

# RECYCLAGE DE DECHETS PAR LA CANNE À SUCRE : ESSAIS AVEC DES VINASSES DE DISTILLERIE

FEDER Frédéric\*, GOSME Marie, CHABALIER Pierre-François, SAINT MACARY Hervé,  
DOELSCH Emmanuel et ISAUTIER<sup>‡</sup> Jérôme

CIRAD, équipe REGARD (Risque Environnemental, Gestion Agricole, Recyclage des Déchets), PADEF  
Station de La Bretagne - BP 20 - 97408 Saint Denis Messagerie CEDEX 9, Ile de La Réunion, France.

\* Tél : 02 62 528 031. Fax : 02 62 52 80 21. E-mail: [frederic.feder@cirad.fr](mailto:frederic.feder@cirad.fr)

<sup>‡</sup> Établissement Isautier, BP 354, 97453 Saint Pierre CEDEX

Tél : 02 62 25 84 27. Fax : 02 62 35 60 92. E-mail: [ets.isautier@wanadoo.fr](mailto:ets.isautier@wanadoo.fr)

## Résumé

La vinasse de mélasse de distillerie de rhum est un effluent organo-minéral complexe dont nous avons cherché à évaluer l'impact environnemental lors d'épandages sur canne à sucre. Au cours de la campagne 2001, nous avons observé une faible variabilité du produit. Au laboratoire, le suivi de la dégradation organique des vinasses montre une rapide, mais incomplète, minéralisation. Les suivis, au champ, des propriétés physico-chimiques des sols (pH, conductivité électrique, capacité d'échange cationique et complexe échangeable) et des cannes à sucre (diagnostic foliaire : N, P, K, Ca, Mg) ne montrent pas de différences notables entre les parcelles où des vinasses ont été épandues et les témoins fertilisés avec un engrais 15.12.24. Un retour aux valeurs initiales des paramètres physico-chimiques du sol se dessine nettement cinq mois après l'épandage. Une confirmation à plus long terme de l'absence de risques pour l'environnement est nécessaire afin de chercher à valoriser ce produit comme fertilisant.

## Mots clés

effluent – vinasse – épandage – agro-épuration – impact environnemental

## Introduction

La préoccupation croissante pour le respect de l'environnement à la Réunion est justifiée par le souci de maintenir un cadre de vie agréable, des espaces agricoles suffisants et un milieu naturel exceptionnel. La croissance démographique prévue impliquera une augmentation de la production des déchets. Le milieu agricole, qui est une partie intégrante de l'écosystème de l'île, se trouve, à ce titre, confronté à une double problématique :

- Participer au recyclage et à la valorisation des déchets, de toutes origines (agricoles mais aussi urbaines ou industrielles) grâce aux fonctions épuratrices des systèmes biologiques ;
- Garantir l'absence de pollution des eaux, des sols ou de l'atmosphère liée au recyclage des déchets, tout en préservant l'innocuité des aliments.

Les directives relatives à la réutilisation agricole des déchets sont plus basées sur le principe de précaution que sur une réelle connaissance des processus de transformation, ou d'atténuation des contaminants. En effet, l'article 37 de l'arrêté ministériel relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation stipule que « les quantités épandues sont adaptées de manière à assurer l'apport des éléments utiles aux sols ou aux cultures sans excéder les besoins ». L'inconvénient majeur de cette législation est l'absence de prise en compte de la dynamique des systèmes naturels et notamment des

interactions sol-plante-déchet. En effet, dans une volonté de recyclage des déchets, la connaissance de ces interactions peut conduire à une optimisation des systèmes épurateurs agricoles tout en préservant la qualité du milieu naturel et des cultures.

La canne à sucre est une culture particulièrement efficace dans le cadre du recyclage par agro-épuration. En effet, elle possède un potentiel de production de matière végétale élevé qui se traduit par des exportations d'éléments minéraux importantes (Chabalier *et al.*, 1984). Son système racinaire extrêmement développé explore le sol de manière très efficace et la couverture quasiment permanente qu'elle maintient limite les phénomènes d'érosion (Van Dillewijn, 1951).

La production de rhum à la Réunion génère un déchet ultime en quantité importante : les vinasses. Leur production est estimée à 150 000 tonnes pour l'année 2000. Issues d'un processus agro-industriel « propre », elles possèdent une bonne qualité microbiologique et sont dépourvues de substances toxiques minérales. Elles n'en demeurent pas moins une source potentielle de pollution et de risque pour l'environnement en raison de leur forte charge en composés organiques et de leur teneur en potassium. À l'heure actuelle, chacune des trois distilleries de l'île de la Réunion a choisi une voie d'élimination des vinasses différente des autres. La distillerie de la Rivière du Mât rejette les vinasses en mer à l'aide d'un émissaire, celle de Bois Rouge les injecte en profondeur par un forage (Martial *et al.*, 2002) et la distillerie Isautier pratique l'épandage sur les champs de canne à sucre.

En partenariat avec la distillerie Isautier, nous avons entrepris d'évaluer l'impact environnemental du recyclage des vinasses sur champs de canne à sucre. L'originalité de cette étude réside dans le choix des échelles d'expérimentation. En effet, il était indispensable de répondre à plusieurs questions concernant le recyclage des vinasses par épandage sur canne à sucre :

- les vinasses qui sont produites tout au long de la campagne de distillation, présentent-elles des variations de leurs propriétés physico-chimiques ?
- les vinasses vont-elles se dégrader sans induire de phénomènes de toxicité, si oui à quelle vitesse et vont-elles restituer une partie de leurs éléments constitutifs à la culture et au sol, une fois épandue ?
- enfin, est-on en mesure de suivre après épandage sur une parcelle, une évolution du système sol-plante-déchet.

Pour répondre à ces questions, des expérimentations non seulement au laboratoire mais également à l'échelle de la parcelle ont été réalisées.

## Matériels et méthodes

La vinasse provenant d'une distillerie est un effluent organo-minéral complexe. L'étude de sa composition impose de disposer de moyens analytiques coûteux puisque l'on y retrouve des substances très différentes telles que des sucres réducteurs, des protéines, des acides organiques, des résidus phénoliques, des éléments minéraux, etc.

Il ne semble donc pas pertinent de proposer un suivi de l'évolution de la vinasse au cours de la campagne d'épandage en s'appuyant à chaque pas de temps sur une analyse détaillée de l'ensemble des constituants de la vinasse. C'est pourquoi nous avons choisi de suivre des paramètres physico-chimiques globaux et génériques, qui permettent de décrire l'évolution du système sol-plante-déchet après épandage : la CEC du sol <sup>1</sup>, la densité, la conductivité

---

<sup>1</sup> CEC : la capacité d'échange cationique correspond à la somme des cations compensant le déficit de charges du complexe absorbant du sol.

électrique, le pH, la DCO <sup>2</sup>, le % de MS <sup>3</sup>, l'analyse des éléments majeurs (N, P, K, Ca, ...). L'ensemble des analyses ont été réalisées au laboratoire d'analyses des sols et des plantes du CIRAD (Station la Bretagne).

Les vinasses étudiées correspondent à la campagne 2001. Au cours de la période comprise entre le 2 octobre et le 26 novembre, un prélèvement hebdomadaire (en sortie de la colonne de distillation) a été effectué puis analysé afin de suivre la variabilité des vinasses produites.

La dégradation au cours du temps des déchets organiques, comme les vinasses, peut être évaluée en mesurant les quantités de carbone et d'azote qui se minéralisent (Trinsoutrot *et al.*, 2000). En effet, les produits organiques se décomposent en produisant essentiellement du CO<sub>2</sub>, du NH<sub>4</sub><sup>+</sup> et du NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Les principaux facteurs influençant cette dégradation sont : le type de sol, la qualité de la matière organique apportée, les micro-organismes présents, et des facteurs abiotiques tels le degré d'humidité, la température, etc.

Nous avons étudié l'évolution, au cours du temps, des vinasses de distillerie dans des conditions contrôlées de température (20°C et 28°C) et d'humidité optimale à la capacité au champ (pF = 2,8) pour deux types de sols caractéristiques (sol brun ferrallitique des «bas » et andosol des «hauts»). Ces incubations en pots hermétiques permettent de mesurer le CO<sub>2</sub> produit <sup>4</sup> ainsi que l'azote ammoniacal (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) et l'azote nitrique (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) formés <sup>5</sup>. Les mesures sont réalisées aux jours 1, 2, 7, 14 et 22 (pour le carbone et l'azote), puis aux jours 28, 49 et 77 (pour le carbone uniquement), 35 et 56 (pour l'azote uniquement).

La mise en place des essais d'épandage a été réalisée sur des parcelles n'ayant jamais reçu de vinasses et appartenant à la société Isautier, productrice des vinasses. Le tableau 1 décrit les trois modalités appliquées. Nous ne présenterons que les résultats des traitements 1 et 3 ; le traitement 2 correspondant à une dose intermédiaire. Ainsi, sur les parcelles témoins (sans vinasse, traitement 1) 1000 kg par hectare d'engrais 15.12.24 sont apportées. Pour les parcelles traitées et présentées ici : 61 m<sup>3</sup> de vinasses par hectare sont épandues et on complète par 700 kg par hectare d'engrais 38.12.0 (traitement 3).

## Résultats

### *Variabilité de la composition des vinasses au cours de la campagne 2001*

Sur la figure 1, l'ensemble des variables enregistrées (pH, % MS, DCO, densité et conductivité électrique) sur les vinasses prélevées chaque semaine en sortie de la colonne de distillation durant la campagne 2001 sont reportées. Deux types de variables peuvent être distingués :

- celles ne présentant pas de variation significative au cours du temps : pH et densité ;
- celles qui varient au cours de la campagne : conductivité électrique, DCO et % MS.

Le pH des vinasses est acide (4,64 en moyenne) et relativement constant. Une compilation des données de la littérature montre que les vinasses étudiées sont légèrement moins acides que la moyenne (pH<sub>(moyenne)</sub> = 4,3 ; moyenne basée sur les données extraites des références suivantes : Pichot, 1983 ; Mazza *et al.*, 1986 ; Bontemps, 1987 ; Bazile and Bories, 1989 ; Matibiri, 1996 ; SUAD, 1996 ; MVAD, 1998). La densité à 20°C est constante et analogue à celle rencontrée dans la littérature. Si la conductivité électrique, la DCO et le % de MS

---

<sup>2</sup> DCO : la demande chimique en oxygène mesure la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder en présence de bichromate à chaud et en milieu acide, la matière organique contenue dans un échantillon.

<sup>3</sup> %MS : Le pourcentage de matière sèche est mesuré par différence de poids avant et après séchage à l'étuve à 105° C.

<sup>4</sup> Le CO<sub>2</sub> qui se dégage au cours de la minéralisation est piégé par de la soude, puis mesuré par une titration volumétrique.

<sup>5</sup> L'azote du sol est extrait par une solution de KCl ; on mesure ensuite par colorimétrie en flux continu l'azote en solution.

présentent des variations au cours de la campagne, celles-ci semblent aléatoires et ne pas traduire une dérive du processus de fabrication au cours du temps.

Une analyse plus complète a été réalisée sur les vinasses qui ont été utilisées dans le cadre de l'expérimentation sur la parcelle. Ces analyses comparées avec celles de la littérature soulignent l'uniformité de la composition de ce type d'effluent (tableau 2).

L'étude de la variabilité de la composition des vinasses au cours d'une campagne et la comparaison avec les données de la littérature permet de conclure que la vinasse est un effluent organo-minéral dont la composition est relativement constante au cours du temps et d'un site de fabrication à l'autre. Les faibles variations observées ne peuvent pas, *a priori*, être à l'origine de comportements fondamentalement différents dans les sols lors de l'épandage.

### ***Minéralisation des vinasses***

La seconde étape a consisté à évaluer le potentiel de dégradation des vinasses par des expériences de minéralisation réalisées en laboratoire en conditions contrôlées. Les résultats de ces expérimentations sont présentés dans les figures **2a** et **2b** pour l'azote et **3a** et **3b** pour le carbone. La production d'azote ammoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) est rapide au début de la minéralisation puis devient nulle après 7 à 22 jours, selon les conditions.  $\text{NH}_4^+$  est produit plus longtemps pour les températures d'incubation de 28 °C ainsi que pour l'andosol. L'azote nitrique ( $\text{NO}_3^-$ ) est, approximativement, dans un premier temps, immobilisé dans le sol (jusqu'à 21 à 35 jours). Ensuite, les quantités produites, au bout de 56 jours, sont équivalentes pour le sol brun ferrallitique et l'andosol. L'effet de la température est, au final, minime quelles que soient les conditions imposées. Après deux jours d'incubations, 30 à 40 % du carbone, selon le type de sol, est minéralisé en  $\text{CO}_2$ . Le sol témoin, sans vinasses, n'atteint que 4 % au maximum. Cette minéralisation rapide correspond à des vitesses comprises entre 5 et 25 mg de carbone par jour. À partir du septième jour, les vitesses de minéralisation deviennent très faibles (figure **3b**) : le pourcentage de carbone minéralisé augmente très lentement (figure **3a**).

Les vinasses sont donc des déchets organiques qui se dégradent vite mais incomplètement. Certaines formes carbonées ne se minéralisent pas bien. Les quantités initiales d'azote sont faibles. Cependant, dans les incubations, on observe toujours une première phase d'immobilisation de l'azote nitrique ( $\text{NO}_3^-$ ) dans le sol avant une production nette positive.

### ***Épandage des vinasses au champ***

Les conditions contrôlées au laboratoire ne permettent cependant pas d'appréhender la complexité des interactions qui se produisent au champ. C'est pourquoi nous avons couplé cette détermination de la dégradation des vinasses au laboratoire par des expérimentations sur le terrain en conditions de culture.

La figure **4a** présente l'évolution du pH du sol après l'épandage de vinasses. La précision de ces mesures est de  $\pm 0,05$  unité pH. On observe que c'est sur les parcelles témoins (apports d'engrais 15.12.24 mais pas de vinasses) que le pH du sol s'abaisse le plus. Après 5 mois, le pH n'est pas encore revenu à son niveau initial mais les différences entre les traitements avec ou sans vinasses restent significatives.

Il ne semble pas qu'une acidification du sol se développe ; cependant, seul un suivi à plus long terme de ces parcelles le démontrera. Nous pouvons néanmoins supposer que le retour à un pH vers le niveau initial s'explique par la dégradation relativement rapide des composés responsables de cette acidité, les acides organiques (Bousquet, 1987).

La figure **4b** montre que pour les trois premiers mois du suivi, la conductivité électrique du sol est plus élevée sur les parcelles avec vinasses ainsi que en surface (0 – 10 cm) plutôt qu'en profondeur (0 – 20 cm). La précision de ces mesures est inférieure à 5 %. Après 5 mois, les différences entre parcelles ne sont quasiment plus significatives.

Ces résultats sont cohérents avec les apports d'éléments minéraux (responsables de la conductivité électrique) présents en grande quantité dans la vinasse. Le décalage de deux mois par rapport à la date d'épandage s'explique sans doute par la présence d'un mulch qui a retenu les éléments minéraux. Ensuite, avec les pluies et les irrigations, ceux-ci pénètrent progressivement dans le sol. Enfin, après deux mois, on aurait donc une phase de lessivage de ces éléments minéraux avec pour conséquence une diminution de la conductivité électrique.

La figure **4c** présente l'évolution de la CEC au cours du temps. La précision de ces mesures est inférieure à 5 %. Les différences entre les parcelles témoins et les parcelles épandues avec des vinasses ne sont jamais très importantes (entre 1 et 2 méq. / 100g). On notera cependant les fortes valeurs de CEC des échantillons prélevés fin janvier après le passage du cyclone Dina. Les variations sur l'ensemble de la période étudiée sont cependant marquantes (entre 10 et 15 méq. / 100g).

Le pourcentage de potassium sur la CEC est représenté au cours du temps sur la figure **4d**. La précision obtenue sur ces mesures est inférieure à 5 %. On observe une très nette augmentation durant les deux premiers mois après l'épandage. Ensuite, la diminution progressive ne permet cependant pas, au bout de 5 mois, de retrouver les valeurs initiales. Comme pour les valeurs de la conductivité électrique, le pourcentage de potassium sur la CEC est plus élevé sur les parcelles épandues avec de la vinasse ainsi qu'en surface (0 – 10 cm). L'apport de vinasse, riche en potassium, explique ces augmentations.

### ***Diagnostic foliaire***

Les diagnostics foliaires réalisés sur la canne à sucre cinq mois après l'épandage sont présentés dans le tableau **3**. Aucune différence significative n'est observée entre les témoins et les parcelles épandues avec de la vinasse pour les éléments analysés.

### **Discussion**

Le suivi au champ de l'épandage des vinasses de distillerie montre que le mulch joue probablement un rôle important dans la libération progressive de certains éléments minéraux contenus dans les vinasses et les engrais. En effet, les conséquences les plus marquantes des apports d'engrais et de vinasses ont été enregistrés dans les sols après un mois (pour le pH et la conductivité électrique) et après deux mois (pour le pourcentage de potassium sur la CEC).

Après 5 mois, nous pouvons déjà constater que la composition de la canne à sucre ne reflète plus les hétérogénéités de composition chimique qui existaient entre les rangs (résultats non présentés ici) et entre les parcelles. De plus, les différents paramètres que nous avons suivis montrent une tendance allant vers un retour aux valeurs initiales avec une cinétique qu'il sera nécessaire de préciser.

Il est prévu, au cours des prochaines campagnes, de confirmer ces résultats sur des durées plus longues.

### ***Les vinasses de distillerie, un engrais complet ?***

Sous réserve d'une confirmation de l'absence de conséquences environnementales de l'utilisation des vinasses, il est possible de réfléchir à leur emploi comme engrais complet NPK auprès des exploitants cultivant la canne à sucre <sup>6</sup>.

La composition en NPK des vinasses ne correspond pas du tout aux doses idéales pour la canne à sucre (beaucoup de potassium pour peu d'azote et de phosphore). Cependant, nous pouvons imaginer trois principales possibilités d'utilisation :

1. apport de vinasses à des doses d'environ 80 m<sup>3</sup> / ha la première année puis, les deux années suivantes, apport d'engrais non potassique <sup>7</sup> (puisque les quantités apportés par les

---

<sup>6</sup> essentiellement à proximité des lieux de production des vinasses pour des raisons de coûts de transport.

vinasses sont importantes et une partie du potassium est toujours disponible sur le complexe d'échange).

2. apport de vinasses à des doses d'environ 80 m<sup>3</sup> / ha tous les ans et aucun engrais supplémentaire. Cependant, il est indispensable d'évaluer précisément, à moyen et long terme, les problèmes (pollution, saturation de la CEC, qualité de la canne, etc.) liés aux fortes concentrations de potassium.

3. apport toutes les années à faibles doses<sup>8</sup> de vinasses enrichies en azote et phosphore.

L'expérience de concentration et d'épandage de vinasses en 1992-1996 (SUAD, 1996) était arrivée à des propositions proches des nôtres. Ces possibilités doivent cependant répondre à des contraintes économiques. En première analyse, dans le cas d'un épandage direct, le produit de base est peu coûteux mais les transports constituent un poste de dépenses important ; inversement, les engrais synthétiques (ou des vinasses concentrées) ont essentiellement un coût à l'achat. La répartition de ces coûts entre le producteur d'effluents et l'utilisateur constitue donc un élément essentiel de la viabilité de la technique.

## Conclusion

Les vinasses de distillerie étudiées sont de composition relativement constante et se minéralisent bien dans les sols. Leur valorisation agronomique, sur la canne à sucre, ne présente pas de risques majeurs pour l'environnement, à court terme, aux doses testées. En effet, les différences, mesurées régulièrement pendant la croissance de la plante, sont minimales entre les parcelles témoins avec engrais et celles épandues avec les vinasses.

La capacité épuratoire des sols testés sur canne à sucre, à la parcelle et au laboratoire, permet donc d'envisager un recyclage important de ce produit. La démarche pourrait être étendue à d'autres déchets. Il semble intéressant, maintenant, d'évaluer la viabilité technique et économique d'une complémentarité des vinasses en vue de l'obtention d'un engrais complet NPK.

## Remerciements

Les auteurs remercient vivement la distillerie Isautier pour son aide sur le terrain et sa participation à la réalisation de cette étude. Ce travail s'est inscrit dans le cadre d'un stage d'étude réalisée par Marie Gosme (ENSA Rennes) et d'une ATP (Action Thématique Programmée) du CIRAD (méthodes d'évaluation de l'impact agronomique et environnemental du recyclage agricole des déchets agro-industriels).

## Bibliographie

Bazile, F. et Bories, A. (1989) Utilisation d'écosystèmes naturels : application à la dégradation anaérobie des vinasses de canne à sucre. *Bulletin Agronomique Antilles Guyane*, **9** : 20-26.

Bontemps, J. C. (1987) Evaluacion de la fertilizacion organica (vinaza de melaza) en las caracteristicas agroindustriales de la cana de azucar. Mexico, Universidad Autónoma Chapingo : 101 p.

Bousquet, N. (1987) Addition des effluents de distillerie à l'eau d'irrigation sur le périmètre agro-industriel de Médine (Ile Maurice). Toulouse, ENSAT : 40 p.

Chabalier, P.-F., Helmann, M. et Pichot, J. P. (1984) Nutrition de la canne à sucre dans plusieurs écologies de la Réunion : différents comportements de quelques variétés. 8<sup>ème</sup> congrès de la Société de Technologie Agricole et Sucrière de Maurice, revue sucrière de l'île Maurice.

---

<sup>7</sup> par exemple 400 kg / ha de 38.12.0

<sup>8</sup> environ 25 m<sup>3</sup> / ha

- Martial, J. S., Join, J. L. and Coudray, J. (2002) L'injection en domaine côtier, une alternative à la gestion des déchets d'une distillerie de rhum. *Colloque "La canne : une passion à partager"*, muséum Stella Matutina, 2-5 oct. 2002, La Réunion.
- Matibiri, B. (1996) The effects of stillage (vinasse) on nine ratoon crops of NCo376 receiving full irrigation in the south-east lowveld of Zimbabwe. *Proc. S. Afr. Sug. Technol. Ass.* **70** : 63-70.
- Mazza, J. A., Demattê, J. L. I. and Orlando, F. J. (1986) The effects of repeated applications of vinasse on the properties of some soils. *XIX<sup>e</sup> Congress of the International Society of Sugar Cane Technologists, Jakarta (Indonésie)*.
- MVAD (1998) Caractérisation des déchets organiques à la Réunion. Saint-Denis, Chambre d'Agriculture, La Réunion : 91 p.
- Pichot, J. P. (1983) Analyses d'effluents de distillerie. Saint-Denis, GERDAT-IRAT : 3 p.
- SUAD (1996) Valorisation agricole de la vinasse sur canne à sucre. Saint-Denis, Chambre d'Agriculture, La Réunion : 40 p.
- Trinsoutrot, I., Recous, S., Bentz, B., Linères, M., Chéneby, D. and Nicolardot, B. (2000) Biochemical quality of crop residues and carbon and nitrogen mineralization kinetics under nonlimiting nitrogen conditions. *Soil science society of america journal*, **64** : 918-926.
- Van Dillewijn, C. (1951) Botanique de la canne à sucre. Wageningen, H. Veenman & Zonen N. V.

**Tableau 1** – Traitements appliqués dans l'essai au champ : quantités appliquées et correspondance en éléments minéraux.

	<b>N (kg / ha)</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (kg / ha)</b>	<b>K<sub>2</sub>O (kg / ha)</b>
<b>Traitement 1</b>			
Pas de vinasses	0	0	0
+ 1000 kg / ha de 15.12.24	150	120	240
<b>Traitement 2</b>			
48 m <sup>3</sup> / ha de vinasses	147	12	802
+ 700 kg / ha de 38.12.0	266	84	0
<b>Traitement 3</b>			
61 m <sup>3</sup> / ha de vinasses	187	15	1019
+ 700 kg / ha de 38.12.0	266	84	0

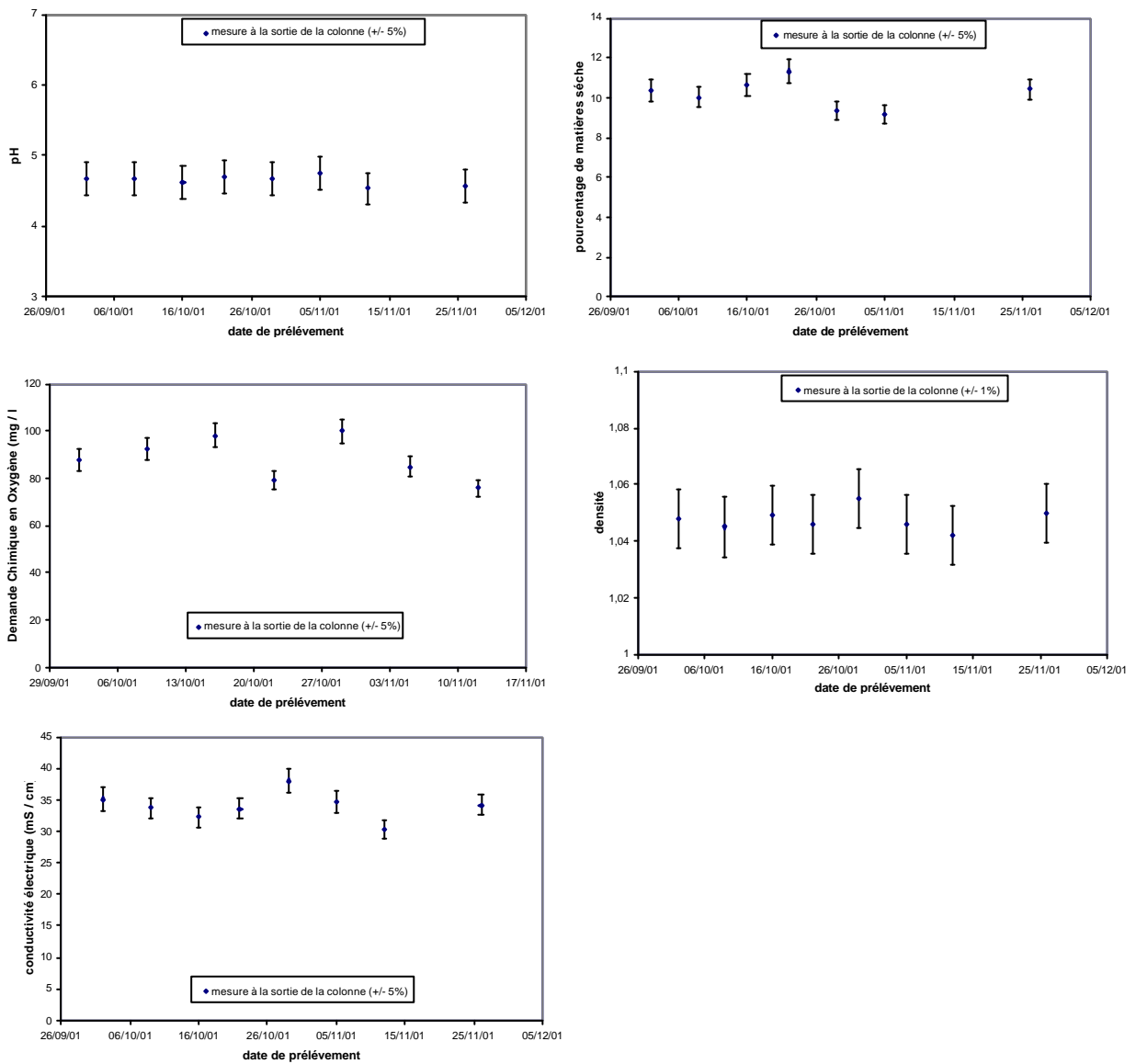


**Tableau 2** – Analyses physico-chimiques des vinasses utilisées au cours de l'étude et données extraites<sup>†</sup> des références suivantes : Pichot, 1983 ; Mazza *et al.*, 1986 ; Bontemps, 1987 ; Bazile et Bories, 1989 ; Matibiri, 1996 ; SUAD, 1996 ; MVAD, 1998.

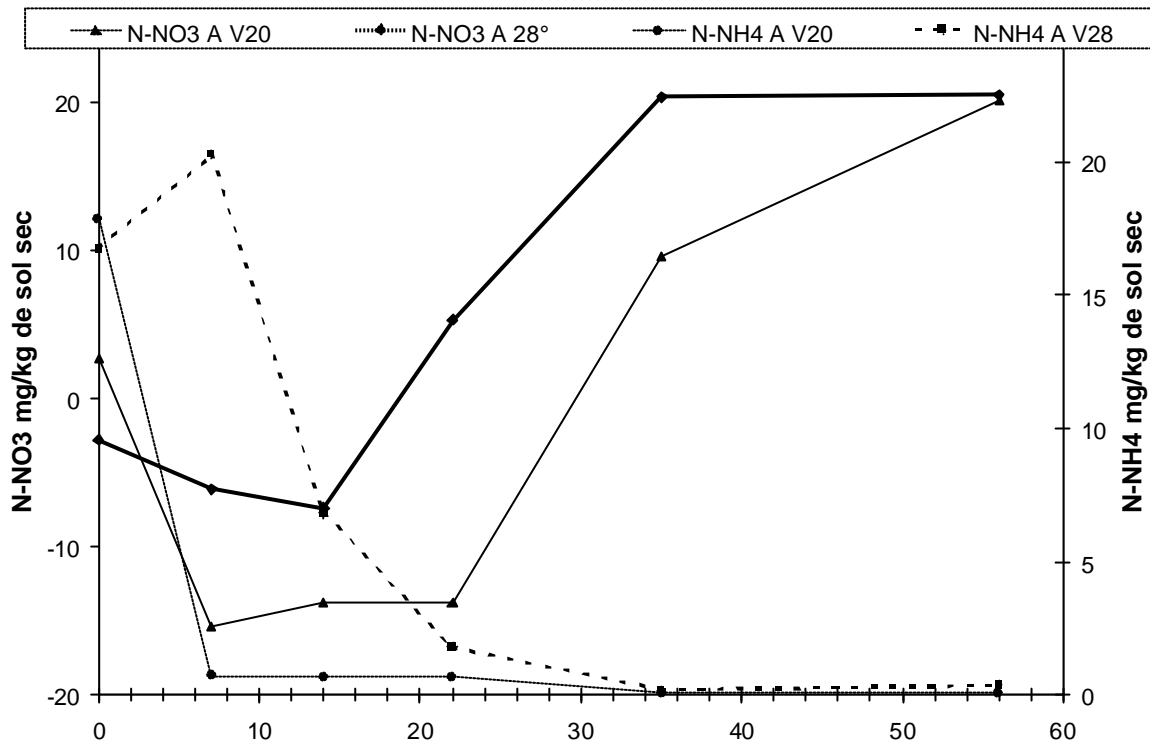
	<b>Vinasses utilisées dans cette étude</b>	<b>Analyses de vinasse (littérature<sup>†</sup>) moyenne</b>	<b>Analyses de vinasse (littérature<sup>†</sup>) écart-type</b>
<i>DCO (g/l)</i>	103		
<i>pH</i>	4,6	4,3	0,54
<i>conductivité (mS/cm)</i>	38,4		
<i>densité à 20°C</i>	1,054		
<i>% de MS</i>	11,3	8,1	2,45
<i>MO tot. (g pour 100g MS)</i>	66		
<i>N tot. (g pour 100g MS)</i>	2,81	1,81	0,83
<i>P (g pour 100g MS)</i>	0,23	0,29	0,27
<i>K (g pour 100g MS)</i>	13,8	10,65	3,21
<i>Ca (g pour 100g MS)</i>	2,18	1,78	0,26
<i>Mg (g pour 100g MS)</i>	1,17	1,05	0,15
<i>Cl (g pour 100g MS)</i>		5,38	1,55
<i>Fe (mg pour 100gMS)</i>	716		
<i>Mn (mg pour 100gMS)</i>	171		
<i>Zn (mg pour 100gMS)</i>	40,8		
<i>Cu (mg pour 100gMS)</i>	25,3		

**Tableau 3** – Résultats des analyses du diagnostic foliaire réalisé 5 mois après l'épandage.

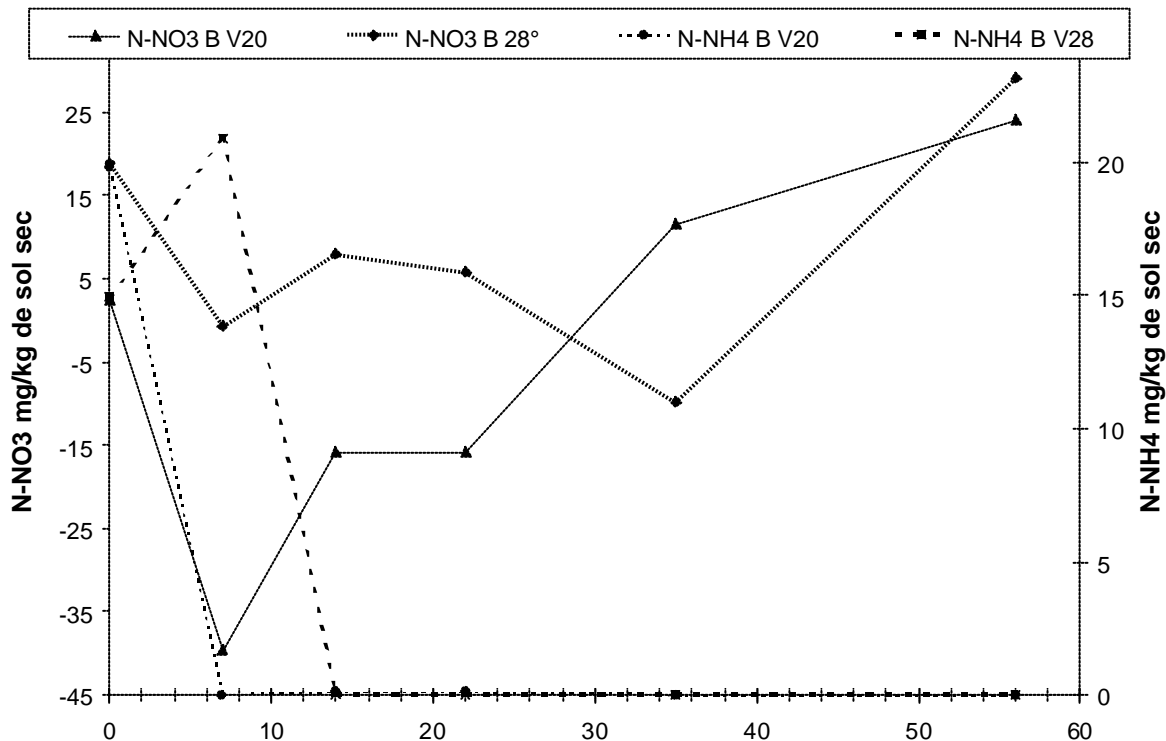
éléments (mg/kg de matière sèche)	N	P	K	Ca	Mg
<i>parcelle témoin</i>	15,5	1,86	14,2	2,77	1,24
<i>parcelle avec vinasse</i>	16,1	1,80	14,2	2,69	1,31



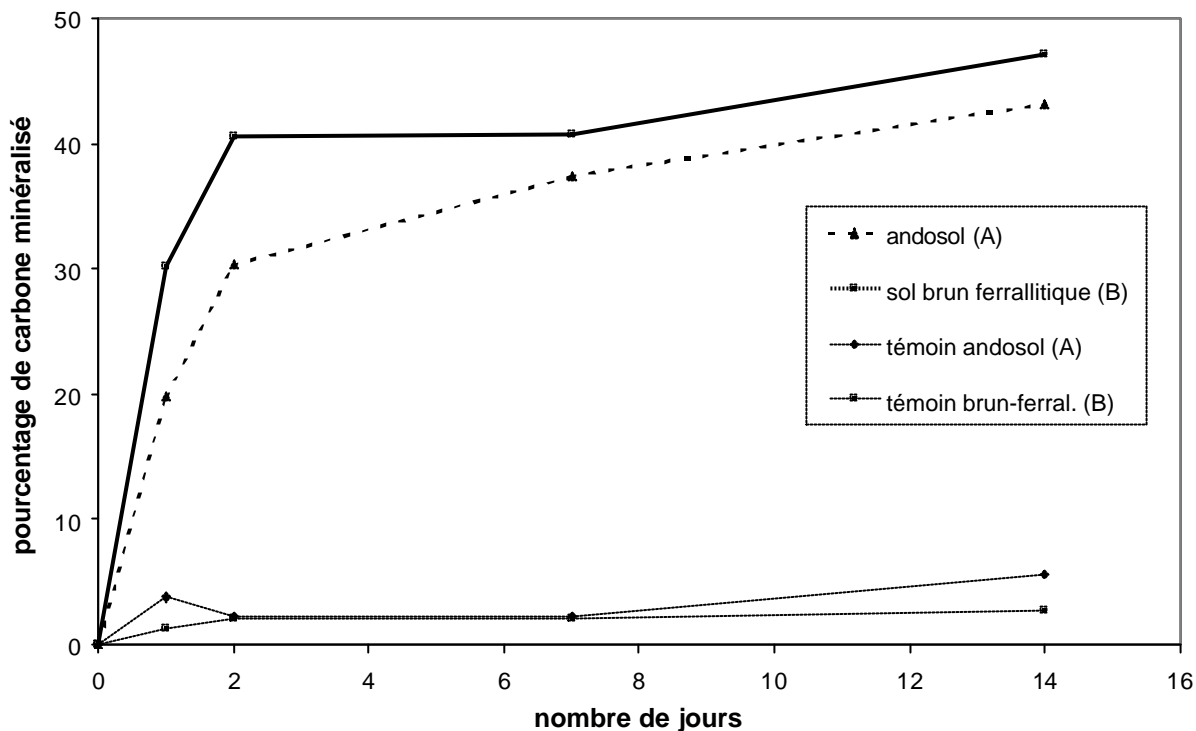
**Figure 1** – Variation des paramètres physico-chimiques (pH, % de MS, DCO, densité, conductivité électrique) des vinasses échantillonnées au cours de la période du 2 octobre au 26 novembre 2001.



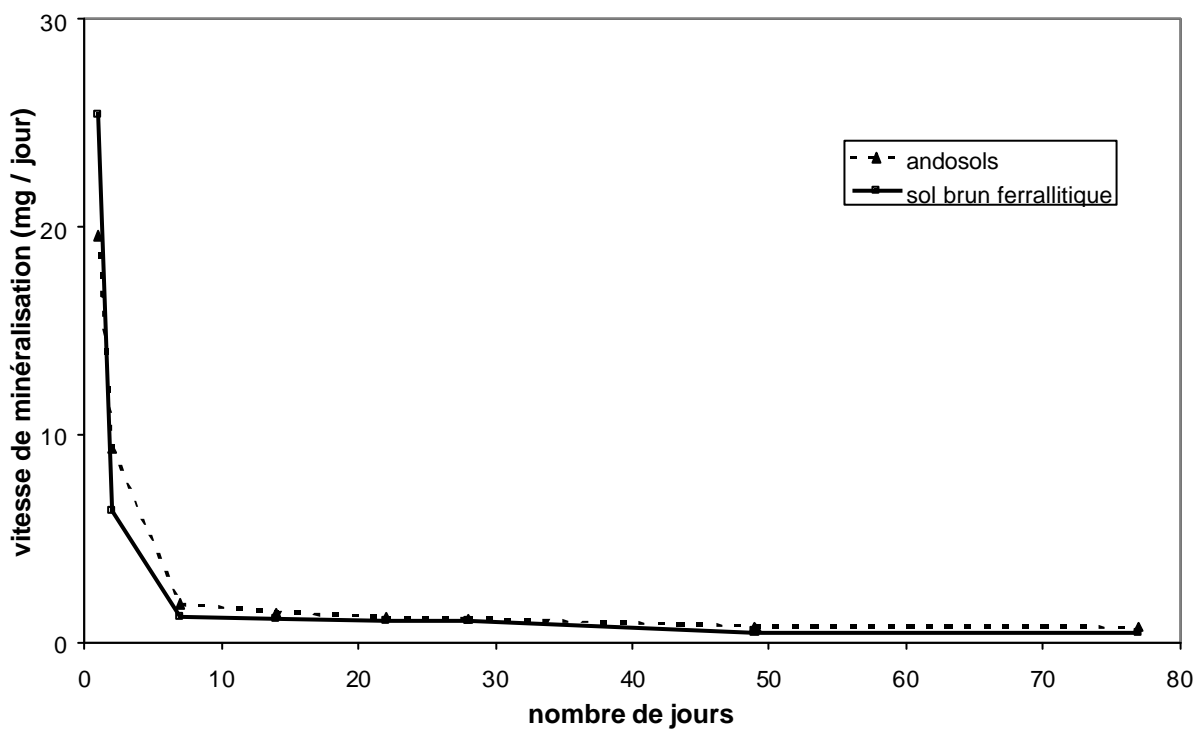
**Figure 2a** – Minéralisations au laboratoire de l'andosol + vinasses à deux températures (20 et 28 °C) : quantités d'azote nitrique ( $\text{NO}_3^-$ , échelle de gauche, courbes en traits pleins) et d'azote ammoniacal ( $\text{NH}_4^+$ , échelle de droite, courbes en pointillés) mesurés au cours du temps (échelle en abscisse, en jours).



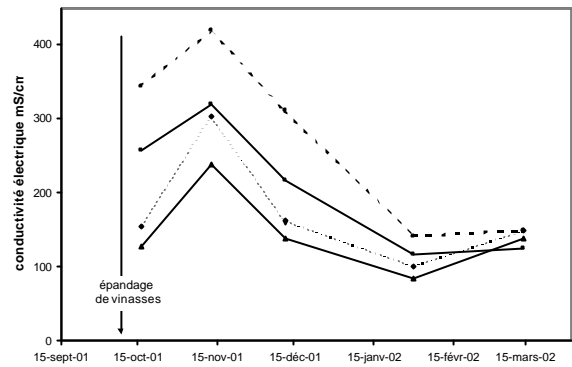
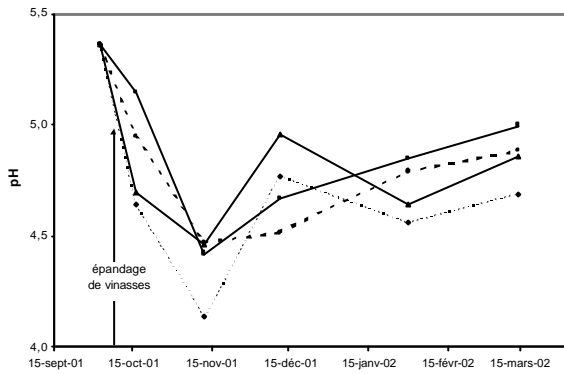
**Figure 2b** – Minéralisations au laboratoire du sol brun ferrallitique + vinasses à deux températures (20 et 28 °C) : quantités d'azote nitrique ( $\text{NO}_3^-$ , échelle de gauche, courbes en traits pleins) et d'azote ammoniacal ( $\text{NH}_4^+$ , échelle de droite, courbes en pointillés) mesurés au cours du temps (échelle en abscisse, en jours).



**Figure 3a** – Minéralisations à 28 °C au laboratoire du carbone, au cours du temps, pour les mélanges sol brun ferrallitique (ou andosol) + vinasses ainsi que pour les témoins.



**Figure 3b** – Vitesses de minéralisation à 28 °C au laboratoire du carbone, au cours du temps, pour les mélanges sol brun ferrallitique + vinasses et andosol + vinasses.

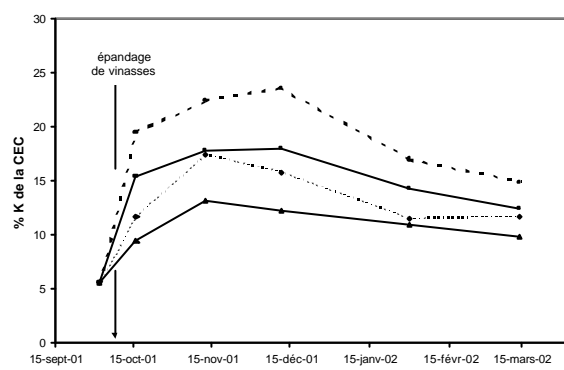
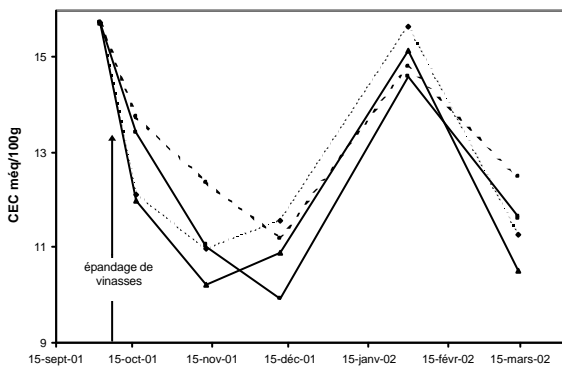


····· parcelle témoin (0 - 10 cm)

—▲— parcelle témoin (10 - 20 cm)

- - - - - essai vinasses (0 - 10 cm)

—■— essai vinasses (10 - 20 cm)



**Figures 4a à 4d** – Essai au champ : variations au cours du temps, respectivement, du pH du sol, de la conductivité électrique, de la CEC totale et du pourcentage de potassium sur cette CEC. La précision de ces mesures est inférieure à 5 % excepté pour le pH où elle correspond à  $\pm 0,05$  unité pH.