

SEPTIEME REUNION DU GROUPE DE REFLEXION
SUR L'ETUDE DE LA SOLUTION DU SOL
EN RELATION AVEC L'ALIMENTATION DES PLANTES
(GRESSAP)

ORSTOM Montpellier - 15 septembre 1994

**COMPTE RENDU
DE LA SEPTIEME REUNION DU GROUPE DE REFLEXION
SUR L'ETUDE DE LA SOLUTION DU SOL
EN RELATION AVEC L'ALIMENTATION DES PLANTES**

(Centre ORSTOM de Montpellier - 15 septembre 1994)

La septième réunion du GRESSAP a rassemblé 42 participants (ORSTOM : 20, INRA : 9, CNRS/CPB : 5, CIRAD : 4, divers : 4, voir liste en annexe). L'ordre du jour de cette réunion comportait quatre points :

- 1 - Activité du groupe et présentation de la journée.
- 2 - Session consacrée au thème "relation sol - racines".
- 3 - Session "tribune libre".
- 4 - Questions diverses et objectifs du groupe pour 1995.

1 - Rapport sur l'activité du groupe depuis la dernière réunion et présentation de la journée.

J.F. VIZIER rappelle que l'objectif du groupe est, depuis sa création en 1988, de faciliter l'échange d'informations sur les recherches se rapportant à la solution du sol et l'alimentation hydrique et minérale des plantes. Cet échange s'effectue principalement à l'occasion d'une réunion annuelle qui se tient habituellement au cours de la première quinzaine de septembre.

L'évolution du groupe, aussi bien sur le plan des participants (équipes suivant assez fidèlement ces réunions) que sur celui des sujets abordés (plus grande prise en compte du rôle de la plante sur la composition de la solution du sol), avait incité B. JAILLARD et J.F. VIZIER à proposer pour cette année, une journée au cours de laquelle les présentations de travaux, achevés ou en cours, pourraient se regrouper en deux sessions : l'une, consacrée à un thème, l'autre conservant la forme de "tribune libre" des années précédentes.

Après avoir fait part aux participants des courriers de G. AUBERT, C. CHEVERRY, J.L. CHOTTE et P. MOUTONNET qui s'excusent de ne pas pouvoir assister à cette réunion, J.F. VIZIER propose que les deux sessions annoncées soient successivement présidées par B. JAILLARD et R. POSS, co-animateurs de ce groupe.

2 - Session consacrée au thème "relation sol - racines".

Cette session, présidée par B. JAILLARD, est ouverte par un exposé de F. TARDIEU, directeur du Laboratoire d'écophysologie de l'INRA de Montpellier : "Comment analyser les relations sol - plantes ?"

Trois points essentiels concernant les relations sol - plante ont été développés :

- concernant le développement de la plante, le sol doit répondre à la demande climatique. Le système racinaire doit assurer l'alimentation hydrique et minérale des plantes même dans des conditions "extrêmes", d'où le "surdimensionnement" de ce système par rapport aux besoins de la plante.

- importance de la distance que doit parcourir l'eau et les éléments minéraux présents dans le sol pour accéder aux racines, d'où l'intérêt de connaître la densité des racines et surtout leur répartition.

- les racines sont formées de photosynthétats provenant des parties aériennes de la plante ; en effet, si l'eau et les éléments minéraux sont prélevés par le système racinaire, le carbone est assimilé par les feuilles en fonction du rayonnement intercepté. La plante forme une unité dont chaque partie intervient dans les mécanismes de croissance. Si un stress affecte les parties aériennes, il affecte aussi le système racinaire ; si une partie du système racinaire est affectée par une contrainte, c'est le développement de toute la plante qui en est affectée.

Quatre communications ont été présentées au cours de cette session. Les deux premières se rapportaient aux modifications de la disponibilité du phosphore minéral

au contact des racines. La première, présentée par E. MIGNARD, met en évidence le rôle favorable de l'endomycorhization des racines sur la nutrition phosphatée des plantes. Les mycorhizes, par la taille des hyphes et l'accroissement du volume de sol prospecté, augmentent les possibilités de prélèvement d'éléments minéraux du sol par les plantes. Mais il apparaît également des modifications physico-chimiques au voisinage des racines mycorhizées et en particulier une acidification qui, par dissolution de formes insolubles, améliore la nutrition phosphatée des plantes. La deuxième communication, présentée par P. HINSINGER, porte également sur les modifications physico-chimiques de la solution du sol au contact des racines de certaines plantes. Ces modifications, dues en particulier à l'excrétion de protons par les racines, facilitent la dissolution des roches phosphatées. Ces recherches ont été menées en Australie où, pour des raisons économiques ou de préservation de l'environnement, il est envisagé d'utiliser des roches phosphatées moins solubles que les superphosphates. La troisième communication, présentée par R. POSS, concerne aussi l'Australie. Dans la région du sud-est, grande productrice de blé, l'acidité des sols est un problème préoccupant. L'établissement d'un bilan annuel de protons dans le sol a été tenté sur des essais dans lesquels l'azote est apporté au sol sous forme ammoniacale ou d'urée. En surface, la libération de protons intervenant lors de la production de nitrate n'est pas compensée par l'activité racinaire (excrétion d'anions consécutive à l'absorption des nitrates). En profondeur par contre, l'activité racinaire se traduit par une addition d'alcalinité, le nitrate absorbé par les racines s'étant formé en surface. Dans ces essais, il a été noté que les nitrates sont faiblement lixiviés. La quatrième communication, présentée par M.C. LARRE LARROUY en l'absence des auteurs J.L. CHOTTE, J.Y. LAURENT et J.P. ROSSI, se rapporte à un dispositif permettant de séparer les racines contenues dans de grands volumes de sol. Il s'agit d'un dispositif qui s'inspire d'appareillages existants mais qui, en traitant de grands volumes de sol, permet de mieux évaluer la quantité de racines présente dans un horizon. Le dispositif et le protocole mis au point s'avèrent efficaces pour séparer les racines de deux types de sol dans lesquels une telle séparation est pourtant délicate (vertisols, andosols).

3 - Session "tribune libre"

Cette session présidée par R. POSS comporte deux communications. La première, présentée par B. GARCIA, porte sur les problèmes que pose la caractérisation de "l'ambiance physico-chimique" d'un milieu et, plus particulièrement du degré d'anoxie d'eaux de nappes ou de solutions de sols. Cette caractérisation peut se faire par des dosages d'oxygène dissous, mais plus facilement par des mesures couplées de pH et de potentiel d'oxydoréduction. Les résultats de telles mesures peuvent faire l'objet d'un traitement statistique pour mettre en évidence les variations de l'anoxie dans le temps et l'espace, ou d'un traitement thermodynamique pour envisager les processus de transformation susceptibles de se produire dans les milieux étudiés. Dans deux zones étudiées en région méditerranéenne, l'état d'aération des eaux dépend de leur circulation, mais aussi de la présence de matière organique ou d'oxyde. La deuxième communication, présentée par J.A. PETARD, revient sur des problèmes de déséquilibres minéraux observés dans certains sols et leurs corrections, déjà abordés lors de précédentes réunions du groupe. Ces déséquilibres existent dans des vertisols de Nouvelle Calédonie où la garniture cationique du complexe d'échange peut présenter un rapport Ca/Mg inférieur à 0,1. L'apport de gypse permet de corriger ce déséquilibre et se révéler favorable au développement de la culture du maïs, à condition que le drainage des sols soit suffisant pour éliminer par lixiviation le sulfate de magnésium formé.

4 - Questions diverses et objectifs du groupe pour 1995.

Les animateurs du groupe B. JAILLARD, R. POSS et J.F. VIZIER tirent les enseignements de cette journée.

Sur le plan de l'organisation de la réunion, en raison du nombre croissant de participants, il sera demandé aux personnes recevant l'appel à communications (en général au cours du mois d'avril), de nous indiquer si elles pensent participer à la réunion et le nombre approximatif de personnes susceptibles de les accompagner (choix de la salle).

Pour la réalisation du compte rendu, il est demandé aux personnes ayant présenté une communication d'adresser aux animateurs un résumé "étouffé" de leur travail. L'objectif recherché étant de permettre aux personnes n'ayant pu assister à cette réunion d'avoir une information plus complète sur cette journée, par le compte rendu qui en est fait.

Pour l'année prochaine, la formule de la journée comportant deux sessions, dont l'une à thème, pourrait être reconduite. Le thème sera choisi ultérieurement parmi les cinq propositions suivantes :

- La solution du sol : méthodes d'extraction, problème d'échantillonnage, biais méthodologiques et représentativité.
- L'acidité des sols : notion d'alcalinité d'un sol, calcul du bilan de protons à différentes échelles de temps et effets de la végétation.
- Modélisation des transferts d'eau et de solutés dans les sols : échelles d'investigation, structure des modèles, problèmes de validation et limites de l'approche numérique.
- Structure et organisation des sols : caractérisation, évolution, relations avec les propriétés physico-chimiques et l'activité biologique des sols.
- La matière organique des sols : définition, caractérisation, rôle sur le fonctionnement hydrique et physico-chimique des sols.

Les deux derniers thèmes paraissent un peu éloignés des préoccupations du GRESSAP ; d'autres propositions peuvent encore être faites.

L'objectif du groupe reste, pour le moment, de faciliter l'échange d'informations sur les recherches évoquées précédemment. Mais il est évident que la participation assez fidèle de plusieurs équipes aux réunions annuelles, faciliterait la construction d'un réseau de laboratoires ayant des préoccupations communes. Ces laboratoires seraient alors susceptibles de se rassembler autour de projets ou de programmes communs.

B.J., R.P., J.F.V., Montpellier, octobre 1994

RESUME DES COMMUNICATIONS

- Comment aborder les relations sol - plantes ? (F. TARDIEU, INRA Montpellier)
- Effet de l'endomycorhization sur la nutrition phosphatée du poireau (*Allium porrum*) ; mise en évidence d'une action chimique des plantes mycorhizées (L. RIGOU* et E. MIGNARD** - * INAO DDAF Martinique, ** INRA Montpellier).
- Dissolution d'une roche phosphatée apatitique dans la rhizosphère de diverses espèces cultivées (P. HINSINGER INRA Montpellier/University of Western Australia).
- Assimilation du nitrate et bilan de protons sous blé d'hiver en Australie (R. POSS*, F. DUNIN** et W. REYENGA** - * ORSTOM Montpellier, ** CSIRO, Canberra).
- Séparation quantitative des racines de grands échantillons de sol par pneumo-hydro-élutriation (J.L. CHOTTE, J.Y. LAURENT et J.P. ROSSI, ORSTOM, Fort de France).
- Caractérisation de l'anoxie des eaux de nappes et de solutions de sols. Approche méthodologique et application à deux zones méditerranéennes. (B. GARCIA*, A. LAIFA**, R. DJAMAI**, O. ROBOLZI* et V. VALLES* - *INRA, Montfavet, ** ISN Université d'Annaba).
- Correction du rapport Mg/Ca d'un vertisol hypermagnésien acide. (J.A. PETARD*, B. BONZON**, J. KOMOR** - * ORSTOM Montpellier, ** ORSTOM Nouméa).

Comment aborder les relations sol - plantes ?

François Tardieu

INRA, Ecophysiologie des Plantes sous Stress Environnementaux 34060 Montpellier

Cet exposé introductif, qui n'avait pas de prétention à l'exhaustivité, était ordonné autour de trois idées directrices.

1. Les besoins de la plante sont essentiellement déterminés par les caractéristiques du climat. L'offre du sol ("fertilité du sol") ne peut donc être analysée que dans un contexte climatique précis, variable au cours du temps. Pour l'eau, en transit dans la plante et pour laquelle le "pouvoir tampon" de la plante est de quelques heures, les besoins peuvent varier de 1 à 10 entre jours consécutifs. La variabilité de la demande est essentiellement liée à celle du rayonnement solaire, mais aussi à l'état de la surface foliaire le jour considéré. Pour les éléments minéraux, la demande est liée à la croissance en biomasse, elle même liée au rayonnement intercepté et à la disponibilité de l'eau et des éléments minéraux.

Il existe donc des "boucles de contrôle" à plusieurs échelles de temps entre l'offre du sol, la demande liée au climat, la croissance et l'état de la plante. Des plantes soumises au déficit hydrique peuvent ainsi être dans un état hydrique similaire à celui de plantes bien alimentées, via une réduction de la surface foliaire ou de l'ouverture stomatique. Les racines jouent très probablement un rôle clé d'informateur pour les parties aériennes, et participent ainsi à ces boucles de contrôle^{1,2}.

2. Les "critères de qualité" du système racinaire ont évolué en même temps que les modèles de transfert d'eau et d'éléments minéraux. Pour l'eau et l'azote, la distance à parcourir entre chaque point du sol et la racine la plus proche est une caractéristique essentielle. Si la disposition spatiale des racines se rapproche d'une disposition régulière, cette distance peut être calculée à partir de la longueur de racines. Si au contraire des obstacles structuraux perturbent la disposition des racines (obstacles liés au tassement du sol ou à caractères permanents de celui-ci) une approche cartographique fournit des informations essentielles. C'est au travers de cette distribution que nous proposons une analyse de l'effet du tassement du sol^{2,3}.

3. Le système racinaire, source d'eau et d'éléments minéraux pour la plante, est aussi puits pour le carbone et les acides aminés. En particulier, l'allongement racinaire journalier est étroitement lié au rayonnement intercepté la veille par la plante⁴. Dans ces conditions, il est logique que des plantes de petite taille aient des systèmes racinaires peu développés. La taille du système racinaire n'est pas "explicative" de la croissance foliaire.

C'est donc au travers de modèles de transfert et de croissance que les relations racine - partie aériennes peuvent être analysées. Dans un système comprenant de nombreuses boucles de contrôle, des relations expérimentales entre caractéristiques du sol, des racines et des parties aériennes doivent être analysées avec précaution.

¹ Davies, W.J., Tardieu, F., Trejo, C.L. (1994) How do chemical signals work in droughted plants? *Plant Physiol*, 104, 309-314.

² Tardieu F, Zhang J and Davies W J (1992) What information is conveyed by an ABA signal from maize roots in drying field soil? *Plant, Cell and Environment*, 15,185-191.

³ Tardieu, F. (1994) Growth and functioning of roots or root systems subjected to soil compaction. Towards a system with multiple signalling? *Soil & Tillage Res.*,30, 217-283.

⁴ Aguirrezabal, L.A.N., Deléens, E., Tardieu, F. (1994) Root elongation rate is accounted for by intercepted PFD and source-sink relations in field and laboratory-grown sunflower. *Plant, Cell and Environment*, 17, 443-450.

Effet de la mycorhization sur la nutrition phosphatée du poireau (*Allium porrum*). Mise en évidence d'une action chimique des plantes mycorhizées

Laurent RIGOU (1) & Éric MIGNARD (2)

(1)VAT CODERUM-INAO DDAF Martinique

(2)UFR de Science du Sol INRA, 2 pl. Viala F34060 Montpellier Cedex 1

Le phosphore est un élément peu mobile dans le sol et peu disponible pour les plantes. Il est reconnu que la mycorhization améliore la nutrition phosphatée des plantes.

La plupart des auteurs supposent que cet effet résulte principalement d'une utilisation plus efficace du phosphore soluble ou susceptible de passer facilement en solution, du fait (i) d'une augmentation du volume prospecté par le couple plante-champignon grâce au réseau d'hyphes mycélien et (ii) du faible diamètre des hyphes mycéliens qui pourraient ainsi prospecter des zones inaccessibles aux racines.

D'autres auteurs supposent que l'association plante-mycorhize possède la capacité de modifier la biodisponibilité du phosphore d'un minéral phosphaté. Ainsi nous avons montré expérimentalement que dans certaines conditions de milieu les racines mycorhizées présentaient des capacités d'acidification plus importantes que les racines non mycorhizées. Cette acidification résulte à la fois d'une excrétion de protons due au déséquilibre de la balance cation/anion absorbés, d'une excrétion de CO₂ respiratoire, et d'une excrétion d'acides organiques principalement émis par les champignons.

Nous avons donc mis au point un dispositif afin d'étudier l'effet de la mycorhization sur le prélèvement de phosphore provenant d'un minéral phosphaté peu soluble par le poireau.

Le dispositif (voir figure) inspiré de Hinsinger *et al.*(1992) et Ruiz (1993) permet un contact chimique étroit entre une racine modèle mycorhizée ou non et un minéral de synthèse placés dans des conditions physico-chimiques contrôlées.

Les plantes sont cultivées 17 jours, deux traitements sont appliqués : soit (i) culture des poireaux en solution nutritive complète contenant 10 µM ou 50 µM de phosphore et renouvelée en flux continu, soit (ii) culture de poireaux en solution nutritive dépourvue de phosphore et renouvelée en flux continu, le phosphore étant alors fourni par une phase minérale d'hydroxyapatite (HA) de synthèse mise en contact avec les racines à travers la toile formant le fond du dispositif de culture, les plantes sont récoltés à différents intervalles, la masse sèche et la teneur en phosphore sont mesurées.

Les valeurs d'exportation en phosphore par la plante sont données en fonction de la biomasse sèche des poireaux récoltés pour les différents traitements.

Ces exportations sont linéairement corrélées aux valeurs des biomasses sèches récoltées, donc selon des droites paramétrées par leur pente (a sur les courbes) et leur coefficient de corrélation linéaire (r sur les courbes).

Dans les conditions de milieu imposées et sous une pCO₂ atmosphérique, l'hydroxyapatite maintient à l'équilibre une concentration en phosphore en solution de 10 ± 4 µM.

Or on constate que les poireaux tant mycorhizés que non mycorhizés maintiennent en présence de minéral phosphaté une concentration plus importante que celle donnée par la solubilité du minérale. Cette valeur est toutefois plus important pour les poireaux mycorhizés.

Ces résultats montrent que les racines sont capables d'exercer une action sur le milieu, dont la conséquence est une augmentation sensible de la solubilité du minéral, cette action est beaucoup plus forte pour les poireaux mycorhizés. Le dispositif expérimental empêche (toile du fond du dispositif de maille 0,2 µm) tout passage des hyphes dans la gélose contenant le minéral phosphaté. L'action exercée ne peut donc pas être due à une augmentation du volume prospecté par le réseau mycélien : elle est donc purement chimique.

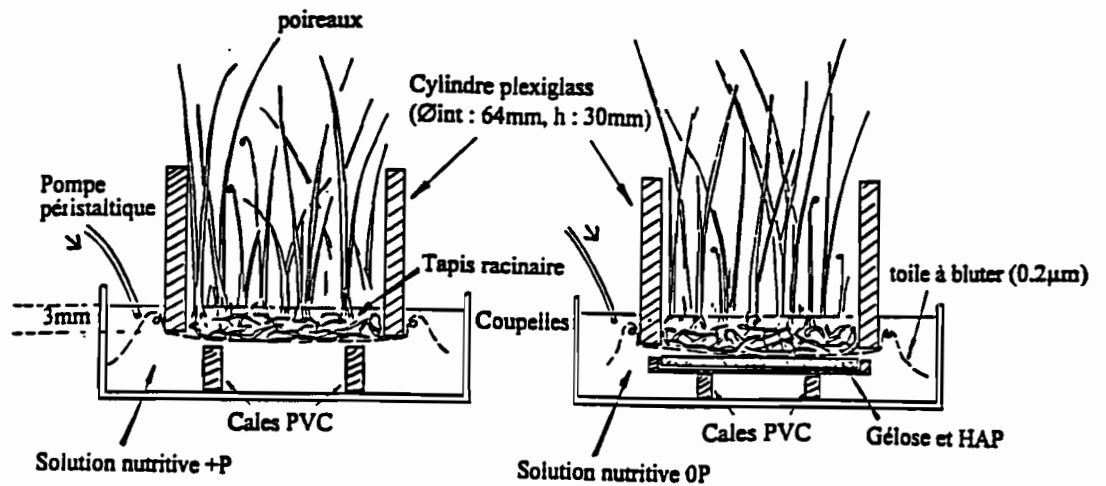
En conclusion nous pouvons dire suite aux travaux expérimentaux réalisés que l'endomycorhization du poireau par une souche de *Glomus* récoltée sur des poireaux sauvages provenant d'un sol de garrigue calcaire est susceptible de modifier la biodisponibilité du phosphore minéral en altérant les conditions physico-chimiques qui règnent dans leur rhizosphère, toutefois ces résultats n'ont pas été retrouvés lors d'expériences utilisant d'autres souches de champignons endomycorhiziens.

Bibliographie :

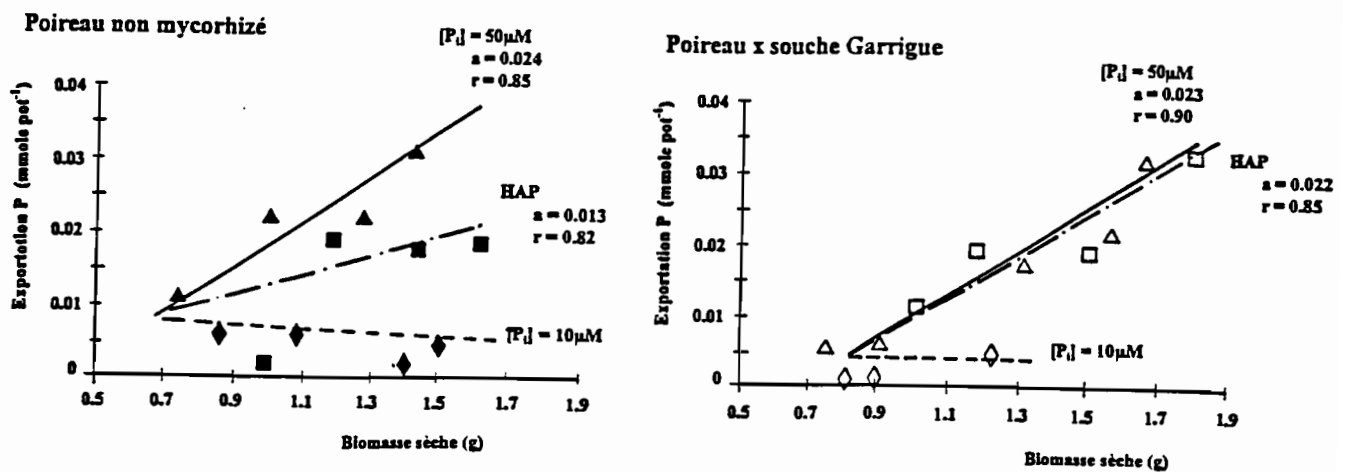
Hinsinger P., Jaillard B. and Dufey JE., 1992 : Rapid weathering of a trioctahedral mica by the roots of ryegrass. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 977-982.

Rigou L., 1994 : Influence de la mycorhization sur les conditions physico-chimiques du sol dans la rhizosphère. Conséquences sur la nutrition phosphatée de la plante-hôte. Thèse Doctorat ENSA Montpellier, 92p.

Ruiz L., 1992 : Mobilisation du phosphore des apatites dans la rhizosphère. Rôle de l'excrétion de protons par les racines. Thèse Doctorat, USTL Montpellier, 125p.



Dispositif de culture utilisé pour évaluer l'incidence d'une action chimique de la racine sur la mobilisation du phosphore d'un minéral phosphaté.



Exportations en phosphore (mmole pot⁻¹) en fonction de la biomasse sèche (g) des poireaux mycorhizés (symboles ouverts) et non mycorhizés (symboles noirs) pour différentes solutions de culture : solution 50µM de P_i (▲), solution 10 µM de P_i (◆) et gélose + HAP (■)

DISSOLUTION D'UNE ROCHE PHOSPHATÉE APATITIQUE DANS LA RHIZOSPHÈRE DE DIVERSES ESPÈCES CULTIVÉES

Philippe HINSINGER
INRA Science du Sol Montpellier

Ces recherches ont été réalisées en collaboration avec Prof. R.J. Gilkes, dans le cadre d'un séjour post-doctoral à Perth, en Australie Occidentale, dans le Department of Soil Science and Plant Nutrition de l'University of Western Australia (janvier 1993 à juillet 1994).

L'agriculture australienne est une agriculture extrêmement extensive qui ne peut toutefois faire l'impasse sur la fertilisation phosphatée, comme elle le fait le plus souvent sur la fertilisation potassique, car les sols australiens, notamment en Australie Occidentale, sont parmi les plus pauvres en P au monde. Pour des raisons tant économiques (augmentation du prix des engrais manufacturés type superphosphate) qu'écologiques (eutrophisation des eaux de surface liée à un lessivage du P), il est devenu un enjeu important d'évaluer la possibilité de recourir à des engrais phosphatés à faible valeur ajoutée et peu solubles, tels que les roches phosphatées (RP).

L'objectif de ce travail était d'évaluer l'aptitude de diverses espèces cultivées à influencer la dissolution de RP dans leur rhizosphère, d'en préciser les mécanismes responsables et leur importance. La dissolution d'une RP, phosphate calcique de type apatite, peut être décrite par l'équation (cas simplifié d'une fluorapatite):



Les racines, en prélevant du P ou du Ca et en excréant des protons, sont donc susceptibles de déplacer cet équilibre de dissolution vers la droite. Ces différentes hypothèses ont été testées au travers de cultures réalisées sur un sol modèle constitué d'un sable d'alumine pure (Al_2O_3 contenant P et Ca en trace), mélangé à une RP de Caroline du Nord à deux doses d'application (0,1 et 1 mg P / g de sol). Cette dernière constituait la seule source de P et de Ca pour les plantes qui étaient cultivées dans un dispositif permettant de prélever des échantillons de sol rhizosphérique situés à différentes distances des racines. Trois expériences ont été réalisées à des pH acide, neutre et alcalin, avec diverses espèces et, dans tous les cas, un traitement témoin sans plante permettant d'estimer la dissolution abiotique de RP suite à son incorporation au sol.

En conditions alcalines limitant fortement la dissolution de RP, deux espèces de lupin se sont montrées aptes à induire une dissolution significative de RP dans la rhizosphère, sous l'action des protons excrétés par leur racines. Des résultats analogues ont été obtenus pour du ray-grass cultivé à un pH initialement neutre (cf Figure): au contact des racines, la dissolution a atteint près de 40% des quantités de RP apportées, ainsi que le montre la diminution sévère de la teneur en Ca total dans la rhizosphère. Dans le même temps, une importante diminution de pH y a été enregistrée, suggérant une importante excrétion de protons par les racines de ray-grass. En outre, une importante augmentation du P extractible à NaOH a été observée, suggérant qu'une fraction importante du P dissous sous l'action des racines se retrouvait à l'état de P adsorbé dans la rhizosphère. Ce résultat est conforme aux résultats expérimentaux de Ruiz et Arvieu (GRESSAP 1993) et aux modèles de Nye (1983 et 1984). Ils suggèrent que le prélèvement de P par les racines ne peut être considéré en aucun cas comme le moteur de la dissolution de RP induite par les plantes.

En conditions acides (pH initial de l'ordre de 4), la solubilité d'une RP est très supérieure à sa solubilité en conditions neutres ou alcalines, de sorte qu'une importante dissolution de RP a été mesurée en l'absence de plantes. Néanmoins, certaines espèces comme le colza et le ray-grass se sont révélées aptes à induire une dissolution supplémentaire de RP de même ordre de grandeur, sous l'action propre de leurs racines. Le moteur de la dissolution induite par les racines réside dans l'excrétion de protons pour le ray-grass et dans le prélèvement de Ca pour le colza.

Les plantes sont donc capables d'induire à des degrés divers et selon des processus variés la dissolution de RP sous l'action des modifications chimiques exercées par les racines dans la rhizosphère. Même en situation de sol acide favorisant la dissolution abiotique de RP, la contribution des racines de certaines espèces à la dissolution peut être importante. Il est donc nécessaire de prendre en compte ces processus rhizosphériques pour évaluer de façon pertinente la biodisponibilité du P de roches phosphatées.

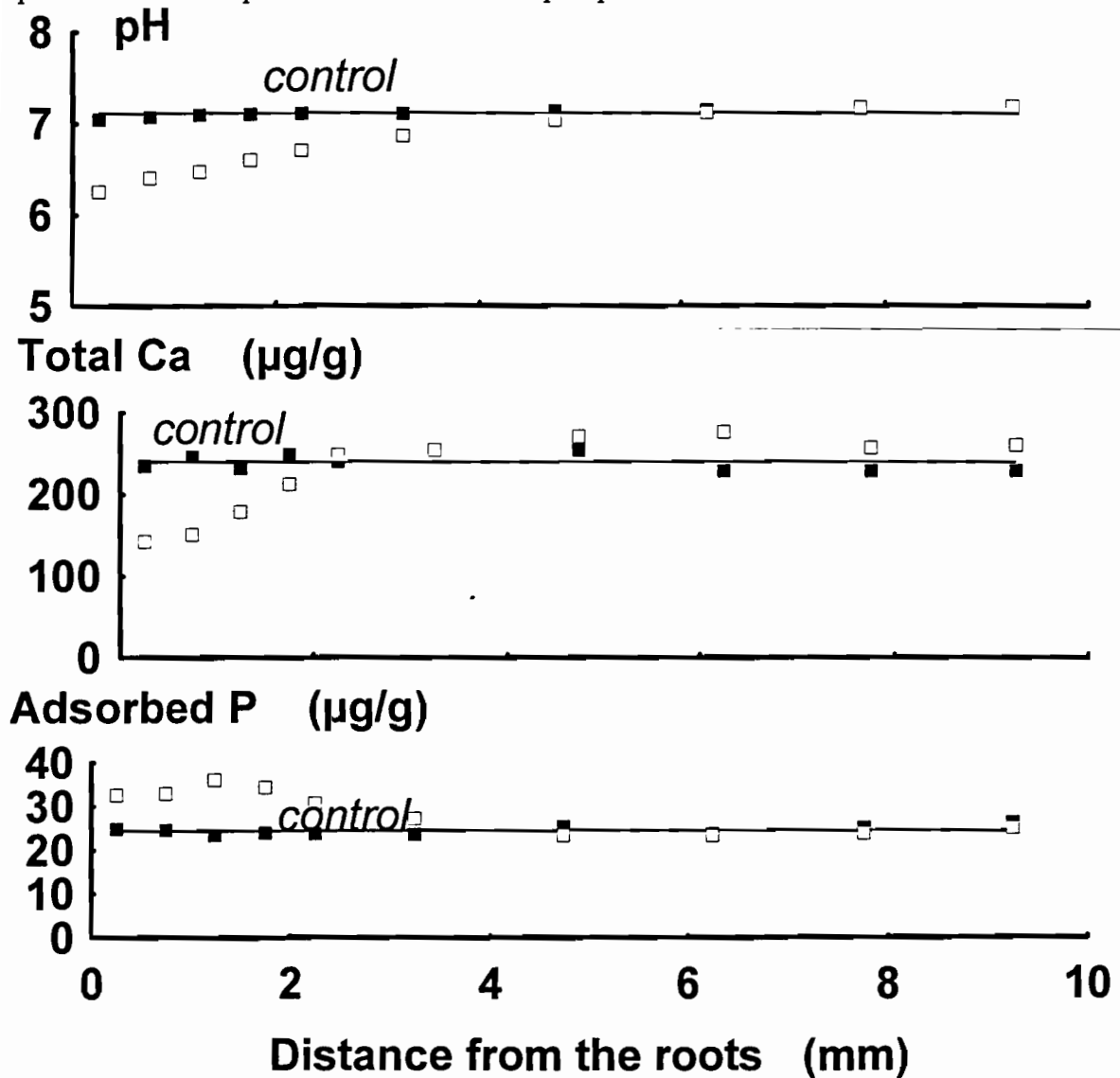


Figure: Modifications des conditions physico-chimiques de la rhizosphère du ray-grass (*Lolium rigidum* L.) cultivé pendant 14 jours sur sable d'alumine avec pour seule source de P et Ca une RP de Caroline du Nord, utilisée à raison de 0,1 mg P / g de sol. Les carrés noirs ont été obtenus dans le traitement témoin sans plante, les blancs en présence de ray-grass.

Assimilation du nitrate et bilan de protons sous blé d'hiver en Australie

Roland POSS*, Frank DUNIN** et Wybe REYENGA**

La ceinture de blé du sud-est de l'Australie est une région semi-aride (300 à 700 mm) dans laquelle est produite la plus grande partie du blé australien. Les ressources en eau y sont limitées et l'acidité des sols est un problème préoccupant (pH CaCl₂ inférieur à 5). La pollution éventuelle de la nappe phréatique par du nitrate d'origine agricole est une question d'autant plus d'actualité que les agriculteurs augmentent leurs apports d'engrais azotés. Par ailleurs la lixiviation du nitrate est considérée comme étant la principale cause de l'acidification des sols. Cet exposé présente les résultats d'une expérimentation conduite sous blé d'hiver afin de quantifier les pertes de nitrate en-dessous de la zone d'extraction racinaire et d'établir un bilan annuel de protons dans le sol.

Les transferts hydriques et minéraux dans le système sol-plante ont été étudiés au cours de l'année 1993. L'étude a porté sur deux parcelles adjacentes de 5 hectares situées sur sol fersiallitique. Une parcelle n'a reçu qu'une fertilisation traditionnelle au semis (17 kg NH₄-N ha⁻¹, 25 kg P ha⁻¹), l'autre a reçu la même fertilisation plus un apport de 140 kg N ha⁻¹ sous forme d'urée à la montaison. Seuls les grains de blé ont été exportés de la parcelle. Les pailles ont été brûlées puis enfouies avant le semis de la culture suivante. L'hiver a été particulièrement pluvieux, avec un drainage en-dessous de 90 cm compris entre 100 et 110 mm (moyenne estimée 40 mm).

La quantification des flux a été effectuée sur une base bimensuelle à la limite des horizons A et B (25 cm) et à la base de la zone racinaire (90 cm). Les flux de drainage ont été calculés à partir de mesures d'évapotranspiration (lysimètre à pesée et rapport de Bowen) et de teneur en eau (étuve à 105°C), à partir de prélèvements gravimétriques effectués jusqu'à 150 cm. La solution du sol a été extraite à l'aide de capteurs en céramique à suction (Soil Moisture et Coinda, construits en Australie) et à diffusion (Tensionic). La teneur en nitrate et en ammonium du sol a été mesurée après extraction avec 2M KCl. La biomasse du blé et la teneur

* ORSTOM UR 24 BP 5045 34 032 Montpellier cedex France

** CSIRO Plant Industry GPO Box 1600 Canberra ACT 2601 Australie

en éléments minéraux a été suivie à l'aide de quatre prélèvements effectués deux fois par mois sur des placettes de 50x50 cm ensuite analysés par fluorescence X et Kjeldahl.

Au moment de l'élongation, presque tout le nitrate du sol formé au cours de l'automne a été prélevé par les racines. Les teneurs en nitrate de la solution du sol à 25 cm sont alors descendues à moins de 2 mg l⁻¹ et ont continué à diminuer ensuite. La lixiviation fut d'environ 30 kg NO₃-N ha⁻¹ en-dessous de 25 cm avant élongation, mais aucune lixiviation ne s'est produite ensuite, malgré un drainage de 40 mm. La lixiviation à 90 cm fut de 4.9 kg ha⁻¹ sur la parcelle non fertilisée et 4.0 kg ha⁻¹ sur la parcelle fertilisée. Bien que l'étude ait été réalisée en année humide, l'apport de nitrate aux nappes phréatiques a donc été faible. Les différents capteurs ont conduit à des évaluations de la lixiviation du nitrate non significativement différentes.

Dans l'horizon 0-25 cm, la minéralisation de la matière organique pour produire le nitrate absorbé par les racines a libéré 3.2 kmol de protons. Lorsque les racines ont absorbé ce nitrate, la différence de charge entre les anions et les cations absorbés a été de 2.2 kmol. Les racines ont donc excrété 2.2 kmol d'anions, hydroxyle ou bicarbonate. Le bilan de la nitrification et de l'activité racinaire est donc une addition de 1 kmol de protons dans cet horizon.

Le nitrate absorbé par les racines dans l'horizon 25-90 cm a principalement été formé dans l'horizon superficiel. Peu de protons ont donc été libérés par minéralisation de la matière organique à ce niveau. L'équilibre des charges indique que 1.5 kmol d'anions ont été libérés en conséquence de l'absorption racinaire. Le bilan de la nitrification et de l'activité racinaire est donc une addition de 1.5 kmol d'alcalinité dans cet horizon.

SÉPARATION QUANTITATIVE DES RACINES DE GRANDS ÉCHANTILLONS DE SOL PAR PNEUMO-HYDRO ELUTRIATION

Chotte J.L.* , Laurent J.Y. et Rossi J.P.

Centre Orstom de Fort de France

Résumé

La masse racinaire représente le paramètre essentiel de nombreuses études agro-pédologiques (e.g. nutrition minérale des plantes, cycle de la matière organique...). La mesure par pesée de la masse de racines séparées puis extraites d'un échantillon de sol est la méthode la plus couramment utilisée. L'apparition d'appareils semi-automatiques de tri des racines permettant d'alléger fortement les procédures de lavage et d'extraction des racines a rendu cette méthode plus performante.

Pour étudier l'importance des racines dans les processus de conservation et/ou de restauration de la fertilité des sols à la Martinique, nous avons adapté un de ces appareils au traitement de grands échantillons (sol >20 kg). L'appareil, d'une hauteur totale de 1,50m, est constitué de tubes en PVC (diamètre = 100 mm). Les racines sont séparées du sol à la base de l'appareil par des jets d'eau sous pression. Elles sont ensuite entraînées verticalement sous l'effet conjugué du courant d'eau et d'un courant de bulles d'air produites par un compresseur. Au sommet de l'appareil, les racines sont entraînées horizontalement pour être recueillies sur une colonne de deux tamis amovibles. Les sables (> 250 µm) qui sédimentent à la base de l'appareil sont évacués en continu.

Les débits d'eau et d'air sont choisis afin d'obtenir des résultats statistiquement égaux (test de la plus petite moyenne significative: PLSD de Fisher) à ceux obtenus par séparation manuelle. L'appareil est conçu afin de traiter 300 g sol . 5 min⁻¹ soit environ 25 kg de sol par jour. Cet appareil a été testé et adapté à diverses situations agro-pédologiques.

Mots clés: Racines, masse, pneumo-hydro elutriation, grands échantillons

Introduction

Le système racinaire d'une plante peut-être caractérisé par de nombreux paramètres (masse, rapport racines vivantes sur racines mortes, longueur et longueur par volume de sol, surface, distance moyenne entre deux racines, architecture et relations racines-sol) dont l'importance dans l'étude de la nutrition minérale et hydrique des plantes et la dynamique de la matière organique des sols n'est plus à démontrer. On peut classer les

* adresse actuelle: Orstom C° CSIRO, Division of Soils, PB N°2, Waite Road, Glen Osmond, SA5064, Australia

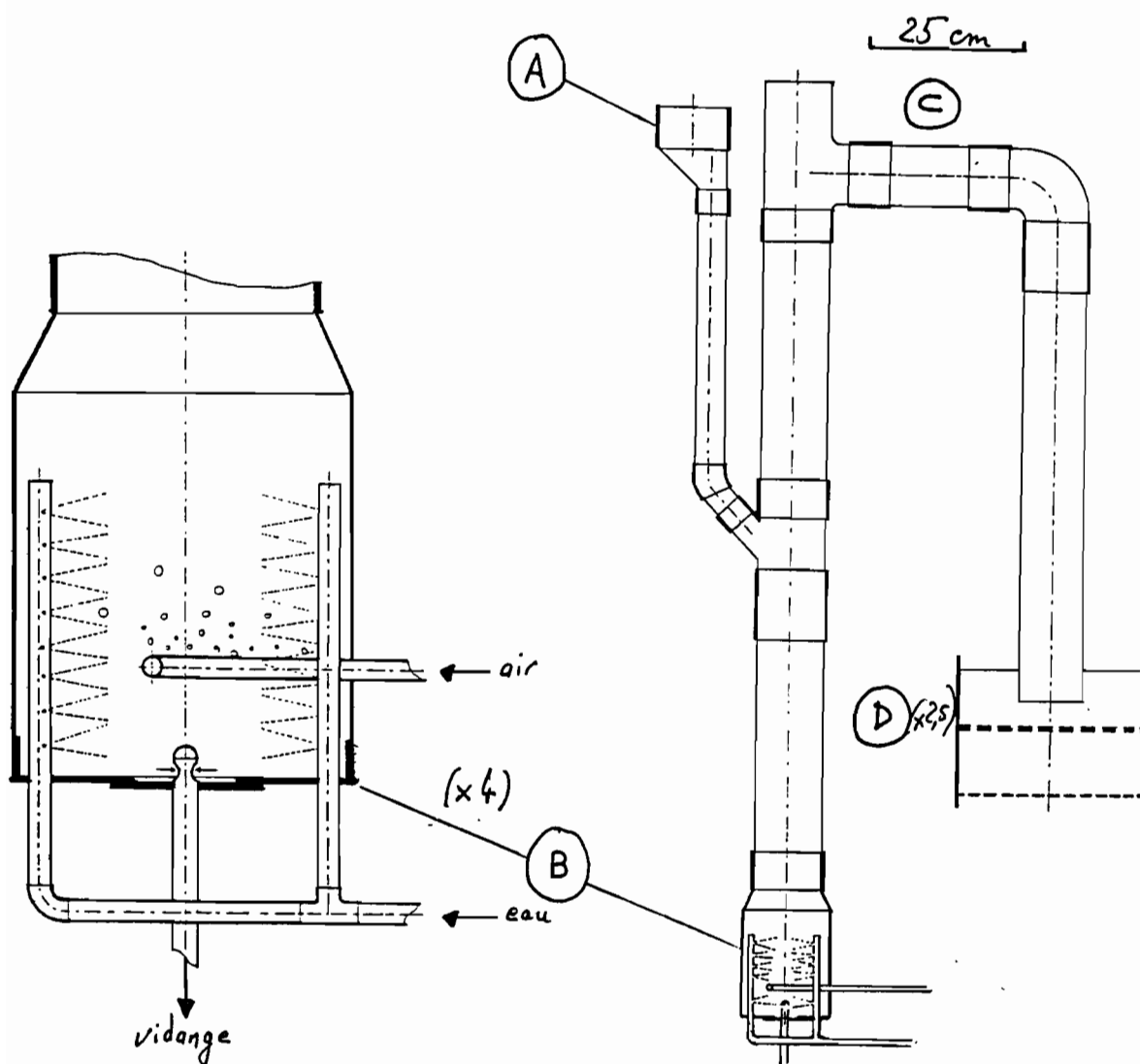
méthodes d'étude du système racinaire en deux catégories: 1) celles qui conservent les relations racines-sol et 2) celles qui ne conservent pas ces relations. Les premières reposent sur l'observation des racines soit sur la face d'un profil recouvert ou non d'une plaque de verre (Pearson and Lund, 1968, Roberts, 1976, Tardieu 1988 a et b) soit au travers d'un tube transparent enfoncé dans le sol (Brown and Upchurch, 1987; Smucker *et al.*, 1987). Parmi les méthodes destructives, la mesure de la masse des racines séparées et triées manuellement d'un prélèvement de sol est celle la plus couramment utilisée. Cette méthode très fiable possède cependant l'inconvénient majeur d'être longue et fastidieuse. Pour réduire les temps de séparation et de tri des appareils semi automatiques ont été conçus (Fehrenbacher and Alexander, 1955; Cahoon and Morton, 1961; Brown and Tilhenius, 1976). Smucker *et al.* (1981) proposent un appareil formé de 9 unités en PVC permettant de séparer quantitativement les racines de 9 échantillons de sol de 125 g chacun en moins de 10 minutes.

Afin d'étudier l'importance des racines dans les processus de conservation et/ou de restauration de la fertilité des sols à la Martinique nous avons adapté cet appareil au traitement en continu de grands échantillons de sol (> 20 kg). Cette communication décrit l'appareil et son adaptation à deux situations agro-pédologiques contrastées: un vertisol sous prairie et un andosol sous canne à sucre.

Description de l'appareil

L'appareil, d'une hauteur totale de 1,50 m, est formé par l'assemblage de tubes en PVC (diamètre interne = 100 mm) de façon à pouvoir être très facilement démonté pour son lavage. L'échantillon de sol est introduit dans l'appareil par la grande ouverture d'un réducteur 100mm/40mm constituant la chambre d'introduction (Figure 1.A.). Il tombe ensuite dans la chambre de dispersion (Figure 1.B.). Cette partie de l'appareil a un diamètre de 130 mm et une hauteur de 150 mm. A ce niveau, le sol est dispersé sous l'action de deux séries de huit jets d'eau sous pression produit par 8 trous percés (diamètre = 500 μ m) dans deux tubes en cuivre verticaux et diamétralement opposés. La pression de l'eau fonction du débit est ajustée par un robinet. Les racines séparées sont alors entraînées hors de la chambre de dispersion sous l'effet conjugué du courant d'eau et d'un courant de bulles d'air produites par 10 trous (diamètre = 500 μ m) percés dans un tube en plastic placé horizontalement dans le tiers inférieur de la chambre de dispersion. L'air sous pression produit par un compresseur est contrôlé par un débitmètre. Les particules minérales qui sédimentent à la base de l'appareil peuvent être évacuées en continu par un orifice de vidange. Les racines entraînées au sommet de l'appareil (Figure 1.C) sont ensuite évacuées horizontalement vers la chambre de récupération où elles tombent sur une colonne de deux tamis amovibles (Figure 1.D).

Figure 1: Schéma de l'appareil



Étalonnage de l'appareil

L'étalonnage de l'appareil a porté sur les débits d'air et d'eau. Les valeurs testées sont:

- débit d'eau (en litre par minute): 2, 3, 4, 6, 8 et 11
- débit d'air (unité arbitraire lue sur le débitmètre): 10, 20, 40, 70, 100, 150 et 200.

Il y a 42 traitements au total et pour chaque traitement trois répétitions. La colonne de tamis est constituée d'un premier tamis de 1000 μm et d'un second tamis de 200 μm . Le cycle de lavage fixé à 5 minutes est suffisamment long pour ne pas interférer dans l'étalonnage.

Le sol utilisé est un vertisol (Sainte-Anne, Martinique) depuis deux ans sous prairie à pangola (*Digitaria decumbens*). Les racines de cette plante ont un diamètre maximum de 500 μm . On prélève environ 100 kg de sol de la couche 0-10 cm. Le sol est séché à l'air, tamisé à 4 mm, homogénéisé puis quarté (300 g). Pour les sols argileux, une étape préliminaire de dispersion du sol est indispensable car l'énergie mécanique produite dans la chambre de dispersion n'est pas suffisante. L'aliquote prélevé est dispersé durant une nuit dans une solution de NaOH 0,10N à pH. L'échantillon est ensuite soit traité par la machine soit traité manuellement. Le poids sec à 80 °C et la perte au feu à 950°C de la fraction 200-1000 μm obtenue automatiquement par la machine sont comparés (test de la plus petite différence significative: PLSD de Fisher) au poids sec et à la perte au feu de la même fraction isolée manuellement.

Résultats

Etalonnage

L'analyse statistique des résultats n'est pas détaillée (Chotte *et al.* en préparation). Cette analyse montre que le débit d'eau de 3 litres par minute associé aux débits d'air de 20, 40, 70, 100 et 150 ainsi que le débit d'eau de 2 litres par minute associé aux débits d'air de 100 et 200 donnent des résultats statistiquement non différents de ceux obtenus manuellement. Cette large gamme de débits utilisables souligne la souplesse de l'appareil. Le couple débit d'eau-débit d'air retenu est 3-70 afin de ne pas travailler aux valeurs limites de l'appareil.

Exemple 1: vertisol sous prairie

Les racines de pangola (*Digitaria decumbens*) participent activement à l'accroissement du stock organique de l'horizon de surface de vertisol (Chotte, 1988). Afin de préciser la répartition verticale des racines, nous avons mesuré la masse racinaire d'une prairie de 11 ans jusqu'à la roche mère (0-100 cm).

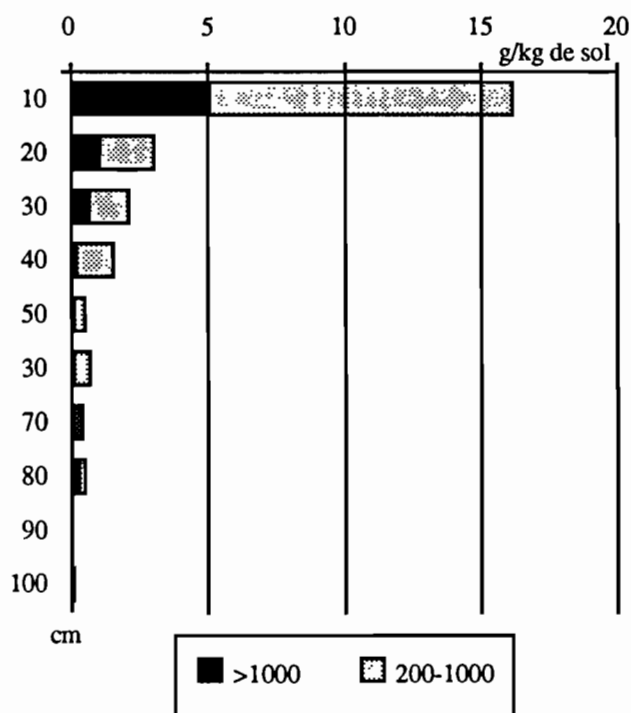
Pour chaque couche de 10 cm d'épaisseur, nous avons prélevé 3 cubes de 10 cm X 10 cm X 10 cm soit environ 5 kg de sol sec par couche et 50 kg de sol au total. Les échantillons sont dispersés dans une solution de soude 0,10 N à pH 10. Les 50 kg de sol sont traités en 2 jours de travail. Les racines sont séparées en deux classes: celles récupérées sur le tamis de 1000 μm (notées >1000) et celles sur le tamis de 200 μm (notées 200-1000).

La masse totale des racines (>1000 + 200-1000) sur l'ensemble du profil est de 25,712 g.kg^{-1} de sol. Les dix premiers centimètres de sol contiennent environ 16 g.kg^{-1} de sol (Figure 2) soit 62 % de la masse totale. On trouve cependant encore des racines dans les horizons de profondeur (i.e. masse >1000 + 200-1000 dans la couche 90-100 = 0,171

g.kg⁻¹ de sol). Les racines recueillies sur le tamis de 200 µm (200-1000) sont les plus abondantes.

Figure 2: Masse racinaire (en g/kg de sol)

Vertisol sous prairie de 11 ans



Exemple 2: andosol sous canne à sucre

Ce deuxième exemple fait parti d'un projet intitulé "Contribution de la faune du sol au maintien de la fertilité des andosols en zone tropicale humide (Martinique)" (responsable V. Eschenbrenner) financé par le Ministère de l'Environnement (programme SOFT). Ses objectifs sont de déterminer l'importance de la faune du sol sur les propriétés des andosols développés sur cendres et ponces (Sainte-Marie, commune du nord est de la Martinique). Au total huit situations agronomiques sont étudiées. Pour chacune d'entre-elle nous avons prélevé par couche de 10 cm d'épaisseur des volumes de sol de 20 cm x 20 cm x 10 cm jusqu'à 2 m de profondeur soit environ 3 kg de sol par couche et 60 kg de sol au total.

Pour ces situations sur andosol, le principal problème n'est plus l'abondance des argiles et leur dispersion mais la présence de ponces plus ou moins altérées dont la densité est proche de celle des débris racinaires. Il a donc fallu modifier la procédure.

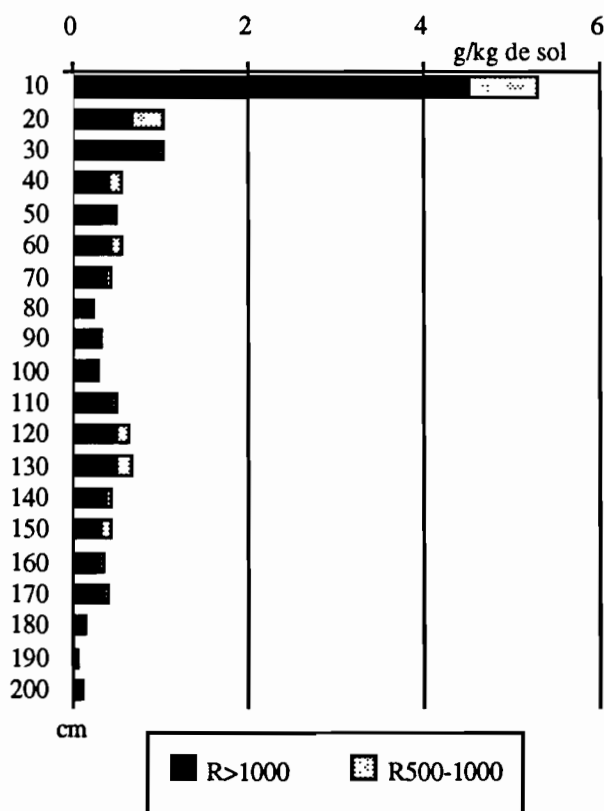
modification de la procédure

Pour ces situations, les échantillons de sol, conservés humide, sont mis à tremper dans de l'eau (rapport sol/eau = 5) durant une nuit puis tamisé à 4 mm pour éliminer les ponces grossières. Un premier essai est réalisé avec les paramètres utilisés pour le vertisol: i) débits d'eau et d'air de 3 l/mm et 70 et ii) un tamis de 1000 µm et un de 200 µm. Cependant l'examen à la loupe binoculaire de la fraction 200-1000 µm révèle la présence d'importante quantité d'imogolite entourant les débris racinaire. Pour éliminer cette pollution, nous avons remplacé le tamis de 200 µm par un tamis de 500 µm. Avec ces modifications, les 60 kg de sol ont été traités en 4 jours.

Sous canne à sucre, la masse totale des racines (> 1000 + 500-1000) sur l'ensemble du profil étudié (0-200 cm) est de 14,713 g/kg de sol et l'horizon 0-10 cm contient près de 40% de la masse totale. La masse racinaire diminue avec la profondeur, mais on remarquera une légère augmentation dans les couches 100 et 120 cm (Figure 3). Les racines récupérées sur le tamis de 1000 µm sont les plus abondantes.

Figure 3: Masse racinaire (en g/kg de sol)

Andosol sous canne à sucre



Conclusions

L'appareil que nous avons construit et testé pour le lavage et le tri par pneumo-hydro-élutriation des racines de grands échantillons de sol est d'une conception très simple et d'un coût réduit (environ 3000 FF compresseur compris, prix Fort de France). Il permet de traiter en continu environ 25 kg de sol par jour. Les racines séparées sont identiques à celles obtenues manuellement.

Pour les sols argileux une étape préalable de dispersion de l'échantillon par une solution de soude (NaOH 0,10 à pH 10) est indispensable. Pour les andosols sur cendres et ponces, les échantillons doivent être conservé humide et subir une pré-tamassage manuel afin d'éliminer les ponces grossières.

La fiabilité et la souplesse d'utilisation de cet appareil font de lui un excellent outil pour l'étude de la masse racinaire.

Bibliographie

- Brown D.A. and D.R. Upchurch. 1987. Minirhizotrons : A summary of methods and instruments in current use, 15-30, IN: (ed. H.M. Taylor), Minirhizotron Observation Tubes: Methods and Applications for Measuring Rhizosphere Dynamics, ASA Special Publication N° 50, Madison.
- Brown G.R. and E.S. Thilenius. 1976. A low-cost machine for separation of roots from soil materials. *J. Range Manag.*, 29, 506-507.
- Cahoon G.A. and E.S. Morton. 1961. An apparatus for the quantitative separation of plant roots from soil. *Am. Soc. Hort. Sci.*, 78, 593-596.
- Chotte J.L. -1988- Importance de l'activité rhizosphérique dans la dynamique de reconstitution du stock organique des sols. (vertisol, Martinique). Traçage isotopique ¹⁵N. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XXIV, 4, 345-346.
- Fehrenbacher J.B. and J.D. Alexander. 1955. A method for studying corn root distribution using a soil-core sampling machine and a shaker-type washer. *Agron. J.*, 47, 468-472.
- Pearson R.W. and Z.F. Lund. 1968. Direct observation of cotton root growth under field conditions. *Agron. J.*, 60, 442-443.
- Roberts J. 1976. A study of root distribution and growth of *Pinus sylvestris* L. (Scotch pine) plantation in East Anglia. *Plant and Soil*, 44, 607-621.
- Smucker A.J.M., S.L. McBurney and A.K. Srivastava. 1981. Quantitative separation of roots from compacted soil profiles by the hydropneumatic elutriation system. *Agron. J.*, 74, 501-503.
- Smucker A.J.M., J.C. Fergusson, W.P. DeBruyn, R.K. Belford and J.T. Ritchie. 1987. Image analysis of video-recorded plant root systems, 67-80, IN: (ed. H.M. Taylor), Minirhizotron Observation Tubes: Methods and Applications for Measuring Rhizosphere Dynamics, ASA Special Publication N° 50, Madison.
- Tardieu F., 1988 a Analysis of the spatial variability of maize root density. I. Effect of wheel compaction on the spatial arrangement of roots. *Plant and Soil*, 107, 259-266.
- Tardieu F., 1988 b Analysis of the spatial variability of maize root density. II. Distances between roots. *Plant and Soil*, 107, 267-272.

Caractérisation de l'anoxie des eaux de nappes et de solutions de sols Approche méthodologique et application à deux zones méditerranéennes

Béatrice GARCIA*, Aziz LAIFA**, Rachid DJAMAI**, Olivier RIBOLZI* et Vincent VALLES*

*I.N.R.A., Unité de Science du Sol, B.P. 91, 84143 Montfavet Cedex (France)

**I.S.N. Université d'Annaba, B.P. 13, 23000 Annaba (Algérie)

Introduction :

La mesure de l'état d'anoxie d'eaux libres se fait le plus souvent par le dosage de l'oxygène dissous. Or, au moment des prélèvements il peut y avoir des échanges de gaz entre la solution et l'atmosphère. Ils seront d'autant plus rapides que l'échantillon sera agité avant le dosage : par exemple en versant la solution d'un récipient à un autre ou lors de la remontée d'eau d'un aquifère. Ces problèmes sont d'autant plus marqués lorsqu'il s'agit d'eaux extraites du sol. Enfin, lorsque la teneur en oxygène dissous est faible (inférieure à 1%), il devient impossible d'obtenir une mesure correcte du fait de la précision de l'électrode. Dans ce cas les échanges de gaz peuvent avoir lieu lors de l'introduction de l'électrode dans la solution. Ce problème existe aussi pour les solutions à forte pO_2 , mais la différence relative est alors moins importante.

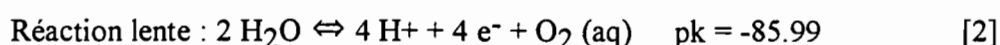
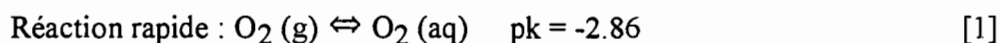
En revanche, les réactions d'oxydoréduction sont connues comme ayant une cinétique lente. Malgré les problèmes liés à la mesure du rédox (stabilité de l'électrode, nécessité d'avoir un couple rédox) il est possible de faire des mesures sans trop perturber le système. Ces mesures ne sont pas à interpréter seules mais de façon couplées avec le pH qui est facile à acquérir. Il est alors possible de les multiplier afin de faire des études statistiques ou géostatistiques ainsi que des traitements thermodynamiques.

Matériel et méthodes :

1. Rappels théoriques :

Pour équilibrer la plupart des couples rédox, il y a intervention de H^+ , de plus beaucoup de couples rédox sont aussi des couples acide-base. La représentation commode des propriétés (c'est à dire acido-basique et rédox) d'un élément chimique se fait par le diagramme Eh-pH (Pourbaix, 1963). Par ce moyen, on représente les domaines de prédominance des formes dissoutes, par exemple celles de l'azote.

Pour notre étude, nous avons également utilisé la pression partielle équilibrante en oxygène (pO_2) que nous avons estimée à partir de l'équation de dissociation de l'eau (Stumm et Morgan, 1981) :



en conditions standards et en combinant [1] et [2] :

$$f(O_2) = -83.1 + 4 \text{ pH} + 4 \text{ pe} + 2 \log(H_2O) \cong pO_2 \quad [3]$$

Connaissant le pH, le Eh et la température, nous obtenons la pO_2 .

A titre d'application de ces méthodes, deux études ont été réalisées en milieu naturel. La densité des points de mesures (une centaine dans un cas et plus de cinq cents dans l'autre) a permis de tracer des cartes assez précises de la pO_2 . Nous les avons comparé avec la zonation des différentes unités du milieu naturel.

2. Présentation des sites :

La première étude a été effectuée dans l'aquifère de la Vistrenque situé au sud de Nîmes, sur plus de cinq cents points. C'est un petit bassin d'effondrement, localisé entre garrigues et costières qui est défini par plusieurs unités de paysage (Fig. 1) :

- au nord-ouest, les garrigues formées de collines calcaires,
- au sud-est, la costière du Gard,
- au sud-ouest, le Vidourle, où la nappe est captive le long de sa rive gauche,
- la partie basse de la plaine de la Vistrenque, orientée nord-est et sud-ouest, débute par un verrou ayant pour conséquence la formation d'une petite zone hydromorphe vers l'amont. La vallée s'ouvre ensuite ; elle est formée de sols de type fersiallitique saturés surmontant un niveau très épais de cailloutis et galets constitués de quartzites et de roches cristallines en cours d'altération.

- vers le sud-ouest, la plaine débouche vers les lagunes littorales de la petite Camargue.

Le dosage de l'oxygène dissous constituait directement un problème : d'une part, il fallait remonter l'eau par des forages ce qui impliquait inmanquablement son oxygénation d'autre part, des prélèvements ont été effectués dans des habitations où l'eau est mise sous pression avant d'être distribuée ce qui occasionne une oxygénation importante. C'est pourquoi l'étude de la pO_2 équilibrante était préférable.

La deuxième étude se situe en Algérie à quelques kilomètres de la frontière Tunisienne, à proximité immédiate de la mer Méditerranée, à l'est d'El Kala (Fig. 2).

Le paysage s'organise autour de quelques unités particulièrement typées :

- le lac Tonga dont les eaux saumâtres constituent la bordure sud de la zone d'étude,
- la garaa d'El Adzer constituée de marais au centre est couverte de végétation dense et haute (*phragmites*, *typhas*, ...)
- un premier alignement de dune orienté est-ouest le long de la mer,
- le second groupe de dunes s'étirant du nord vers le sud sur la rive gauche de l'Oued Messida, à l'ouest de la zone d'étude. Comme pour le premier alignement, ces dunes sont constituées de sables rubéfiés, c'est à dire couvert d'oxydes ferriques.

Les dosages ont été effectués dans l'eau libre de surface, dans les premiers centimètres de sédiments et aussi dans la nappe. Deux cartes ont été calculées :

- une à partir de la pO_2 calculée pour les eaux de nappe et les sédiments,
- l'autre pour les eaux libres de surfaces.

Résultats et discussion :

1. Vistrenque :

La carte de la pO_2 (Fig. 3) présente deux zones où l'eau est fortement oxydante (au nord-est et au sud-ouest), une zone allongée où l'anoxie est assez marquée et enfin tout à fait au sud, une zone très anoxique. En comparant ces données avec la carte des unités naturelles, il apparaît que les deux zones très oxydantes correspondent aux garrigues et aux costières qui sont surélevées par rapport à l'aquifère. Ces deux unités récoltent l'eau et alimentent l'aquifère, elle y est donc en mouvement. Par contre, au nord-ouest au niveau du verrou, l'eau retenue ne s'écoule que très lentement vers le sud de la vallée. Cet état de mauvaise circulation se traduit sur la carte de la pO_2 par de l'anoxie. Enfin, le sud de la zone d'étude correspond au début de la petite Camargue où l'eau stagnante est très présente soit sous la forme de marécage soit de terre inondable en hiver. On note alors une très importante anoxie.

L'information apportée par la concentration en oxygène dissous est beaucoup moins précise du fait des artefacts déjà cités.

2. Algérie :

Plusieurs zones très marquées pour la pO_2 sont visibles (Fig. 4) sur la carte obtenue pour l'eau de nappe et des sédiments. Au nord, l'eau est très oxydante alors qu'au centre elle est au contraire très anoxique. Quand on superpose cette carte à celle définissant les unités paysagiques, il apparaît que les eaux très oxydantes sont des eaux qui circulent à travers les dunes. Ces eaux restent oxydantes même après avoir traversé des tourbières au niveau des dunes nord. La circulation de l'eau est donc un facteur important pour définir son état d'anoxie. Il établit le caractère oxydant avec un déterminisme supérieur à celui lié à la présence de matières organiques. Ainsi, quand l'eau est stagnante comme au niveau de la Garaa, elle est dans un état très réducteur.

La carte des isocontours de la pO_2 des eaux de surface (Fig. 5) montre une différence entre le lac Tonga et la Garaa. Le lac présente des eaux dans un état d'aération proche de celles des dunes Nord. En revanche, la Garaa est légèrement anoxique malgré le contact avec l'air. Au niveau du lac Tonga le vent entraîne un brassage et une aération de la surface libre, alors que sur la Garaa, la végétation annule son effet. De plus, l'oxydation de la matière organique apportée par les végétaux consomme de l'oxygène dissous ce qui accroît l'anoxie.

Pour confirmer l'état d'anoxie du milieu, il est possible de reporter les points d'échantillonnage des deux études sur des diagrammes Eh-pH de l'azote et du fer.

Dans le cas de l'Algérie, les eaux des dunes Nord sont autour de la droite théorique représentant l'équilibre thermodynamique NO_3^-/NO_2^- (Fig.6). A ce niveau, le Eh et le pH évoluent de façon inverse selon l'équation (Stumm et Morgan, 1981) :

$$1/2 \log(NO_3^-) + pe + pH - 1/2 \log(NO_2^-) = 14,15 \quad [4]$$

Ceci explique la stabilité de la pO_2 décrite par l'équation :

$$\log(NO_2^-) + 1/2 \log(pO_2) - \log(NO_3^-) = -6,6 \quad [5]$$

Les eaux de surfaces sont par contre très éloignées de cette droite d'équilibre. En revanche sur le diagramme Eh-pH du fer (Fig. 7), ces eaux sont proches de l'équilibre entre Fe_2^+ et $FeOH^+$. Le lac Tonga se distingue même de la Garaa par un état moins réducteur.

Pour l'étude de la Vistrenque, trois types d'eaux peuvent être différenciées. Les eaux oxydantes se retrouvent dans le domaine de stabilité du NO_3^- , elles correspondent à celles venant des garrigues et des costières. Puis viennent les eaux moins oxydantes se situant en parallèle à la droite d'équilibre théorique NO_3^-/NO_2^- qui sont celles du centre de la vallée. Enfin, il y a des eaux hors du domaine de stabilité de l'azote. Celles ci sont en revanche situées dans le domaine de stabilité du fer, à cheval sur le domaine de stabilité des formes ferreuses et ferriques. Ces eaux correspondent à celles provenant du sud de la vallée et des zones de nappe captive le long du Vistre et du Vidourle.

Conclusion :

Nous avons donc vu que la mesure du Eh était intéressante à utiliser car beaucoup moins délicate que celle de l'oxygène dissous. Sa facilité d'acquisition, ainsi que celle du pH et de la température nous a permis de faire des études statistiques, thermodynamiques et cartographiques en utilisant la pression partielle équilibrante en oxygène (pO_2) comme donnée plus constante. De plus, le couplage du Eh et du pH sous la forme de diagramme de Pourbaix nous a permis de lever les ambiguïtés liées à l'utilisation du Eh seul. Nous avons également pu identifier les processus actifs principaux pour chaque unité paysagique.

Finalement, il s'avère que l'état d'aération de l'eau d'un milieu dépend essentiellement du caractère circulant de cette eau, mais aussi de la présence d'oxyde (au centre de la Vistrenque) ou de matières organiques (Garaa en Algérie). La connaissance du milieu naturel est également un outil précieux qui permet par l'observation du couvert végétal de mieux comprendre les différents états d'anoxie décrits par les schémas, cartes et études statistiques.

Références

Pourbaix M. 1963. Atlas of Electrochemical Equilibria. Pergamon Press (ed.), New York.

Stumm, W., and J.J. Morgan. 1981. Aquatic chemistry : an introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters. 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.

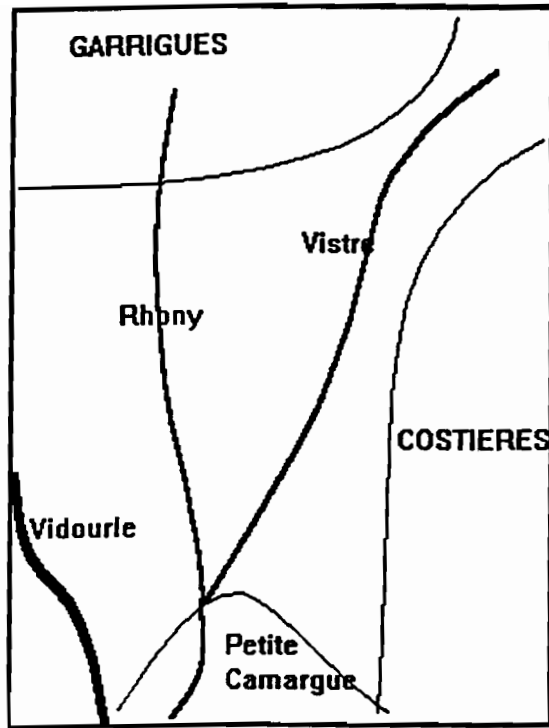


Figure 1 : représentation schématique des différentes unités du paysage de la vallée de la Vistrenque (Gard - France).

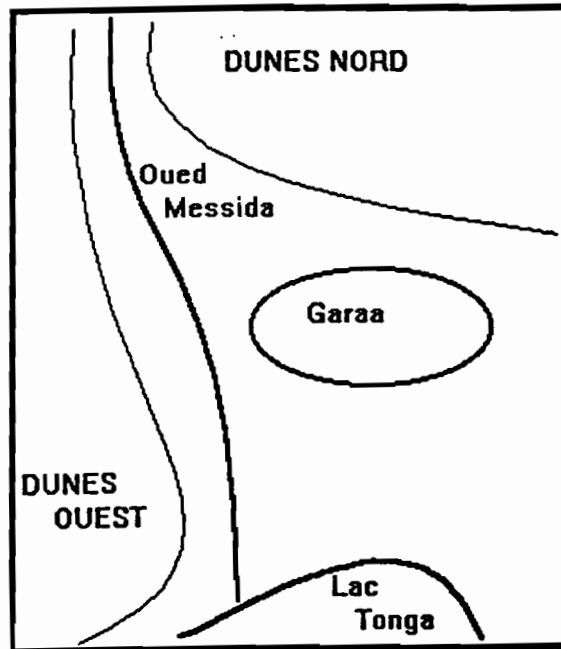


Figure 2 : représentation schématique des différentes unités du paysage de la région d'El Kala (Algérie).

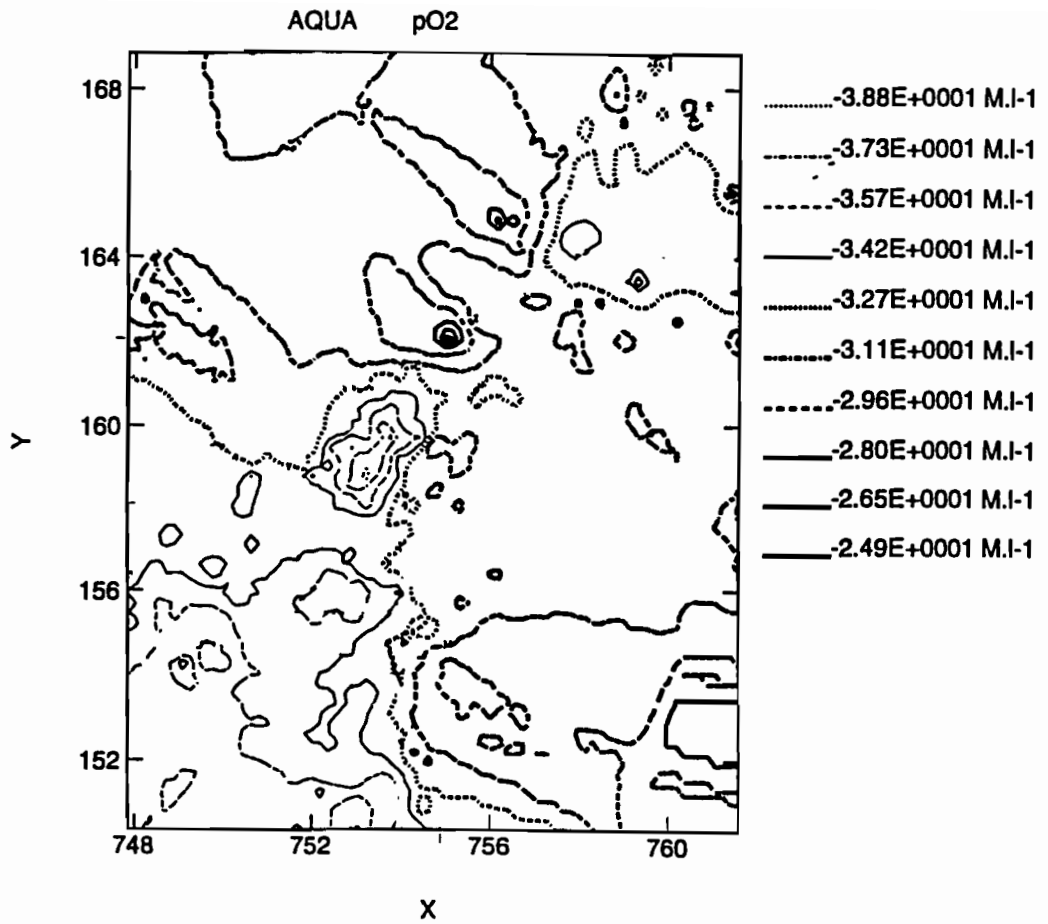


Figure 3 : isocontours de la pO2 de l'aquifère de la Vistrenque montrant que les zones où l'eau est fortement oxydante (au nord-est et au sud-est) sont les garrigues et les costières et qu'au niveau de la petite Camargue (au sud) les eaux sont très anoxiques .

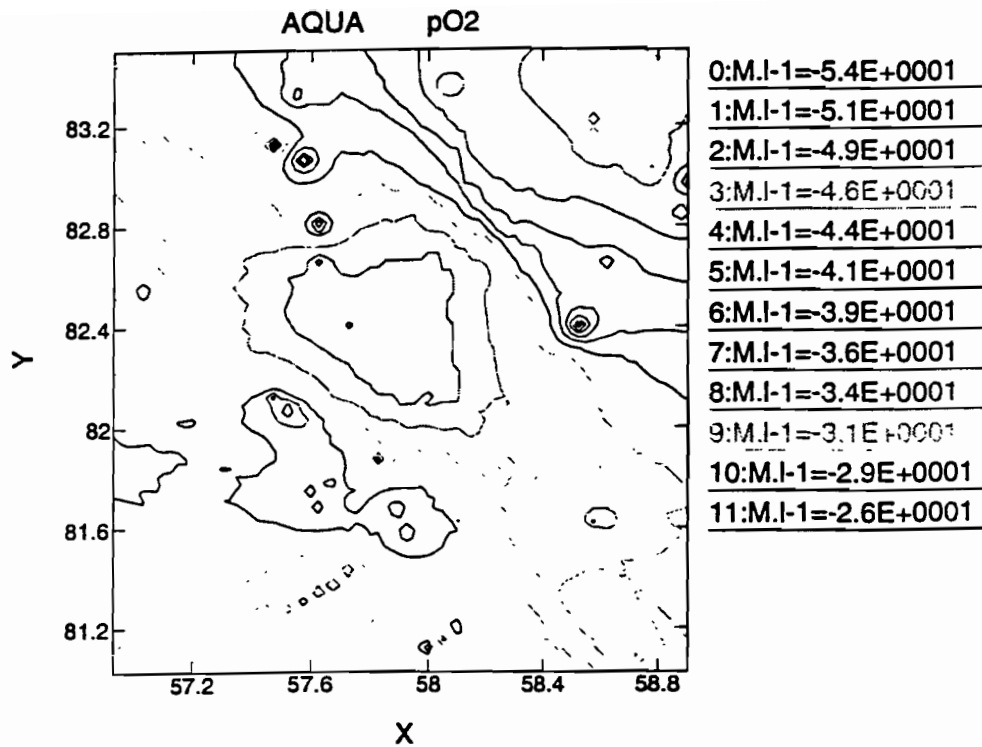


Figure 4 : isocontours de la pO2 des sédiments et de la nappe de la région d'El Kala montrant que les eaux oxydantes proviennent des dunes et que les eaux anoxiques sont situées dans la Garaa.

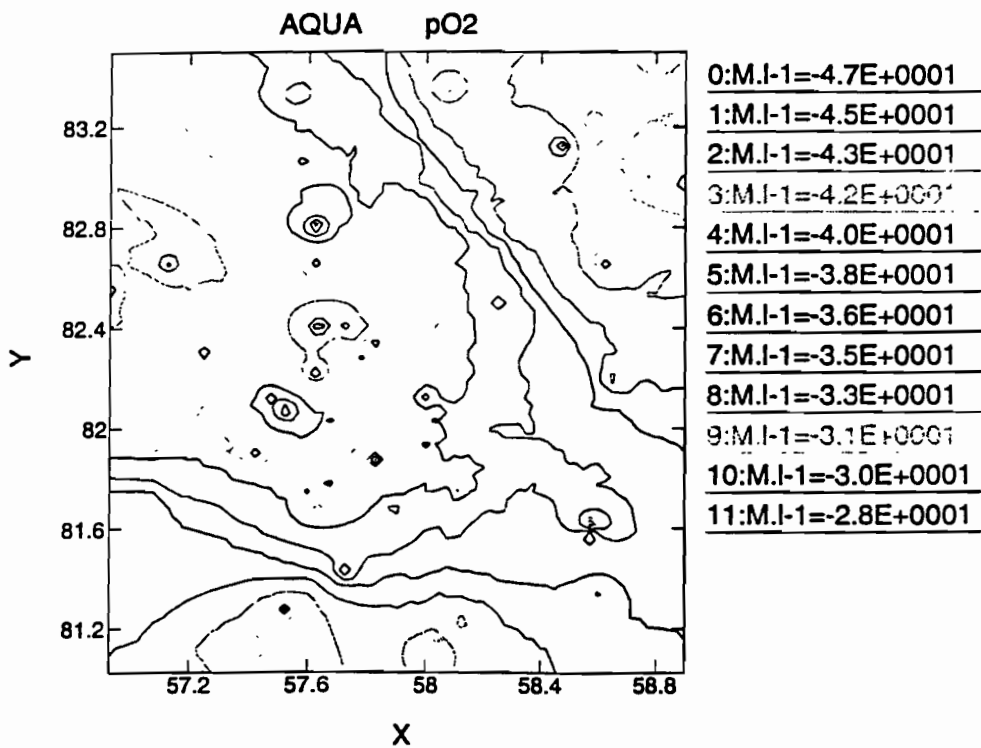


Figure 5 : isocontours de la pO2 des eaux de surface de la région d'El Kala permettant de distinguer les eaux plus oxydantes du lac Tonga des eaux plutôt anoxiques de la Garaa.

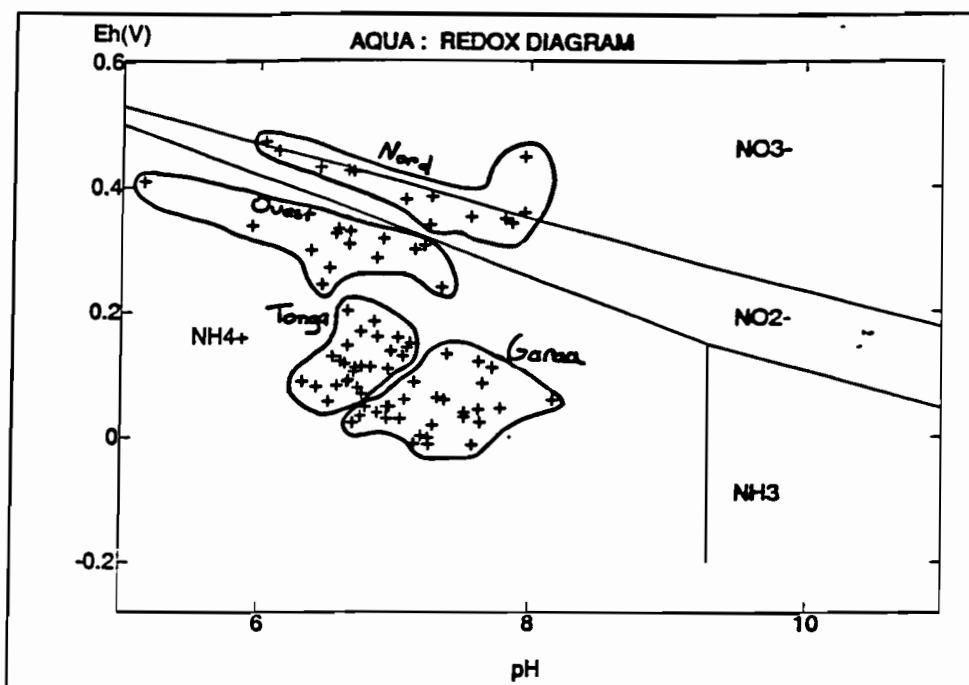


Figure 6 : positionnement des échantillons de la région d'El Kala sur le diagramme Eh-pH de l'azote.

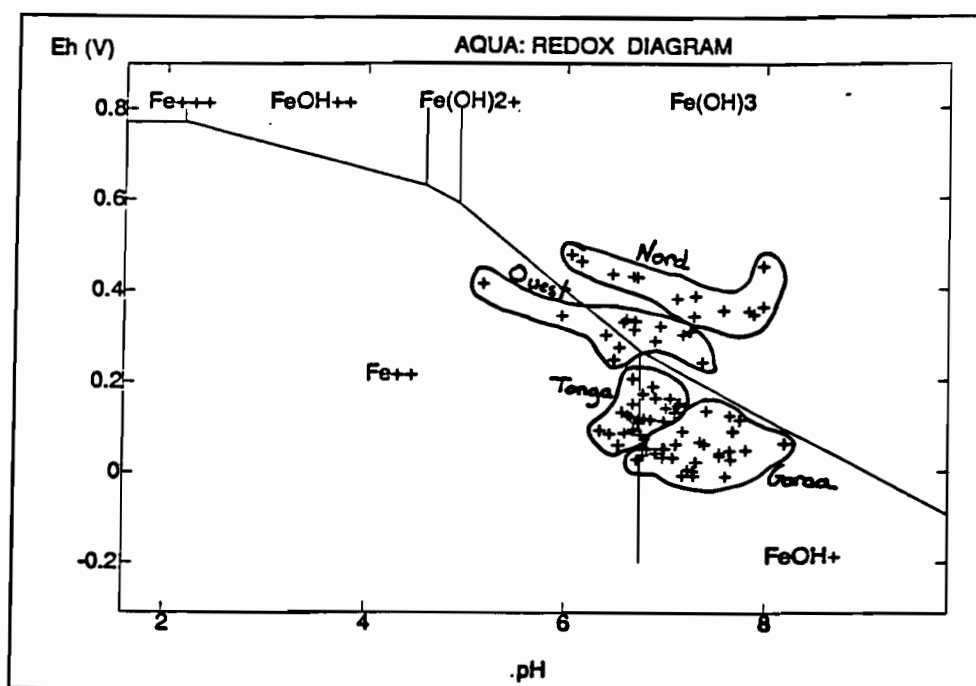


Figure 7 : positionnement des échantillons de la région d'El Kala sur le diagramme Eh-pH du fer.

CORRECTION DU RAPPORT Mg/Ca D'UN VERTISOL HYPERMAGNÉSIEU ACIDE

J.A. PETARD, B. BONZON, J. KOMOR
(Centre ORSTOM de Nouméa)

Les vertisols de la vallée de la Tamoa sont légèrement acides. Leur pH est voisin de 6,0, leur capacité d'échange est élevée (50 cmol (p⁺) kg⁻¹). Ils ont cette particularité de posséder une teneur en magnésium échangeable très élevée (> 40 cmol (1/2 Mg⁺⁺) kg⁻¹) représentant plus de 90 % des bases échangeables. Le rapport Mg/Ca est supérieur à 10 (il peut aller jusqu'à 40). Malgré une teneur en calcium échangeable de 4 cmol (1/2 Ca⁺⁺) kg⁻¹, ces sols font apparaître sur le développement des végétaux une carence en calcium (essais au champ et en serre). Cette carence peut être supprimée par l'apport d'amendements calciques sous forme de croûte calcaire et de gypse. Toutefois ce dernier induit une réaction très marquée du sol par la mise en circulation d'une quantité importante de magnésium dans la solution du sol.

L'influence du gypse dans les vertisols avait déjà été remarquée lors :

- de l'étude des vertisols à gypse⁽¹⁾,
- de l'étude des effets des amendements calciques sur vertisol hypermagnésien⁽²⁾,
- de la mise au point d'une méthode d'extraction du complexe échangeable des vertisols hypermagnésien à gypse et à carbonates ou des vertisols hypermagnésien soumis à amendement calcique (CaCO₃) puis gypseux (CaSO₄, 2H₂O)⁽³⁾.

L'extraction des sels d'un vertisol calcimagnésien à gypse et à carbonate, effectuée à différents rapports sol/solution fait ressortir la solubilité du gypse et l'échange qui se produit durant l'extraction entre le calcium et le magnésium.

A partir de ces observations sur la réaction du sol aux amendements gypseux et sur l'échange entre le magnésium et le calcium lors de l'extraction des sels solubles dans les vertisols à gypse, nous avons tenté de corriger le rapport Mg/Ca à partir de doses calculées de gypse. Nous avons également voulu préciser l'influence du régime hydrique sur l'échange Mg - Ca et vérifier le devenir du sulfate de magnésium formé.

L'expérimentation a été conduite dans des vases de végétation mis au point au laboratoire d'agropédologie par B. Bonzon. Chaque vase contient une même quantité de sol tamisé à 6 mm. Des doses croissantes de gypse nécessaires pour obtenir un rapport Mg/Ca de 6,5 - 5,3 - 4,2 - 3,1 et 2,1 sont mélangées intimement aux échantillons de sol. Les échantillons amenés à la capacité au champ sont alors soumis à une lixiviation par apport quotidien d'un volume d'eau déminéralisée correspondant à 50 ou 100 mm de pluie (l'apport d'eau se fait par capillarité descendante), jusqu'à ce que la conductivité de la solution de percolation soit inférieure à 10 mS m⁻¹. Les "hauteurs de pluie" sont déterminées par pesée des percolats.

A la fin de l'expérimentation, les sols sont séchés à l'air puis analysés ainsi que chaque percolat.

ANALYSE DES PERCOLATS

L'analyse des percolats fait apparaître un effet dose sur la quantité d'eau nécessaire au déplacement des sels (obtention de la conductivité ≤ 10 mS m⁻¹).

L'exportation du sulfate est une fonction linéaire de la dose (fig. 1) :

$$\text{SO}_4^- = 0,90 \text{ dose} + 0,15 ; r^2 = 0,97$$

La somme des cations majeurs (Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺) exportés suit la même règle avec une pente semblable.

$$\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} = 0,89 \text{ dose} + 0,71 ; r^2 = 0,97$$

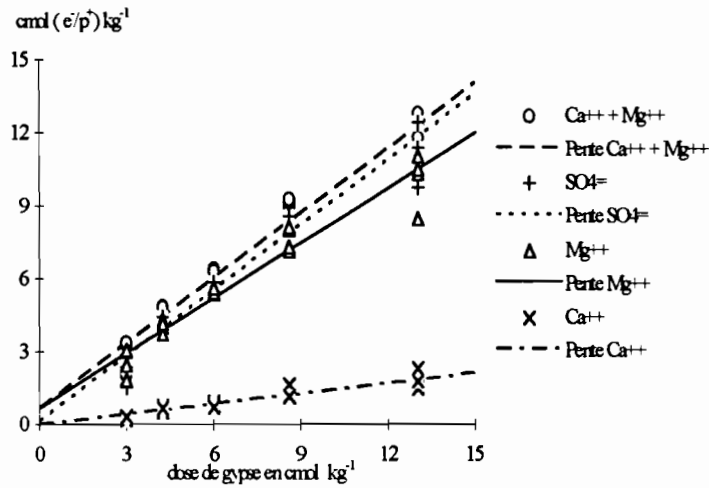
⁽¹⁾ BEAUDOU A.G., DENIS B., LE MARTRET H. 1984, Magnesian soils of New Caledonia, Experiment to restore the balance of the base exchange complex. ORSTOM, Nouméa. *multigr.* : 18 p.

⁽²⁾ BONZON B. *et al.* 1985, Effet des amendements calciques sur un sol sodique acide et sur un vertisol hypermagnésien. Résultats des études expérimentales conduites en 1984. ORSTOM, Nouméa. *multigr.* : 87 p.

⁽³⁾ PODWOJEWSKI P., PETARD J.A. 1988, Expressions des sels solubles et des bases échangeables sur un vertisol calcimagnésien à gypse et à carbonates (La Tamoa, Nouvelle-Calédonie). ORSTOM, Nouméa. *Notes Tech., Sc. de la Terre, Pédologie.* 2 : 75 p.

La constante, plus élevée de la somme des cations est due à l'hydrolyse du calcium et surtout du magnésium ($0.54 \text{ cmol (p}^+) \text{ kg}^{-1}$) pour l'échantillon témoin.

figure 1 : cumul des éléments extraits.



Les exportations de magnésium et de calcium croissent également de façon linéaire avec toutefois des pentes différentes.

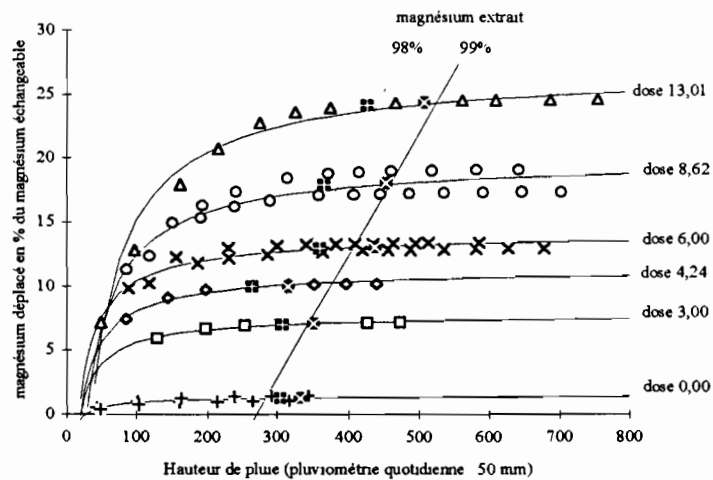
$$\text{Mg}^{++} = 0,75 \text{ dose} + 0,67 ; r^2 = 0,97$$

$$\text{Ca}^{++} = 0,14 \text{ dose} - 0,01 ; r^2 = 0,91$$

Les courbes de déplacement du magnésium en fonction de la dose de gypse apportée (fig.2) permettent d'apprécier les quantités de pluie nécessaires pour déplacer une fraction du magnésium échangeable. Elles sont de la forme :

$$\text{Mg extrait} = a + b * \left(\frac{1 + \text{Ln}(\text{pluie} + 1)}{(\text{pluie} + 1)} \right) \text{ (équation [1])}$$

figure 2 : Quantité de pluie nécessaire au déplacement du magnésium en fonction de la dose.

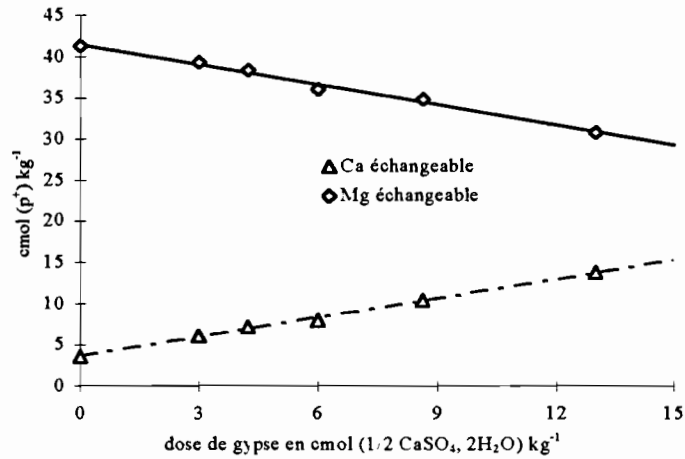


Nous avons ajouté sur ces figures deux droites représentant les hauteurs suffisantes pour déplacer respectivement 98 et 99 % du magnésium total lixivié.

ANALYSE DU SOL

Le pH du sol n'est pas affecté par l'addition du gypse. Il en est de même pour la matière organique et pour le phosphore (total ou assimilable). Le complexe échangeable est modifié dans le sens souhaité. Le magnésium et le calcium échangeable varient en sens inverse, suivant une relation linéaire de la dose de gypse apportée (fig. 3).

figure 3 : Evolution du Ca^{++} et du Mg^{++} échangeables après des apports de gypse.



$$\text{Mg}^{++} \text{ éch.} = 41,5 - 0,81 * \text{dose} ; r^2 = 0,99$$

$$\text{Ca}^{++} \text{ éch.} = 3,60 + 0,78 * \text{dose} ; r^2 = 0,997$$

Le rendement de substitution du magnésium par le calcium (rapport Mg/Ca théorique * 100 / rapport Mg/Ca expérimental) est supérieur à 92 %.

Les résultats des analyses du complexe échangeable viennent confirmer notre hypothèse sur le remplacement du magnésium échangeable par le calcium provenant du gypse.

DISCUSSION

Les courbes des variations du rapport Mg/Ca (fig. 4) à partir des valeurs moyennes du calcium et du magnésium échangeable montrent que, malgré les imperfections du système (maîtrise imparfaite des flux d'eau (quantité et vitesse de percolation), ignorance de l'occupation de l'espace par le sol (distribution de la porosité)), il est possible de remplacer une partie du magnésium échangeable par du calcium (à partir de gypse), conformément aux prédictions, avec un rendement supérieur à 92 %, dans des conditions de drainage permettant l'évacuation du sulfate de magnésium formé.

L'équation des courbes est de la forme :

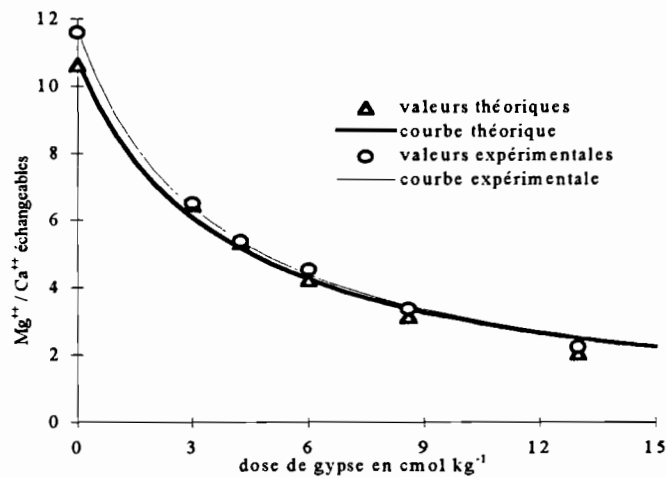
$$y = \frac{1}{a + b * dose} \quad (\text{équation [2]})$$

courbe théorique : $a = 0,093$ $b = 0,024$ $r^2 = 0,991$

courbe expérimentale : $a = 0,086$ $b = 0,024$ $r^2 = 0,997$

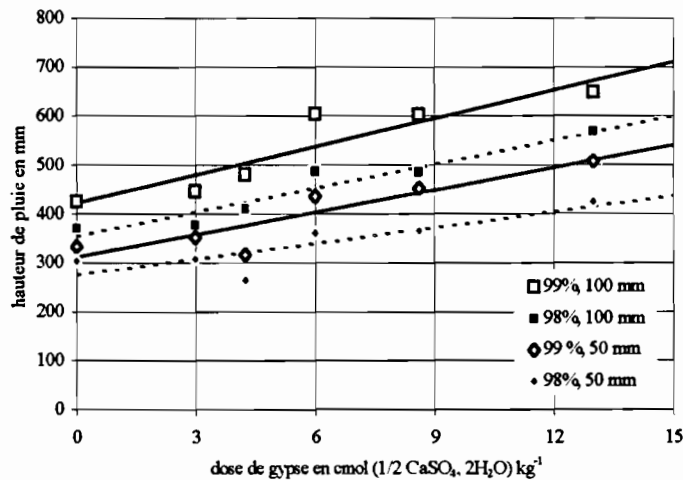
Il est aisé de calculer la quantité de gypse à appliquer pour obtenir le rapport Mg/Ca souhaité.

figure 4 : Variation du rapport Mg⁺⁺/Ca⁺⁺ échangeables



La figure 5 nous donne les hauteurs de pluie nécessaire pour lixivier, en fonction de la dose de gypse apportée, respectivement 98 et 99 % du magnésium déplaçable. On retrouve ici les droites de la figure 2. La distribution des points (moyenne des hauteurs pour chaque dose) autour des droites de cette figure fait très bien ressortir les difficultés rencontrées dans la maîtrise des flux d'eau (hauteur, vitesse de lixiviation).

figure 5 : Hauteurs de pluie nécessaires pour déplacer 98 ou 99 % du magnésium extrait selon les doses de gypse.



De la figure précédente (fig. 5), il apparaît clairement que l'efficacité du déplacement est meilleure avec un apport d'eau quotidien équivalent à la plus faible hauteur de pluie ; la quantité totale d'eau nécessaire est plus faible.

L'analyse des paramètres a et b de l'équation [1] : $Mg\text{ extrait} = a + b * \left(\frac{1 + \ln(\text{pluie} + 1)}{(\text{pluie} + 1)} \right)$ fait

ressortir une dépendance à la hauteur de la pluie quotidienne. a et b varient de façon linéaire avec la dose de gypse :

Hauteur de pluie 50 mm :

$$a = 2,76 + 1,92 * \text{dose} \quad r^2 = 0,994$$

$$b = 21,89 - 18,07 * \text{dose} \quad r^2 = 0,978$$

Hauteur de pluie 100 mm :

$$a = 1,43 + 2,04 * \text{dose} \quad r^2 = 0,980$$

$$b = 41,37 - 24,80 * \text{dose} \quad r^2 = 0,999$$

Il est difficile de tirer des conclusions sur ce facteur "pluie", nous ne disposons expérimentalement que de deux hauteurs de 50 et de 100 mm (difficilement maîtrisées puisque ces hauteurs ont varié de $\pm 20\%$). Le rapport entre les paramètres en fonction de la hauteur quotidienne (100 mm/ 50 mm) est voisin de 0,5 pour la constante de a et voisin de 2 pour la constante de b .

Une expérimentation complémentaire serait à envisager pour définir les conditions permettant d'assurer avec le minimum d'eau un échange aussi complet que possible entre le calcium issu du gypse et le magnésium échangeable. Il faudrait préciser les hauteurs et intensités des pluies (ces intensités dépendent de la vitesse de filtration, il faut éviter le ruissellement). Il serait également judicieux d'étudier l'effet d'une période de dessiccation ou de maintien à la capacité au champ entre deux pluies. L'étude de la cinétique de l'échange Ca^{++} (phase liquide)/ Mg^{++} (phase solide) et de l'affinité du complexe absorbant pour le calcium au moyen d'isothermes d'échange nous apporterait également des informations utiles pour mieux appréhender les phénomènes mis en jeu.

Quelques conditions devront être appliquées avec rigueur :

1. le remplissage des pots,
2. le maintien des échantillons à la capacité au champ pendant une durée égale (bien qu'aucune relation n'apparaisse entre la durée de saturation et la hauteur totale de pluie ou la conductivité du premier percolat),
3. le contrôle des apports d'eau d'irrigation et de la qualité chimique de cette eau. Dans l'expérience décrite ici l'eau déminéralisée utilisée avait une conductivité inférieure à $0,3 \text{ mS m}^{-1}$, or les eaux naturelles de cette région sont exclusivement magnésiennes (environ $12 \text{ mmol (1/2 Mg}^{++}) \text{ L}^{-1}$). Dans les conditions expérimentales, l'apport de magnésium par une eau de rivière représenterait $3,2 \text{ mmol (1/2 Mg}^{++})$ pour une pluie de 50 mm, soit pour le sol l'équivalent de $0,2 \text{ cmol (1/2 Mg}^{++}) \text{ kg}^{-1}$. Il faut donc tenir compte de cet enrichissement qui s'oppose au but recherché.

CONCLUSION

Cette expérimentation a permis de montrer rapidement la possibilité de corriger par un amendement gypseux le rapport Mg/Ca d'un vertisol hypermagnésien.

L'expérimentation a montré les limites du système. Il est indispensable que le dispositif de drainage soit très performant afin d'éliminer la totalité du sulfate de magnésium formé. Les quantités d'eau nécessaires pour permettre l'échange total du magnésium par le calcium sont importantes puisqu'elles atteignent l'équivalent d'une pluie de 600 mm pour la dose la plus élevée ($13 \text{ cmol (1/2 CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O) kg}^{-1}$ ou $2,2 \text{ g kg}^{-1}$). D'autre part, dans notre expérience nous n'avons pas pris en compte la qualité chimique de l'eau disponible pour l'irrigation ; La quantité de magnésium apporté par l'équivalent d'une "pluie" de 600 mm n'est pas négligeable puisqu'elle correspond à $2,4 \text{ cmol (1/2 Mg}^{++}) \text{ kg}^{-1}$. Une étude complémentaire est nécessaire pour préciser les conditions d'irrigation (hauteur, intensité et fréquence) La connaissance de ces derniers paramètres permettrait d'exploiter rationnellement les apports dus aux précipitations naturelles. Une autre étude pourrait être entreprise en laboratoire pour définir les isothermes d'échange et déterminer la sélectivité du sol pour le calcium.

L'aspect économique est à prendre en considération, quelles sont les possibilités d'approvisionnement en gypse et à quel prix ? L'eau peut être un facteur limitant par sa disponibilité et aussi par son coût d'application.

LISTE DES PARTICIPANTS

| Noms & Prénoms | Organisme | Adresse |
|--------------------|-------------------------|----------------------------|
| ARVIEU J.C. | INRA | Sci. du Sol Montpellier |
| BABRE D. | CIRAD | GERDAT-URA Montpellier |
| BARTHES B. | ORSTOM | LCSC Montpellier |
| BARTOLI F. | CNRS | CPB Nancy |
| BECQUER T. | ORSTOM | Agropédologie Nouméa |
| BREYSSE M. | CIRAD | GERDAT-URA Montpellier |
| BROSSARD M. | ORSTOM | CPB Nancy |
| BURTIN G. | CNRS | CPB Nancy |
| CALBA H. | CIRAD | GERDAT-URA Montpellier |
| CHAUVEL A. | ORSTOM | LEST Bondy |
| CORNIELES M. | Université | Hydrogéologie Avignon |
| CZARNES S. | CNRS | CPB Nancy |
| DAGBA E. | ORSTOM | Pointe Noire (Congo) |
| DENIS B. | ORSTOM | LHP Bondy |
| DO F. | ORSTOM | MAA Montpellier |
| DOIRISSE M. | CNRS | CPB Nancy |
| FALLAVIER P. | CIRAD | GERDAT-URA Montpellier |
| FARDEAU J.C. | CEA | DPVE Cadarache |
| FARDOUX J. | ORSTOM | LCSC Montpellier |
| FELLER C. | ORSTOM | LCSC Montpellier |
| GARCIA B. | INRA | Sci. du Sol Montfavet |
| GAVINELLI E. | ORSTOM | LCSC Montpellier |
| GRIMALDI C. | INRA | Sci. du Sol Rennes |
| HINSINGER P. | INRA | Sci. du Sol Montpellier |
| JAILLARD B. | INRA | Sci. du Sol Montpellier |
| LARRE-LARROUY M.C. | ORSTOM | LCSC Montpellier |
| MIGNARD E. | INRA | Sci. du Sol Montpellier |
| MOREAU R. | ORSTOM | LCSC Montpellier |
| PANSU M. | ORSTOM | LCSC Montpellier |
| PETARD J.A. | ORSTOM | LCSC Montpellier |
| PHILIPPY R. | CNRS | CPB Nancy |
| POSS R. | ORSTOM | Montpellier |
| QUANTIN P. | ORSTOM | LFS Bondy |
| REVERSAT F. | ORSTOM | Paris |
| SALA G.H. | ORSTOM | LCSC Montpellier |
| SEMADI A. | Inst. Sci. de la Nature | Annaba (Algérie) |
| SICAMOIS D. | SDEC | Tours |
| SICOT M. | ORSTOM | LCSC Montpellier |
| SIERRA J. | INRA | Sci. du Sol Montfavet |
| TARDIEU F. | INRA | Ecophysiologie Montpellier |
| VALLES V. | INRA | Sci. du Sol Montfavet |
| VIZIER J.F. | ORSTOM | LCSC Montpellier |
| WACKERMANN J.M. | ORSTOM | LFS Bondy |