu'entreprise d'avant-garde, est surtout de nature technique ou

de type basculement variétal : introduction de nouveaux clones d'agrumes comme l'Ortaline ou réhabilitation d'anciens clones comme les Bekria I et II ou plus récemment le mandarinier d'Afourer, la Fortuna, la Nova, ou la Caffin. . . ; ou bien de nouvelles variétés de céréales en provenance d'ailleurs [Ait Houssa et al, 1992]. . . .

### IV-Conséquences pour les décisions d'investissement

A chaque investissement est toujours lié un certain risque  $R_w$ , plus ou moins important, qui peut être présenté sous forme (d'une fonction multidimensionnelle  $R_w = F(\text{sol, climat, possibilité d'irrigation, prix sur le marché, . . .})$ ). Considéré selon sa seule dimension qualité du sol les autres variables étant supposées constantes, il est évident que  $R_w$  va varier en sens inverse du classement des sols et des systèmes de culture ci-dessus. Le risque  $R_w$  est en effet :

- très grande ( $R_w \rightarrow R_{\max}$ ) lorsque, par erreur ou par accident, on a été amené à faire une fausse dépense, sur une terre marginale à faible productivité ;
- très minime ( $R_w \rightarrow R_{\min}$ ), au contraire, lorsque le choix est bien fait;

Bien sûr, les relations traditionnelles type de sol-système de culture et type de sol-risque  $R_w$  sur l'investissement énoncées, ci-dessus, cessent d'être valables dès lors qu'il existe un avantage foncier, un atout éco-

**Tableau 1 : Correspondance entre types de sol et systèmes de culture aux Domaines Royaux.**

Sols marginaux à contrainte physique, topographique. . . non corrigible (ex sol de pied de montagne, sol rocheux, sol en très forte pente, sol trop salé imperméable. . .)	→	Réserve de chasse, parcours, plantation d'eucalyptus, amandier, culture d'avoine, culture d'orge pour les chevaux, . . .
Sols marginaux à contrainte chimique ou hydrique (-ex sols salés avec possibilité de lessivage, sols inondés facile à assainir, . . .)	→	Cultures maraîchères sur butte, culture de riz, hors-sol.
Sols de qualité moyenne irrigables	→	Grandes cultures sous pivots, plantations d'agrumes
Sols de bonne ou de moyenne qualité non irrigables	→	Grandes cultures (céréales à paille, colza, fourrages, légumineuses. . .)
Sols de bonne qualité irrigués	→	Agrumes, rosacées fruitières, cultures maraîchères, grandes cultures.

nomique, climatique, technique, ou de position géographique par rapport au marché, ou bien une raison politique justifiant un aménagement particulier du terrain. Quelques expériences vécues aux Domaines Royaux méritent d'être évoquées ici :

- **l'atout de nature économique** : l'exemple de l'introduction du bananier à Skhirat. En 1980, la banane fut figurée par les Finances du Maroc parmi les fruits interdits d'importation. Nous avons alors été chargés de réaliser les premières expériences sous serre pour tenter de voir si l'on peut en assurer la production sur place. Pour pouvoir rester à proximité de la côte, nous avons été obligés

d'aménager des terres hydro-morphes (les seules disponibles chez nous) et de les équiper en serres : des terrains qui n'auraient jamais bénéficié de tels soins si la culture n'était pas rentable!!

- **l'atout de nature énergétique** : l'exemple du projet hors-sol de Douiet. En 1981 fut découverte une importante source d'eau chaude artésienne dans le Domaine de Douiet, à proximité de la ville historique de Fès. Nous avons alors profité de cette source d'énergie gratuite pour réaliser des productions de tomate de primeur dans une région continentale ; la première expérience de son genre au Maroc. Encore une

fois, le sol était des plus mauvais pour être directement mis en valeur : forte pente, salinité abondante, texture très lourde, et nappe perchée proche de la surface et créant des conditions d'hydromorphie permanente.

- **la raison politique** : être gestionnaire des Domaines Royaux n'est pas toujours un avantage en matière de gestion. Dès lors que la décision politique est prise, la marge de manoeuvre devient pratiquement nulle pour nous. Nous avons été parfois amenés à gérer des terres très difficiles pour lesquelles nous n'avions pas le choix et sur lesquelles on ne serait peut-être jamais allé (et en

tout cas pas les premiers), si on devait raisonner strictement économie et rentabilité. Fort heureusement que dans la plupart des cas, ces "aventures" ont été couronnées de véritables succès. Les exemples à ce propos ne manquent pas. Le dernier en date est le projet réalisé à Dakhla Dans cette province du Sahara, la population a émis son souhait de voir produire tout sur place, notamment en matière de légumes. Notre expérience dans la mise en valeur des déserts était nulle à l'époque et le nombre d'inconnues était très grand. La démarche habituelle, dite de contraintes hiérarchisées [ Ait Houssa et al, 1987 ], utilisée dans les agrumes s'avérait donc d'application malaisée dans ce projet. Outre les difficultés liées au vent, à l'hygrométrie, à la latitude, . . . nous avons découvert, entre autres, pour la première fois, qu'un sol très sableux pouvait être imperméable à l'eau et aux sels dans certaines conditions. Finalement, il a fallu appliquer une politique draconienne et d'extrême prudence afin de s'entourer d'un maximum de sécurité vis à vis des risques liés au sol dans cette région : étude de base sur le sol le climat, la réaction des cultures et du matériel au vent, à l'hygrométrie salée, . . . essais de prospection en petites parcelles, essais en vraie-grandeur, projet pilote et enfin seulement investissement pour la

production. Des cultures et des scénarios techniques considérés sur le plan théorique comme devant mieux marcher, ont été totalement abandonnés, alors que d'autres, écartés initialement, ont mieux réussi. Quatre années d'efforts soutenus et de tentatives tous azimuts étaient nécessaires pour parvenir à mettre en valeur ces sols difficiles. Et ce n'est pas encore fini !!

## V Relation types de sol-techniques culturales.

C'est l'entreprise de production qui constitue le vrai champ d'essais aux innovations et aux inventions techniques destinées à l'agriculture. Au niveau de la ferme, le choix de la panoplie de techniques à appliquer va varier selon le type de sol et de la connaissance que l'on a de son terrain (au sens large). Dans une grande entreprise, comme la notre, tous les domaines sont concernés : choix du matériel agricole pour équiper son exploitation, du matériel d'irrigation, des engrais, des produits phytosanitaires, . . . Examinons dans ce qui suit quelques exemples à titre de stricte illustration.

### *1-type de sol et choix des outils de préparation.*

C'est à ce premier niveau que commence le rôle du conseiller technique. Si le terrain est rocheux en profondeur ; il faut éviter les outils de type charrue à socs compte tenu des risques de casse. On leur préférera les outils à dis-

ques mieux adaptés. Dans certaines situations l'affinement du choix peut aller jusqu'au type de sécurité à prendre : mécanique ou hydraulique non-stop !! Si le terrain est limoneux battant, l'achat de rouleaux pour l'exploitation peut paraître superflû. Si le programme de culture comprend des plantations sur sols trop compacts, on pensera à l'achat de sous-soleurs ou de décompacteurs. Si le terrain est caillouteux, trop abrasif, il faudrait rechercher des outils avec des lames interchangeables et qui s'usent moins. . . . En sols situés dans des régions arides où l'économie de l'eau reste l'objectif fondamental de tout travail du sol on conseillera les outils à dents et non les charrues à disques comme cela se fait habituellement [ Ait Houssa et Ouknider, 1987]. En sols infestés de mauvaises herbes à rhizomes, il est déconseillé d'utiliser des outils à disques qui vont multiplier l'infestation Le type de sol permet également de définir la séquence outils à utiliser pour l'installation de la culture et d'éviter certaines façons culturales erronées :

- en sol battant, on adoptera des séquences du genre Charrue à disque + façons superficielles qui affinent moins la structure.
- en sol à forte activité structurale on est parfois amené à supprimer le labour pour plus longtemps, sans qu'il y ait la moindre incidence sur le rendement, c'est le cas de certains sols de Meknès [ Chekli, 1989 ].
- en sol destiné à des planta-

tions, un décomptage profond s'impose le plus souvent ; une opération similaire peut également s'avérer nécessaire en cas de sol peu perméable à l'eau en surface, ou en profondeur, ou bien présentant une semelle de labour infranchissable par les racines;

## ***2-type de sol et choix du mode de semis ou de plantation.***

Là aussi les exemples ne manquent pas :

- ex 1, sol en pente : réalisation des plantations suivant la ligne de plus grande pente de façon à limiter les risques d'érosion.
- ex 2, sol battant. avec les ris-

ques que ca pleuve : on fera les semis de préférence derrière les pluies. Si la possibilité d'irriguer existe, par exemple par le pivot, on fera tourner ce dernier jusqu'à ce que la levée soit terminée.

- ex 3, sol trop lourd et plantation d'agrumes : dilution des trous avec du fumier ou du sable pour assurer un bon démarrage des jeunes plants.
- ex 4, sol hydromorphe avec plantation de bananier ou de rosier déjà sur place : réalisation de sillons profonds pour éviter les stagnations d'eau.
- ex 5, sol peu profond et projet de betterave, d'agrumes, . . .

ou bien sol irrigué avec eau salée : réalisation de culture sur ados.

- ex 6, sol hydromorphe : sous solage-buttagé.
- ex 7, sol trop infesté de certaines mauvaises herbes non contrôlables chimiquement de façon sélective (ex brome) : réalisation du semis après retournement des levées de brome et non avant les pluies.

## ***3-type de sol et choix du système d'irrigation et de drainage.***

Certaines terres sont sans grande valeur agricole en l'absence d'irrigation (ou de drai-



nage) et acquièrent une grande valeur lorsqu'elles sont irriguées (ou drainées). C'est le cas des terres des zones à dominante aride pour le cas de l'irrigation ou l'introduction de cette dernière peut permettre de multiplier la productivité par 10, et des terres Dehs lourd de Marja du Gharb, de très bonne qualité physique, pour le cas du drainage, ou malheureusement, rien ne peut être produit tant que le drainage n'est pas assuré.

Si l'en est un facteur à gérer avec beaucoup de soins au Maroc, c'est bien l'eau d'irrigation ou l'eau tout court. En présence de sol à réserve utile limitée, la première réaction d'un agronome de terrain est d'irriguer à faible dose et plus fréquemment. Si en plus l'eau coûte très chère, comme dans le Souss, les techniques d'apport traditionnelles par gravité, doivent laisser la place à la micro-irrigation. Selon les caractéristiques du sol, le type de matériel sera également différent. En sol peu profond où l'on cherche à maintenir les racines des arbres proches de la surface pour les empêcher de descendre dans les couches calcaires, on prendra du micro jet, en particulier si l'eau n'est pas salée. Le même raisonnement s'applique également en sol de texture très légère ou il est impossible de former un " bulbe ", autrement que par ce système. Par contre le goutteur peut s'avérer plus intéressant pour l'économie de l'eau et en cas d'eau salinisante.

Les cas les plus compliqués sont ceux où l'on est en

présence à la fois d'un sol imperméable, une nappe proche de la surface, et une eau d'irrigation salée ; dans ce cas il faut essayer de combiner entre eux le drainage profond ou de surface (du moins), le buttage (ou la dilution par ensablage), un goutteur à débit adapté et un mode de raisonnement des apports désalinisant de type Leaching-Recurrent. [Bressine et Chertozky, 1951 ]

#### *4-type de sol et choix du système d'entretien*

La valeur agronomique d'une terre, ce n'est pas seulement son côté physique mais aussi son état pathologique. Certains sols à céréales, fortement infestés de mauvaises herbes non contrôlables chimiquement de façon sélective, comme le brome [ Psarski, 1989 ], nous posent d'énormes problèmes. La difficulté est à son maximum lorsque le système de production végétale est combiné à l'élevage et ne permet de faucher ni la jachère travaillée ni le désherbage total. C'est l'exemple des terres d'Ouled Abbou où la jachère est maintenue pour servir de pacage, ce qui augmente les risques d'infestation.

Dans d'autres terrains, comme à Elouata, nous avons été fortement surpris par la rapidité avec laquelle le rendement du blé sous pivot a dû chuter par suite d'une infestation par les nématodes du genre Hétérodéra ; un problème plutôt associé d'habitude au maraîchage : 75 qx/ha la première année, 65 la 2<sup>ème</sup> année et seulement 40 la troisième année.

Les fortes infestations par les taupins et par les maladies peuvent également fortement compromettre la valeur agronomique d'une terre au point de les rendre parfois inexploitable dans des conditions économiques raisonnables.

#### *5-type de sol et choix du mode de fertilisation.*

C'est sans doute dans le domaine de la fertilisation que la notion de type de sol a été la plus élucidée en agronomie. La nature pédologique de celui-ci intervient pour :

- fixer la procédure d'échantillonnage (nécessité d'un zonage ou non, période, profondeur, forme de l'outil, nombre de sondage, . . . ) ; [ Legros, 1978, Ait Houssa et Badraoui, 1992 ]
- choisir la liste de méthodes d'analyse à utiliser au laboratoire;
- choisir la nature des engrais, la l'époque et le mode d'application;

Un sol parfaitement homogène n'existe pas. Selon l'origine et le degré d'hétérogénéité probable d'un sol, on est amené à faire ou non un zonage de la parcelle, à prélever un nombre élevé ou non d'échantillons et à fixer une certaine profondeur de travail et prendre ou non en compte le sous-sol.

Le type de sol peut également influencer le raisonnement de la fertilisation et le choix des engrais à utiliser. Le TSP par

exemple convient mieux aux sols calcaires alors que l'hyper 32 ou le super normal seront réservés aux terrains plus acides. Lorsqu'on a affaire à des fortes teneurs en Caco 3 actif, il faut également faire attention aux oligo-éléments, en particulier au fer. En sols salés, il est déconseillé d'apporter du chlorure de potasse. Si la texture est très sableuse et si on est en présence d'irrigation par gravité surtout, il est important de penser à fractionner les engrais. Ce fractionnement peut intéresser parfois même le phosphate et la potasse. Si le sol dispose d'un fort pouvoir de minéralisation, la fumure azotée doit en tenir compte et revue à la baisse.

## *6-type de sol et choix du mode de récolte.*

Dans la nature, on peut rencontrer des terres extrêmement sensibles au piétinement et à la compaction. Des passages répétés d'engins lourds par temps humide ou pluvieux sont parfois très problématiques dans certaines zones d'agrumes comme le Gharb au moment de la récolte. La récolte peut aussi être problématique dans les terres à très grande pente où les moissonneuses batteuses classiques ne peuvent travailler. Sur le terrain, les solutions pour éviter d'arriver à un état structural

irréversible sont connues, mais elles sont malheureusement en contradiction avec les impératifs économiques. Des recommandations du genre " charger les engins à l'extérieur" ou encore " ne pas récolter par temps humide " ne sont pas toujours compatibles avec les contraintes du marché.

## **Conclusion.**

Bien qu'ils se sacrifient parfois, dans des opérations de solde économique négatif, qui sont normalement du ressort du Public : entretien de collections d'agrumes, essais variétés, investissement dans les zones à grand risque ou les autres se réservent d'investir. . . , les Domaines Royaux n'échappent pas totalement à la règle générale selon laquelle une entreprise privée de production doit rechercher un plus grand profit sur ses terres. Dans ce système, pour nous aussi la bonne terre est la terre qui a des points forts, rémunératrice avec un minimum de frais, et la mauvaise terre est la terre non rémunératrice qui demande beaucoup de frais pour finalement un résultat médiocre.

## **Bibliographie**

Revue Marocaine Al-Ard, 1992-numéro 10 : Spécial consacré aux Domaines Royaux

**Aït Houssa A, Badraoui M ; 1992-** Le prélèvement de sol pour l'analyse au laboratoire. Comment le réaliser en grande culture. A paraître.

**Aït Houssa A, Ouknider M ; 1990 -** Le profil cultural. Quel intérêt pour le raisonnement du travail du sol. Note technique -Direction des Domaines Royaux 40, rue Ibn Toumert-Casa.

**Aït Houssa A, Lekchiri A. ; 1987-** Théorie et pratique de la vulgarisation agricole. Premier colloque International sur la Vulgarisation rurale. ENA - Meknés (Maroc), 16,17 et 18 Juin.

**Aït Houssa A. , Sqalli, Taoura. 1992-C-R** Essais variétés de céréales-Direction des Domaines Royaux-40, rue Ibn Toumert-Casa.

**Bressine G, Cherotsky G-1951.** Note sur la relation entre la salure du sol, celle de l'eau d'arrosage et le régime des irrigations-70<sup>e</sup> congrès de l'Ass. Tr Av. Sc ; , fasc ; 14. Tunis.

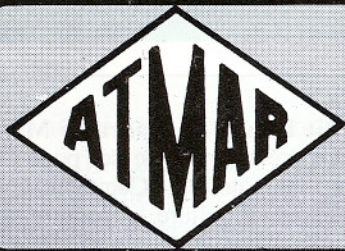
**Breton M. ; 1962-A** propos de l'expression : vocation naturelle. C. R Acad Agric. Fr. , 48, 812-817.

**Chekli H ,1989-**Exposé présenté au séminaire des Domaines Royaux sur le travail du sol. ENA Meknés.

**Legros J. P 1978-**Recherche et contrôle de la précision en cartographie pédologique. Précision dans la caractérisation des unités de sols Ann. Agron. 29 (6) 525-545.

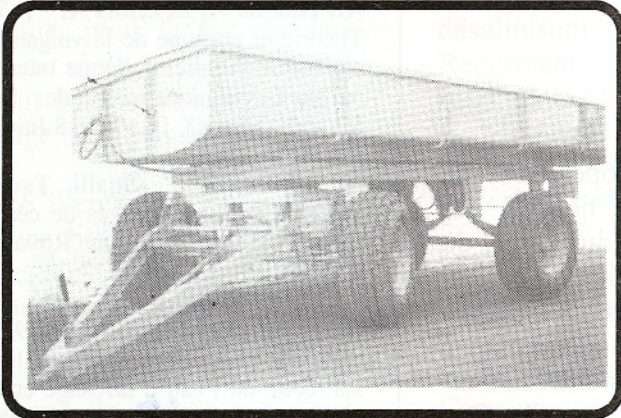
**Monnier G. , 1966-**Le concept de sol et son évaluation. Sci Sol (I), 89-111.

**Marin-Lafèche A. ,1972-**Les classements de terrains. Ann. Agron. 23 (I), S-30.

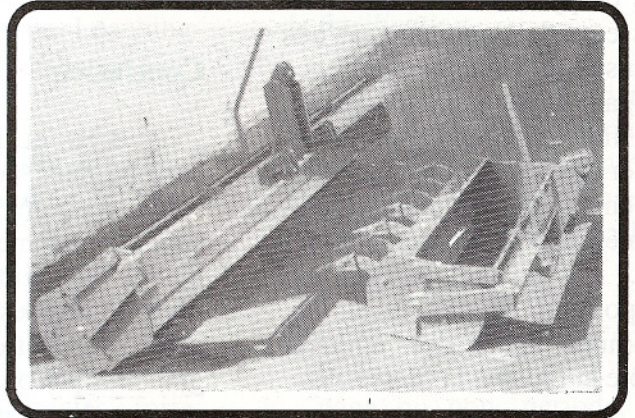


# المصانع المغربية LES ATELIERS MAROCAINS

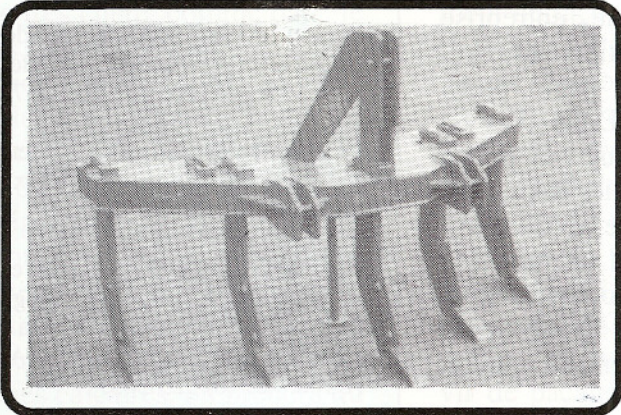
Produits nationaux, machines robustes, entretien rapide



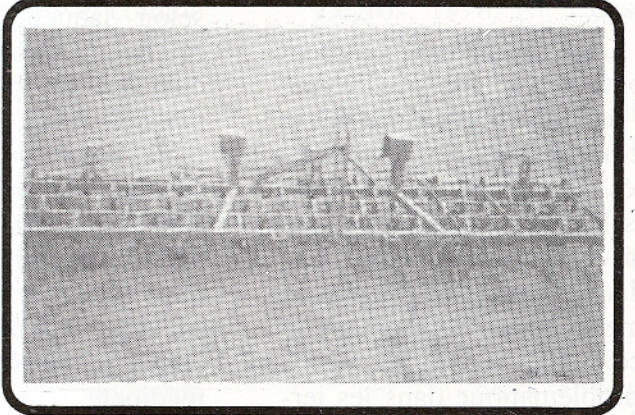
Remorque Hydraulique 8 tonnes



Pelle. Niveleuse Robuste 1,8 • 3,00 m



Sous soleur Porté 5 dents



Vibroculteur avec rouleau de 5 m de large

## Autres produits Leaders

- Cover Crop trainé et porté (disque 610 m) paliers fonte ou à roulements de 12 à 36 disques
- Stubble Plow trainé disque 710 mm paliers à roulements de 10 à 20 disques
- Chisel porté 5 à 9 dents
- Cultivateurs Canadiens de 7 à 21 dents
- Sous soleur porté ou trainé à 1 à 5 dents
- Remorques simples ou hydrauliques 3 à 10 Tonnes
- Citernes galvanisées sur roues 1000 à 5000 Litres
- Vibroculteurs avec rouleau 2,5 à 5 m

20, CHR II EL FADILA • QUARTIER INDUSTRIEL • RABAT  
TEL : 79 40 63 / 79 48 45 / 79 46 38 • TELEX : 31.627 M • FAX : 79 40 69 • BP : 31 RABAT

## CONNAISSANCE DES SOLS ET DEVELOPPEMENT : LE PROGRAMME FRANÇAIS "INVENTAIRE, GESTION ET CONSERVATION DES SOLS"

J.C. FAVROT<sup>(1)</sup>, D. ARROUAYS<sup>(2)</sup>, M. BORNAND<sup>(1)</sup>, M.C. GIRARD<sup>(3)</sup>, R. HARDY<sup>(4)</sup>

### Résumé

Pour maîtriser les problèmes de développement agricole et de protection des ressources naturelles, il est nécessaire de bien connaître, entre autres, la nature et la distribution des sols.

Le programme Inventaire, Gestion et Conservation des Sols de France, engagé en 1990, vise cette connaissance des sols, à deux niveaux d'actions complémentaires : la programmation régionale et la gestion parcellaire. Pour le niveau régional, la méthodologie est basée sur un découpage de la couverture pédologique en unités pédo-paysagères, ensembles organisés de sols délimitables à partir de critères lithologiques, géomorphologiques et d'occupation des sols. La connaissance des sols à l'échelon parcellaire est déduite de l'analyse détaillée d'aires échantillons - ou secteurs de référence - représentatives de petites régions naturelles pédologiques. La restitution des données, dans les deux cas, fait largement appel - après adaptation - aux nouveaux outils informatiques : bases de données, systèmes d'information géographique, systèmes experts. La mise en oeuvre de ce programme, aux plans financier et organisationnel, repose sur une politique de partenariat et de décentralisation.

### INTRODUCTION

En France, comme dans beaucoup d'autres pays, le Développement agricole doit prendre en compte l'émergence du concept d'agriculture "durable" et, corrélativement, la mise en oeuvre d'une politique plus volontariste en vue de la protection des ressources naturelles. Cette nécessité rend encore plus indispensable qu'avant l'acquisition de références scientifiques et techniques sur le milieu physique.

A cet égard, la connaissance de la nature et de la distribution des sols, à l'échelle nationale, constitue maintenant une priorité forte. Or, si depuis plusieurs décennies divers programmes de cartographie pédologique ont été entrepris (périmètres des Sociétés Régionales d'Aménagement, carte pédologique de France à 1/100.000, cartes des sols de l'Aisne à 1/5000 et de la Région Centre à 1/50.000, cartes départementales des terres agricoles, opération secteur de référence-drainage, etc...) (FAVROT, 1977; JAMAGNE et al, 1989), plus de la moitié du territoire français ne bénéficie pas encore d'un inventaire cartographique. En outre, les données existantes ne sont pas toujours facilement mobilisables et exploitables.

Face à ce constat, en 1990, l'Institut National de la Recherche Agronomique et le Ministère de l'Agriculture ont conçu et lancé conjointement le **programme Inventaire, Gestion et Conservation des Sols** (IGCS). Avec un échéancier de 7 ans, trois objectifs ont été notamment affichés (INRA - MAF, 1992; GIRARD, 1992; ARROUAYS et HARDY, 1993) :

- harmoniser et compléter l'inventaire des sols français,
- améliorer les connaissances sur leur organisation spatiale, leur fonctionnement, leurs aptitudes et contraintes;
- rendre ces informations accessibles et opérationnelles pour le plus grand nombre, grâce aux nouveaux outils informatiques.

Deux niveaux de décision, quant à l'utilisation de l'espace, ont été visés pour définir les échelles et modalités d'investigation :

- celui de la **programmation et de la planification régionale**, conduites par les décideurs politiques, administratifs et professionnels;
- celui de la **gestion parcellaire**, qui est le quotidien des agriculteurs, aidés pour cela par des conseillers et techniciens locaux.

(1) INRA - Science du Sol - Montpellier

(2) INRA - Science du Sol - Bordeaux

(3) Institut National Agronomique Paris-Grignon

(4) INRA Science du Sol - Orléans

Pour concrétiser ces divers objectifs, le programme IGCS a été articulé autour de trois volets complémentaires :

- le "**Référentiel Régional Pédologique**", qui repose sur la cartographie au 1/250.000 des pédo-paysages régionaux;
- les "**Secteurs de référence**", fondés sur la cartographie détaillée (échelle 1/10.000) d'aires échantillons représentatives de petites régions naturelles pédologiques;
- le "**Traitement numérique des données spatialisées**", conduisant à l'élaboration de banques de données pédologiques régionales.

En s'appuyant sur des exemples concrets, les objectifs, contenus et applications de ces trois domaines d'action vont être décrits, ainsi que le cadre institutionnel et organisationnel retenu.

## 1. Le Référentiel Régional Pédologique (R.R.P.)

### 1.1. Cadre général et objectifs.

L'entité territoriale concernée par un R.R.P. est la Région Programme dont la superficie varie de 1 à 4 millions d'ha. Toutefois, le R.R.P. peut être aussi conçu, dans une première phase, à l'échelle de départements (500 à 800.000 ha).

Le choix de l'échelle (1/250.000) retenue pour élaborer l'inventaire cartographique régional, résulte d'un compromis entre deux aspirations :

- acquérir une information suffisante sur la nature de la couverture pédologique, afin de pouvoir définir les aptitudes-contraintes et les risques (érosion, pollution...) inhérents aux sols et aux eaux en fonction de différents types d'usage des terres (intensification agricole, déprise, épandages,...);
- réaliser, dans des délais et à des coûts raisonnables, la couverture cartographique de l'ensemble des 22 régions-programmes françaises.

### 1.2. Concept de pédo-paysage et démarche cartographique.

Pour tenir compte, d'une part, d'une faible densité des sites d'acquisition des données sur le terrain (sondages à la tarière, fosses pédologiques), d'autre part des contraintes liées à la représentation graphique de la couverture pédologique (lisibilité des cartes), et enfin pour rendre compte du mode de distribution des sols dans le paysage, l'unité cartographique (U.C.) à la base du découpage régional est l'unité de pédo-paysage (ARROUAYS, 1989; ARROUAYS et HARDY, 1993; BORNAND et al, 1989).

Il s'agit d'un ensemble litho-géomorpho-pédologique cohérent, regroupant plusieurs unités typologiques de sols (UTS, au comportement homogène), distribuées dans l'espace selon un motif bien défini, dont on sait caractériser l'agencement et les composantes (fig. 1).

En pratique, les éléments de paysage (modelé topographi-

que, occupation des sols, lithologie) servent de guide au tracé des limites, puis le contenu de l'unité est caractérisé à partir des observations pédologiques. En d'autres termes, en association avec des prospections de terrain, le découpage des unités pédo-paysagères fait beaucoup appel à des documents tels que cartes géologiques (1/50.000, 1/80.000), cartes topographiques, images satellitaires. La démarche est itérative, la prospection cartographique permettant de corriger le découpage initial.

Lors de l'élaboration d'un R.R.P., deux situations sont généralement rencontrées : l'existence de zones bénéficiant déjà d'une cartographie des sols, à des échelles variant du 1/100.000 au 1/25.000, et la présence de territoires vierges de toute investigation pédologique.

Dans le premier cas, une véritable synthèse est à réaliser, ne se limitant pas à une simple réduction photographique des contours existants. Dans le second, la prospection de terrain doit permettre une caractérisation suffisante des unités typologiques de sols. Dans cet esprit, au regard de la qualité des interprétations futures autorisées par le document final (cartes thématiques), **trois niveaux (ou labels)** sont distingués en fonction de la densité des sites d'étude (profils pédologiques) :

- un niveau minimal (label bas) désigné par "reconnaissance régionale pédologique" lorsqu'il n'y a pas plus d'un site d'étude pour 8000 ha non encore cartographiés;

Pour concrétiser ces divers objectifs, le programme IGCS a été articulé autour de trois volets complémentaires :

- le "**Référentiel Régional Pédologique**", qui repose sur la cartographie au 1/250.000 des pédo-paysages régionaux;
- les "**Secteurs de référence**", fondés sur la cartographie détaillée (échelle 1/10.000) d'aires échantillons représentatives de petites régions naturelles pédologiques;
- le "**Traitement numérique des données spatialisées**", conduisant à l'élaboration de banques de données pédologiques régionales.

En s'appuyant sur des exemples concrets, les objectifs, contenus et applications de ces trois domaines d'action vont être décrits, ainsi que le cadre institutionnel et organisationnel retenu.

## 1. Le Référentiel Régional Pédologique (R.R.P.)

### 1.1. Cadre général et objectifs.

L'entité territoriale concernée par un R.R.P. est la Région Programme dont la superficie varie de 1 à 4 millions d'ha. Toutefois, le R.R.P. peut être aussi conçu, dans une première phase, à l'échelle de départements (500 à 800.000 ha).

Le choix de l'échelle (1/250.000) retenue pour élaborer l'inventaire cartographique régional, résulte d'un compromis entre deux aspirations :

- acquérir une information suffisante sur la nature de la couverture pédologique, afin de pouvoir définir les aptitudes-contraintes et les risques (érosion, pollution...) inhérents aux sols et aux eaux en fonction de différents types d'usage des terres (intensification agricole, déprise, épandages,...);
- réaliser, dans des délais et à des coûts raisonnables, la couverture cartographique de l'ensemble des 22 régions-programmes françaises.

### 1.2. Concept de pédo-paysage et démarche cartographique.

Pour tenir compte, d'une part, d'une faible densité des sites d'acquisition des données sur le terrain (sondages à la tarière, fosses pédologiques), d'autre part des contraintes liées à la représentation graphique de la couverture pédologique (lisibilité des cartes), et enfin pour rendre compte du mode de distribution des sols dans le paysage, l'unité cartographique (U.C.) à la base du découpage régional est l'unité de pédo-paysage (ARROUAYS, 1989; ARROUAYS et HARDY, 1993; BORNAND et al, 1989).

Il s'agit d'un ensemble litho-géomorpho-pédologique cohérent, regroupant plusieurs unités typologiques de sols (UTS, au comportement homogène), distribuées dans l'espace selon un motif bien défini, dont on sait caractériser l'agencement et les composantes (fig. 1).

En pratique, les éléments de paysage (modélé topographi-

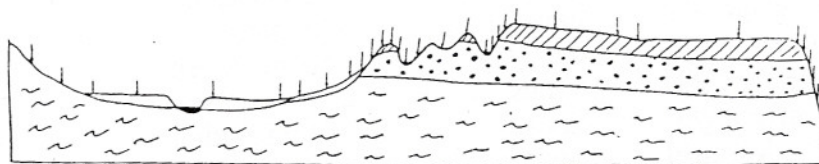
que, occupation des sols, lithologie) servent de guide au tracé des limites, puis le contenu de l'unité est caractérisé à partir des observations pédologiques. En d'autres termes, en association avec des prospections de terrain, le découpage des unités pédo-paysagères fait beaucoup appel à des documents tels que cartes géologiques (1/50.000, 1/80.000), cartes topographiques, images satellitaires. La démarche est itérative, la prospection cartographique permettant de corriger le découpage initial.

Lors de l'élaboration d'un R.R.P., deux situations sont généralement rencontrées : l'existence de zones bénéficiant déjà d'une cartographie des sols, à des échelles variant du 1/100.000 au 1/25.000, et la présence de territoires vierges de toute investigation pédologique.

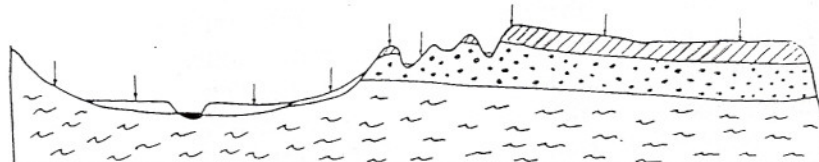
Dans le premier cas, une véritable synthèse est à réaliser, ne se limitant pas à une simple réduction photographique des contours existants. Dans le second, la prospection de terrain doit permettre une caractérisation suffisante des unités typologiques de sols. Dans cet esprit, au regard de la qualité des interprétations futures autorisées par le document final (cartes thématiques), **trois niveaux (ou labels)** sont distingués en fonction de la densité des sites d'étude (profils pédologiques) :

- un niveau minimal (label bas) désigné par "reconnaissance régionale pédologique" lorsqu'il n'y a pas plus d'un site d'étude pour 8000 ha non encore cartographiés;

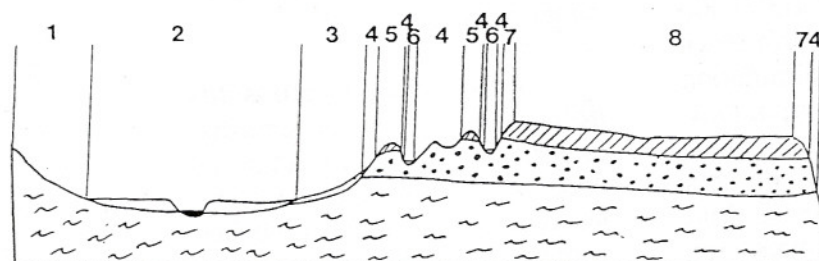
## emplacement des sondages



## emplacement des profils

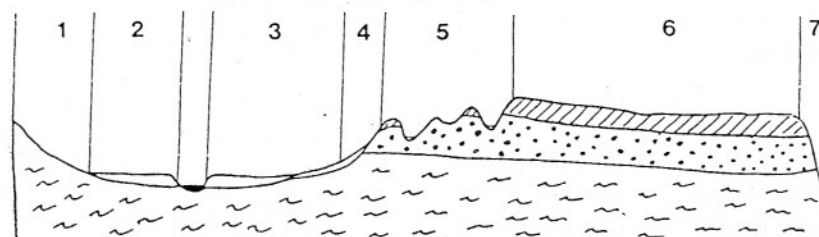


## unités typologiques de sols



- |  |   |
|--|---|
| 1 = sols argileux, calcaires, sur marne,   | 5 = sols limoneux lessivés hydromorphes |
| 2 = sols argileux alluviaux, hydromorphes, | 6 = sols colluv. limoneux hydromorphes  |
| 3 = sols colluviaux limoneux sur marne,    | 7 = sols limoneux lessivés érodés       |
| 4 = Sols graveleux d'alluvions anciennes,  | 8 = sols isohumifères de "touyas"       |

## unités cartographiques de sols



- |   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| 1 = Système des pentes fortes sur marne,                    | 5 = Système des collines érodées    |
| 2 = Vallée du Bas, alluvions de rive gauche,                | 6 = Plateau des terrasses anciennes |
| 3 = Vallée du Bas, colluvions/alluvions de rive droite      |                                     |
| 4 = Système des pentes moyennes des versants de rive droite |                                     |
| 7 = Système des pentes fortes exposées à l'ouest            |                                     |

**Figure 1** - Inventaire et répartition des sols dans le Tursan, petite région naturelle du département des Landes (France). Notions d'unités typologiques et d'unités cartographiques # unités pédopaysagères.

(d'après ARROUAYS et HARDY, 1993)

- un niveau moyen, dit "d'esquisse régionale pédologique" lorsqu'il y a un site pour 4000 ha environ;
- et un niveau supérieur, correspondant à la "carte régionale pédologique", lorsqu'il y a au moins un site d'étude pour 2000 ha.

A titre indicatif, pour la **réalisation du Référentiel Pédologique du Languedoc-Roussillon**, qui couvre 2.780.000 ha, il a fallu prospecter 1.480.000 ha (400 journées de terrain) et synthétiser les données existant sur 1.300.000 ha (220 études répertoriées). Cela a abouti à la délimitation de 370 unités cartographiques, réparties en 4.150 polygones. Au total, 2.450 profils de sols ont été décrits et saisis, dont 1.200 pour les territoires non prospectés initialement. Pour la même région, 82 petites régions naturelles pédologiques ont été définies en fonction du mode d'assemblage des unités pédopaysagères (BORNAND et al, 1993).

### 1.3. Exemples d'applications d'un R.R.P.

Plusieurs régions-programmes et départements français bénéficient maintenant d'un inventaire des unités pédopaysagères : Ile de France (ROQUE et HARDY, 1993), Languedoc-Roussillon (BORNAND et al, 1993), Côte d'or (CHRETIEN et al, 1993), Isère, (C.R.A. Rhône-Alpes), Landes (ARROUAYS et WILBERT, 1993), Loiret (ARROUAYS et al, 1989), Yonne (BAIZE, 1993) etc...

A partir de données tirées de ces référentiels, associées ou non à d'autres informations, il a été possible de répondre, en temps court, à diverses questions ayant trait à l'utilisation des sols. Pour cela, l'élaboration de **cartes thématiques** a tenu compte notamment de la proportion relative des différentes unités de sols au sein des unités pédopaysagères. Le raisonnement se fait alors soit en fonction des unités dominantes, soit à partir de l'ensemble d'entre elles. (en recourant à une fonction statistique de répartition de tel ou tel caractère du sol).

**Trois niveaux croissants de complexité** peuvent être distingués lors de la production de documents cartographiques orientés vers des problèmes d'aménagement et de développement.

Le plus simple correspond à une **extraction mono-facturielle**, permettant de visualiser la répartition spatiale de caractères importants pour la mise en valeur agricole : carte des textures dominantes, carte de profondeur des sols, etc...

Le second niveau comprend la **combinaison de plusieurs paramètres pédologiques**. C'est le cas, par exemple, de la représentation spatiale de la réserve utile (théorique) en eau des sols. Celle-ci est obtenue en combinant profondeur utile, densité apparente, teneur en eau à la capacité de rétention et au point de flétrissement. Ce document permet de déduire - de manière approchée - la répartition spatiale des risques de sécheresse d'une cultures d'été en

fonction d'une année climatique moyenne ou particulière. L'interprétation des caractéristiques hydriques des sols peut aussi se traduire par une carte de sensibilités de transferts verticaux ou latéraux de solutés (polluants) dans les différentes unités pédopaysagères régionales.

**Le croisement de données d'origines différentes** peut enfin être obtenu, à partir du référentiel. Premier exemple, en Languedoc (BORNAND et al, 1993), un zonage des possibilités d'épandage de composts urbains a pu être réalisé (LEGROS et al, 1991). Il est le fruit de la combinaison de quatre groupes de critères : pédologiques (profondeur, perméabilité), topographiques (pentes), occupation du sol (garrigues, vignes, céréales,...) et économiques (coût du transport, lié à la distance des terres à l'atelier de production des composts). Dans la même région, une carte des possibilités de diversification des cultures après arrachage de la vigne a pu être aussi élaborée. Plusieurs couches d'information ont été croisées, elles concernent les sols, le climat (adaptabilité des cultures envisagées aux exigences pédo-climatiques), me foncier (parcellaire), l'hydraulique (proximité des ressources en eau d'irrigation), le contexte socio-économique (technicité et succession des exploitants), l'occupation des sols (vignobles d'appellation contrôlée ou non), etc... (BORNAND et al, 1989). Dans une autres région, en Loiret, un zonage de l'aptitude des sols à la production de taillis à courte rotation (peupliers, sequoïas) a pu être

effectué avec la participation d'un expert forestier (ARROUAYS et BOUVAREL, 1990). Dernier exemple, un zonage de la sensibilité à l'érosion des sols de la région Nord - Pas de Calais, a été obtenu en croisant des données relatives à la texture des sols (RRP), à l'occupation des sols (télé-détection, statistiques agricoles communales), et à la délimitation de bassins versants de différents types (Modèles numériques de terrains) (KING et al, 1991 et 1992).

## 2. Secteurs de référence et gestion parcellaire des sols.

### 2.1. Objectifs et principe de la démarche.

A l'échelle de l'agriculteur et de son exploitation, l'objectif de développement agricole est d'apporter notamment une aide concrète pour la gestion rationnelle des sols. Cela implique la formulation de recommandations opérationnelles pour un choix raisonné d'itinéraires techniques et d'aménagements fonciers, ceux-ci devant être bien adaptés au contexte édaphique des parcelles exploitées. Il s'agit en effet de permettre une amélioration de la productivité, sans entraîner - par érosion, pollution, comptage... - une perte de fertilité physique ou chimique du sol. Le maintien, pour le futur, de l'intégrité des fonctions de la couverture pédologique (production agricole, pouvoir épurateur, aires de loisir,...) doit subsister également lors d'autres usages des sols : gel temporaire ou déprise définitive des terres, élimination de dé-

chets et d'effluents par épandage, gestion des reboisements, etc... Cet objectif générale nécessite deux types d'interventions :

1 - L'acquisition de données précises sur la **nature et la distribution des sols** de l'exploitation agricole ; l'unité cartographique de base est alors la série de sols, unité homogène au plan de la nature et de la succession des horizons dans le solum et donc aux plans hydrique et agronomique;

2 - la recherche de **références agronomiques et / ou technologiques** garantissant la bonne interprétation de ces données pédologiques en termes de recommandations ou de conseils concrets et fiables. On entend ici par "références" des connaissances opérationnelles - obtenues selon un protocole et dans un cadre agro-pédo-climatique bien définis - traduisant par exemple l'efficacité et la pérennité de telle technique culturale ou de tel type d'aménagement sur le cycle végétal et la productivité de telle culture, implantée dans tel milieu donné.

Le premier volet implique le recours à des critères et à des méthodes d'investigation qui soient adaptés aux finalités visées (choix d'un système de culture, fertilisation, irrigation, drainage, épandage,...). En France, très peu de régions bénéficient déjà de manière systématique de tels inventaires cartographiques détaillés, et, le plus souvent, la cartographie parcellaire des sols sera à réaliser.

Le second volet représente la collecte de références opérationnelles, calées sur la réalité régionale. Compte-tenu de la multiplicité des thèmes concernés par la gestion des sols, et de la diversité des sources d'informations (organismes professionnels agricoles, instituts techniques, structures d'enseignement et de recherche, etc...) cette deuxième phase représente aussi une opération longue et coûteuse lorsqu'il n'existe pas de référentiel régional pré-établi.

Face à cette double nécessité - dans un contexte de coût et de délais raisonnables une stratégie d'étude des sols à grande échelle a été proposée : **la méthode des secteurs de référence** (FAVROT, 1981 ; FAVROT et al, 1981). D'abord conçue pour la conduite des études préalables au drainage (Fig. 2) (HERVE et URBANO, 1984 ; LAGACHERIE, 1987), elle est maintenant appliquée aussi à d'autres objectifs dans le cadre du programme national Inventaire, Gestion et Conservation des Sols (INRA-MAF, 1992).

En vue d'une connaissance des sols au niveau parcellaire, l'idée centrale de la méthode est d'établir d'abord, pour un territoire bien identifié et à partir de la cartographie détaillée d'une aire échantillon, **un modèle d'organisation spatiale des sols** représentant la structure et le fonctionnement de la couverture pédologique de cet espace. L'entité territoriale retenue est la **petite région naturelle (pédologique)**. Celle-ci correspond à un système lithostratigraphique unique, présente

## MODELISATION DU MOUVEMENT DES SELS DANS LES SOLS DU MAROC

H. Laudelout - C. Chiang<sup>(1)</sup>

L'année 1993 marqua le vingt-cinquième anniversaire du début du second cycle de formation des ingénieurs agronomes à l'Institut National Agronomique et Vétérinaire Hassan II à Rabat.

Parallèlement à l'enseignement et aux travaux pratiques à ce niveau, se mettaient en place les structures du troisième cycle destiné à accueillir les élèves plusieurs années plus tard.

Il était nécessaire qu'au moment où les 3<sup>èmes</sup> cycles s'effectueraient à Rabat, des programmes de recherche soient déjà en cours dans les divers départements.

Ces programmes devaient répondre à plusieurs conditions dont la première était incontestablement leur utilité au point de vue du développement de l'agriculture marocaine et la seconde leur valeur formative pour développer la réflexion sur un sujet de grande importance pratique.

Cette note n'est pas destinée à analyser les aspects purement historiques du développement de la recherche sur le mouvement des sels dans les sols à l'Institut mais surtout à retracer le cheminement de la réflexion d'un groupe de chercheurs.

Tout d'abord, qu'est-ce qui a motivé le choix de ce sujet

comme l'un des programmes de recherche du Département des Sciences du Sol ? Il a semblé à cette époque que l'étude du mouvement des sels dans les sols irrigués répondait aux critères énoncés ci-dessus.

Bien sûr, on ne trouvait pas au Maroc des sols salés, "pédogénétiquement parlant" mais il y avait une superficie considérable de sols "salables" en raison d'erreurs de gestion, toujours possibles, dans l'utilisation des périmètres ou d'aléas climatiques. D'autre part, le succès de la culture céréalière en Afrique du Nord est conditionné partiellement par la pluviosité hivernale, trop faible, il n'y a pas de germination ; trop importante, les pluies peuvent entraîner les nitrates hors de la portée des racines de la plante cultivée.

Il était évident que les méthodes d'approche pour le calcul du mouvement des nitrates dans les sols étaient en principe très semblables à celles que l'on devait utiliser pour le déplacement des chlorures dans les sols salés.

On remettait ainsi à plus tard l'étude des processus qui se déroulaient lors du mouvement des sels dans les sols : échange ionique, solubilisation et précipitation dans le cas des sols salés, minéralisation et nitrification dans le cas du mouvement des nitrates.

Ces deux sujets furent donc choisis et on commença leur étude avec les moyens limités de l'époque et l'on peut dire aujourd'hui que les travaux sur ces deux aspects de l'agriculture marocaine se sont poursuivis sans interruption depuis lors.

Une première évaluation du problème a été celle de Mougenot (1972), de El Lioui, Van Bladel et Laudelout et de Laudelout (1973).

Le premier travail sur le mouvement des sels dans les sols des oasis du Sud Marocain est celui de Dupret, Mougenot et Chiang (1972). Les auteurs ont tenté d'estimer à partir d'un modèle extrêmement simple l'optimisation des techniques de dessalage des sols salés du Tafilalt en utilisant les expériences réalisées par Alain Ruellan (ORSTOM) au cours des années soixante.

Encore que le modèle utilisé par ces auteurs fût basé sur un raisonnement tout à fait erroné, sa formulation était correcte comme on le verra ci-dessous et il a permis de réaliser le but poursuivi.

Ce modèle avait été décrit quelques années auparavant par Bresler (Soil Sci. 104 :227, 1967) et le raisonnement qui est à sa base est le suivant :

On découpe le profil en un certain nombre de couches ficti-

1- Université Catholique de Louvain (UCL), Louvain-la-Neuve, Belgique.

ves d'épaisseur constante, chaque couche a une capacité de saturation en eau  $S$ , elle a d'autre part une capacité au champ  $F$ .

On considère qu'une couche qui était à la capacité au champ se remplit de la solution présente dans la couche supérieure jusqu'à saturation puis se vide dans la couche inférieure en retournant à la capacité au champ.

Soit l'indice  $i$  pour le niveau auquel se trouve la couche et l'indice  $j$  pour le temps qui correspond au nombre de volumes poreux qui ont traversé le profil, puisque l'écoulement se fait à vitesse constante. Si donc on avait dans la couche au niveau  $i$  au temps  $j-1$  une concentration  $C_{i,j-1}$ , après le passage de l'eau d'irrigation, la solution aura la valeur  $C_{i,j}$ .

Lorsque la couche au niveau  $i$  est remplie à saturation au temps  $j$  elle contient la quantité de sel  $SC_{i,j}$  ce qui est égal à la somme de ce qui s'y trouvait déjà au temps  $j-1$  soit  $FC_{i,j-1}$  plus ce que l'on y a introduit à partir de la couche supérieure au temps  $j$  soit  $(S-F)C_{i-1,j}$ , on a ainsi :

$$SC_{i,j} = F C_{i,j-1} + (S-F) C_{i-1,j}$$

et en divisant par  $S$  et en désignant par  $\lambda$  le rapport  $F/S$

$$C_{i,j} = \lambda C_{i,j-1} + (1-\lambda) C_{i-1,j}$$

La nature est ainsi faite que le rapport  $\lambda$  vaut environ 0.5 et l'on obtient ainsi

$$C_{i,j} = \frac{1}{2} (C_{i,j-1} + C_{i-1,j})$$

Comme nous le verrons ci dessous, le succès de cette formulation dont la base physique est pour le moins faible, sinon fallacieuse, tient à ce qu'elle reproduit très exactement une solution explicite de l'équation aux dérivées partielles qui décrit le mouvement convectif avec dispersion d'un soluté à travers le sol. (voir à ce sujet Laudelout, 1974).

C'est ce qui a permis aux auteurs cités ci dessus de modéliser avec succès les expériences de dessalage du Tafilalt, la fidélité de la représentation de la courbe expérimentale d'évolution de la salure dans le profil était suffisante pour utiliser le modèle pour simuler un très grand nombre d'expériences sur ordinateur et valoriser ainsi les expériences réalisées sur le terrain. On pouvait ainsi simuler ce qui se serait passé si l'on avait fractionné davantage l'apport total d'eau d'irrigation ou avait utilisé une eau de moindre qualité ou encore si l'on s'était fixé pour but un niveau donné de dessalage jusqu'à une profondeur donnée.

Parallèlement à ce travail, on s'était attaqué au problème du lessivage des nitrates des sols cultivés. En Afrique du Nord, on observe lors du retour des premières pluies, après un été qui a considérablement abaissé la teneur en eau du sol un 'flash' de fertilité résultant de l'effet de stérilisation partielle. Une étude des rendements en céréales de diverses régions du Maroc avait montré que les pluies excessives pouvaient le diminuer, par conséquent l'ap-

proche devait nécessairement consister à transformer la pluviosité hivernale en une profondeur de lixiviation des nitrates produits lors du retour des pluies. Si cette profondeur dépassait la vitesse de pénétration des racines en profondeur, on pouvait ainsi calculer l'utilité d'un apport d'azote au printemps. On trouvera l'illustration de cette méthode dans la publication de Chiang, Mougenot, Depret et Germain (1973).

On pouvait se demander quel pouvait être l'intérêt de se servir d'une formulation aussi simplifiée pour traiter le mouvement de solutés dans les sols.

La réponse est très simple : si l'on désire coupler le mouvement du soluté avec des réactions diverses il est nécessaire d'avoir une formulation aussi simple que possible de la solution de l'équation de diffusion avec convection.

Aussi simple que possible bien sur mais néanmoins suffisamment exacte. Pour s'en rendre compte il suffit d'écrire l'équation de diffusion sous forme adimensionnelle, elle ne contient plus alors qu'un seul paramètre le nombre de Péclet (par analogie avec la théorie de propagation de la chaleur). Ce nombre possède une gamme de valeurs limitée dans les sols : plus élevé dans les sols sablonneux, plus bas dans les sols argileux. Si l'on compare la solution numérique avec une solution analytique pour une gamme plausible de valeurs du nombre de Péclet, on voit que l'accord est largement suffisant. C'est en

fait ce nombre de Péclet qui détermine le nombre de couches fictives dans lesquelles le profil a été divisé. On peut évidemment choisir un nombre de couches ad hoc ou bien calculer le nombre de couches à partir du nombre de Péclet déterminé expérimentalement comme l'ont montré El Etreiby et Laudelout (1988).

On peut alors s'attaquer au problème du mouvement des sels avec échange ionique par exemple entre  $\text{Na}^+$  et  $\text{Ca}^{++}$ .

Ceci implique la solution d'un système de deux équations aux dérivées partielles, l'une pour Na l'autre pour Ca, la concentration de chacun de ces cations devant satisfaire à la relation d'échange ionique qui lie les proportions relatives de ces deux cations dans la solution du sol et à la surface des colloïdes.

C'est ce qui a été fait par François MOUGENOT dans sa très belle thèse soutenue en 1975. L'accord qu'il avait obtenu entre les calculs effectués par le modèle et des expériences de laboratoire sur la sélectivité d'échange Ca-Na et sur la chromatographie d'échange ionique était suffisamment encourageants pour que l'on envisage de passer à l'application sur des sols de périmètres irrigués.

Pour y arriver, il avait utilisé un sous-modèle original pour la simulation des réactions d'échange ionique, lequel était appelé par le programme de calcul principal décrivant la mouvement de la solution mixte Na-Ca à travers la colonne de sol, laquelle

était rééquilibrée à chaque passage à travers une couche.

Ce programme fut complété par une sous-routine de solubilisation du gypse empruntée à Tanji et al. (Hilgardia 38 : 319 348, 1967).

Le modèle complet fut ainsi utilisé pour le calcul de l'effet du sodium contenu dans l'eau d'irrigation sur des monolithes prélevés à la ferme d'application de l'Institut dans la plaine du Tadla (Gallez, Stitou et Dufey, 1981) et dans la plaine de la Haute Medjerda en Tunisie (Chattaoui, Dufey et Laudelout, 1977).

Ce modèle dont on trouvera la description, complète dans le "Manuel de Simulation des processus pédologiques dans les sols maghrébins" de Laudelout, Cheverry et Calvet (1993) est certainement susceptible d'amélioration mais il nous semble préférable de confronter ses prévisions avec un plus grand nombre de situations concrètes que ce qui a été fait jusqu'à présent.

Le problème du mouvement des nitrates dans les sols et de leur production a déjà été évoqué au début de cet exposé. Il est évidemment beaucoup plus difficile d'incorporer dans

MANUELS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

## MODÉLISATION MATHÉMATIQUE DES PROCESSUS PÉDOLOGIQUES

**H. LAUDELOUT, C. CHEVERRY & R. CALVET**

avec la collaboration de

**Chantal GASCUEL-ODOUX, P. BOIVIN & C. WALTER**



le modèle simple décrivant le mouvement des nitrates, des sous-modèles sur les cinétiques de minéralisation de la matière organique et de nitrification de l'azote ammoniacal.

Les travaux à ce sujet n'ont pas manqué et en bonne logique, ont d'abord tenté de jeter les bases d'une connaissance plus détaillée et plus quantitative des réactions de minéralisation et de nitrification dans les sols marocains de façon à mettre au point des sous modèles adéquats et reposant sur des bases expérimentales solides. Les premiers travaux dans cette direction sont ceux de Stitou, Goblet et Chiang (1979).

L'attaque de la cinétique des processus et surtout de la modulation de l'activité biologique du sol et de ses conséquences avec la profondeur a été faite par Brahim Soudi dans sa très belle thèse (1989) et les publications qui en ont été tirées (Soudi et al. 1990, 1992).

Il reste à faire l'intégration (au sens intellectuel et mathématique du mot) de l'ensemble des relations trouvées dans un modèle qui permettrait de prévoir en fonction du climat hivernal la nécessité d'une fumure azotée au printemps. C'est là sans aucun doute l'un des aspects les plus utiles de cette recherche.

Très certainement, les chercheurs marocains devront se préoccuper, rançon du progrès, de l'adsorption et du mouvement des pesticides dans les sols et de la pollution des aquifères par les nitrates et les rési-

dus des industries agricoles.

Leur expérience en la matière laisse présager qu'ils y arriveront sans difficulté majeure et pourront ainsi aider à concilier le respect de l'environnement et les exigences du développement.

## BIBLIOGRAPHIE

**Chattaoui T., Dufey J. & Laudelout H. (1977)** Simulation physique et mathématique du mouvement des sels dans les sols de la haute vallée de la Medjerdah (Tunisie). Sols de Tunisie (9 : 108 147).

**Chiang C., Sinnaeve J. & Dubuisson G. (1972)** Ecologie microbienne des sols du Maroc. I. Fluctuations saisonnières. Ann. Inst. Pasteur 122 : 1171 1182.

**Chiang C., Soudi B. & Moreno A. (1983)** Soil nitrogen mineralization and nitrification under Moroccan conditions. Proc 17th Coll. I.P.I. : 129 140.

**Chiang C., Belhaj Md. Zerhouni A. (1974)** Peut on prévoir le salage des terres par irrigation ? Hommes, Terre et Eaux, N°11, 2 ème trimestre.

**Chiang C., Mougnot F., Dupret F. & Germain L. (1973)** Ecologie microbienne des sols du Maroc. II. Simulation digitale de la migration hivernale des nitrates. Ann. Agron. 24 : 679 688.

**Dupret F., Mougnot F. & Chiang C. (1972)** Optimisation du dessalage par eau saumâtre des sols du Tafilat. Hommes, Terre et Eau, 3 : 68 90.

**El Etreiby F. (1986)** Movement of salt and nitrate through soils. Thèse de doctorat en Sc. Agronomiques. Louvain la Neuve.

**El Etreiby F. & Laudelout H. (1988)** Movement of nitrate through a loess soil. Journal of Hydrology : 213 224.

**El Lioui Md, Van Bladel R. & Laudelout H. (1971)** Etude de l'effet de quelques eaux d'irrigation en sol calcaire. Hommes, Terre et Eaux, 1 : 45 52.

**Gallez A., Stitou M. & Dufey J. (1981)** Dessalage et désodification d'un sol marocain irrigué. Agronomie 1(4) : 265 272.

**Germain L.** Etude de deux mécanismes de perte d'azote dans les sols. Thèse de Doctorat. Louvain la Neuve. 1975.

**Goblet Y. (1981)** Transformation de l'azote dans les sols marocains : Minéralisation et nitrification. Thèse de doctorat en Sc. Agronomiques (Louvain la Neuve).

**Laudelout H., Germain L., Chaballier P.F. & Chiang C. (1977)** Computer simulation of loss of fertilizer nitrogen through chemical decomposition of nitrite. J. Soil Science, 28 : 329 339.

**Laudelout H. (1973)** La modélisation des processus pédologiques de drainage et d'irrigation. Hommes, Terre et Eaux, 7 : 129 133.

**Laudelout H. (1974)** Modelling of salt movement in soils. In "Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies". I.A.E.A. Vienne : 153 157.

**Laudelout H., Dufey J.E. & Sheta T.H. (1979)** Ionic equilibria in semi arid soils. Proc. 14th Coll. I.P.I. : 135 150.

**Laudelout H., Cheverry C. & Calvet R. (1993)** Simulation des processus pédologiques dans les sols maghrébins. 280 pp.

**Mougnot F. (1975)** Introduction à la modélisation du mouvement des sels et de l'alcalinisation des sols. Thèse de doctorat en Sc. Agronomiques.

**Mougnot F. (1972)** L'eau et le sel dans l'agriculture marocaine. Hommes, Terre et Eaux, 3 : 51 61.

**Soudi B., Sbai A. & Chiang C. (1990)** Nitrogen mineralization in semi

arid soils of Morocco : Rate constant variation with depth. Soil Sci. Soc. America J., 54 : 756 761.

**Soudi B. (1989)** Etude de la dynamique de l'azote dans les 801s marocains : caractérisation et pouvoir minéralisateur. Thèse de Doctorat . Rabat et Louvain la Neuve. 1989

**Soudi B., Chiang C., Hachouma S.A. et A. Sbai. (1992).** Characterization and distribution of nitrogen in selected

soils of Morocco. In " J. Ryan and A. Matar (Eds) Proceedings of the Fourth Regional workshop on fertilizers use efficiency in rain fed agriculture in West Asia and North Africa. ICARDA Publications 159168.

**Soudi B , Chiang C., Hachouma S.A. et A. Sbai. (1992).** Evaluation de la valeur fertilisante azotée des fumiers de ferme et des composts industriels. Actes de

l'InstitutAgron.etVétér.12 (3)515

**Soudi B., Chiang N. et Zrouali M. (1990)** Variations saisonnières de l'azote minéral et effet combiné de la température et de l'humidité du sol sur la minéralisation. Actes de l'Institut Agron. et Vétér. 10 :29 38.

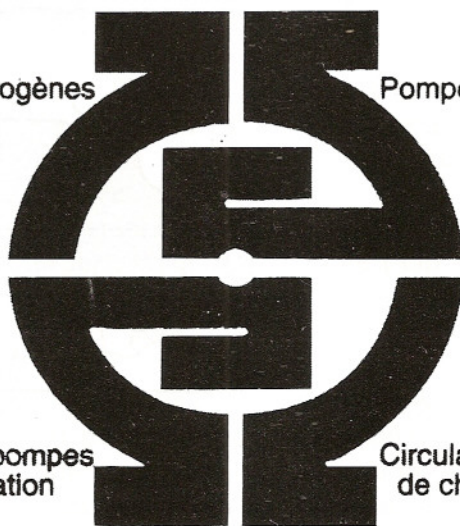
**Stitou M., Goblet Y. & Chiang C. (1979)** Nitrification in sandy soils of the Massa plain in Morocco. Proc. 14th Coll. I.P.I. : 165172.

# SEHI

**Société pour l'Équipement Hydraulique et Industriel**

Groupes Electrogènes

Pompes de surpression



Circulateurs et pompes pour climatisation

Circulateurs et pompes de chauffage central

1975-1985

# 20

1985-1995

# ans

Siège : 47, Rue Planquette Belvédère Code Postal 20.300 - Tél. : 24.46.59 / 24.52.59 / 24.29.81 / 24.29.82

Fax. : 40.90.54 - Casa 05 - Téléc. : 25028 M - R.C : 33567

## Présentation du projet STRING

Paul J.M. Mulder (1)

### Préambule

Cette présentation décrit le projet STRING, ses objectifs et résultats ainsi que sa position dans le programme de l'OSS. La figure ci-après montre la première page d'un dépliant sur STRING. L'acronyme STRING veut dire (en anglais) "Soil and Terrain Resources Information Network Generation". La phase en cours est la première phase qui durera un an, jusqu'au 1er septembre 1993.

STRING est exécuté par l'ISRIC (International Soil Reference and Information Centre ou, en français, Centre International de Référence et d'Information Pédologique). C'est un projet mis en place à la demande de l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS).

### L'Observatoire du Sahara et du Sahel. OSS

L'OSS avait un statut provisoire depuis 1991. La conférence inaugurale ayant eu lieu à Paris en mai 1992 a donné naissance à son statut actuel : l'Association Internationale de l'Observatoire du Sahara et du Sahel.

Sa mission est d'être un outil de liaison et un cadre international de partenariat et de concertation afin de donner un nouvel élan à la lutte contre la sécheresse et la désertification en complétant et en renforçant

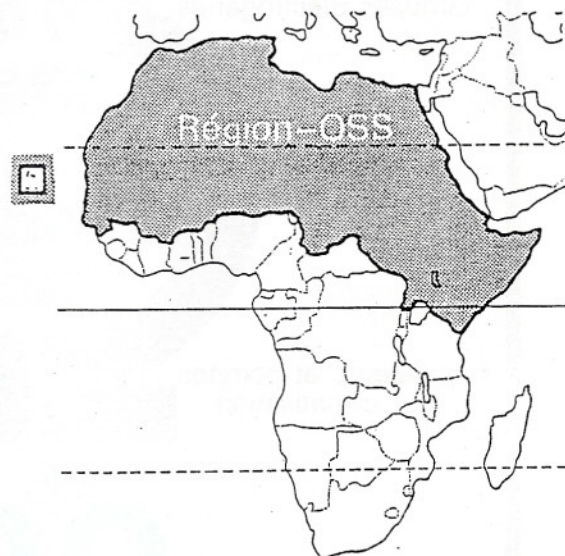
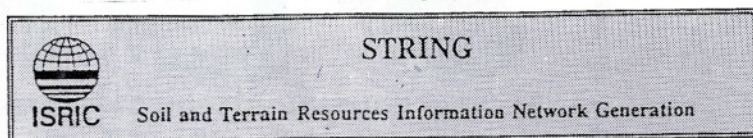
les activités existantes en Afrique du Nord, de l'Est et de l'Ouest.

### Les partenaires sont :

- les vingt pays africains qui couvrent ou bordent le Sahara et le Sahel : l'Algérie, le Burkina Faso, le Cap-Vert, le Tchad, Djibouti, l'Égypte, l'Éthiopie, la Gambie, le Ke-

nya, la Libye, le Mali, la Mauritanie, le Maroc, le Niger, le Sénégal, la Somalie, le Soudan., Tunisie et l'Ouganda,

- les sept pays du G7,
- les principales Organisations Internationales : UNESCO, FAO, PNUD, BNUS, Banque Mondiale, OMM, PNUE, CNUED, OCDE, CEE, FIDA, CIUS,



ISRIC



OSS

1- ISRIC / Coordinateur STRING

- Les principales Organisations Régionales : OUA, LEA, CILSS, IGAAD, UMA.

## *Les objectifs formulés lors de la conférence d'inauguration sont :*

- accroître les échanges et la synergie entre les Etats Africains et Organisations concernés pour consolider un véritable espace régional de coopération et favoriser une gestion durable des ressources naturelles dans les zones arides et semi-arides,
- renforcer les capacités africaines en matière de recherche-développement se rapportant à la sécheresse et à la désertification,
- promouvoir une approche intégrée "Observation, Recherche-Développement" permettant de définir ensemble des actions nouvelles et de favoriser la liaison entre les opérations existantes,
- dégager une vue globale et un diagnostic de la désertification devant conduire à établir et maintenir à jour un tableau de bord de la lutte contre ce phénomène,
- améliorer les actions de partenariat de développement qui restent de la compétence des Etats et des Organisations concernés.

## *Le Programme d'Activités 1993 se concentrera sur quatre domaines :*

- agir pour une meilleure maîtrise de l'information sur l'Environnement,
- agir pour le renforcement de la connaissance de base des

écosystèmes et de leur évolution,

- agir pour améliorer la compréhension par les acteurs locaux de la dynamique et de l'évolution des ressources naturelles, et contribuer à freiner le processus de dégradation par une gestion décentralisée des espaces ruraux arides ou semi-arides,
- agir pour une bonne diffusion de l'information et une bonne connaissance de l'O.S.S.

Les activités de STRING relèvent surtout du premier point de ce programme mais contribuent également au quatrième point.

## **Le projet STRING**

STRING s'engage à mettre au point un système documentaire informatisé sur les données cartographiques et bibliographiques de ressources sol et terre pour la région de l'Observatoire du Sahara et du Sahel.

L'objectif global du projet est de renforcer la communication entre les hommes politiques, les cadres responsables du développement et les scientifiques de cette région et de permettre une utilisation plus efficace de l'information cartographique et bibliographique existante sur les ressources sol et terre.

L'objectif d'une utilisation plus efficace de l'information explique le place du projet dans le programme de l'OSS pour 1993.

Afin d'atteindre cet objectif global, le projet s'est fixé comme objectif de projet : faire l'inventaire systématique de la documentation existante, cartographique et bibliographique, sur les ressources sol et terre, y compris les données institutionnelles des organisations régionales et nationales responsables de l'inventaire des ressources. Les deux derniers mots de l'acronyme anglais "Network Generation" réfèrent à la création d'un réseau d'information et se rapportent aux activités à plus long terme, au cours des phases suivantes.

## *Les résultats de la première phase, la phase actuelle, seront donc :*

- un classement systématique des données sur les ressources sol et terre de la région de l'OSS, sous forme d'un système informatique dynamique auquel un grand nombre d'utilisateurs pourront avoir accès ; il s'agit explicitement de rassembler des références, STRING ne cherche pas à rassembler les documents eux-mêmes.
- une base pour un réseau opérationnel d'institutions et de spécialistes,
- un rapport approfondi en anglais et en français sur l'inventaire des informations avec copies sur support papier de la base de données.

Les termes "sol" et "terre" devront être compris dans leur plus ample signification ; ils couvrent les thèmes :

- agro-climatologie et agro-

- écologie, y compris les aspects spécifiques dérivés des données climatologiques (par exemple érosivité des pluies),
- géomorphologie et physiographie,
  - genèse pédologique, morphologie du sol et aspects physico-chimiques et biologiques,
  - taxonomie et classification des sols,
  - occupation des terres, utilisation des terres et végétation naturelle si reliée aux sols,
  - fertilité, productivité, toxicité des sols, salinité, sodicité,
  - aptitudes ou potentialités des sols, évaluation des sols et des terres, planification des terres,
  - érosion et risque d'érosion,
  - pollution et autres types de dégradation que l'érosion et la salinisation,
  - aménagement, réhabilitation, restauration et protection des sols.

Afin de se limiter à un volume de travail qui soit maîtrisable dans le temps disponible pour la première phase, le projet s'est posé quelques restrictions en ce qui concerne le choix des données à inclure dans les bases de données bibliographiques et cartographiques. Les données cartographiques n'incluront que des cartes à petite échelle (égale ou inférieure à 1.100.000). Quant aux données bibliographiques, elles devront spécifier la partie concernée de la région OSS. Par exemple, un article traitant de la "Distribution des sols salés ou "salables" au Maroc" sera inclus, un livre général sur les "Problèmes de salinité" ne sera pas inclus. Toutefois, ces restrictions peuvent être an-

nulées et n'excluent pas des extensions du thème traité pendant les phases suivantes.

En tant que système d'information opérationnel, STRING pourra, aussi bien au niveau national qu'international,

- aider à signaler les lacunes dans l'information thématique et dans la couverture cartographique et aider à identifier les problèmes de compatibilité des données cartographiques entre les différents pays,
- faciliter les échanges d'information entre institutions de tous niveaux,
- renforcer la capacité institutionnelle par un transfert mutuel des connaissances,
- bénéficier directement aux agences de recherche agricole, de conservation des eaux et des sols, ainsi qu'aux agences impliquées dans la sauvegarde de la nature,
- fournir un service d'information pour la planification régionale et nationale.

A plus long terme, STRING pourrait devenir un outil très efficace pour contribuer à un rapprochement et à une harmonisation des efforts de sauvegarde de la nature et du maintien durable de la production alimentaire.

### Mise en oeuvre de la base de données de STRING

Les résultats du projet STRING devront être soumis à l'OSS qui, bien que certaines idées relatives à l'utilisation et à la gestion de la base de données aient été développées, n'a pas encore déterminé la manière de

sa mise en oeuvre (situation en avril 1993). Par conséquent, les recommandations suivantes ne reflètent que les idées de l'ISRIC.

Il est en tout cas recommandé par l'équipe du projet que la base de données

- soit installée aux différents niveaux, dont le niveau régional (ou sous-régional) et national semblent les plus appropriés pour la gestion et la préparation de versions adaptées ou plus élaborées,
- devienne accessible à tout intéressé, à un coût le plus bas possible (par exemple frais de photocopie),
- soit disponible gratuitement à tous ceux qui y ont contribué.

A cet égard, il est encore une fois stipulé que la base de données ne sera pas la propriété de l'ISRIC et que les informations ne sont pas rassemblées uniquement pour l'institution de l'OSS. L'OSS ainsi que le projet STRING sont d'avis que la totalité des informations devra être mise à la disposition des personnes et des institutions participantes de la région OSS. Toute l'information sera incluse dans une banque de données qui sera, à terme, gérée dans les pays de la région OSS.

### Technicité de la base de données

STRING utilise le logiciel CDS-ISIS qui a un certain nombre d'avantages. C'est un programme assez puissant, développé spécialement pour des

systèmes documentaires, et opérationnel sur micro-ordinateur. Les rubriques d'un article peuvent contenir jusqu'à 8000 caractères. L'échange des informations, en format ISO, avec d'autres programmes ne pose pas de problèmes majeurs. Bien que CDS-ISIS soit un programme difficile à apprendre, dès que les modules pour la saisie, la présentation sur l'écran et l'impression sont préparés, son utilisation est très facile. Des avantages spécifiques du programme sont, entre autre, le développement automatique d'un fichier comprenant une liste des termes utilisés, et la possibilité de changer la langue de travail au niveau du programme lui-même.

CDS-ISIS a été développé par l'UNESCO qui le distribue gratuitement. Dans la région de l'OSS, l'utilisation de CDS-ISIS est déjà assez répandue, surtout dans les centres de documentation.

Bien qu'un certain nombre d'éléments soient identiques pour la description des documents bibliographiques ou cartographiques, d'autres éléments sont spécifiques pour l'un ou l'autre. Les bordereaux de saisie des bases de données cartographique et bibliographique sont présentés dans les figures 1 et 2. Les règles d'enregistrement sont simples. Lors de l'enregistrement, des messages explicatifs (Help messages) relatifs à la

manière d'enregistrement apparaissent par rubrique au bas de l'écran.

En principe, l'interrogation de la base de données peut s'effectuer sur la base de chaque article voulu. Un certain nombre de descripteurs est inclus pour l'interrogation par thème ou par nom géographique. STRING utilise ses propres termes de catégorisation et réfère également aux codes correspondants du système utilisé par la FAO voir figure ci-après. Pour la base de données cartographiques, STRING utilise encore un autre terme d'interrogation essentiel : les coordonnées géographiques de la zone concernée. Etant une base de données sur la distribution des ressources sol et terre, son interrogation devra en premier lieu pouvoir donner une réponse sur la question : "Quelle information existe pour une certaine région, délimitée par telles et telles coordonnées?"

La base de données de STRING n'est pas qu'une nouvelle base de données. Elle est unique en son genre en étant la première base de données publique dans le domaine sol et terre, sur une région de cette étendue, et combinant l'information cartographique et bibliographique.

## Développement futur du STRING

Le développement futur de STRING pourra s'effectuer de deux manières. D'une part, la base de données de STRING pourrait fournir une base appropriée pour la créa-

### STRING - CODES DE CATEGORISATION FAO - STRING FRANCAIS

P40	CLIMA	Cartes "monothématiques" dérivées des cartes climatiques (par excmple érosivité des pluies)
	AGROC	Agro-climatologie/agro-écologie/agro-physiographie/agro-pedologie
	GEOMO	Géomorphologie/physiographie/paysages
	GENES	Genèse du sol
	MORPH	Morphologie du sol
P33	PHYCH	Propriétés physico-chimiques du sol (+ relations sols-air-eau)
P34	BIOLO	Biologie du sol
P32	TAXON	Taxonomie/classification du sol
P31	PEDOL	Types de sol, propriétés édaphiques, cartographies
F07	UTILI	Occupation des terres
F70	VEGET	Végétation naturelle par rapport aux types de sols
P35	FERTI	Fertilité/productivité/toxicité du sol (sauf salinité/salinisation du sol)
	EVALU	Aptitudes/évaluation des terres
	PLANI	Utilisation potentielle/planification de l'utilisation des terres
P36a	EROSI	Erosion des sols/pertes de sols/crodibilité/risques d'érosion
	POLLU	Pollution des sols
	SALIN	Salinité/sodicité/salinisation des sols
	DEGRA	Dégradation/détérioration (autres types)
P36b	AMELI	Gestion/aménagements des sols/mise en valeur/réhabilitation des terres
P36c	CONSE	Conservation/protection des sols
	BIBLI	Bibliographie/Liste de publications
P01	ENVIR	Environnement/Ecologie
P11	DRAIN	Drainage

tion d'un réseau d'information parmi les pays membres de l'OSS, le point régional ou sous-régional étant le noyau du réseau.

D'autre part, la base de données de STRING pourrait progressivement faire partie d'un système d'information intégré sur les ressources sol et terre ayant pour terme d'interrogation central les coordonnées géographiques de la zone ou du point concerné. L'interrogation devrait se concentrer sur la question, déjà mentionnée, de savoir quelle information est disponible pour une certaine région. Dans ce système, les références à l'information bibliographique et cartogra-

phique devraient être reliées avec les références à l'information ponctuelle, comme les descriptions des profils de sols ou les résultats des analyses physico-chimiques, ainsi qu'à l'information spatiale, comme celle des polygones stockés dans un Système d'Information Géographique SIG.

### L'importance de STRING pour les "points de discussion de la conférence"

En reprenant les six points centraux discutés au cours de la conférence, points qui doivent indiquer l'apport de la science du sol au développement, il peut être constaté que le projet STRING contribue surtout à

- une meilleure connaissance dans le domaine 'sol et terre',
- une meilleure organisation, archivage et gestion de cette connaissance,
- une plus grande accessibilité à cette connaissance au service d'autres disciplines scientifiques et donc une meilleure collaboration avec elles.

En se basant sur une amélioration de la connaissance, STRING pourrait jouer un rôle dans les thèmes inventaire - conservation - gestion des sols.

Au niveau de l'entreprise agricole, STRING n'a malheureusement que peu à offrir.

Figure 3 **STRING - BORDEREAU DE SAISIE DOCUMENTS CARTOGRAPHIQUES**

Date d'entrée: \_\_\_\_\_ Pays concernés (R): \_\_\_\_\_

**AUTEUR INDIVIDUEL**  
Auteur (R;ab): \_\_\_\_\_

Affiliation du premier auteur individuel  
Institut, Ville, Pays: \_\_\_\_\_

**AUTEUR INSTITUTIONNEL**  
Institut, Ville, Pays (R): \_\_\_\_\_

**TITRE**  
Titre original: \_\_\_\_\_  
Titre traduit: \_\_\_\_\_

Nom et n° de projet: \_\_\_\_\_  
Notice explicative: \_\_\_\_\_

ISBN de la notice explicative: \_\_\_\_\_

**DOCUMENT-MERE**  
Auteur(s) (R): \_\_\_\_\_  
Titre: \_\_\_\_\_

N° de chapitre, volet, partie, série: \_\_\_\_\_  
N° de feuille ou page: \_\_\_\_\_ ISBN: \_\_\_\_\_

**EDITION**  
Maison d'édition (Nom, Ville, Pays): \_\_\_\_\_

**DESCRIPTION**  
Année de publication: \_\_\_\_\_ Langue(s) (R): \_\_\_\_\_  
Echelle: 1: \_\_\_\_\_ Superficie: \_\_\_\_\_  
Dimensions: \_\_\_\_\_  
Présentation: \_\_\_\_\_  
Nombre de feuilles: \_\_\_\_\_  
Annotations: \_\_\_\_\_

**COORDONNEES**  
Latitude Nord: \_\_\_\_\_ Longitude Est: \_\_\_\_\_  
Latitude Sud: \_\_\_\_\_ Longitude Ouest: \_\_\_\_\_

**DESCRIPTEURS**  
Mots clés (R): \_\_\_\_\_  
Abréviations STRING (R): \_\_\_\_\_  
Code(s) FAO (R): \_\_\_\_\_  
Noms géographiques (R): \_\_\_\_\_  
Côte (disponibilité): \_\_\_\_\_

Figure 2 **STRING - BORDEREAU DE SAISIE DOCUMENTS BIBLIOGRAPHIQUES**

Date d'entrée: \_\_\_\_\_ Pays concernés (R): \_\_\_\_\_

**AUTEUR INDIVIDUEL**  
Auteur (R;ab): \_\_\_\_\_

**AFFILIATION DU PREMIER AUTEUR INDIVIDUEL**  
Institut, Ville, Pays: \_\_\_\_\_

**AUTEUR INSTITUTIONNEL**  
Institut, Ville, Pays (R): \_\_\_\_\_

**TITRE**  
Titre original: \_\_\_\_\_  
Titre traduit: \_\_\_\_\_

Nom et numéro de projet: \_\_\_\_\_  
Nom(s) des cartes incluses (R): \_\_\_\_\_

Type de document (R): \_\_\_\_\_

**DOCUMENT MERE (SOURCE)**  
Auteur (R, ab): \_\_\_\_\_

Titre ou nom: \_\_\_\_\_

Numéro: \_\_\_\_\_

**EDITION**  
Numéro d'édition: \_\_\_\_\_  
Maison d'édition: (Nom, Ville, Pays): \_\_\_\_\_

Année de public: \_\_\_\_\_ Langue (R) \_\_\_\_\_ Pagination: \_\_\_\_\_  
These: \_\_\_\_\_

ISBN/ISSN: \_\_\_\_\_ Numero de document: \_\_\_\_\_  
Annotations: \_\_\_\_\_

**DESCRIPTEURS**  
Mots clés (R): \_\_\_\_\_  
Thèmes (R): \_\_\_\_\_  
Codes FAO (R): \_\_\_\_\_  
Noms géographiques (R): \_\_\_\_\_  
Côte (disponibilité) (R): \_\_\_\_\_

## THE DYNAMICS OF SOIL QUALITY AS A MEASURE OF SUSTAINABLE MANAGEMENT

W. E. Larson and F. J. Pierce <sup>(1)</sup>

### ABSTRACT

Soil quality is the state of existence of a soil relative to a standard, or in terms of a degree of excellence. Soil quality is a critical component of sustainable agriculture. A soil management system is sustainable only when it maintains or improves soil quality. However, standards for soil quality and for the design and evaluation of management systems are needed to assess sustainability of management systems. In this paper, we define soil quality, *Q*, in terms of soil attributes, *q<sub>i</sub>*'s, and propose the use of a minimum data set (MDS) and pedo-transfer functions (PTF's) in conjunction with models and statistical quality control procedures to quantify *Q*. We favor the use of a dynamic assessment approach to evaluating soil quality in which a management system is assessed in terms of its actual performance rather than in comparison to other systems. The dynamics of soil quality is determined by measuring all parameters of quality MDS over time and assessing their pattern of variation expressed in control charts using statistical quality control (SQC) procedures. We also recognize the need to apply the SQC concepts of design and process control of inherently sustainable management systems to provide the manager the tools needed to achieve soil quality standards of sustainability.

### INTRODUCTION

The economic, social and environmental circumstances of the last few decades have compelled American agriculture to assess the sustainability of its land use and production systems. Different perspectives, however, have yielded varying ideas as to what constitutes a sustainable management system. For many, sustainable management means stability in production and profitability. For others, the intrinsic goal of sustainable management is to protect and enhance the natural resource base, both biotic and abiotic. For others, maintenance of the social (e.g., family farm) is essential for sustainability. In short, the concept of sustainability is multidimensional. Thus, sustainable management requires that these and other important concepts must be addressed simultaneously.

While considerable activity is currently aimed at development and evaluation of sustainable management systems, these efforts are hampered by a lack of agreement on what constitutes credible measures of sustainability. evaluate the sustainability of management systems, both in terms of design and performance, are not yet de-

termined (Larson and Pierce, 1991; Pierce and Larson, 1992). In addition, until measures of sustainability are established, it is not possible to assess how the various components should be weighted in determining sustainability. The latter may deal, for example, with the question of how should farm profitability issues be tempered by environmental concerns and visa versa.

Soil quality is a critical component of sustainable agriculture. While the term "soil quality" is relatively new, it is well known that soils vary in quality and that soil quality changes in response to use and management. The soil system is characterized by attributes that both range within limits and functionally interrelate. Therefore, these attributes can be used to quantify soil quality. Additionally, the soil is an open system, with inputs and outputs, that is bounded (at least artificially) by other systems collectively termed "environment" (Jenny, 1941). Sustainability, then, while multidimensional, is certainly focused both on the "quality" of the soil resource base and the relationship between its use and management and the "environment".

Our hypothesis in this paper is simple. If it can be agreed that a management system is

1. Professor Emeritus, Soil Science Department, University of Minnesota, St. Paul, MN 55108; Associate Professor, Crop and Soil Sciences Department, Michigan State University, East Lansing, MI 48824. \*Corresponding Author (517)355-6892.

sustainable only when soil quality is maintained or improved, then a quantitative assessment of the changes in soil quality provides a measure of sustainable management. This paper defines soil quality and presents an approach to quantify both the inherent and dynamic dimensions of soil quality in terms of minimum data sets (MDS) and pedotransfer functions (PTF) in combination with procedures and models used in statistical quality control (SQC) (the introduction of terminology used in statistical quality control has the potential to create some confusion over the use of the term "quality". However, "quality" is used frequently in SQC literature as a modifier. Therefore, to avoid confusion, references in the text to "quality" as used in SQC will be italicized). It also explores the concept of designing inherently sustainable land management systems combined with process quality control procedures to ensure quality performance of the management system design.

## SOIL QUALITY AND THE SUSTAINABLE PARADIGM

It is important to establish a common paradigm on what constitutes sustainable management. Standards are needed for the design and evaluation of management systems that allow an assessment of their sustainability. We will argue that since the soil system is dynamic, measures of sustainable management should also be dynamic.

An approach frequently employed in the evaluation of sustainable management systems is a **comparative assessment**. A comparative assessment approach is one in which the performance of the system is determined in relation to alternatives. The characteristics and outputs of alternative systems are compared at some time, *t*, with respect to biotic and abiotic soil system attributes. A decision, based on the difference in magnitude of the measured parameters, is made about the relative sustainability of each system.

Consider an example of a comparative assessment in which two management systems (A and B) occur side by side on the same soil. After some a battery of measure-

ments are taken on the soil and comparisons are made between systems. The differences between systems A and B are presented as evidence of the sustainability of one system relative to the other. An example of a comparative assessment study is given by Reganold (1989) in which he compared two farms near Spokane, Washington, managed under conventional and organic farming practices. A brief summary of his comparative data is given in Table 1. He concluded from these data that, "in the long-term, the organic farming system was more effective than the conventional farming system in maintaining the tilth and productivity of the Naff soil and in reducing its loss to erosion" (Reganold, 1989).

**Table 1 :** Soil physical, chemical and biological properties of a Naff silt loam soil in the Pelouse region of Washington managed under conventional and organic strategy (adapted from Reganold, 1989).

Soil Property	Organic Farm	Conventional Farm
Organic Matter ( $\text{g kg}^{-1}$ ) (0-10 cm)	27**	17
Polysaccharides ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) (0-10 cm)	1.13*	1.00
C.E.C ( $\text{cmol kg}^{-1}$ ) (0-10 cm)	17.3*	15.6
Total N ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) (0-15 cm)+	1179	1066
Ext. P ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	5.5	5.3
Ext. K ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )	1.2**	0.7
Bulk Density ( $\text{mg m}^{-3}$ )	1.0	1.0
Modulus of rupture (MPa)	0.016*	0.2
Surface Horizon Thickness (cm)	39.8*	36.7
Depth to Bt horizon (cm)	55.6**	39.8
Color (dry)	10 YR 4/2	10 YR 5/2, 5/3
Consistence (dry)+	slightly hard	hard to very hard
Consistence (wet)+	friable	firm
Structure +	granular	subangular blocky parting to granular

\*,\*\* Significant at the 0.05 and 0.01 levels, respectively. ( $P>0.05$ ).  
+ Average of summer and Fall 1981 and Spring 1982 Saples. All other samples taken July, 1985.

While on the surface comparative assessments may appear reasonable, they are limited for a number of reasons. If only outputs are measured, it provides little information or inference about the process that created the measured condition. It is also not possible to determine if the system that produced the result was poorly designed or operated in a way that was unstable and could not produce the desired output.

In contrast to the comparative assessment approach, we propose a dynamic assessment approach, in which the dynamics of the system is a measure of its sustainability. In this approach, a management system is assessed in terms of its actual performance determined by measuring attributes of soil quality over time. This does not preclude, however, comparisons of the dynamics of alternative management systems. The dynamic assessment approach is based on principles established in statistical quality control (Pierce and Larson, 1992).

Statistical quality control yields a number of important principles that have relevance to the evaluation of the dynamics of soil quality and as a measure of sustainable management (see Pierce and Larson, 1992): (1) quality cannot be "monitored" into the soil ; (2) soil quality is enhanced through design of inherently sustainable management systems combined with process quality control to ensure soil quality and identify improvement opportunities to refine these systems; (3) process

quality control requires the identification and monitoring of key variables that influence quality characteristics of the system; (4) it is important to know the life cycle or pedigree of the process that produces an output in order to quantify the process variability; (5) decreasing the variability of the input of a process will tend to decrease the variability of the output (Gilliland, 1990); (6) Statistical tests should be in place so that a decision to adjust the process or not is based on operationally defined standards and not the whims of the people in charge (Gilliland, 1990); (7) as quality is designed into more and more of the process, one can expect the need for quality monitoring of the output will be less; (8) in statistical quality control, by controlling the data collection and knowing the time sequence of the data, inferences can be made about the stability of the system over time (Montgomery, 1985).

The dynamic assessment approach should include the following steps :

- Explicit identification of the desired outputs of a management system.
- Assessment of the design of the system to determine if it will produce the desired output.
- Identification of the soil quality parameters of importance and establishment of quality standards.
- Establishment of the starting point for evaluation of a management system. The condition of the soil at the initia-

tion of the management change is required unless the historical record of the site is good.

- Assessment of the system output to determine if it results from the system design, the system process performance, or both.
- Stabilization of a system process that is out-of-control. A stable system of variation is one in which the variation is solely a result of the system in place; there are no special causes of variation (Gilliland, 1990).
- Improvement of the sustainability of a stable management system by adjusting it with proper experimental design techniques. This should be attempted only if the system is stable, since tampering with a stable system will make the system less stable (Montgomery, 1985).

What follows is an overview of concepts on soil quality which constitute a framework for its assessment and, subsequently, to achieve sustainable management. We refer the reader to two previous papers on this issue (Larson and Pierce, 1991; Pierce and Larson, 1992).

## SOIL QUALITY ASSESSMENT

There are two aspects of the dynamics of soil quality with regards to sustainable management. The first deals with the quantification of soil quality, both in terms of magnitude and dynamics. This aspect deals with how soil quality is chan-

ging in response to management. The second deals with design and control of the process by which management systems affect soil quality and hence, sustainability. The emphasis here is on how the components of a management system and the associated processes acting within a management system are performing with respect to their measured impacts on soil quality.

### Quantifying the Dynamics of Soil Quality

The dynamics of soil quality can be quantified by expressing soil quality,  $Q$ , as a function of measurable soil attributes,  $q_i$ 's, measuring the variation of these attributes over time, and evaluating the dynamics of soil quality,  $dQ/dt$ , using models or statistical quality control procedures (Larson and Pierce, 1991; Pierce and Larson, 1992).

Larson and Pierce (1991) defined soil quality as the capacity of a soil to function, both within its ecosystem boundaries (e.g., soil map unit boundaries) and with the environment external to that ecosystem (particularly relative to air and water quality). Soil quality relates specifically to the ability of soil to function as a medium for plant growth (productivity), in the partitioning and regulation of water flow in the environment, and as an environmental buffer. As a simple operational definition, soil quality means "fitness for use" (Pierce and Larson, 1992). Soil quality, 'Q', can be defined (Larson and Pierce, 1991) as the state of existence

of a soil relative to a standard or in terms of a degree of excellence. It is expressed as a function of attributes of soil quality,  $q_i$ , defined as:

$$Q = f(q_{1...n}) \quad [1]$$

It may be important to think of  $Q$  as multi-dimensional, e.g., as a vector or surface rather than a single point or value. In any event, it is the collective contribution of all  $q_i$ 's that determine the magnitude of  $Q$ .

While  $Q$  is important in land evaluation, sustainable management requires knowledge about changes in soil quality (Pierce and Larson, 1992). The dynamic change in soil quality,  $dQ/dt$ , can be defined (Larson and Pierce, 1991) as:

$$\frac{dq}{dt} = f \left( \frac{(q_{i1} - q_{i0}) \cdots (q_{in} - q_{n0})}{q_{i0} \quad q_{n0}} \right)$$

An aggrading soil would have a positive  $dQ/dt$  and a degrading soil would have a negative  $dQ/dt$ . In terms of sustainability, it is our main interest to detect changes in soil quality resulting from a change in land use or management or in measuring the performance of a specific management system in terms of soil quality.

The functional relationship in Equation [2] is difficult to define and it is impossible to describe  $Q$  in terms of all soil attributes. There for Larson and Pierce (1991) proposed that a minimum data set (MDS), in combination with pedotransfer functions (PTF's), be designed to monitor changes in soil quality. An important aspect of an MDS is that it must include soil attributes in which quantitative attributes can be measured in a short time span in order to be useful in land use or management decisions. The components of an MDS are selected on

**Table 2 :** Soil attributes and standard methodologies for their measurement to be included as part of a minimum data set (MDS) for monitoring soil quality (adapted from Larson and Pierce, 1991).

Soil Attribute	Methodology
Nutrient Availability for region	Analytical soil test
Total organic carbon (OC-T)	Dry or wet combustion
Labile organic carbon (OC-L)	Digestion with KCL
Texture	Pipette or hydrometer method
Plant-available water capacity (PAWC)	Determined in fiel best or from water desorption curve
Structure	bulk density from intact soil cores field permeability or Ksat
Strength	Bulk density or penetration resistance
Maximum rooting depth	Crop specific - depth of common roots or standard
Ph	Glass electrode - calomel electrode ph meter
Electrical conductivity	conductivity meter

the basis of their ease of measurement, reproducibility, and to what extent they represent key variables that control soil quality. It is important to note that any MDS represents a minimum set of attributes to be measured to assess soil quality. Other attributes may be part of an extended data set intended for certain investigations. An example of a minimum data set was described by Larson and Pierce (1991) and a summary is given in Table 2. Note that both the type of measurement and a measurement procedure should be standardized, at least within a geographic region. In addition, there are soil parameters that are too costly or difficult to measure that would be desirable in a MDS for soil quality. Fortunately, soil properties are interrelated and can be predicted from other properties using pedotransfer functions (PTF's). A PTF is described by Bouma (1989) as a mathematical function that relates soil characteristics and properties with one another for use in the evaluation of soil quality (Larson and Pierce, 1991). Therefore, PTF's can be used to extend the utility of the MDS to monitor soil quality. Many PTF's occur in the literature and are statistical or empirical in nature. Selected PTF's were discussed by Larson and Pierce (1991) and are given in Table 3.

There is no consensus on what a MDS for soil quality should contain. The MDS and PTF's given by Larson and Pierce (1991) represent a starting point. However, a new technical Committee of the In-

**Table 3 : A limited listing of proposed pedotransfer functions (adapted from Larson and Pierce, 1991).**

PTF No.	Estimate	Relationship
1	Phosphate-sorption capacity	<b>Chemical</b> PSC = 0.4 (Al <sub>ox</sub> + Fe <sub>ox</sub> )
2	Cation-exchange capacity	CEC = a OC + b C
3	Change in organic matter	ΔC = a + b OR
4	Bulk density	<b>Physical</b> D <sub>b</sub> = b <sub>0</sub> + b <sub>1</sub> OC + b <sub>2</sub> SI + b <sub>3</sub> M
5	Bulk density	Random packing model using particle size distribution
6	Bulk density	D <sub>b</sub> = f(OC, clay)
7	Water retention	q <sub>10</sub> = b <sub>0</sub> + b <sub>1</sub> C + b <sub>2</sub> SY
8	Water retention	q = b <sub>1</sub> (%Sa) + b <sub>2</sub> (%Si) + b <sub>3</sub> (%CL) + b <sub>4</sub> (%OC)
9	Random roughness from moldboard plowing moldboard plowing	RR = f(soil morphology)
10	Porosity increase	P = f(MR, IP, clay, SI, OC)
11	Hydraulic conductivity	<b>Hydraulic</b> K <sup>3</sup> = f(texture)
12	Seal conductivity	SC = f(texture)
13	Saturated hydraulic conductivity	D <sub>3</sub> = f(soil morphology)
14	Soil productivity	<b>Productivity</b> PI = f(D <sub>b</sub> , AWHC, pH, E <sub>c</sub> , ARE)
15	Rooting depth	RD = f(D <sub>b</sub> , WHC, pH)
D <sub>b</sub> = Bulk density ; si = percent silt ; M = median sand fraction ; OC = organic carbon ; C = clay ; SY = 1/D <sub>b</sub> ; PSC = phosphate sorption capacity ; Al <sub>OX</sub> = oxalate extractable Al ; Fe <sub>OX</sub> = oxalate extractable Fe ; OM = organic matter ; Sa = sand ; Mr = moisture ratio ; IP = initial porosity ; ARE = aeration.		

ternational Organization for Standardization (ISO/TC 190) has been recently formed whose scope is "standardization in the field of soil quality, including classification, definition of terms, sampling of soils and measurement and reporting of soil characteristics" (D. L. Rimmer, personal communication to F. J. Pierce). A comprehensive effort is also underway by the Environmental Protection Agency Environmental Monitoring and Assessment Program, EMAP, to assess changes in soil quality by monitoring key soil

attributes at selected locations nationally (EPA, 1991). It is, therefore, essential that working groups be formed in the United States, similar to ISO/TC 190, to develop an MDS and associated PTF's for assessing soil quality

The soil quality MDS is measured over time to assess the dynamics of soil quality. There are two ways of assessing changes in soil quality: (1) through the use of computer models to determine how changes in the MDS impact the im-

portant functions of soil, such as productivity; and (2) using statistical quality control procedures, a MDS is repeatedly measured over time and the temporal pattern of variation of a MDS parameter or PTF is evaluated (Pierce and Larson, 1992).

The use of models for dynamically assessing soil quality is illustrated by the use of productivity indices by Pierce et al. (1983) to quantify soil productivity and the loss in productivity with accelerated soil erosion (Pierce and Larson, 1992). Using a modification of a productivity model developed by Kiniry et al. (1983), Pierce et al. (1983) used the PTF's to calculate a normalized sufficiency of pH, bulk density and available water capacity (AWC) for root growth. Once determined, the product of the sufficiencies were weighted by a normalized rooting function to calculate a productivity index, PI as:

$$PI = \sum_{i=1}^r (A_i \times C_i \times D_i \times WF) \quad [3]$$

where  $A_i$  is sufficiency of AWC,  $C_i$  is the sufficiency of bulk density,  $D_i$  is the sufficiency of pH, WF is a weighting factor, the number of horizons in the depth of rooting. Using soil survey data contained in the SOILS-5 data base and land use and erosion data from the National Resources Inventory, the effect of erosion on soil productivity was estimated for the Corn Belt Region of the United States (Pierce et al., 1984). Both the quality (PI) and the change in quality (PI) were estimated using the concepts given in

**Table 4 :** Organic carbon, bulk density and available water capacity for sandy textures North Dakota soils as influenced by two managements systems (adapted from Bauer and Black, 1992).

Soil Depth	Conventional Tilled			Relict Grazed		
	OC +	D <sub>b</sub>	AWC	OC	D <sub>b</sub>	AWC
m	g Kg <sup>-1</sup>	Mg m <sup>-3</sup>	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	g Kg <sup>-1</sup>	Mg m <sup>-3</sup>	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>
0-0.076	9.9	1.37	0.164	27.9	1.00	0.225
0.076-0.152	9.1	1.39	0.164	17.0	1.23	0.168
0.152-0.305	7.2	1.42	0.162	13.4	1.30	0.168
0.305-0.457	5.6	1.46	0.159	8.9	1.42	0.160
0-0.457	7.4	1.42	0.162	14.9	1.28	0.175

+OC = organic carbon, D<sub>b</sub> = bulk density, and AWC = available water capacity.

Equations [1] and [2].

Consider the study reported by Bauer and Black (1992) in which they compared the organic carbon, bulk density and available water capacity of a number of soils from Grant County, North Dakota, that had been cropped to conventionally tilled wheat, stubble mulch-tilled wheat, grazed grassland, and relict grassland. Twelve nearby sites for each management system were sampled from the same or similar soil type. The soils were then grouped into sandy, medium and fine texture. The results were summarized by texture and management system. Data from all soils were used in separate regression equations relating bulk density, water concentrations at field capacity, and permanent wilting point to organic carbon content of the different soil sampling depths. Because the texture varied slightly among the management systems, we used the measured organic carbon levels to predict bulk density and available water capacity for the dif-

ferent management systems and textural groupings for the regressions given by the authors. The data for conventionally tilled and relict grazed on a Ve-bar soil (coarse-loamy, mixed Typic Haploborol) are summarized in Table 4.

We calculated PI as an index of soil quality using the bulk density, available water capacity and pH. For the sandy soils, PI was 0.71 for conventionally tilled wheat and 0.76 for the relict grassland, a small difference. Except for the surface 0.076 m the available water capacity was essentially the same for both treatments. Bulk density was lower in the relict grasslands than the conventionally tilled, but the bulk densities in both treatments were non-limiting (Pierce et al., 1983). We conclude, as did Bauer and Black (1992) that in these soils, the two widely different managements did not greatly affect the productivity of the soil for wheat other than in likely nutrient losses (not measured) in this semi-arid region.

The example from Bauer and Black (1992) and given in Table 4 exemplifies the difficulty in determining a standard for Q. Most would argue that the soil from the relict grassland has the higher Q because of the higher OC and lower bulk density. The reasoning might be that the higher OC soil would have a higher state of aggregation and, therefore, the soil would be more resistant to wind erosion and rainfall runoff. In this semi-arid climate, runoff is not a major problem. Even though wind erosion is a hazard, it apparently has not materially affected Q (as evidence by PI) after 25 years of cropping. Water holding capacity, the most important soil attribute in this semi-arid ecosystem was not influenced significantly, except in the surface 0.076 m layer. Bulk density was higher in the soil with conventionally tilled wheat but was not great enough to limit root growth. Although not measured and not considered in our analysis, the nutrient supplying power of the soil was probably lower in the soil with conventionally tilled wheat. Thus, degradation of the soil tilled for 25 years did not lower its performance in a managed wheat ecosystem. Therefore, the degradation appears to have not exceeded quality standards for this soil relative to productivity.

One might also argue that the conventionally tilled wheat soil has degraded the atmosphere because the loss in OC from the soil has supplied CO<sub>2</sub> to the atmosphere and in a small way contributed to the global war-

ming phenomena. Reducing OC in the 0 to 0.46 m depth from 14.9 to 74 g kg<sup>-1</sup> would supply 143,000 kg ha<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> to the atmosphere, assuming all C losses resulted from biological oxidation of organic matter.

A second approach to assess the dynamics of soil quality from the MDS is the use of statistical quality control. Pierce and Larson (1992) proposed the use of statistical quality control procedures to describe the dynamics of soil quality and assess sustainable management. The following discussion relies heavily on their paper.

Recall that our interest is mainly in detecting changes in soil quality resulting from a change in land use or management or in measuring the performance of a specific management system in terms of soil quality. Pierce and Larson (1992) stated that statistical tools appropriate for assessing changes in soil quality may be found in the use of 'control charts'. Control charts are a standard device used in statistical quality control in the manufactured goods and services industry. The statistical basis for their use is well established and the types and uses of control charts are very diverse (Gilliland, 1990; Montgomery, 1985; Ryan, 1989). Control charts can be thought of as indicators of changing soil quality.

The basic use of control charts is illustrated in (Figure 1).

Under this procedure, soils would be sampled over

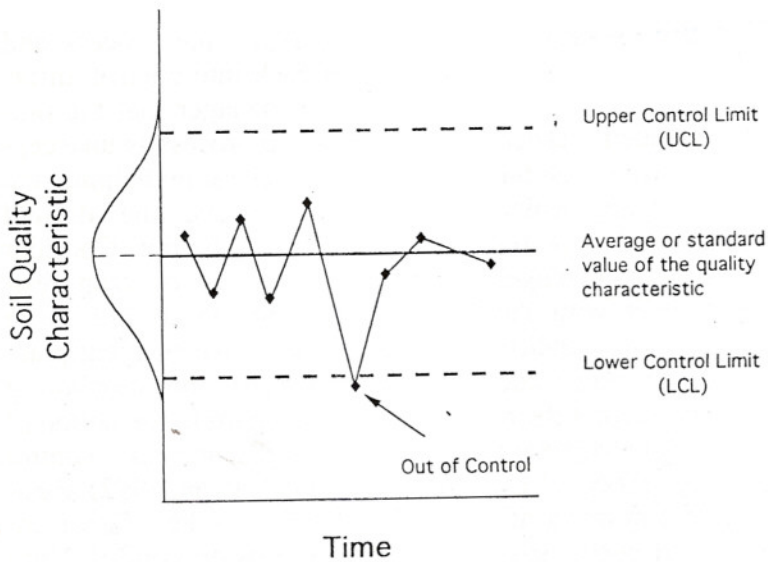
time for soil attributes (MDS) representing quality parameters or transformed using PTF's to other quality parameters. The upper control limit (UCL) and lower control limit (LCL) are set based on known or desired tolerances, or based on the mean variance obtained from past performance or known through some other means. It may be desirable to design the control limits to represent minimum levels for sustainability, beyond which management cannot be sustained, such as minimum soil organic matter-content.

In the simplest case, as long as the sample mean plots within the control limits, the process or system is considered in-control. When a sample mean plots outside the control limits, the process or system is considered out-of-control, i.e., soil quality is changing. Additionally, trends may occur within the control chart and statistical quality control procedures are available to analyze these trends. Trends may be indicative of instability in the management system or merely characteristic of the process.

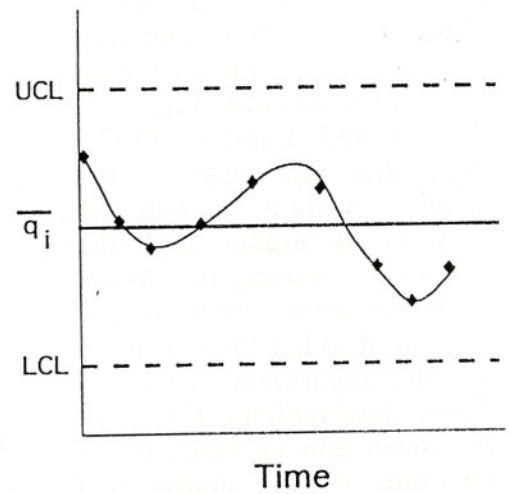
For example, the data in (Figure 2) would be indicative of a system with cyclic variation that operates within the control region (Pierce and Larson, 1992).

The data of Reinert et al. (1991) illustrate the temporal variation in the aggregate stability of a Kalamazoo loam soil (Typic Hapludalf, fine-loamy, mixed, mesic) under varying management: cropped

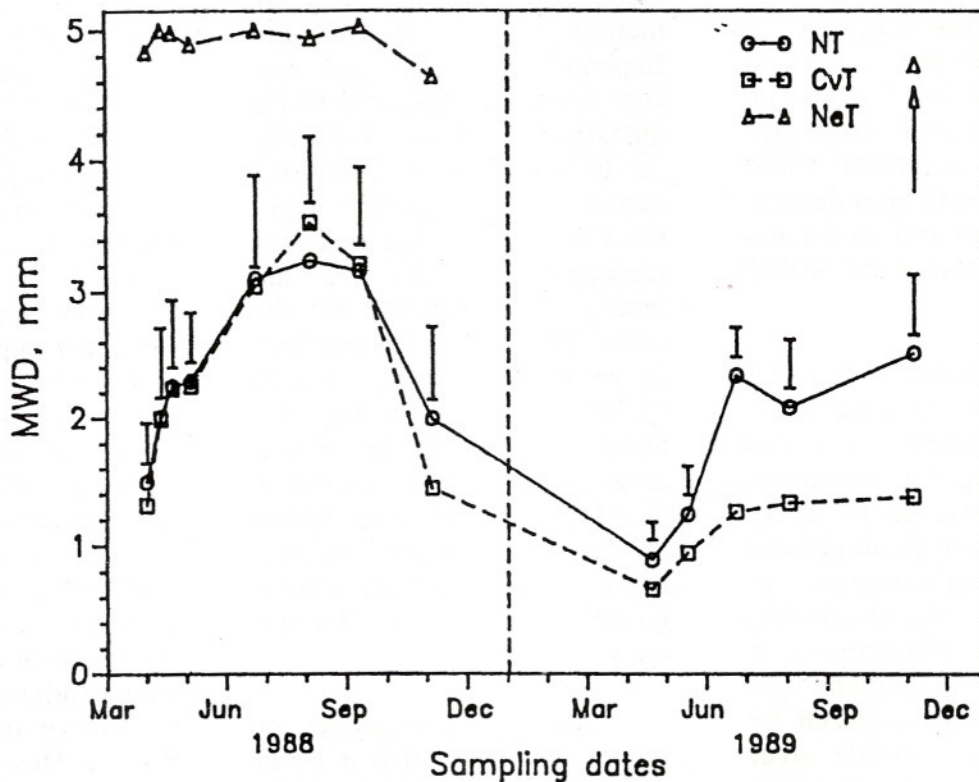
### Statistical Control Chart



**Figure 1.** The basic concept of a Shewhart control chart as used for soil quality monitoring (from Pierce and Larson, 1992 after Montgomery, 1985 and Ryan, 1989).



**Figure 2.** An example of a control chart with variation within the control limits but exhibiting a pattern in the variation of a soil quality parameter (from Pierce and Larson, 1992).



**Figure 3.** The temporal variation in mean weight diameter (MWD) of soil aggregates sampled from a Kalamazoo loam soil under conventional tillage (CvT), no-tillage (NT) and never tilled (NeT) management for the production of corn (Reinert et al., 1991).

for over 100 years and either plowed or notilled compared to never tilled, but all recently cropped to corn (Figure 3) (Pierce and Larson, 1992). Note that the mean of the mean weight diameter (MWD) is higher and the temporal variation lower when the never tilled soil is compared to the long cropped systems regardless of tillage. These data indicate that both the mean and variance of an attribute of soil quality ( $q_j$ ) may be affected by a management system and both should be monitored and charted. If the situation in Figure 3 is extrapolated over the long-term (Figure 4), one might expect that no-tillage of the long-term cultivated area would increase the mean and reduce the variance of the MWD of the cultivated soil (Reinert et al., 1991). Conversely, no-till crop production of the never tilled soil should result in a decrease in the mean and an increase in the variance of MWD over time.

The concept of using control charts for each MDS and PTF parameter is useful in quantifying the dynamics of soil quality. It is likely that for a given management system some  $q_j$ 's may be stable, others out-of-control, and others showing trends. A sustainable management system will be characterized by  $q_j$ 's which are stable over time and if trends occur in the control charts, they are indicative of an aggrading soil quality, not degrading.

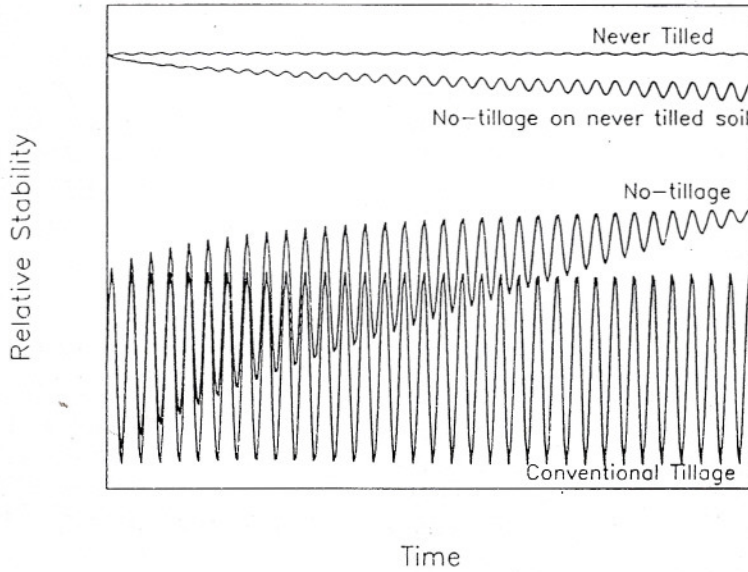
## System Design and Process Control

As we indicated earlier, there is a second aspect of the dynamics of soil quality which needs to be addressed with regards to sustainable management. The first dealt with the quantification of soil quality, both in terms of its magnitude and dynamics. The second deals with the design of management systems and the process by which management systems affect soil quality and hence, sustainability.

Pierce and Larson (1992) pointed out that a basic principle in the manufacture of products is that you cannot sample quality into a product. The obvious analogy is that you cannot monitor quality into the soil. Experimental design and process control are required in the manufacture of goods and services to build quality. Therefore, sustainable management requires a deliberate effort to design management systems that are inherently sustainable and the use of process control measures to ensure soil quality and to identify improvement opportunities to refine these design systems. An important outcome is that if quality is built into both the design and the process, quality assurance sampling (monitoring) is minimized (Montgomery, 1985).

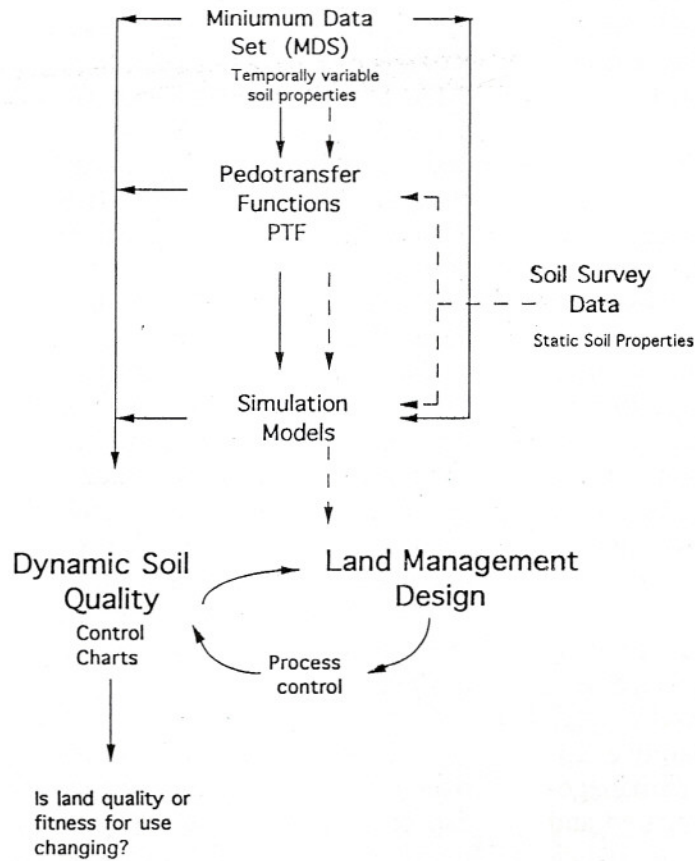
An important aspect of process control is that it be in the hands of those managing the process. The manager should be able to interpret the control charts and take appropriate ac-

tion to adjust the process and bring it back into control. Informing the manager that the outcome of the process is unacceptable is useless in helping the manager achieve the desired quality of the output. Consider the management of crop residues for erosion control as an example of a management practice that relies on monitoring with little regard to the notion of design and process control (Pierce and Larson, 1992). Residue cover is a key factor influencing erosion control. Until recently, interest focused specifically on the amount of residue cover after planting and it was not uncommon that conservation tillage systems failed to meet the target residue coverage amount of 30% on the erosive landscape positions. The problem is that the standard measure of residue cover occurs after most of the management practices that affect residue cover are completed. At this time, it is not possible for the farm manager to alter those practices to ensure the proper residue cover. How would process control measures impact residue cover, if it can be assumed that the design of the system is correct? Since the harvest, tillage and planting operations impact residue distribution, statistical process controls could be implemented to monitor machinery performance relative to residue management to detect when machinery adjustments are required to achieve desired residue coverage. This level of management is nearly achievable with the site specific crop management technology currently available (Larson and Robert, 1991).



**Figure 4.** A conceptual illustration of the expected change in relative stability over the long-term of a soil in cropland managed under no-tillage and conventional tillage on previous tilled soil or no-tillage of a never tilled soil (Reinert et al., 1991).

## Land Management Sustainability Evaluation



**Figure 5.** A flow diagram illustrating a procedure for evaluating the sustainability of land management systems

(from Pierce and Larson, 1992).

Thus, if the system is designed to meet the intended output, then through process control the output can be reasonably assured. The overall process of assessing soil quality and evaluating management is illustrated in (Figure 5) (Pierce and Larson, 1992). Soil survey data, MDS's, and PTF's provide input to simulation models to design sustainable management systems and establish standards for soil quality. Control charts of various  $q_i$ 's are monitored with time and used alone or in combination with models to detect quality control problems and identify improvement opportunities in the system. Control charts can also be used in combination with MDS's and PTF's to monitor soil quality and serve as thresholds and criteria for quality standards.

## SUMMARY

Soil quality is defined as the capacity of a soil to function, both within its ecosystem boundaries and with the environment external to that system. Soil quality relates specifically to its ability to function as a medium for plant growth, in the partitioning and regulation of water flow in the environment, and as an environmental buffer.

Two approaches to evaluating sustainable management are (a) comparative and (b) dynamic. In the comparative approach, two or more management systems are compared and judgements made as to which system is most "sustainable". Usually, a minimum of attention is given as to the attributes that

contribute to the behavior the systems. In the dynamic approach, which we favor, the system is assessed in terms of its actual performance determined by measuring soil quality parameters over time. The dynamic assessment approach is based on principles established in statistical quality control.

The dynamics of soil quality can be identified by expressing soil quality,  $Q$ , as a function of measurable soil attributes,  $q_i$ 's, measuring the variation of these attributes over time, and evaluating the dynamics of soil quality,  $dQ/dt$ , using models or statistical quality control procedures.

Larson and Pierce (1991) proposed that a minimum data set (MDS), in combination with pedotransfer functions (PTF's), be designed to monitor soil quality changes over time. The MDS must include soil attributes whose changes can be measured in a short period of time. The components of a MDS are selected on the basis of their ease of measurements, reproducibility, and to what extent they represent key variables controlling soil quality. Because soil attributes are interrelated, one attribute can often be predicted from others. Therefore, PTF's can be used to extend the utility of the MDS to monitor soil quality.

Using a monitoring system over time, soil quality changes can be assessed using (a) computer models, or (b) statistical quality control procedures. The latter requires establishment of quality standards and control li-

mits. The concept of using control charts for each MDS and PTF parameter is attractive. In this way, changes in critical parameters can be identified and corrective action taken to adjust the management system.

## REFERENCES

- Bauer, Armand and A. L. Black. 1992. Organic carbon effects on available water capacity of three soil textural groups. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:248-254.
- Bouma, J. 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advances in Soil Sci.* 9:177-213.
- EPA. 1991. An overview of the environmental monitoring and assessment program. *EMAP Monitor*, January, 1991. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D. C. 20460.
- Gilliland, D. C. 1990. Experiences in Statistics. Kendall/Hunt Publ. Co., Dubuque, IA. 104p.
- Jenny, Hans. 1941. *Factors of Soil Formation*. McGraw-Hill Book Co., New York. 281p.
- Kiniry, L. N., C. L. Scrivner, and M. E. Keener. 1983. A soil productivity index based upon predicted water depletion and root growth. *Res. Bull.* 1051. Mo. Agr. Exp. Sta., Columbia.
- Larson, W. E. and F. J. Pierce. 1991. Conservation and enhancement of soil quality. In *Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World Vol. 2: Technical Papers*. Bangkok, Thailand: International Board for Soil Research and Management, 1991. IBSRAM Proceedings No. 12(2).
- Larson, W. E. and P. C. Robert. 1991. Farming by soil. p. 103112 In R. Lal and F. J. Pierce (ed.) *Soil Management for Sustainability*. Soil and Water Conserv. Soc., Ankeny, IA.

Montgomery, D. C. 1985. Introduction to Statistical Quality Control. John Wiley and Sons, New York. 520p.

Pierce, F. J. and W. E. Larson. 1992. Developing threshold values, indicators, and criteria to evaluate sustainable land management. Proceedings of the International Soil Management Workshop, Sacramento, CA, July 19, 1992.

Pierce, F. J., W. E. Larson, R. H. Dowdy, and W. A. P. Graham.

1983. Productivity of soils: Assessing long-term changes due to erosion. *J. Soil Water Conserv.* 38:39-44.

Pierce, F. J., W. E. Larson, R. H. Dowdy, and W. A. P. Graham. 1984. Soil productivity in the Corn Belt: An assessment of erosion's long-term effects. *J. Soil Water Conserv.* 39:131-136.

Reganold, J. P. 1989. Comparison of soil properties as influenced by organic and conventional farming systems. *Am. J. Alter. Agric.* 3:144-154.

Reinert, D. J., F. J. Pierce and M. C. Fortin. 1991. Temporal variation in structural stability induced by tillage. p. 6372 In J. A. Stone, B. D. Kay, and D. A. Angers (ed.) *Soil Structure Research in Eastern Canada. Proceedings of the Eastern Canada Soil Structure Workshop, September 10-11, 1990, Guelph, Ontario.*

Ryan, T. P. 1989. *Statistical Methods for Quality Control.* John Wiley and Sons, New York. 446p.

## SOCIETE DES TRAVAUX AGRICOLES MAROCAINS

# STAM

S.A. AU CAPITAL DE 20.045.000 DH

10, Route d'El jadida -Guynemer- Rue N°3 -Villa 23- Hay Hassani - CASABLANCA

Tél. : 23.31.66 - 23.36.04/05 - 25.69.64 - 25.33.04 - Fax : 25.69.10 - Téléx : 21928

ATELIER : Km 10, Route côtière 111 Ain Sebaâ - Tél. : 35.37.53 - 35.90.60 - CASABLANCA

**SPECIALISEE DANS LES TRAVAUX  
DE MISE EN VALEUR DES TERRES :  
DEFRICHEMENT - NIVELLEMENT  
DRAINAGE - ASSAINISSEMENT  
TERRASSEMENT**

## MINERALOGICAL CONSIDERATIONS IN SOIL FERTILITY MANAGEMENT IN MOROCCO.

M. BADRAOUI<sup>1</sup>, B. SOUDI<sup>1</sup>, Y. MOUJAHID<sup>2</sup>,  
F. BENNANI<sup>3</sup>, M. MIKOU<sup>3</sup>, S. BOUHLASSA<sup>4</sup>.

### ABSTRACT

In Morocco, like in other mediterranean conditions, the most active part of the soil with respect to nutrients and water supply is made of crystalline layer silicates, humic substances, iron oxides, and clay sized carbonates. The 2 : 1 phyllosilicates regulate the dynamics of K<sup>+</sup> and NH<sub>4</sub><sup>+</sup> as a consequence of their high surface area, their charge characteristics, and environmental conditions. The preference of soil smectites for K<sup>+</sup> over Ca<sup>++</sup> is controlled by the tetrahedral charge. Recent developments in Electron Microscopy coupled with Energy Dispersive Detector showed that smectites may have a great importance on phosphorus adsorption. Phosphate anions are specifically adsorbed by 1:1 layer silicates and iron oxides. Clay sized CaCO<sub>3</sub> reduces the availability of P by its precipitation as P-Ca forms with low solubility. It is demonstrated that humic substances present in soil solution chelate Ca and Fe and thus prevent the formation of P-Ca and P-Fe compounds. The availability of nitrogen is largely controlled by the amount of organic matter and soil ecological conditions. The pertinence of clay mineralogy needs to be clarified.

Although there is evidence that soil mineralogy influences critical levels to interpret soil fertility analysis, more research is needed to establish quantitative relationships between clay mineralogy and nutrients availability. Detailed characterization of soil clays and reliable quantitative analysis of the clay minerals are necessary to reach this objective.

### INTRODUCTION

Soil mineralogy-fertility relationship is a basic component in understanding and interpreting the results of fertility experiments. In fact, soils with the same texture (similar clay content) may have different behavior with respect to nutrients and water supply. In these cases, the nature and relative quantities of clay minerals are important to consider. However,

establishing quantitative relationships between clay mineralogy and soil fertility is a very difficult task. Difficulties are still exist in identification, characterization, and quantification of soil clays (Badraoui et al., 1992).

Many regional surveys in Morocco have shown that the soil fertility status in a given region at a given time is independent of soil type. It depends mostly on the agricultural history (previous crops and fertilizers used) of the plots (Badraoui

et al., 1993). Thus, the quantities of fertilizers to be added to a given crop should not be the same on the same soil type. However, soil nutrients critical levels used in interpreting soil analysis depend strongly on soil type (Torrent, 1992). Pertinent soil characteristics in mediterranean areas are clay content, clay mineralogy, relative quantities of each mineral phase, iron oxides content, organic matter content, and carbonates (Bajwa, 1983; Badraoui, 1988; Badraoui et al., 1992; Torrent, 1992). These characteristics influence largely the capacity of the soil to supply nutrients to plants and the kinetics of its ability to replenish the soil solution after the depletion of the rhizosphere (Badraoui et al., 1992; Hinsinger et al., 1992).

The objective of this paper is to demonstrate the importance of clay mineralogy in soil fertility management through a number of recent research studies done in Morocco. It will focus on major plant nutrients only (K, P, and N).

### MINERALOGY OF MOROCCAN SOILS

The mineralogical composition of the clay fraction (the most active part of the soil) of Moroccan soils, like other Mediterranean soils, is dominated by 2 : 1 layer silicates (Badraoui, 1988; Badraoui and

1 IAV Hassan II, Rabat, Morocco ;

2 INRA, Meknès, Morocco ;

3 University Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès, Morocco;

4 University Mohamed V, Rabat, Morocco.

Bloom, 1990; Badraoui et al., 1992; Torrent, 1992). In general, Moroccan soils have a mixed mineralogy. The dominance of a mineral phase with respect to the others depends on soil types.

Vertisols and vertic subgroups of other soils, locally called Tirs soils, are dominated by smectites with small amounts of illites and kaolinites. Detailed characterizations showed that smectites are mostly high-charged and iron-rich beidellites. The sand and silt fractions of these soils are in most cases quartzitic.

Red Alfisols or Fersiallitic soils contain much more kaolinite and iron oxides than 2:1 layer silicates. However, illite is generally present in association with kaolinite. The relative quantities of illite with respect to the other minerals depend on the parent material.

Inceptisols and Aridisols present calcium carbonate accumulation in the profile. Their mineralogical composition, although mixed, is dominated by 2:1 clays. Other minerals such as palygorskite may be dominant.

These three categories of soils would have different behavior with respect to the dynamics of nitrogen, phosphorus, and potassium. They should be considered when setting experiments for establishing critical levels of plant nutrients, especially phosphorus and potassium. The following sections will demonstrate how distinc-

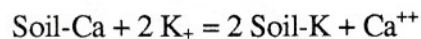
tive mineralogical assemblages influence the dynamics of potassium, phosphorus, and nitrogen in the soil.

## SOIL MINERALOGY AND POTASSIUM AVAILABILITY

Fixation and release of potassium are the two major processes controlling the availability of this element to plants. The quantity of potassium which is immediately available to plant is that of the soil solution. At any time, a dynamic equilibrium is established between soil solution K, adsorbed K, and fixed K in the interlayer space of the 2:1 layer silicates. This equilibrium is controlled by the clay mineralogy. The effects of mineral content, the total charge, and the location of the charge on K fixation were largely discussed by Badraoui et al. (1992) and Bouabid et al. (1991). The amount of fixed potassium is strongly related to the tetrahedral charge of the clay which is the distinctive character of soil beidellites (swelling clays). It was suggested, for a practical viewpoint, that both total and tetrahedral CECs of the soil could be used as good predictors of K fixation. In fact, soil K test should be interpreted in relation with the CEC (Quemener, 1986; Ait Houssa, 1989) for soils with different clay mineralogy. For soils with similar mineralogy, clay content is enough to interpret soil K test.

More recent studies on K-Ca exchange equilibria in vertisols focused on the relative effects of total charge and tetrahe-

dral charge on selectivity coefficients (Moujahid, 1993). A fraction of the potassium which is added to the soil as fertilizer will replace calcium in the exchange complex as shown in the following equation:



The relative affinity of the exchanger (soil clay) with respect to Ca and K depends on its charge characteristics and can be expressed by a selectivity coefficient. Both Vanselow (1932)  $K_v$  and Gaines and Thomas (1953)  $K_{GT}$  selectivity coefficients are used as follow:

$$K_v = \frac{M^2 K (Ca^{++})}{M Ca (K^+)^2}$$

M: molar fraction of adsorbed K

$$K_{GT} = \frac{E^2 K (Ca^{++})}{E Ca (K^+)^2}$$

E: equivalent fraction of adsorbed K

Five clay fractions extracted from vertisols (M1, ZR, M16, S, and DK) and one reference clay (SWY-1) were used in K-Ca exchange experiments at 25°C to obtain exchange isotherms and to evaluate their relative selectivity for K. (Figure 1) shows that all soil clays isotherms are above the nonpreference isotherm. M1 soil, which is the Chaouia vertisol, has the highest selectivity for K versus Ca. The reference montmorillonite (SWY-1) shows the lowest preference for K compared to soil clays. Tetrahedrally charged soil smectites have higher affinity for K than reference octahedrally charged montmorillonites generally used

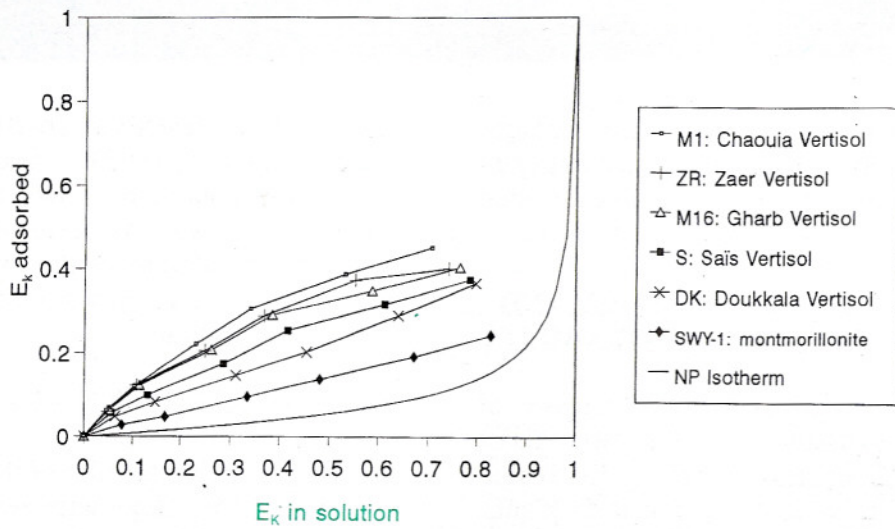


Fig. 1: exchange isotherms of K-Ca in vertisols of Morocco at 25°C

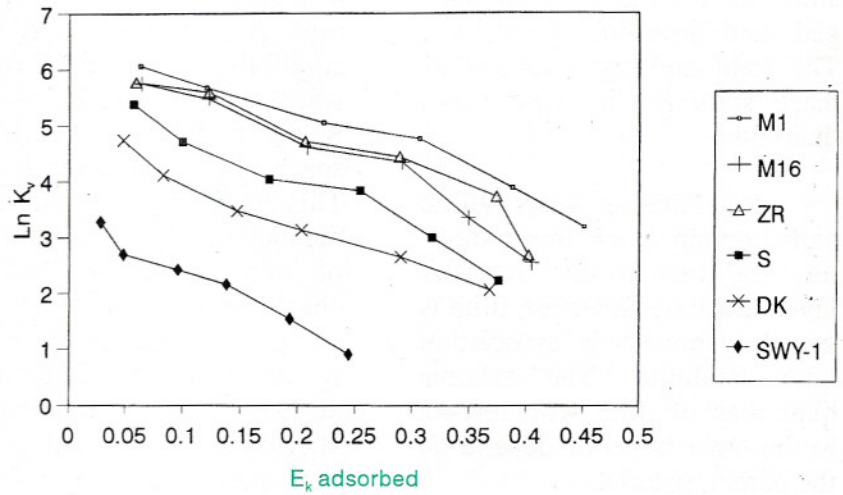


Fig. 2: changes of Vanselow selectivity coefficients with the saturation of K adsorption sites in Vertisols of Morocco at 25°C (see Fig. 1 for sample references)

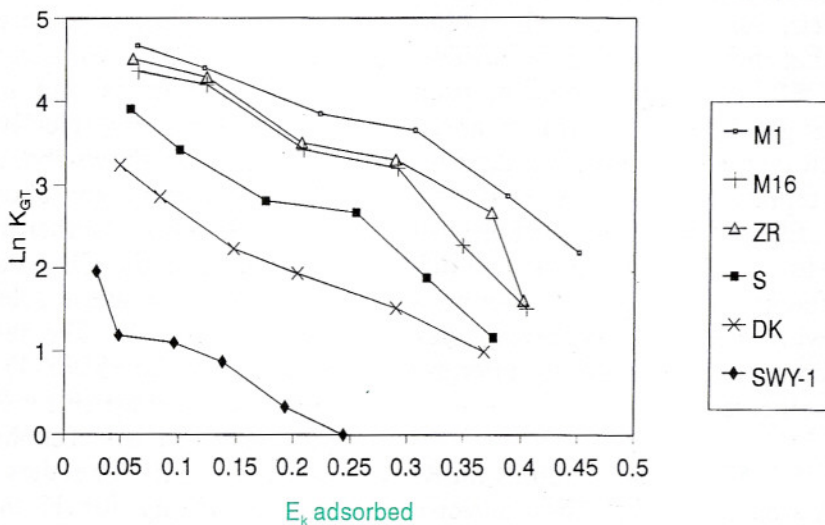


Fig. 3: changes of Gaines and Thomas selectivity coefficients with the saturation of K adsorption sites in Vertisols of Morocco at 25°C (see Fig. 1 for sample references)

in laboratory experiments to simulate the behavior of soils.

The preference for K compared to calcium by soil clays is also demonstrated by the high values of both Vanse-low and Gaines and Thomas selectivity coefficients. For example,  $K_v$  ranges from 400 to 114 (mol/l)<sup>-1</sup> at low concentration of K in the exchange sites for soil clays.

The lowest  $K_v$  were obtained for SWY-1 (Figure 2). Similar results were obtained for  $K^{GT}$  (Figure 3). The preference for K decreased with the saturation of the clays with this element (figure 2 and 3). These results clearly demonstrate that the sites having a high selectivity for potassium are saturated first. The curves of  $\ln K_v$  versus the equivalent fraction of K adsorbed by clays are necessary for modeling the partition between K in soil solution at equilibrium and K adsorbed on clay surfaces.

The relative selectivity for K over Ca by soil clays could be explained by their charge characteristics. Highly significant correlations exist between both total and tetrahedral charges and the selectivity coefficients at any equivalent fraction of K in solution (Figures 4 and 5). These relationships demonstrate that it would be possible to predict selectivity coefficients of K versus Ca in vertisols using cation exchange capacity data which are available soil in characterization reports. From a practical point of view, clay mineralogy should be taken into

consideration in soils presenting high K fixation capacity. This phenomenon could give rise to problems of K deficiency or lack of response to K fertilizers in soils low in exchangeable K.

## SOIL MINERALOGY AND PHOSPHORUS AVAILABILITY

Pertinent soil parameters influencing the dynamics of phosphorus in the soil are clay content, the nature of clays especially iron oxides and 1:1 layer silicates, pH, carbonates, and organic matter (Matar et al., 1992). In fact, the dynamics of phosphorus in the soil is much more complicated than potassium. It is generally known that soil constituents with pH-dependent charges (oxides, kaolinites, and organic acids) control the availability of phosphorus to the plants. This is the reason why most of the weathered acid tropical soils, which are rich in kaolinite and Fe oxides have phosphorus fertility problems (Ryan et al., 1985a, 1985b; Soltanpour et al., 1988; Torrent, 1992; Moughli et al., 1992; Matar et al., 1992).

The availability of phosphorus decreases in calcareous soils because of the precipitation of this element as calcium phosphates with low solubility.  $\text{CaCO}_3$  in the clay fraction of the soil is the most reactive part of carbonates to be used as an indicator for phosphorus availability in calcareous soils (Matar et al., 1992).

In mediterranean soils with homogeneous clay minera-

logy sorption of phosphorus is generally correlated with clay content (Moughli et al., 1992; Matar et al., 1992). Kaolinite adsorbes more phosphorus per unite area than 2:1 layer silicates because kaolinite has higher surface charge density in the edge faces. Matar et al. (1992) reported that clay sized carbonates have a higher P sorption capacity than clay minerals but a lower P sorption capacity than iron oxides.

The effects of humic substances (HS),  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ , and soil clay mineralogy on the availability of phosphorus added as monocalcium phosphate monohydrate  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (MCPM) at pH5 were investigated on a vertisol of Fes region in Morocco (Bennani et al., 1993). In both solution and whole soil or clay suspensions, humic substances chelate phosphorus and prevent the formation of less soluble forms such as dicalcium phosphate dihydrate (DCPD)  $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (Figure. 6). The percent P remaining in solution ranged from 58.5 to 50 when no HS were added. In the clay fraction of the vertisol (CFV) and bentonite (B)  $\text{Ca}^{++}$  -  $\text{Na}^+$  exchange at the clay surfaces decreased the amount of  $\text{Ca}^{++}$  in solution and thus the precipitation of DCPD. The vertisol however, increased the precipitation of DCPD, compared to solution experiment, because of its iron content and exchangeable calcium.

The addition of humic substances increased the availability of P in solution (Figure 6). Linear correlations were found

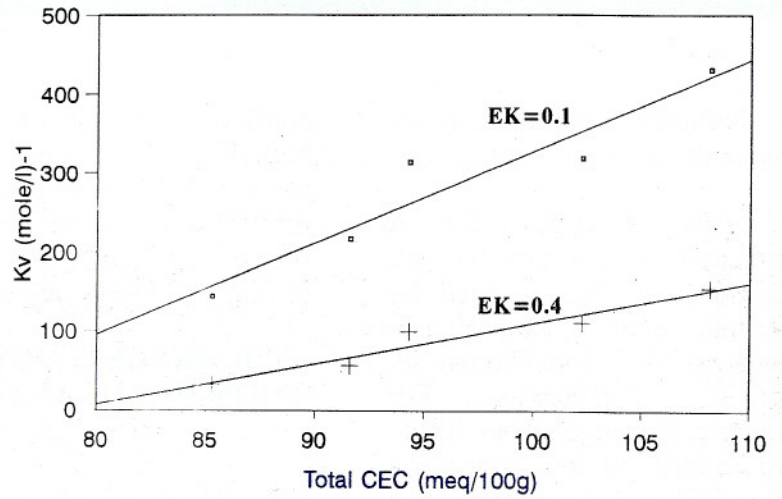


Fig. 4: relationships between Vanselow selectivity coefficient and total charge of the Clay fraction of Vertisols of Morocco for different equivalent fractions of K in solutions

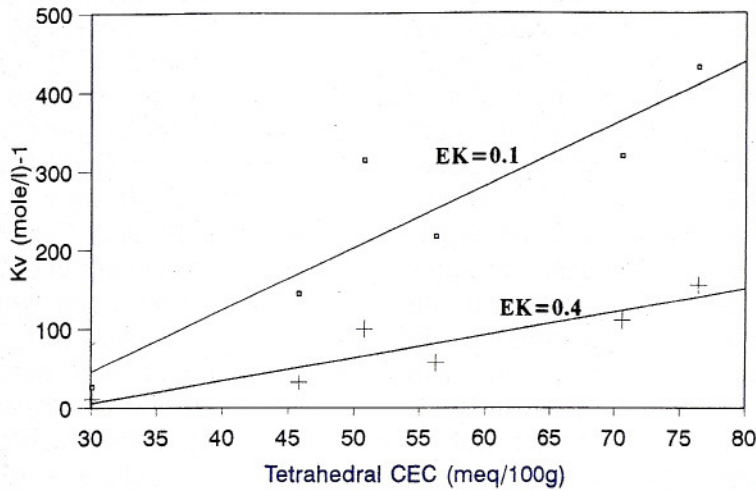


Fig. 5: relationships between Vanselow selectivity coefficient and tetrahedral charge of the Clay fraction of Vertisols of Morocco for different equivalent fractions of K in solutions

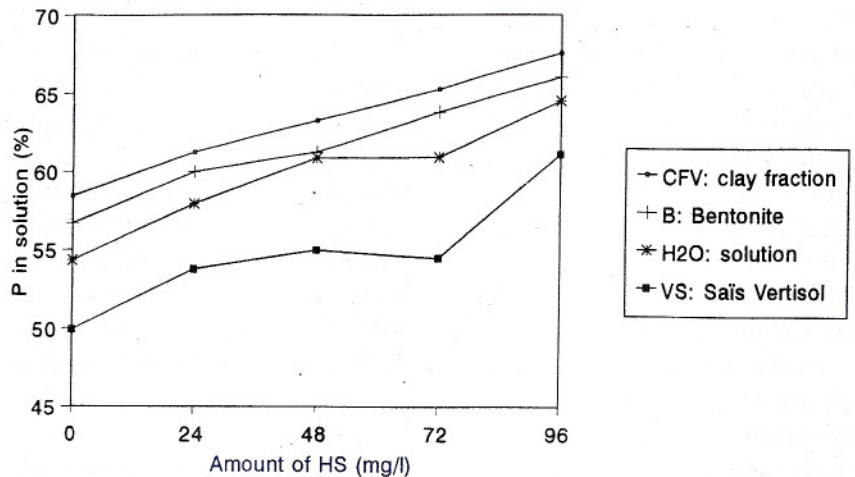


Fig. 6: dependence of phosphorus which remains in solution on the amount of humic substance (HS) added

between the amount of humic substances added and percent P remaining in solution.

For CFV: % P = 53.87 + 0.113 HS;  
avec  $r^2 = 0.99$  ( $P < 0.001$ )

For B: % P = 52.97 + 0.091 HS;  
avec  $r^2 = 0.93$  ( $p < 0.001$ )

For H<sub>2</sub>O: % P = 51.76 + 0.087 HS;  
avec  $r^2 = 0.97$  ( $P < 0.001$ )

For VS: % P = 45.82 + 0.141 HS;  
avec  $r^2 = 0.99$  ( $P < 0.001$ )

The increase of P in solution per unit of humic substances added is higher for the whole soil (VS) compared to the other treatments. This effect could be explained by the chelating properties of HS for Ca released by MCPM dissolution and for Fe<sup>3+</sup> and Al<sup>3+</sup> which could form in soil solution at pH5.

The addition of Fe<sup>3+</sup> and/or Al<sup>3+</sup> decreased the availability of phosphorus in solution for all treatments (data not shown). The presence of humic substances before the addition of Fe<sup>3+</sup> and Al<sup>3+</sup> reduced this effect. Swelling clays (smectites) can considerably reduce the evolution of MCPM to DCPD by their high capacity to adsorb Ca, Al, and Fe and thus permit higher concentration of P in solution.

In a practical point of view, it is important to maintain a high organic matter content in agricultural soils to reduce the transformation of soluble fertilizer phosphorus to less soluble forms and to prevent its specific

adsorption by clay minerals. In fact, critical P-level would depend on texture, clay mineralogy, active (or clay sized) calcium carbonates, CBD-extracted iron (Torrent, 1992).

A new approach to phosphorus speciation in soils was developed by Rodier and Robert (1995). It is based on direct observation and counting of P-bearing particles under a transmission electron microscope coupled with an energy dispersive detector. Applied to an acid soil and a calcareous soil from long-term PK fertilization experiments in France, this technique showed that P-SiAl particles (with Si/Al ratio indicating 2:1 layer silicates) were dominant (> 60 % of total particles) compared to P-Fe, P-Al, P-Fe/Al, or P-Ca particles in the concentration range between 1 and 15 % molar fraction. Above this concentration, P-Fe and P-Al particles were the most frequent in acid soils and P-Ca in the calcareous soil. It was shown that very small clay-P bearing particles contribute greatly to P adsorption. More work is needed using this technique to understand the behavior of fertilizer phosphorus after its addition to the soil in mediterranean conditions.

## SOIL MINERALOGY AND NITROGEN AVAILABILITY

Relatively little is known about quantitative relationships between soil mineralogy and nitrogen dynamics in mediterranean areas. However, clay minerals would influence Nmineralization, microbial activity,

and especially ammonium fixation. In fact, several studies showed that tropical and sub-tropical soils contain large amounts of native fixed NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (Feigin and Yaalon, 1974; Nommik and Vahtras, 1982; Soudi, 1988; Burford and Sahrawat, 1989; Sahrawat, 1995).

The NH<sub>4</sub><sup>+</sup> cation, having a size and a charge similar to that of K<sup>+</sup>, was considered having the same behavior than K<sup>+</sup> in relation to 2:1 layer silicates. Therefore, quantitative relationships between clay characteristics (total charge and location of the charge) and K<sup>+</sup> fixation could apply for NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Chen (1985) demonstrated that NH<sub>4</sub><sup>+</sup> fixation by smectitic soil clays is largely increased with the increase of total and tetrahedral charges. Soudi (1988) and Soudi et al. (1992) showed that native fixed NH<sub>4</sub><sup>+</sup> by 31 soils samples from Chaouia, Tadla, Gharb, and Zaer regions of western Morocco ranged from 22 to 137 mg/kg of soil. It represented from 3.2 to 25.3 % of total nitrogen. No clear relationship between clay mineralogy and native fixed NH<sub>4</sub><sup>+</sup> was found for the soils studied. However, native fixed NH<sub>4</sub><sup>+</sup> is related to clay content (Figure 7). Although significant, this relationship shows a large variation. In fact, previous fertilization history under intensive cropping in addition to different ecological conditions from a region to another would explain the observed NH<sub>4</sub><sup>+</sup> fixation (Soudi et al., 1992)

Nitrogen mineralization potential (No) was found to be

related to total N (Nt), organic matter content (OM), clay content, and calcium carbonate equivalent for 38 soils in Morocco when taken together in multiple regression analysis (Ejbari, 1991). No ranged from 60 to 270 mg/kg of soil. When used separately, only total N and organic matter content were related to No. The best prediction could be obtained using the following equations:

a)  $No(mg/kg) = 65.8 + 650.8Nt(\%) + 0.53 \text{ clay}(\%)$  ;  
avec No(mg/kg),  
Nt(%), clay(%)  
et  $r^2 = 0.57$  ( $P < 0.001$ )

b)  $No(mg/kg) = 77.7 + 30.4OM(\%) + 0.42 \text{ clay}(\%)$  ;  
avec No(mg/kg),  
OM (%), clay(%)  
et  $r^2 = 0.58$  ( $P < 0.001$ )

The effect of clay mineralogy on No is not investigated yet.

The availability of N to plant can be evaluated through several availability indexes. The anaerobic incubation index (AII) was determined for many soils of Morocco (Soudi, 1988; Ejbari, 1991). This index was well correlated to N uptake by wheat in pot experiment. Similar results were found by Felus (1995) for soils from Rommani et Gharb regions of Morocco. Values of AII were correlated only to organic matter content of the soils. No relationship was found between AII and clay content or CEC.

Extensive work is needed to investigate possible relationships between clay mineralogy and N availability.  $NH_4^+$  previously fixed could be released and highly contribute to N uptake by plants. The exact con-

tribution of  $NH_4^+$  is difficult to determine. The difficulties rise from the discrimination between soil N mineralization and fixed ammonium.  $^{15}N$  investigations are needed for this purpose.

## CONCLUSIONS

Quantitative relationships between clay mineralogy and soil fertility management are still difficult to establish for different reasons. First of all reliable data on clay minerals quantification are needed. Not only crystalline layer silicates but also less crystalline iron oxides, amorphous silicates, and carbonates. Any progress in this area would help the understanding of soil behavior with respect to plant nutrients and water supply. In soils with similar mineralogy, percent clay would generally be enough to predict the behavior of K in the soil. For soils with different mineralogical composition the charge characteristics are important to consider.

For vertic soils, 2:1 layer silicates could be of primary importance to understand the behavior of phosphorus. The availability of P is increased with the presence of humic substances which prevent the adsorption and precipitation of this element. The new approach based on direct observation of P-bearing particles using electron microscopy should be tested in mediterranean soils.

Except for  $NH_4^+$  fixation which was studied to some extent, the availability of nitrogen in relation to clay mineralogy is

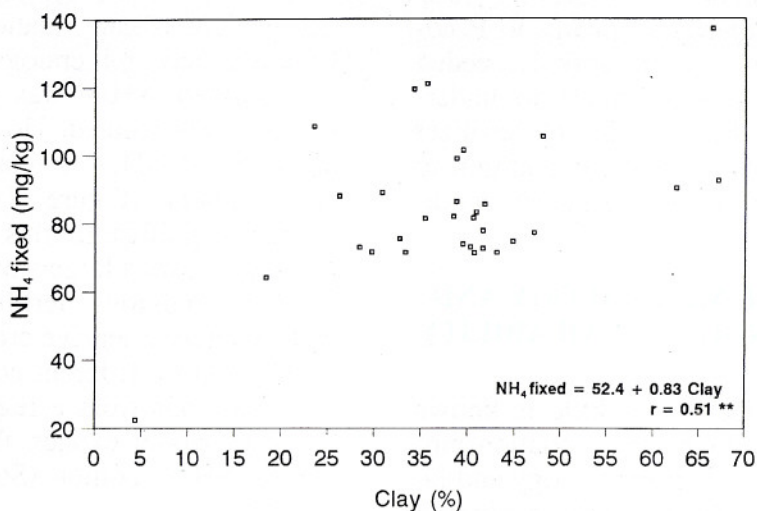


Fig. 7: relationship between native fixed ammonium and clay content for 31 soil samples from Morocco

not clear yet. The use of  $^{15}\text{N}$  in to a good characterization of soil clay mineralogy is necessary to investigate N availability-mineralogy relationships in different soil types under diverse ecological conditions.

## REFERENCES

- Ait Houssa, A. 1989.** Etude du potassium dans divers types de sols des systèmes de cultures au Maroc. Doctorat es-Sciences Agron., IAV Hassan II, Rabat, Morocco.
- Badraoui, M. 1988.** Mineralogy and potassium availability in soils from the Chaouia and Gharb regions of northwestern Morocco. PhD dissertation, Univ. of Minnesota, St. Paul, (Dissertation abstract 89-07368).
- Badraoui, M. and Bloom, P.R. 1990.** Iron-rich high-charge beidellite in Vertisols and Mollisols of High Chaouia region of Morocco. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 54:267-274.
- Badraoui, M., Agbani, M., Merzouk, A., Bloom, P.R., Bouabid, R., Soudi, B., Mimouni, A., and Bouchaara, S. 1992.** Chemistry and mineralogy of potassium in Moroccan soils: Implications for fixation and release. Pages 16-27 In J. Ryan and A. Matar eds. Fertilizer use efficiency under rain-fed agriculture in west Asia and north Africa, Proc. fourth regional workshop 5-10 May 1991, Agadir, Morocco, ICARDA, Aleppo, Syria.
- Badraoui, M., Bouaziz, A., Kabbassi, M. 1993.** Les sols des Doukkala: contraintes et potentialités pour une céréaliculture intensive. DPV, MAMVA, Morocco, 62p.
- Bajwa, M.I. 1983.** Soil clay mineralogy in relation to fertility management: effect of clay mineral composition on potassium fixation under conditions of upland rice soils. Pages 1-14 In Potash Rev. Subj.4, 77th. Suite, IPI, Bern, Switzerland.
- Bennani, F.M., Badraoui, M., Mikou, M. 1993.** Evolution of mono-
- calcium phosphate monohydrate in soil suspensions containing humic substances, iron, and aluminum ions. *Homme Terre Eaux Rev.* 91:51-56, ANAFID, Morocco.
- Bouabid, R., Badraoui, M., Bloom, P.R. 1991.** Potassium fixation and charge characteristics of soil clays. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 55:1493-1498.
- Burford, J.R. and Sahrawat, K.L. 1989.** Nitrogen availability in SAT soils: Environment effects on soil processes. Pages 53-60 In C.B. Christianson ed., *Soil Fertility and Fertilizer Management in Semi-Arid Tropical India*. Proc. Colloq. ICRISAT October 10-11, Patancheru, India.
- Chen, C.C. 1985.** Ammonium availability as influenced by clay minerals in Texas rice-producing soils. PhD Dissertation, Texas A&M Univ., Texas, USA.
- Ejbari, O. 1991.** Contribution à l'étude du potentiel de minéralisation et des indices de disponibilité de l'azote en sols marocains. MSc. thesis, IAV Hassan II, Rabat, Morocco.
- Feigin, A. and D.H. Yaalon. 1974.** Non-exchangeable ammonium in soils of Israel and its relation to clay and parent materials. *Journal of Soil Science*, 25:384-397.
- Felus, A. 1995.** Caractérisation et appréciation de la fertilité des sols de quelques propriétés de la SO.DE.A. dans les zones de Rommani, Kenitra et Sidi Slirrane. MSc. thesis, IAV Hassan II, Rabat, Morocco
- Gaines, G.L. and Thomas, H.C. 1953.** Adsorption studies on clay minerals. II: A formulation of the thermodynamics of exchange adsorption. *J. Chem. Phys.*, 21:714-718.
- Hinsinger, P., Jaillard, B., and Duffey, J.E. 1992.** Rapid weathering of a trioctahedral mica by the roots of ryegrass. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 56:977-982.
- Matar, A., Torrent, J., and Ryan J. 1992.** Soil and fertilizer phosphorus and crop responses in the dryland Mediterranean zone. *Advances in Soil Science*, 18:81-146.
- Moughli, L., Westfall, D.G., Boukhal, A. 1992.** Soil phosphorus adsorption and evaluation of soil-phosphorus buffering capacity indices. Pages 28-38 In J. Ryan and A. Matar eds., *Fertilizer use efficiency under rainfed agriculture in west Asia and north Africa*, Proc. fourth regional workshop, May 5-10, 1991, Agadir, Morocco, ICARDA, Aleppo, Syria.
- Moujahid, Y. 1993.** Mineralogie des argiles et échange K-Ca dans les vertisols du Maroc: incidences sur la fertilité potassique des sols. MSc. thesis, Univ. Mohammed V, Faculty of Sciences, Rabat, Morocco.
- Nommik, H. and K. Vahtras. 1982.** Reoension and fixation of ammonium and ammonia in soils. Pages 123-171 In F.J. Soeuvson ed., *Nitrogen in Agricultural Soils*. Agronomy 22..
- Quemener, J. 1986.** Les états du potassium dans le sol et conséquences sur l'alimentation des plantes. *Potash Rev.* IPI ed., Bern, Switzerland.
- Rodier, C. and M. Rohert. 1995.** A new approach to phosphorus speciation in soils. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 321 Série IIa. (in press).
- Ryan, J., D. Curtin, and M.A. Cheema. 1985a.** Significance of iron oxides and calcium carbonate particle size in phosphate sorption by calcareous soils. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 49:74-76.
- Ryan, J., H.M. Hasan, M. Baasiri, and H.S. Tabbara. 1985b.** Availability and transforonation of applied phosphorus in calcareous Lebanese soils. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 49: 1215-1220.
- Sahrawat, K.L. 1995.** Fixed ammonium and carbon-nitrogen ratios of some semi-arid tropical Indian soils. *Geoderma* 68:219-224.
- Soltanpour, P.N., M. El Gharous, A. Azaoui, and M. Abdel Moumen. 1988.** Nitrogen and phosphorus soil test calibration studies in the Cbaouia region of Morocco. Pages 67-81 In A. Matar, P.N. Soltanpour, and A. Choui-