

Caractérisation des déchets organiques et des milieux récepteurs (sols andiques) sous climat tropical

Cas de l'île de La Réunion

Pierre Chabalier^a, Thierry Morvan^b, Virginie Parnaudeau^c, Hervé Saint Macary^a

^a CIRAD, station de la Bretagne, BP 20, 97408 Saint-Denis
pierre.chabalier@cirad.fr

^b UMR INRA-ENSAR, 65 rue de Saint-Brieuc, 35042 Rennes cedex

^c INRA, unité d'Agronomie de Laon-Reims-Mons, BP 224, 51686 Reims cedex 2

La Réunion, île de la diversité, mais aussi île des complexités

La Réunion, île volcanique en milieu tropical, présente des écosystèmes particulièrement fragiles en raison du milieu physique difficile : pluviométrie importante avec passage fréquent de cyclones, relief tourmenté, fortes pentes, présence d'andosols particulièrement fragiles.

Tous ces facteurs font que l'érosion est très active à tous les niveaux. Si l'érosion géologique a sculpté des paysages accidentés magnifiques, l'érosion des sols sous culture pose des problèmes aux agriculteurs : perte des horizons de surfaces et donc de la fertilité des sols, apparition de ravines dans les champs, sur les pistes et les routes. Les fortes pertes en terre engendrées par les pluies fragilisent les milieux récepteurs et, particulièrement, les lagons.

L'insularité pose également de gros problèmes aux collectivités, comme ceux liés au traitement des nombreux déchets qui doivent être nécessairement recyclés sur des surfaces très limitées.

L'agriculture réunionnaise, s'inscrivant dans une logique de production intensive, constitue encore la principale ressource de l'île. Les 43 000 ha de SAU sont occupés principalement par la canne à sucre (23 000 ha) dans les Bas. Dans les Hauts, les prairies couvrent plus de 10 000 ha et continuent à s'étendre sur les anciennes terres à géranium et sur les friches forestières. Le reste des surfaces agricoles est constitué de maraîchage et des cultures fruitières. L'élevage se développe très rapidement pour faire face à la demande croissante de la population qui va atteindre le million d'habitants dans les 20 prochaines années.

Un des enjeux majeurs de cette agriculture réunionnaise est de gérer, c'est-à-dire valoriser mais aussi protéger, les espaces et les ressources renouvelables. La pérennité des exploitations agricoles et les équilibres écologiques sont conditionnés par la protection des ressources partagées (qualité de l'eau, maintien de la fertilité des sols, aménagement raisonné des espaces ruraux). Cette agriculture réunionnaise est face à un vrai défi, posé par le problème des effluents qui est d'autant plus difficile à relever que les possibilités de valorisation agronomique sont limitées par un ensemble de contraintes. Les petites structures foncières et les fortes contraintes topographiques (seuls 22% de la SAU

présentent des pentes inférieures à 10%), auxquelles s'ajoute le mitage urbain important et croissant de l'ensemble du territoire, rendent difficile la valorisation agronomique des effluents.

Ceci est d'autant plus vrai pour les produits liquides bruts et malodorants, comme les lisiers d'élevage, qui représentent plus des trois-quarts de l'azote des déchets organiques.

Pour aider les agriculteurs dans leur décision et afin de ne pas produire de la pollution par des nitrates, les conditions d'épandage des effluents sont définies par un ensemble de conseils et de normes dans un document appelé le CBPA (Code de bonnes pratiques agricoles, directive nitrate 91/676/CEE). Les résultats de suivi analytique sur différents captages ont globalement confirmé le faible niveau de contamination des eaux par les nitrates, mis à part un secteur particulier où le maraîchage et l'élevage sont très développés. Mais dans l'ensemble, on observe l'augmentation progressive des teneurs depuis 10 ans. Il y a donc lieu de se préoccuper de ce problème.

Mais les spécificités des systèmes de culture et des sols tropicaux liées aux particularités climatiques rendent nécessaire l'adaptation du CBPA élaboré en métropole aux conditions de La Réunion.

À titre d'exemple de systèmes locaux, les fourrages sont coupés et fertilisés un minimum de 5 fois par an avec des productions de 15 à 20 t/ha de matière sèche. Les terrains maraîchers produisent 4 à 6 cycles par an de cultures maraîchères.

Cette adaptation suppose l'acquisition de connaissances sur le cycle biogéochimique de l'azote en milieu tropical, en particulier sur les processus de minéralisation de la matière organique (MO) des sols et des produits apportés, qui déterminent la valeur fertilisante des produits organiques et qui peuvent ainsi évaluer les risques de pollution. Les expérimentations conduites dans le cadre du programme « AGREDE » concernent essentiellement la caractérisation des produits et des milieux récepteurs : analyse des déchets, mise au point de test concernant la stabilité, l'efficacité et la valeur agronomique des produits et la prise en compte du fond géochimique en éléments traces métalliques (ETM).

Nous développerons ici quelques aspects des résultats obtenus.

Décomposition de produits organiques et minéralisation de sols

La nécessité de disposer de connaissances acquises dans des conditions standardisées pour pouvoir paramétrer des modèles dynamiques de prévision des biotransformations a conduit à mettre en œuvre des expérimentations ayant pour objectif de préciser la dynamique de l'azote dans les sols réunionnais.

Deux expérimentations ont porté, en 2000, sur la caractérisation au laboratoire de l'activité minéralisatrice de 8 types de sols cultivés de La Réunion et sur la minéralisation du carbone et de l'azote de différents produits organiques. Ces produits, issus d'élevages et de l'industrie agro-alimentaire ont été étudiés dans deux sols représentatifs des sols cultivés de l'île : un andosol des Hauts et un sol brun-ferrallitique des Bas.

Une expérimentation complémentaire a été menée en 2002, conjointement avec le laboratoire de l'INRA de Reims, pour préciser certains résultats obtenus sur l'effet des températures sur les cinétiques de minéralisation de produits organiques dans les 2 sols choisis.

La transformation de l'azote et du carbone de produits organiques issus de l'élevage et de l'agro-industrie a été suivie sur ces deux sols. Les résultats (tab. I, ci-après) montrent les grandes différences de comportement des produits selon leur nature et leur origine.

Tableau I. Origine et nature des produits organiques apportés aux sols

Désignation	Type de produit	Azote total (en % de la matière sèche)	Carbone organique/azote total
A	déchets verts compostés	2,04	12,7
B	déchets verts plus boues de STEP compostés	2,09	11,4
C	litière de volailles compostée	2,80	11,0
D	litière fraîche de volailles	5,19	8,1
E	compost de lisier de porc sur bagasse	2,82	10,5
F	compost de lisier de porc sur litière de volaille plus sciure	2,09	18,8
G	litière de bœuf fraîche sur paille de canne	1,63	26,9
H	compost de litière de bœuf sur paille de canne à sucre (6 mois)	2,37	14,9
I	écumes de cannes à sucre compostées (8 mois)	3,03	9,0

En ce qui concerne la minéralisation de l'azote, l'effet du sol est peu important comparativement à celui des produits. Trois grands types de comportement pour les 9 produits étudiés ont été observés : (1) forte activité de minéralisation dès le début de l'incubation avec des produits fermentescibles et de faible rapport carbone/azote (C/N) (fumier frais de volaille) ; (2) organisation nette relativement importante observée avec des produits frais de C/N relativement élevé (25-30) (fumiers frais de bovin) et (3) très faible activité des produits compostés qui minéralisent (ou organisent) très peu d'azote tout au long de l'expérience.

L'analyse de variance effectuée sur les taux de minéralisation de l'azote organique a permis d'identifier 5 groupes de produits :

- la litière fraîche de volaille sur copeaux de bois, dont le taux de minéralisation très élevé représente 58% de l'azote organique apporté ;
- le compost de lisier de porc sur bagasse avec un taux de minéralisation de 26,9% ;
- les écumes de sucrerie compostées (14,8% de l'azote organique minéralisé) ;
- un groupe composé des produits suivants : compost de litière de volaille, compost de lisier de porc avec fumier de volaille plus sciure, et compost de déchets verts plus boues de station d'épuration avec des taux de minéralisation de l'azote organique compris entre 1 et 3% ;
- un groupe correspondant aux produits organiques induisant une organisation nette de l'azote : les déchets verts compostés, le fumier frais de bovin et le compost de fumier de bovin sur paille de canne à sucre.

La minéralisation de l'azote est fortement corrélée aux caractéristiques suivantes : azote total ($r = 0,81$), cellulose ($r = - 0,55$), C/N ($r = - 0,84$), polyphénols totaux plus lignine ($r = 0,50$).

Pour simplifier, les produits peuvent finalement être classés en 3 groupes :

- les composts, peu réactifs, dont la phase soluble paraît être résistante à la dégradation. Au sein de ce groupe, certains minéralisent et d'autres organisent l'azote. Les indicateurs permettent difficilement de déterminer à l'avance leur comportement, hormis le rapport C/N qui donne une indication très globale. Ceux qui organisent le plus sont les moins humifiés et les plus jeunes. L'écume de canne est particulière car elle minéralise plus d'azote que de carbone, ce qui s'explique par un C/N de 10 dans toutes les fractions ;
- les produits très réactifs (jeunes et non compostés) qui minéralisent beaucoup d'azote et pour lesquels le rapport C/N et la fraction soluble sont de bons indicateurs ;
- les produits très réactifs qui minéralisent beaucoup de carbone mais organisent beaucoup d'azote et pour lesquels le rapport C/N élevé est un bon indicateur.

Malgré leur acidité et la faible part du compartiment microbien, la réactivité des 2 sols étudiés vis-à-vis de la décomposition de la MO fraîche est importante : les taux de minéralisation des produits compostés, compris entre 10 et 20% ont tendance à être supérieurs à ceux mesurés sur des sols tempérés où ils varient de 5 à 12% (Morvan *et al.*, 2001). On observe aussi des différences de dynamique de l'azote entre les sols de climat tempéré et ceux de la Réunion. En effet, on ne note plus après 14 jours de minéralisation ou de réorganisation de l'azote dans ces sols, alors que ces dynamiques se prolongent plus longtemps pour les sols tempérés.

Les résultats sur l'étude de la minéralisation potentielle de 8 sols tropicaux de La Réunion ont montré de fortes différences de comportement entre les sols, mis dans des conditions favorables de minéralisation analogues (température et humidité).

La minéralisation cumulée de l'azote varie considérablement selon les sols : les deux andosols perhydratés minéralisent entre 120 et 150 µg/g de sol d'azote en 112 jours, tandis que d'autres sols (différents sols bruns, sol ferrallitique) minéralisent moins de 40 µg/g de sol d'azote, soit moins de 0,36 µg/g de sol d'azote par jour. Cette valeur est très faible comparativement à la minéralisation mesurée sur des sols développés en climat tempéré (Mary, 1988 ; Morvan *et al.*, 2002).

L'activité minéralisatrice des sols 3 à 5 (andosol, sol ferrallitique andique ou vertique) est nettement plus importante durant les deux premières semaines de l'essai que durant la suite et il est probable que ce « flush » s'explique par la décomposition de la MO fraîche encore présente dans le sol à la mise en place de l'essai.

Tableau II. Description des sols

Numéro	Type de sol	Lieu et altitude	Teneur en MO %	C/N	pH
1	Andosol perhydraté	plaine des Cafres - 1 400 m	12,4	11,8	5,5
2	Andosol perhydraté	Ste Rose 200 m	16,7	9,9	5,3
3	Andosol	Hauts de l'ouest - 1 000 m (Colimaçons)	5,3	10,4	4,8
4	sol ferrallitique andique	Ste-Suzanne-les-Hauts - 250 m	3,9	10,4	5,3
5	sol brun ferrallitique	La-Bretagne - 150 m	3,0	10,2	5,9
6	sol brun	St-Gilles-les-Hauts - ouest - 400 m	3,1	8,2	4,8
7	sol brun vertique	Savanna-St-Paul - ouest - 50 m	4,2	11,3	6,6
8	sol ferrallitique	Ste-Suzanne - 50 m	2,7	9,0	4,5

Il paraît alors pertinent d'évaluer la minéralisation basale de ces sols en excluant le flux de minéralisation associé à ce compartiment de MO labile. Cette approche a été retenue en ajustant sur les données de chaque sol le modèle bi-compartimental suivant : $N \text{ minéralisé} = A (1 - e^{(-kt)}) + Bt$

Le premier terme désigne la minéralisation du compartiment labile (racines) et le deuxième la minéralisation « basale ». Le tableau III fournit les coefficients calculés pour les différents sols. Les valeurs de B varient de 0,11 à 0,25 µg/j d'azote pour les sols 5 à 8, ce qui confirme la très faible activité minéralisatrice de ces sols (tab. III, ci-après).

La minéralisation de l'azote mesurée sur les sols témoins est très hautement corrélée ($P = 0,001$) à la teneur en matière organique ; elle est également très hautement corrélée à la minéralisation du carbone.

Tableau III. Valeurs des paramètres A, k, B du modèle bicompartimental calculés sur les flux de N minéralisé sur les 8 sols.

Sol	1	2	3	4	5	6	7	8
A (µg d'azote)	16	17	13	7	17	0	17	0
k (par jour)	0,01	0,14	0,16	0,2	0,15	–	0,14	–
B (µg/j d'azote)	0,74	1,15	0,49	0,35	0,11	0,25	0,13	0,13

Effet de la température sur les dynamiques de minéralisation de l'azote et du carbone des produits organiques apportés aux sols

Il a été mis en évidence dans ces expérimentations que la température avait un effet complexe sur la dynamique de minéralisation du carbone et de l'azote.

Des expérimentations complémentaires ont été menées spécialement en 2002 pour suivre l'effet des températures sur les cinétiques de minéralisation de l'azote et du carbone de produits ayant des rapports C/N différents. Cet effet de la température a été mis en évidence sur les deux sols à La Réunion (à 20°C et à 28°C) : les dynamiques sont plus ou moins marquées en fonction du type de sol et de la nature des produits. À partir de la loi de Van t'Hoff, l'établissement du coefficient thermique et du facteur d'inhibition des réactions biochimiques Q_{10} pour les températures de 20°C et 28°C permet de comparer les différences de minéralisation sur la gamme de produits testés. Nous attendons les résultats des expériences menées à l'INRA de Reims sur une plus grande gamme de températures pour conclure sur le type d'action de la température sur ces dynamiques.

Fond géochimique et éléments traces métalliques dans les sols de la Réunion

La plupart des sols cultivés à la Réunion ont des teneurs assez élevées en certains ETM et particulièrement en deux métaux présentant des risques toxicologiques : le nickel et le chrome.

Ces teneurs de métaux dans les sols découlent des teneurs initiales des différentes laves, support de formation des sols, et dont la composition en métaux dépend de la profondeur des chambres magmatiques d'origine.

Plus la lave est basique et contient des éléments de type olivine, plus elle est riche en métaux de type : fer, magnésium, nickel et chrome.

On ne connaît pas actuellement la mobilité et la disponibilité de ces métaux en fonction des caractéristiques des sols. D'après la littérature, les processus induisant une toxicité dans la plante, du fait de la mise sous des formes échangeables de ces métaux, semblent assez complexes. Ils dépendent de phénomènes biochimiques très liés à la matière organique et à la microflore du sol (Gerzabek et Ullah, 1990).

Des problèmes liés à ces fortes concentrations sont de plusieurs natures :

- les épandages de certains produits de type minéral ou organique peuvent être limités, voire interdits, sur ces mêmes sols, en raison des chartes, labels, cahiers des charges, etc., imposés par les industries agro-alimentaires en Métropole et en Europe ;

- une des explications de l'accumulation de la matière organique dans les andosols pourrait être la forte teneur en ces ETM. Ceux-ci bloqueraient notamment la microflore minéralisatrice, ce qui jouerait dans le sens de l'accumulation progressive de la matière organique dans ces sols ;
- enfin, certaines plantes pourraient concentrer ces éléments dans leurs tissus et devenir ainsi un danger potentiel pour la consommation des animaux et des hommes.

Les premiers résultats sur les analyses des échantillons des 8 sols prélevés pour les essais du programme AGREDE et des échantillons des plantes cultivées sur ces sols (canne à sucre et fourrages) montrent qu'il n'y a pas de relation directe entre les teneurs en ETM dans les sols et les teneurs en ETM dans les plantes. Les teneurs en nickel et chrome restent très faibles dans ces plantes, ce qui n'est pas le cas du fer et du manganèse qui sont en excès dans certains cas.

Cependant, il serait prudent de réaliser une étude plus complète sur des milieux et dans des conditions qui seraient *a priori* propices à ce genre de toxicité.

En effet, on note dans les cendres de canne à sucre recueillies à la sortie des usines sucrières, des teneurs fortes en chrome et en nickel. Ce qu'on ne trouve pas dans d'autres cendres de canne à sucre, comme celles de la Guadeloupe, où celles-ci proviennent de champs de sols volcaniques également. On peut donc faire l'hypothèse que la canne à sucre prélève les éléments traces en fonction de ce qu'il y a dans les sols (Cabidoche, 2001).

Mais, certaines plantes (famille des *Brassicaceae*), dont la physiologie serait propice à l'accumulation de ces métaux, pourraient ainsi contenir plus de ces éléments dans les mêmes conditions de culture et présenter ainsi un danger pour la consommation.

Tableau IV. Analyses des cendres de bagasse : teneurs en éléments et éléments traces métalliques (ETM) à La Réunion (Chabalière, 1999) et en Guadeloupe (Cabidoche, 2001) (Exprimées en mg/kg de matière sèche).

	Guadeloupe	La Réunion
Calcium	46 229	29 643
Magnésium	7 672	26 160
Sodium	900	4 300
Titane	4 340	14 100
Manganèse	1 892	2 080
Cuivre	77	70
Chrome	41	247
Nickel	10	169

En conclusion

Il apparaît bien qu'il existe des spécificités du climat, des systèmes de culture et des sols à La Réunion.

Cette étude contribue à confirmer un fonctionnement assez différent entre les sols tropicaux de La Réunion et les sols tempérés de Métropole.

Les points suivants ont été mis en évidence, notamment :

- une faible activité de minéralisation de l'azote de la matière organique endogène de l'ensemble des sols testés, en relation avec leur acidité et la faible taille du compartiment microbien ;
- une réactivité élevée des sols vis-à-vis de la décomposition de la matière organique de produits organiques apportés : la décomposition se produit de manière intense sur une courte durée quels que soient les produits ;
- un classement des produits organiques vis-à-vis de leur dynamique de décomposition dans les sols qui tient plus compte de leurs caractéristiques biochimiques que du type de sol dans lequel ils sont apportés ;
- la présence d'ETM, chrome et nickel, en fortes concentrations dans certains sols, qui pourrait limiter l'épandage de déchets organiques ■

Références bibliographiques

- CABIDOCHÉ Y.M., avril 2001. *Analyse de l'intérêt agronomique et des conditions d'innocuité pour les sols des cendres de bagasse*. Document Inra-Guadeloupe, 19 p.
- CHABALIER P.F., avril 1999. *Étude de la valeur agronomique des cendres de bagasse de la centrale thermique du Gol*. Document Cirad-Réunion, 17 p.
- GERZABEK M.H., ULLAH S.M., 1990. Influence of fulvic acid and humic acids on Cd and Ni toxicity to Zeamays. *Die Bodenkultur*, 41, 115-124, cité par BECQUER T., BOURDON E., L'HUILLIER L., 1993. *Disponibilité du nickel dans les sols développés sur roches ultramafiques de Nouvelle Calédonie*. Document Orstom Nouvelle Calédonie, 13 p.
- MARY B., 1988. *Rôle de la biomasse microbienne du sol dans la disponibilité en azote minéral en conditions de plein champ*. Rapport de fin de contrat Ministère de l'environnement, 62 p.
- MORVAN T., DACH J., PARNAUDEAU V., 2001. Relationships between biochemical composition of manure and composts and their carbon and nitrogen transformation in soil. *11th Nitrogen Workshop*, Reims, 9-12 sept 2001, 153-154.
- MORVAN T., CHABALIER P.F., SAINT MACARY H., PAILLAT J.M., 2002. Biotransformations résultants de l'apport de produits organiques sur de sols de la Réunion. *Actes du séminaire de l'ATP : modélisation des flux de biomasse*, 19-20 juin 2002, CIRAD, Montpellier, à paraître.

