

Facteurs de la fertilité et conditions de mise en valeur des sols ferrallitiques ferritiques du Sud de la Grande Terre : problématique de leur étude

B. BONZON, S. EDIGHOFFER, L. L'HUILLIER, E. BOURDON et T. BECQUER

Laboratoire d'Agropédologie, Centre ORSTOM, BP A 5, 98848, Nouméa, Nouvelle-Calédonie

Résumé

Les sols ferrallitiques ferritiques arables développés à partir des péridotites du grand massif ultramafique du Sud de la Nouvelle-Calédonie sont naturellement stériles pour les espèces cultivées. Ceux des vallées situées à l'ouest de ce massif présentent, néanmoins, un intérêt économique certain pour le maraîchage et l'horticulture en raison de la proximité de Nouméa, la capitale, de la pluviosité de la zone et de la possibilité d'y pratiquer l'irrigation. Identifier les causes de cette stérilité naturelle et les éliminer, ou en réduire l'importance, constitue un challenge scientifique et technique et devrait, par ailleurs, apporter de très utiles informations générales concernant les sols ferrallitiques d'une part, la toxicité des métaux de transition d'autre part. L'objectif de la présente communication est de mettre en relief la problématique de ces recherches et de fournir le lien existant entre les communications des membres de l'équipe d'Agropédologie.

Introduction

Les massifs de roches ultramafiques recouvrent 28,2% de la Grande Terre (Podwojewski & Beaudou 1987), 30% de l'ensemble constitué par cette dernière, les Îles Belep et l'Île des Pins. Le plus imposant est celui du Sud (3015 km²) qui s'étend du Canal des Loyauté, à l'est, jusqu'aux portes de Nouméa, à l'ouest, et de la vallée de la Thio au nord jusqu'au lagon vers le sud. A lui seul ce massif occupe 43% de la surface de la Province Sud.

Les sols développés à partir des péridotites, principales roches constitutives de ces massifs, sont essentiellement des sols ferrallitiques. Latham *et al.* (1978), ont néanmoins été amenés à créer pour eux la sous-classe des sols ferrallitiques ferritiques en raison de leurs teneurs très élevées en oxydes de fer, et aussi pour les différencier d'un autre type de sols ferrallitiques largement représenté en Nouvelle-Calédonie : les sols ferrallitiques allitiques (riches en oxydes d'aluminium) développés à partir des cendres et des ponces volcaniques déposées sur les atolls soulevés des Loyauté. L'absence d'aluminosilicates et les teneurs élevées en oxydes métalliques font souvent qualifier "d'oxydiques" ces deux types de sols.

D'une façon générale, les sols ferrallitiques ferritiques sont stériles naturellement

pour les plantes cultivées. L'étude des facteurs de leur fertilité et des conditions techniques de leur mise en valeur préoccupait cependant, depuis longtemps, les Services Ruraux : leurs faciès arables présentent l'avantage, important en Nouvelle-Calédonie pour le développement d'une agriculture intensive, de se situer dans des zones de forte pluviosité et à proximité de rivières aux étiages compatibles avec des projets d'irrigation de quelques dizaines d'hectares. À proximité de la capitale, Nouméa, les premières vallées du versant ouest du massif du Sud, celles de la Coulée et de la Lembi, ont ainsi acquis progressivement, depuis le début des années 70 et malgré de nombreux échecs et des difficultés agronomiques permanentes, une solide vocation maraîchère. De leur côté, les thématiques scientifiques, à l'arrière-plan des problèmes techniques, méritaient d'être prises en considération : elles concernent non seulement l'ensemble des sols oxydiques de la zone intertropicale, mais aussi, entre autres, les problèmes (mondiaux ceux-là) de la toxicité des métaux de transition (Ni, Cr, Co, Mn) dont les teneurs sont excessivement élevées dans ces sols (les teneurs en Ni oscillent entre 5 000 et 20 000 ppm alors que la teneur moyenne en Ni des sols cultivables des États Unis, par exemple, est de l'ordre de 25 ppm d'après Holmgren *et al.* (1993).

Ces considérations techniques et scien-

tifiques conduisirent ainsi la Province Sud et l'Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement (ORSTOM), à passer entre eux, en 1990, une convention de recherche pour "l'étude des facteurs de la fertilité et des conditions de mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Grande Terre". L'objet de cette communication est de présenter la problématique de ces recherches. Par la même occasion, elle donne le lien qui existe entre les communications des membres de l'équipe du Laboratoire d'Agropédologie, Thierry Becquer, Bernard Bonzon, Emmanuel Bourdon, Sylvie Edighoffer et Laurent L'Huillier, ou associé, Paul Quantin.

État initial des connaissances et premières hypothèses sur les contraintes relatives aux conditions de mise en valeur des sols ferrallitiques ferritiques

Les premières études sur les sols ferrallitiques ferritiques de Nouvelle-Calédonie ont été réalisées par Trescases (1969). Elles furent suivies de celles de Latham *et al.* (1978), Latham (1986), Bourdon & Podwojewski (1988). L'ensemble de ces travaux permettaient de les caractériser globalement de la façon suivante (Tableau 1) :

- sols constitués essentiellement d'oxydes métalliques, avec des teneurs élevées en nickel, chrome et cobalt, et présentant de faibles réserves en phosphore et en potassium ;
- ne contenant pas de silicates d'aluminium et très peu de silice ;
- avec une faible capacité d'échange variant très fortement en fonction du pH et dépendant essentiellement de la teneur en matière organique ;
- acides naturellement (avec un $pH_{Kc} > pH_{eau}$) et ayant alors une capacité d'échange anionique dans les horizons appauvris en matière organique ;
- présentant un horizon de surface (horizon A humifère) de faible densité apparente (voisine de 0,8), meuble mais facile à compacter, et des horizons de profondeur de densité apparente beaucoup plus élevée (entre 1,2 et 1,5) et beaucoup plus compacts.

Du point de vue agropédologique, ces caractéristiques générales, ainsi que les quelques données bibliographiques et les inter-

prétations que l'on pouvait tirer des échecs rencontrés par les agriculteurs, des maraîchers essentiellement, vu les coûts de production dans ces conditions de milieux, permettaient de préciser les grands traits des contraintes culturales à lever pour exploiter ce type de sols :

- forte carence en phosphore en raison de la fixation aisée de cet élément par les oxydes métalliques, de fer principalement ;
- intérêt certain de remonter le pH par des apports de calcaire ou de chaux, afin, notamment, d'accroître la capacité d'échange en cations ;
- faible capacité d'adsorption, néanmoins, des nutriments apportés par les engrais ou provenant de la minéralisation des résidus de récoltes et risques importants de lixiviation ;
- éventualité d'une carence en silice ;
- possibilité de toxicités métalliques ;
- intérêt des amendements organiques, non seulement pour renforcer la capacité d'échange en cations, mais aussi, peut être, pour atténuer la fixation du phosphore ou les éventuelles toxicités métalliques.

Problèmes des premières recherches

NÉCESSITÉ DE PRÉCISER LA VARIABILITÉ DES FACIÈS DES SOLS FERRITIQUES.

Les premières questions auxquelles il était essentiel de répondre se situaient, toutefois, en amont de celles découlant de l'inventaire des contraintes culturales probables. En effet, il s'agissait d'être clairement informé sur les principaux faciès des sols ferrallitiques ferritiques des massifs ultramafiques du Sud, la logique de leur organisation et les niveaux de leurs principales caractéristiques physiques et chimiques, afin de pouvoir choisir celui ou ceux sur lesquelles porteraient préférentiellement les recherches expérimentales suivantes à caractère plus agropédologique. Ces questions firent l'objet de la première opération du programme intitulée "Organisation structurale des sols ferrallitiques des massifs du Sud".

Les résultats de ces travaux ont été présentés dans trois documents (Bourdon & Becquer 1992a ; Bourdon *et al.* 1993), ainsi que dans une communication (Becquer & Bourdon 1992) et deux posters présentées à l'occasion du séminaire "Sols et fertilité des petites îles du

Tableau 1 Principales caractéristiques physiques et chimiques des faciès arables des sols ferrallitiques ferritiques du Sud de la Nouvelle-Calédonie

Caractéristiques	Unités	Sols de piedmont			Sols de glaciis			Sols de vallée		
		Ap/A ₁	AB et/ou B ₁	B ₂	Ap/A ₁	AC	C	Ap	AC alluvial	IIC alluvial
Épaisseur des horizons	cm	10	37	105	5	22	102	16	35	90
Argile	%	34	40,6	45,1	32,7	30,5	33,9	18,4	19,8	17,3
Limon fin	%	28,6	30,8	31,2	27,5	31,5	25,2	21,0	24,4	22,6
Limon grossier	%	13,5	11,9	12,2	17,0	9,0	8,4	7,8	9,7	14,5
Sable fin	%	10,1	7,0	7,6	16,7	16,1	16,5	31,2	30,0	30,0
Sable grossier	%	13,7	10,7	3,2	8,0	10,4	15,0	20,8	14,4	15,0
Éléments grossiers	%	2,3	1,0	0	10,5	3,7	2,0	0,7	0,4	2,9
Matière organique totale	%	2,3	0,65	0	4,7	2,6	0	3,0	1,8	0
Réserve en eau	%	6,4	4,6	7,2	8,8	6,8	3,7	8,4	8,6	6,9
pH KCl		6,1	6,1	6,4	5,8	5,8	6,2	6,1	6,3	6,4
pH Eau		5,6	5,6	5,3	6,0	6,1	6,4	6,3	6,5	6,5
Carbone total	mg g ⁻¹	13,2	6,1	0	23,8	25,8	0	17,9	9,5	0
Azote total	mg g ⁻¹	0,75	0,45	0	1,45	1,5	0	1,32	0,68	0
C/N		15,9	12,9		15,4	13,6		13,8	14,3	
Phosphore total (P ₂ O ₅)	mg g ⁻¹	0,73 / 0,07	0,54 / 0,05	0,05	0,57 / 0,09	0,07	0	1,28	0,10	0
P ₂ O ₅ assimilable	mg g ⁻¹	0,02 / 0,004	0,02 / 0,004	0	0,03	0	0	0,06	0	0
Ca échangeable	cmol kg ⁻¹	1,11	0,52	0,06	2,93	3,23	1,19	3,72	1,94	0,57
Mg échangeable	cmol kg ⁻¹	0,53	0,13	0,02	3,05	4,34	5,58	4,86	4,73	4,76
K échangeable	cmol kg ⁻¹	0,12	0,08	0,02	0,27	0,17	0,05	0,33	0,17	0,2
Na échangeable	cmol kg ⁻¹	0,12	traces	0,03	0,19	0,12	0,12	0,14	0,12	0,13
Somme des bases	cmol kg ⁻¹	1,88	0,81	0,14	6,89	7,86	6,96	9,0	6,5	5,5
Capacité d'échange	cmol kg ⁻¹	-2,5 à 3,5	-0,5	-4,3	10,6	11,8	10,6	11,2	8,6	6,7
Chrome (Cr ₂ O ₃)	%	2,5	2	2	1,56	1,73	1,42	2,24	1,78	1,93
Nickel (NiO)	%	0,7	0,73	0,73	1,16	1,25	1,20	1,02	1,07	1,04
Manganèse (MnO ₂)	%	0,65	0,57	0,57	0,89	1,05	0,97	0,76	0,86	0,83
Cobalt (CoO)	%	0,06	0,05	0,05	0,10	0,10	0,10	0,09	0,10	0,09
Fer (Fe ₂ O ₃)	%	70,93	-	-	67,6	-	-	54,76	-	-
Aluminium (Al ₂ O ₃)	%	9,32	-	-	10,09	-	-	7,64	-	-

Pacifique Sud” qui s’est tenu à Nouméa du 16 au 21 novembre 1992. Ils permirent effectivement :

- de décrire les principaux faciès de sols ferrallitiques présents dans les massifs du Sud et de comprendre la logique de leur organisation ;
- de préciser les différents faciès ferritiques susceptibles d’être rencontrés sur péridotites et, parmi ces derniers, ceux cultivés ou cultivables (faciès arables) ;
- de choisir les faciès de glacis pour les premières études expérimentales envisagées sur les carences et les déséquilibres minéraux de ce type de sols ;
- de mettre en évidence le caractère généralement superficiel des enracinements, aussi bien de ceux des espèces endémiques des maquis miniers que de ceux des espèces cultivées.

Intérêt d’une enquête agropédologique sur le statut des nutriments et des métaux potentiellement toxiques chez les végétaux cultivés par les maraîchers installés sur des faciès ferritiques

La recherche de références sur le comportement et la nutrition minérale de végétaux cultivés sur des sols ferrallitiques ferritiques analogues à ceux de Nouvelle-Calédonie n’apporta, pratiquement, aucune information susceptible de permettre une interprétation claire des problèmes observés ou signalés, ou une orientation précise des premières recherches expérimentales à envisager. Une enquête agropédologique sur le statut des nutriments et des métaux potentiellement toxiques chez les végétaux cultivés sur les faciès ferritiques du Sud s’imposait donc.

Plus précisément, disposer d’un tel référentiel pour ces conditions de milieux devait permettre, non seulement de mieux appréhender les problèmes de nutrition et de toxicité lorsque l’on dispose déjà de normes en la matière, mais aussi, à terme, d’établir un certain parallélisme entre le comportement des espèces cultivées observées sur le terrain et celui de ces mêmes espèces, ou d’autres, utilisées comme plantes-tests sur des expérimentations en laboratoire, en serre ou au champ.

Cette enquête agropédologique fut le support de la seconde opération du programme intitulée “Statut des nutriments et des métaux de transition chez les végétaux cultivés sur les sols

ferrallitiques ferritiques du Sud”. Devant s’appuyer sur les résultats de la première opération pour une identification précise des faciès ferritiques et de leurs volumes, elle démarra un an après elle par la mise au point de la démarche. Celle-ci fut présentée dans une communication (Edighoffer 1992) et deux posters lors du séminaire “Sols et fertilité des petites îles du Pacifique Sud”. Ses premières données furent publiées par Edighoffer (1993) et Edighoffer & Bourdon (1993, 1994). Elle s’achève actuellement. La communication d’Edighoffer (1997), présentée à l’occasion de cette conférence, montre que l’on était effectivement fondé à s’interroger sur :

- les niveaux atteints par les teneurs en Ni, Cr, Co et Mn chez les végétaux cultivés sur les sols ferritiques du Sud ;
- l’importance des déséquilibres calco-magnésiens ;
- les variations de ces paramètres en fonction des faciès ferritiques exploités et des espèces ou des variétés cultivées.

Elle conforte l’idée que l’amélioration des rendements, souvent médiocres, passe aussi par des criblages intra- et inter-spécifiques de sensibilité aux métaux lourds, au nickel notamment, selon la méthode mise au point par L’Huillier (1992).

Enfin, les examens de profils culturaux, réalisés systématiquement lors des observations et des prélèvements de végétaux et de sols, confirmèrent le caractère superficiel, absolument général, des enracinements.

Obligation de conduire sur vases de végétation la majeure partie des recherches expérimentales sur les carences en nutriments et les toxicités métalliques

La définition de courbes de réponse à des doses croissantes de phosphore, la mise en évidence de carences en oligo-éléments, l’établissement de seuils de toxicité pour le nickel, etc. devaient constituer une part importante des recherches à entreprendre pour cerner progressivement les problèmes de mise en valeur des sols ferritiques et leur apporter des solutions. En d’autres régions du monde (disons : dans les grands pays), nombre de ces questions auraient probablement été abordées directement à l’aide d’expérimentations en plein champ. Dans le cas pré-

sent, du fait principalement du caractère limité des surfaces disponibles pour la réalisation de telles expérimentations, la majeure partie de ces études devait être conduite à l'aide de cultures sur vases de végétation sous serre et selon des protocoles respectant au mieux les règles du «parallélisme serre-champ».

La technique de culture sur vases de végétation répondant à cette exigence existait. Elle avait été mise au point par Bonzon et Denis pour, justement, pallier, en partie, les difficultés de réalisation d'expérimentations au champ sur les petites îles. Cette technique a été décrite par Bonzon *et al.* (1992a) et Bonzon & L'Huillier (1992).

Ces recherches ont été regroupées dans deux opérations importantes intitulées respectivement "Carences et déséquilibres minéraux des sols ferrallitiques ferritiques" et "Toxicité du nickel et des métaux de transition". Leurs résultats, auxquels on peut rattacher ceux de Pujol (1989), ont été présentés par Edighoffer (1991), Gourdon *et al.* (1991), L'Huillier & Edighoffer (1992), Gourdon *et al.* (1992), L'Huillier (1992, 1993), Capart & Bonzon (1993), Capart *et al.* (1993).

Nécessité, cependant, de pouvoir réaliser des expérimentations au champ

Certaines questions ne pourraient, toutefois, pas être étudiées sur vases de végétation. Ainsi en serait-il de l'évolution des caractéristiques physiques et chimiques du sol sous culture, ou du problème des arrière-effets, tant sur le sol que sur la plante, des doses élevées de phosphore que l'on serait amené à appliquer à ce type de sol pour lever sa très forte carence en cet élément. Ou encore des effets et/ou des arrière-effets des amendements silicatés ou organiques. Pour aborder ces questions, un important dispositif expérimental au champ a donc été mis en place à partir de 1994 sur la Station Forestière de Ouénarou, en collaboration avec le Centre Interprovincial de Recherche et d'Expérimentation Agronomiques et grâce à l'obligeance du Service de l'Environnement de la Province Sud. Choisi sur glaciais, ce type de site fit l'objet de plusieurs reconnaissances pédologiques fines, dont la première remonte à 1990 (Bourdon 1990).

Évidence d'un continuum entre recherches appliquées et recherches fondamentales

Énoncées en termes simples et compréhensibles, pratiquement toutes les contraintes culturelles à lever recouvrent, en fait, de nombreuses questions relevant aussi bien de la Recherche Appliquée que de la Recherche Fondamentale.

Cette évidence amena très tôt le Laboratoire d'Agropédologie à établir des relations de travail avec des spécialistes d'autres laboratoires.

Ainsi en est-il de la toxicité du nickel. Dans le prolongement des questions que l'on se posait au départ sur les symptômes de cette toxicité et sur ses effets sur le développement et la nutrition minérale de la plante, questions relevant, pour leur approche, de méthodes et de techniques d'études très classiques, se profilaient, en effet, des interrogations sur la physiologie de la plante - sur les mécanismes impliqués dans cette toxicité (L'Huillier 1996). De la même façon, l'étude de la biodisponibilité du nickel dans les différents faciès ferritiques du Sud, biodisponibilité qui devait être caractérisée par des méthodes classiques de la Chimie des Sols, se devait d'être complétée par la caractérisation des différentes formes de nickel dans ces sols (Quantin *et al.* 1997 ; Becquer *et al.* 1997). Cette dualité transparait clairement dans les rapports et publications d'Edighoffer (1991), L'Huillier & Edighoffer (1991, 1992), L'Huillier (1992, 1993), L'Huillier *et al.* (1994), Becquer *et al.* (1995a, 1995b, 1997) et, surtout, dans la thèse de L'Huillier (1996).

Évolution des questions et problèmes actuels

Comme dans tout programme de recherche d'une certaine importance, les réponses apportées aux questions posées initialement se sont accompagnées de nouvelles interrogations. De ce fait, l'ensemble «connaissances acquises et nouveaux problèmes» complexifie progressivement la définition des conditions de mise en valeur des sols ferrallitiques ferritiques.

Conséquences des résultats des opérations antérieures et des premières observations effectuées sur le dispositif expérimental au champ de Ouénarou, le Laboratoire d'Agropédologie focalise maintenant ses préoccupations sur trois questions :

- la recherche de variétés et d'espèces résis-

tantes, ou tolérantes, au nickel et aux autres métaux de transition ;

- l'influence des techniques culturales, lato sensu et des plantes cultivées sur la dynamique des nutriments et des métaux de transition ;
- les raisons du caractère superficiel des enracinements.

Recherche de variétés résistantes ou tolérantes au nickel et aux autres métaux de transition

Les tests de sensibilité au nickel, mis au point par L'Huillier (1996) sur maïs, doivent, à présent, être exploités pour procéder à des criblages intra- et interspécifiques de sensibilité à cet élément, puis aux autres métaux de transition. Plus précisément, ces tests permettent, à la fois, de distinguer les variétés ou les espèces résistantes de celles tolérantes ou sensibles et de définir des seuils de toxicité. Devraient leur faire suite, très logiquement, un développement des premières études des mécanismes d'action du nickel et des autres métaux de transition sur les plantes.

Recherches sur l'influence des cultures sur la dynamique des nutriments et des métaux de transition

Ces recherches portent en priorité sur la fixation du phosphore, la biodisponibilité du nickel et la mobilité des autres nutriments et métaux de transition. Elles s'appuient actuellement sur le dispositif expérimental de Ouénarou, mais vont nécessairement comporter de nouvelles séries d'études expérimentales en serre et au laboratoire.

Recherches sur l'évolution des caractéristiques physiques et chimiques du profil cultural en relation avec celle de l'enracinement et du comportement général de la plante

Abordée, dans un premier temps, sous végétation naturelle et sur une toposéquence proche du dispositif expérimental de Ouénarou (Bourdon *et al.* 1997), la question de l'évolution des caractéristiques physiques et chimiques du profil cultural en relation avec celle de l'enracinement et du comportement général des plantes cultivées doit être approfondie. En effet, le caractère superficiel des enracinements constitue certainement un facteur limitant important du développement des cultures, des espèces

pérennes tout particulièrement. Une meilleure connaissance des facteurs en cause devrait permettre de définir les moyens à mettre en oeuvre pour y remédier.

Conclusion

Les problèmes de fertilité affectant les sols ferrallitiques ferritiques de la Nouvelle-Calédonie font certainement partie de ceux les plus difficiles à résoudre.

Au plan technique, les solutions trouvées pour assurer un bon démarrage des cultures ne sont encore que partielles et, surtout, ne sauraient présager de la pérennité de leurs effets, même à court terme. Ainsi en est-il de la carence en phosphore dont on sait maintenant qu'elle peut être complètement levée par une application de l'ordre de 7 tonne ha⁻¹ de P₂O₅, mais dont on ignore encore l'évolution après un tel traitement, ou s'il est possible de l'atténuer par d'autres moyens. Ainsi en est-il également de la toxicité du nickel pour laquelle on dispose à présent de tests pour sélectionner les espèces et les variétés résistantes ou tolérantes, mais dont l'évolution en fonction du temps et des techniques culturales, de même que la variabilité dans des conditions de sols très voisines, constituent encore des inconnues.

Au plan scientifique, des réponses précises ont été données à plusieurs des questions posées. Mais ces réponses s'accompagnent toujours de nouvelles interrogations, témoignant par là-même de la complexité des problèmes mais aussi de la très forte valeur heuristique du programme.

Finalement, on ne peut que se réjouir que les conditions socio-économiques de la Nouvelle-Calédonie et, plus précisément, de sa Province Sud, permettent à la recherche de se pencher sur les problèmes des conditions de mise en valeur des sols ferrallitiques ferritiques : en tout autre lieu, ces problèmes auraient certainement été laissés de côté, non pas en raison de leurs difficultés, ni de leur intérêt, mais de leur importance économique moindre par comparaison à celle des problèmes affectant les autres sols cultivables.

Remerciements

Les auteurs remercient la Province Sud de Nouvelle-Calédonie pour l'aide financière

apportée dans le cadre de la Convention de recherche entre la Province Sud et l'ORSTOM pour l'étude des facteurs de la fertilité et des conditions de mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Grande Terre, ainsi que le Centre Interprovincial de Recherche et d'Expérimentation Agronomiques de Nessadiou (CRÉA) pour la réalisation des expérimentations au champ et d'une partie des expérimentations en serre.

Bibliographie

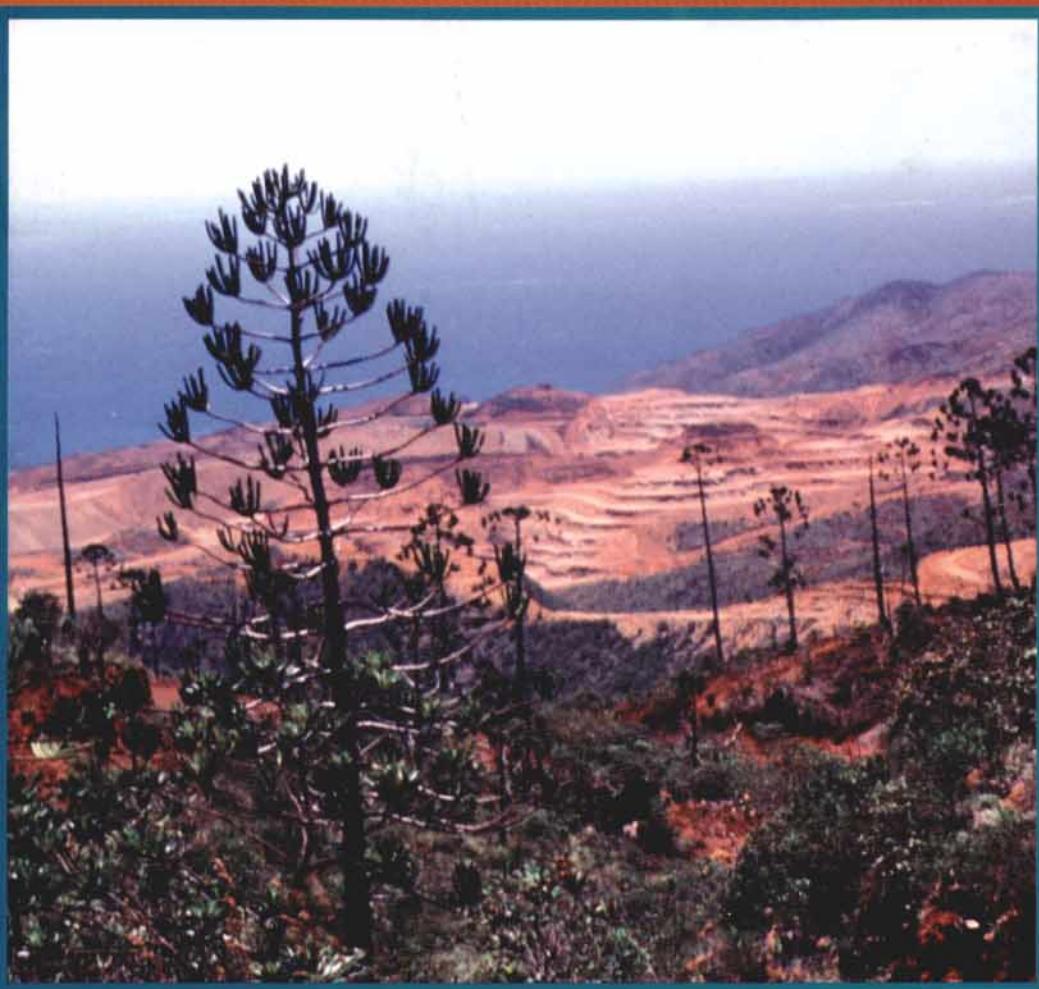
- Becquer, T. & Bourdon, E. (1992) Etude de l'organisation des sols dans le paysage et constitution d'un référentiel des sols. Application à la cartographie et à l'évaluation des sols du Sud de la Nouvelle-Calédonie. *Atelier «Sols et fertilité des petites îles du Pacifique Sud»*, Nouméa, Nouvelle-Calédonie, 16-21 novembre 1992.
- Becquer, T., Bourdon, E. & L'Huillier, L. (1995a) Disponibilité du nickel dans les sols développés sur roches ultramafiques de Nouvelle-Calédonie. *Troisième Conférence Internationale sur la Biogéochimie des Éléments Traces*, Paris, 15-19 mai 1995.
- Becquer, T., Bourdon, E. & Pétard, J. (1995b) Disponibilité du nickel le long d'une toposéquence de sols développés sur roches ultramafiques de Nouvelle-Calédonie. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, série **IIa**, **321**, 585-592.
- Becquer, T., Bourdon, E. & Quantin, P. (1997) Mobilité du nickel dans les sols ferrallitiques ferritiques du Sud de la Nouvelle-Calédonie. *Écologie des milieux sur roches ultramafiques et sur sols métallifères* (eds T. Jaffré, R.D. Reeves & T. Becquer), ORSTOM, Nouméa, ce volume.
- Bonzon, B., Denis, B., Latham, M. & Beaudou, A. (1992a) Systèmes de culture sur vases de végétation testés successivement. Méthodologie. Problème du parallélisme serre-champ. *Atelier «Sols et fertilité des petites îles du Pacifique Sud»*, Nouméa, Nouvelle-Calédonie, 16-21 novembre 1992.
- Bonzon, B., Denis, B. & L'Huillier, L. (1992b) Technique de culture avec irrigation par capillarité descendante utilisée actuellement. Avantages et inconvénients. Limites du système d'irrigation. *Atelier «Sols et fertilité des petites îles du Pacifique Sud»*, Nouméa, Nouvelle-Calédonie, 16-21 novembre 1992.
- Bonzon, B. & L'Huillier, L. (1992) Définitions des fumures minérales sur vases de végétation en fonction des plantes et des objectifs expérimentaux. Cas du maïs et du cocotier. *Atelier «Sols et fertilité des petites îles du Pacifique Sud»*, Nouméa, Nouvelle-Calédonie, 16-21 novembre 1992.
- Bourdon, E. (1990) Variations morphologiques et physico-chimiques d'une parcelle d'expérimentation de la Vallée de la Coulée (Sud de la Nouvelle-Calédonie). *Rapport de conventions, Sciences de la Vie, Agropédologie*, **5**, 36 pp. ORSTOM, Nouméa.
- Bourdon, E. & Becquer, T. (1992a) Etude préliminaire de l'organisation pédologique des sols ferrallitiques des massifs du sud de la Grande Terre : zone de la Coulée et de la Lembi. *Rapport de conventions, Sciences de la Vie, Agropédologie*, **12**, 19pp. ORSTOM, Nouméa.
- Bourdon, E. & Becquer, T. (1992b) Etude de l'organisation pédologique des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Grande Terre : zone de la Coulée et de la Lembi. Caractérisation physico-chimique des sols. *Rapport de conventions, Sciences de la Vie, Agropédologie*, **16**, 88 pp. ORSTOM, Nouméa.
- Bourdon, E., Becquer, T. & Tortelier, M.-C. (1993) Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Étude de l'organisation des sols : bassin amont de la rivière des Pirogues. *Rapport de conventions, Sciences de la Vie, Agropédologie*, **19**, 72 pp. ORSTOM, Nouméa.
- Bourdon, E., Becquer, T., Edighoffer, S. & Bonzon, B. (1994a) Evaluation de la compacité des sols ferrallitiques ferritiques (ferrallisol) de Nouvelle-Calédonie (relation avec l'enracinement). *Rapport de conventions, Sciences de la Vie, Agropédologie*, **26**, 35 pp. ORSTOM, Nouméa.
- Bourdon, E., Becquer, T. & Edighoffer, S. (1994b) Evaluation de la compacité des sols ferrallitiques ferritiques de Nouvelle-Calédonie - relation avec l'enracinement. *Réunion du Groupe Structure et Fertilité*, Montpellier, 12-13 septembre 1994.
- Bourdon, E., Becquer, T., Edighoffer, S. & Bonzon, B. (1997) Évaluation de la compacité des sols ferrallitiques ferritiques de Nouvelle-Calédonie : relations avec l'enracinement. *Écologie des milieux sur roches ultramafiques et sur sols*

- métallifères* (eds T. Jaffré, R.D. Reeves & T. Becquer), ORSTOM, Nouméa, ce volume.
- Bourdon, E. & Podwojewski, P. (1988) Morphopédologie des formations superficielles dans le Sud de la Nouvelle-Calédonie (Rivière des Pirogues, Plaine des Lacs). *Rapports scientifiques et techniques Sciences de la Terre, Pédologie*, **2**, 44 pp. ORSTOM, Nouméa.
- Capart, I & Bonzon, B. (1993) Mise en valeur des sols des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Effets de doses croissantes d'amendement phosphaté sur laitue et haricot (Etude en serre n° 6). *Rapport de conventions Sciences de la Vie, Agropédologie*, **21**, 58 pp., multigr. ORSTOM, Nouméa.
- Capart, I, Boucaron, C., Gourdon, F. & Bonzon, B. (1993) Mise en valeur des sols des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Effets de doses et de formes différentes d'amendements organiques sur maïs (Etude en serre n° 5). *Rapport de conventions, Sciences de la Vie, Agropédologie*, **20**, 26 pp. ORSTOM, Nouméa.
- Edighoffer, S. (1991) *Etude de l'influence des teneurs élevées en nickel des sols ferrallitiques ferritiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie, sur le comportement des plantes cultivées : premières études expérimentales de reconnaissance des problèmes à l'aide du maïs choisi comme plante-test*. Mémoire de fin d'études. 105 pp. ISARA-ORSTOM, Nouméa.
- Edighoffer, S. (1992) Enquête sur le statut des nutriments et des métaux lourds chez les végétaux cultivés sur les différents faciès des sols ferrallitiques des massifs du Sud. Définition de la démarche méthodologique au niveau de la parcelle agricole. *Atelier «Sols et fertilité des petites îles du Pacifique Sud»*, Nouméa, Nouvelle-Calédonie, 16-21 novembre 1992.
- Edighoffer, S. (1993) Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Enquête sur le statut des nutriments et des métaux lourds chez les végétaux cultivés sur différents faciès ferritiques. 2 - Observations réalisées chez M. Cochard. *Rapport de conventions, Sciences de la Vie, Agropédologie*, **23**, 115 pp. ORSTOM, Nouméa.
- Edighoffer, S. (1997) Statut des nutriments et des métaux lourds des cultures maraîchères et fruitières développées sur les sols oxydiques du Sud de la Nouvelle-Calédonie. *Écologie des milieux sur roches ultramafiques et sur sols métallifères* (eds T. Jaffré, R.D. Reeves & T. Becquer), ORSTOM, Nouméa, ce volume.
- Edighoffer, S. & Bourdon, E. (1993) Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Enquête sur le statut des nutriments et des métaux lourds chez les végétaux cultivés sur différents faciès ferritiques. 1 - Définition et mise à l'épreuve de la démarche agropédologiques grâce à une première enquête réalisée chez M. Cochard. Nouméa. *Rapport de conventions, Sciences de la Vie, Agropédologie*, **22**, 83 pp. ORSTOM, Nouméa.
- Edighoffer, S. & Bourdon, E. (1994) Mise en valeur des sols des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Enquête sur le statut des nutriments et des métaux lourds chez les végétaux cultivés sur différents faciès ferritiques. 2 - Observations réalisées chez M. Le Van Hao. *Rapport de conventions, Sciences de la Vie, Agropédologie*, **27**, 87 pp. ORSTOM, Nouméa.
- Gourdon, F., Boucaron, C. & Bonzon, B. (1992) Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Interaction phosphore-silice et influence de la matière organique : résultats de la troisième et de la quatrième études en serre. *Rapport de conventions, Sciences de la Vie, Agropédologie*, **14**, 60 pp. ORSTOM, Nouméa.
- Gourdon, F., Pujol, G., Boucaron, C., Bonzon, B., L'Huillier, L. & Collet, L. (1991) Mise en valeur des sols ferrallitiques ferritiques des massifs du Sud de la Grande Terre. Carences en phosphore et en silice : résultats des deux premières études expérimentales en serre. *Rapport de conventions, Sciences de la Vie, Agropédologie*, **9**, 53 pp. ORSTOM, Nouméa.
- Holmgren, G. G. S., Meyer, M. W., Chaney, R. L. & Daniels, R. B., (1993) Cadmium, lead, zinc, copper and nickel in agricultural soils of the United States of America. *Journal of Environmental Quality*, **22**, 335-348.
- Latham, M. (1986) *Altération et pédogénèse sur roches ultrabasiques en Nouvelle-Calédonie. Génèse et évolution des accumulations de fer et de silice en relation avec la formation du mode-lé*. Etudes et thèses, 331 pp. ORSTOM, Paris.
- Latham, M., Quantin, P. & Aubert, G. (1978) *Etudes des sols de la Nouvelle-Calédonie. Carte pédologique et d'aptitudes culturelles et forestières des sols à l'échelle du 1/1 000 000 eme*. Notice explicative, 138 pp. ORSTOM, Paris.

- L'Huillier, L. (1992) Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Effet d'une fumure organique sur la croissance et la nutrition minérale du maïs cultivé sur un sol ferrallitique riche en métaux lourds (Ni, Mn, Cr, Co). *Rapport de conventions, Sciences de la Vie, Agropédologie*, **15**, 112 pp. ORSTOM, Nouméa.
- L'Huillier, L. (1993) Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Développement complet du maïs intoxiqué par le nickel. Etudes complémentaires des effets du nickel sur la nutrition et la croissance du maïs. *Rapport de conventions, Sciences de la Vie, Agropédologie*, **18**, 60 pp. ORSTOM, Nouméa.
- L'Huillier, L. (1994) *Biodisponibilité du nickel dans les sols ferrallitiques ferritiques de Nouvelle-Calédonie. Effets toxiques de Ni sur le développement et la physiologie du maïs*, Thèse de Doctorat, *Travaux et Documents Microfichés*, **153**, 249 pp. ORSTOM, Paris.
- L'Huillier, L. & Edighoffer, S. (1991) Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Etude de la toxicité du nickel sur les plantes cultivées : synthèse des connaissances actuelles. *Rapport de conventions, Sciences de la Vie, Agropédologie*, **11**, 16 pp. ORSTOM, Nouméa.
- L'Huillier, L. & Edighoffer, S. (1992) Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Etude des effets de doses croissantes de sulfate de nickel sur la croissance, le développement et la nutrition du maïs. *Rapport de conventions, Sciences de la Vie, Agropédologie*, **13**, 84 pp. ORSTOM, Nouméa.
- L'Huillier, L., D'Auzac, J., Durand, M. & Michaud-Ferrière, N. (1994) Mise en valeur des sols ferrallitiques des massifs du Sud de la Nouvelle-Calédonie. Effets toxiques du nickel sur la structure et la physiologie de deux variétés de maïs. Approche d'un mécanisme de phytotoxicité du nickel. *Rapport de conventions, Sciences de la Vie, Agropédologie*, **25**, 20 pp. ORSTOM, Nouméa.
- Podwojewski, P. & Beaudou, A. G. (1987) Légende et carte morphopédologique de la Nouvelle-Calédonie au 1/200 000ème. *Rapport de conventions, Sciences de la Terre, Pédologie*, **10**. ORSTOM, Nouméa.
- Pujol, G. (1989) *Etude sur vase de végétation, sur un maïs, d'amendements phosphaté et calcique sur un sol ferrallitique ferritique du sud néo-calédonien*. Mémoire de fin d'étude de l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs et de Techniciens pour l'Agriculture. 101 pp. CREA, Bourail.
- Quantin, P., Bourdon, E. & Becquer, T. (1997) Minéralogie et contraintes édaphiques des sols dérivés de roches ultrabasiques en Nouvelle-Calédonie. *Écologie des milieux sur roches ultramafiques et sur sols métallifères* (eds T. Jaffré, R.D. Reeves & T. Becquer), ORSTOM, Nouméa, ce volume.
- Trescases, J. J. (1969) Premières observations sur l'altération des péridotites de Nouvelle-Calédonie (Pédologie, Géochimie, Géomorphologie). *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, **I(1)**, 27-57.

Écologie des milieux sur roches ultramafiques
et sur sols métallifères

The ecology of ultramafic and metalliferous areas



Éditeurs scientifiques - *Scientific editors*

T. Jaffré
R. D. Reeves
T. Becquer

L'Institut
français
de recherche
scientifique
pour le
développement
en coopération

ORSTOM

CENTRE DE NOUMÉA