



---

# **Composts de déchets verts urbains réunionnais : origine des concentrations élevées en Eléments Traces Métalliques (ETM)**

---

**Nicolas PAYET  
Virginie VAN DE KERCHOVE**

**Emmanuel DOELSCH  
Géraud MOUSSARD**

**Mars 2008**



**A D E M E**





# SOMMAIRE

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1   | Contexte .....   | 3  |
| 1.1 | Production et contraintes d'écoulement du compost de déchets verts à La Réunion .                      | 3  |
| 1.2 | Etude sur les origines des ETM dans les composts de déchets verts réunionnais .....                    | 4  |
| 1.3 | Objectif de l'étude de 2007 .....  | 5  |
| 2   | Matériaux et méthodes .....  | 7  |
| 2.1 | Préparation des échantillons.....  | 7  |
| 2.2 | Méthodes analytiques .....   | 8  |
| 3   | Résultats et discussion.....   | 9  |
| 3.1 | Teneurs en ETM des végétaux prélevés sur les trois stations de compostage .....                        | 9  |
| 3.2 | Quantités de résidus associés aux végétaux prélevés sur les stations de compostage de La Réunion. .... | 12 |
| 3.3 | Teneurs en ETM des cendres associées aux végétaux des trois stations de compostage.....                | 12 |
| 3.4 | Identification des phases porteuses des ETM au sein des cendres.....                                   | 15 |
| 3.5 | Détermination des concentrations en ETM d'un compost de déchets verts produit à La Réunion .....       | 16 |
| 4   | Conclusion : .....   | 21 |
| 5   | Perspectives : .....   | 22 |
|     | Liste des tableaux et des figures.....   | 23 |
|     | Bibliographie .....  | 24 |



# 1 Contexte

## 1.1 *Production et contraintes d'écoulement du compost de déchets verts à La Réunion*

La production de compost en 2007 a été de 6700 tonnes (contre 8400 en 2005) suivant le détail ci-dessous :

- Le Port : 3800 tonnes
- Saint-Pierre : 2562 tonnes
- Sainte-Rose : 300 tonnes.

Plusieurs facteurs expliquent cette diminution par rapport à 2005 :

- La station de Sainte-Rose est, depuis 2007, gérée par un nouvel exploitant et la station n'a produit du compost que sur 8 mois de l'année. Les quantités produites augmenteront forcément dans les années à venir.
- Sur les stations du Port et de Saint-Pierre la totalité des végétaux entrants n'a pu être transformée en compost.

Ces diminutions sont liées à des difficultés d'ordre pratiques (quantités de végétaux disponibles, pannes matérielles, ...) mais ne sont pas la conséquence des difficultés de mise en marché existantes sur ce produit.

La mise sur le marché du compost de déchets verts urbains est régie par la norme NFU 44-051<sup>1</sup>. La version révisée de cette norme a été rendue d'application obligatoire depuis le mois d'août 2007<sup>2</sup>. Celle-ci fixe un certain nombre de prescriptions que l'amendement organique doit respecter pour pouvoir être cédé (vendu ou donné). Ces prescriptions concernent les :

- Eléments traces métalliques (ETM)
- Critères micro-biologiques
- Inertes et impuretés
- Composés traces organiques (CTO)

Or, les concentrations en Cr et Ni mesurées pour 13 échantillons de composts de déchets verts (Doelsch, 2004) dépassent les valeurs seuils fixées par la norme NFU 44-051.

---

<sup>1</sup> Norme NF U 44-051 : amendements organiques, avril 2006

<sup>2</sup> Arrêté du 21 août 2007 modifiant l'arrêté du 5 septembre 2003 portant mise en application obligatoire de normes

## 1.2 Etude sur les origines des ETM dans les composts de déchets verts réunionnais

En 2006, la MVAD a mené une étude sur la présence des ETM (chrome et nickel) dans les composts de déchets verts urbains réunionnais, répondant à une demande des collectivités propriétaires de stations de compostage (Payet et al., 2007). Cette première étude avait plusieurs objectifs :

- répertorier l'ensemble des résultats d'analyses réalisées à ce jour afin d'améliorer la représentativité des échantillons par rapport au gisement de compost de l'île ;
- détailler le process de fabrication du compost à La Réunion ;
- identifier l'origine des concentrations élevées en Cr et Ni des composts de déchets verts.

49 résultats d'analyse ont ainsi été agrégés (Tableau 1).

*Tableau 1 : concentrations en Cr et Ni de composts échantillonnés à La Réunion (en mg/kg MS)*

|            | Chrome | Nickel |
|------------|--------|--------|
| Médiane    | 98     | 94     |
| Moyenne    | 103    | 97     |
| Ecart type | 48     | 36     |

|                             |     |    |
|-----------------------------|-----|----|
| Valeur seuil<br>NF U 44-051 | 120 | 60 |
|-----------------------------|-----|----|

Au regard de la norme NFU 44-051, le compost de déchets verts urbains réunionnais contient en effet du Ni en quantité importante (médiane = 94 mg/kg pour une valeur seuil de 60). Pour le Cr, même si 35% des échantillons analysés dépassent la valeur seuil, la médiane comme la moyenne se situent en dessous de 120 mg/kg. Le problème est donc relatif pour le Cr et avéré pour le Ni.

Mais la Réunion, sur ce point, présente des caractéristiques particulières. Les sols réunionnais (Doelsch, 2004) présentent des concentrations importantes en ETM (chrome, cuivre, nickel, et zinc) « corrélées avec les compositions des roches mères » de l'île. Il s'agit donc de concentrations élevées mais d'origine naturelle.

Plusieurs hypothèses sur l'origine de ces métaux dans les composts de déchets verts ont ainsi été explorées :

- accumulation par le biais de la dégradation des parties métalliques des engins utilisés lors de la fabrication du compost ;
- présence, dans le compost, de terre chargée en ETM ;
- existence de végétaux bio-accumulateurs.

L'étude a conclu à un phénomène d'accumulation bi-factoriel et naturel, dans lequel le sol apporterait 80% des ETM Cr et Ni du compost et les végétaux, les 20% restants. Il convient de noter que l'hypothèse « sol » est faite par défaut des autres hypothèses citées ci-dessus.

De plus, les végétaux bruts analysés présentaient des teneurs en métaux anormalement élevées. En réalité, les végétaux analysés n'avaient pas été lavés avant l'analyse et présentaient en surface une fine pellicule de poussière susceptible de contenir de la terre et donc des ETM.

### **1.3 Objectif de l'étude de 2007**

Cette deuxième étude a pour objectif d'affiner les résultats obtenus en 2006 (Payet et al., 2007), en déterminant la part réelle de métaux apportés par les végétaux et la part apportée par le sol « collé » aux végétaux. Pour cela, une nouvelle série de prélèvements et d'analyses a été réalisée. Chaque échantillon a été lavé afin de séparer d'une part les végétaux propres et d'autre part les résidus (=matériau décollé de la surface des végétaux) avant analyse des deux fractions.





## 2 Matériaux et méthodes

### 2.1 Préparation des échantillons

Le protocole mis en place a consisté en un prélèvement de trois groupes de végétaux : (palmiers, feuillus, herbacées), sur les trois stations de compostage de l'île et suivant trois répétitions ; soit un total de 27 échantillons prélevés. Pour chacun d'entre eux a été réalisée une analyse de la teneur en matière sèche.

Nous avons également prélevé un échantillon de compost par station pour en déterminer la teneur en matière sèche.

La méthode retenue pour l'étude des 27 échantillons est la suivante :

- Palmiers et feuillus :
  - Nettoyage des végétaux à la brosse à dent en pleine eau dans une bassine d'eau pure (il s'agit d'une eau présentant une très faible conductivité et débarrassée de la majorité de ses minéraux ; elle ne contient donc pas d'ETM susceptibles de polluer les échantillons),
  - Deux séances de rinçage des végétaux à l'eau pure par trempage. On obtient d'un côté des végétaux « propres » et de l'autre une eau chargée en éléments divers,
  - Tamisage de l'eau chargée à 500 $\mu$ m pour retenir les résidus de végétaux. Rinçage des refus de tamis à l'eau pure. Les eaux de nettoyage et de rinçage sont ensuite rassemblées dans une même bassine. Les refus de tamis (principalement des restes de végétaux) sont éliminés.
  
- Herbacées :
  - 2 à 3 trempages des produits de tonte dans une bassine d'eau pure,
  - Tamisage de l'eau chargée à 2 mm pour récupérer les produits de tonte,
  - Deux nouveaux rinçages de ces produits à l'eau pure,
  - Nettoyage à la brosse à dents des herbes entières et des parties racinaires dans une autre bassine d'eau pure avant rinçage à l'eau pure,
  - Tamisage de l'eau chargée à 2 mm pour retenir les résidus de végétaux. Rinçage des refus de tamis à l'eau pure. Les eaux de nettoyage et de rinçage sont ensuite rassemblées dans une même bassine. Les refus de tamis (principalement des restes de végétaux) sont éliminés.

Nous obtenons ainsi pour chaque échantillon une à deux bassines d'eau pure chargée en résidus. Après évaporation (étuve à 65°C pour éviter la volatilisation de la matière organique), les résidus sont conditionnés dans un récipient hermétique.

Ne connaissant pas la nature chimique des résidus, nous avons quantifié leur fraction organique par une calcination à 550°C. Enfin, la partie minérale (cendres), résultant de cette calcination des résidus a été broyée à 100 $\mu$ m au « broyeur planétaire à bille » en utilisant une garniture en oxyde de zirconium, afin d'éviter toute contamination en ETM.

Les végétaux, une fois nettoyés, ont été séchés en étuve à 65°C pour garantir la conservation des échantillons avant analyse.

## 2.2 Méthodes analytiques

Une fois cette phase de préparation des échantillons terminée, les résidus et les végétaux « propres » ont été envoyés au laboratoire du CIRAD de Montpellier pour une analyse complète des ETM (Cr, Cu, Zn, Ni et Cd).

L'étape préalable au dosage des éléments minéraux réside dans la mise en solution des échantillons. La mise en solution est réalisée par attaque acide selon la norme NF X31-147 (1996). Le dosage des teneurs est effectué par ICP-OES (Inducted Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy, spectromètre de marque VARIAN VISTA équipé du détecteur CCD). Seul le Cd est dosé par GFAAS (Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry, spectromètre PERKIN ELMER 5100 Zeeman). Des échantillons références certifiés sont analysés de la même façon à raison de 1 pour 20 échantillons au minimum. Les résultats sont ainsi estimés à  $\pm 15\%$  pour le Cd et  $\pm 10\%$  pour les autres éléments.

Remarque : la norme NFU 44-051 fournit une norme d'analyse pour les ETM (norme NF EN 13650, ou méthode de l'Eau Régale). La méthode d'analyse utilisée par le CIRAD dans le cadre de cette étude est différente. L'attaque acide utilisée est plus agressive. Celle-ci permet de mettre en évidence la totalité des métaux présents dans la solution. Dans le cadre d'une étude portant sur la source des ETM, il est nécessaire de travailler sur des analyses montrant la totalité des éléments en présence. Par ailleurs, les résultats obtenus sont ainsi comparables avec les données de l'inventaire ETM (Doelsch, 2004) utilisées pour déterminer l'origine des métaux.

La diffraction de rayons X, technique de base de la caractérisation des matériaux, permet la détermination des phases minérales micro et poly-cristallines des matériaux. Après broyage, les échantillons ont été analysés à l'aide d'un diffractomètre en géométrie Bragg-Brentano Philips PW 3710 utilisant la radiation  $K_{\alpha}$  du cobalt ( $\lambda=1,79 \text{ \AA}$ ) à 35 kV et 30 mA.

### 3 Résultats et discussion

Les prélèvements effectués permettent de distinguer :

- les teneurs en ETM des végétaux prélevés sur les trois stations et identifiés comme « palmiers », « herbacées » et « feuillus » ;
- les teneurs en ETM des cendres des résidus qui étaient déposés sur ces trois groupes de végétaux.

Afin de déterminer la nature exacte de ces résidus, nous avons procédé à leur calcination afin de déterminer la proportion de matière organique et de matière minérale de ces résidus. Au terme de cette calcination, nous avons récupéré les cendres sur lesquelles nous avons réalisé l'analyse de la teneur en ETM.

#### 3.1 Teneurs en ETM des végétaux prélevés sur les trois stations de compostage

Nous avons regroupé dans le tableau 2, les concentrations moyennes de chacun des différents groupes de végétaux. De manière générale, les concentrations suivent l'ordre décroissant suivant : Zn>Cu>Ni≈Cr>>Cd, ordre classiquement mentionné dans la littérature (Doelsch, 2004; Doelsch, 2005).

*Tableau 2 : concentration moyenne (N=3) des végétaux (herbacées, feuillus et palmiers) échantillonnés sur les 3 stations de compostage et valeurs limites permettant de considérer une plante comme hyperaccumulatrice.*

|                                     | Cu                                | Zn    | Ni   | Cr   | Cd   |
|-------------------------------------|-----------------------------------|-------|------|------|------|
|                                     | mg.kg <sup>-1</sup> matière sèche |       |      |      |      |
| <b>Herbacées</b>                    |                                   |       |      |      |      |
| Le Port                             | 12,8                              | 85    | 8,15 | 5,05 | 0,22 |
| Sainte-Rose                         | 15,2                              | 89    | 6,93 | 4,85 | 0,24 |
| Saint-Pierre                        | 9,23                              | 56    | 5,07 | 6,5  | 0,05 |
|                                     |                                   |       |      |      |      |
| <b>Feuillus</b>                     |                                   |       |      |      |      |
| Le Port                             | 7,87                              | 27,4  | 0,77 | 0,8  | 0,13 |
| Sainte-Rose                         | 10,9                              | 29,4  | 2    | 1,2  | 0,05 |
| Saint-Pierre                        | 7,33                              | 19,3  | 1,83 | 0,8  | 0,03 |
|                                     |                                   |       |      |      |      |
| <b>Palmiers</b>                     |                                   |       |      |      |      |
| Le Port                             | 4,5                               | 15,3  | 2,1  | 3,17 | 0,03 |
| Sainte-Rose                         | 3,63                              | 12,7  | 2,6  | 4,2  | 0,05 |
| Saint-Pierre                        | 3,53                              | 10,9  | 2,9  | 2,5  | 0,02 |
|                                     |                                   |       |      |      |      |
| « Valeur limite hyperaccumulation » | 1000                              | 10000 | 1000 | 1000 | 1000 |

Le tableau 2 et la Figure 1 montrent qu'il n'existe pas de disparité des teneurs en ETM des végétaux entre les stations : les concentrations sont globalement comparables pour un même élément et un même type de végétal.

Nous pouvons remarquer que pour Zn, Cu et Cd les concentrations suivent l'ordre décroissant suivant : herbacées>feuillus>palmiers. Alors que pour Cr et Ni, nous notons l'ordre suivant : herbacées>palmiers>feuillus (cf. Figure 1).

Enfin, soulignons que ces résultats permettent de montrer que parmi les végétaux qui sont compostés dans les stations de compostage de La Réunion, **nous n'avons pas prélevé de végétaux hyperaccumulateurs en ETM.**

Rappelons, en effet, qu'une plante est dite hyperaccumulatrice si elle peut concentrer le ou les polluants selon un pourcentage minimum variant selon le polluant concerné : plus de 1000 mg.kg<sup>-1</sup> de matière sèche pour Ni, Cu, Co, Cr ou Pb ou plus de 10 000 mg.kg<sup>-1</sup> pour Zn ou Mn.

Le tableau 2 permet de montrer que les concentrations mesurées sont inférieures d'environ deux ordres de grandeur aux valeurs limites.

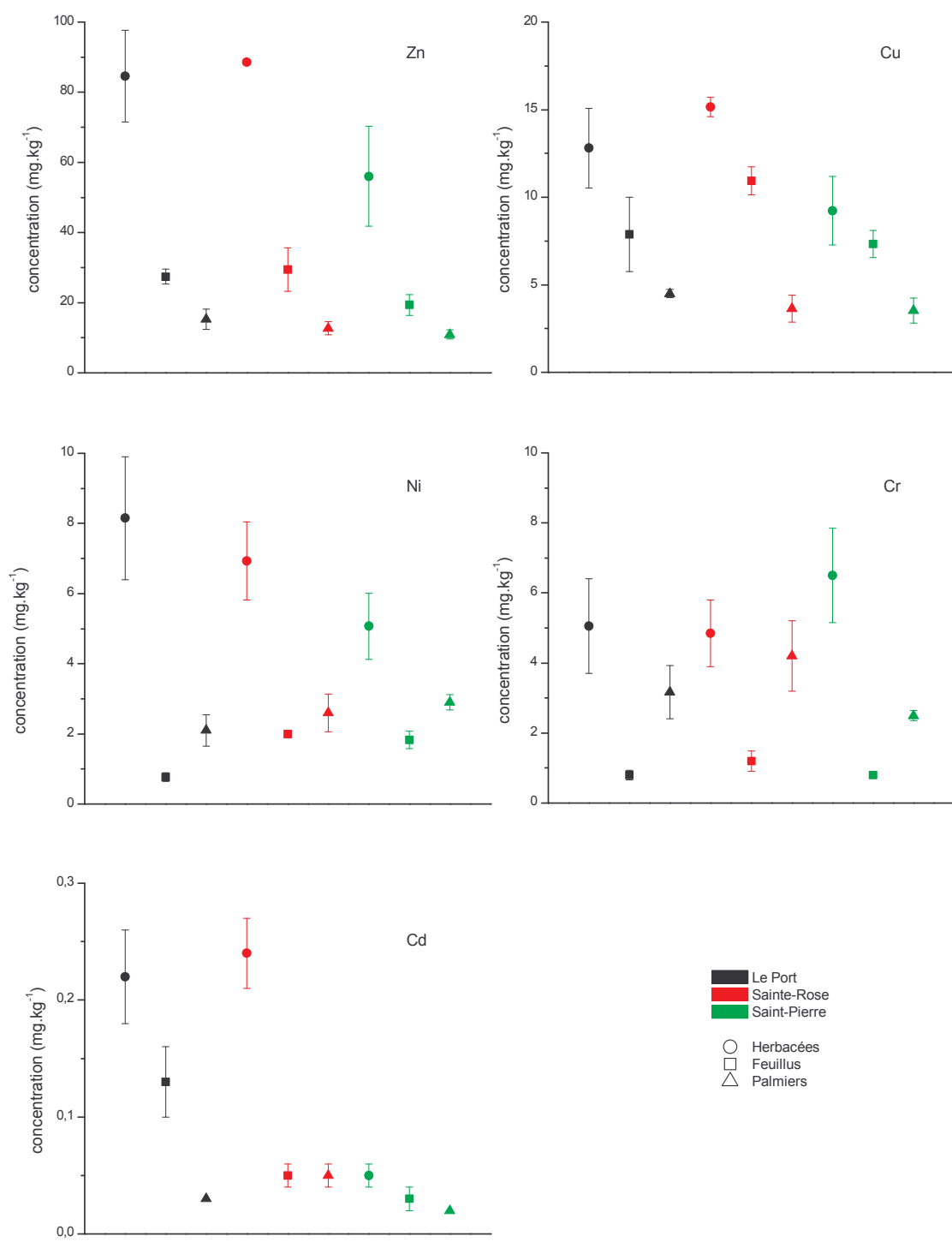


Figure 1 : concentrations moyennes ( $\pm$  écart-type) en ETM pour les végétaux prélevés sur les stations de compostage de La Réunion.

### 3.2 Quantités de résidus associés aux végétaux prélevés sur les stations de compostage de La Réunion.

Comme le montre le tableau 3, les quantités de résidus prélevés avec les palmiers et les feuillus représentent de l'ordre de 1% de la masse totale échantillonnée. Par contre pour les herbacées, cette masse est plus importante et variable : de 6,9 à 25 % selon les stations.

La proportion de matière organique (MO) déterminée par calcination à 550°C présente également des disparités selon le type de végétal considéré : la MO représente environ 50 % de la masse des résidus pour les feuillus et les palmiers et de 23 à 43 % pour les herbacées.

Tableau 3 : quantités moyennes de résidus associés aux végétaux prélevés sur les stations de compostage de La Réunion

|                  | Quantité de résidus<br>par kg de végétal sec | Proportion de MO<br>des résidus |
|------------------|--|---------------------------------|
|                  | %  |                                 |
| <b>Herbacées</b> |  |                                 |
| Le Port          | 25,4   | 23,1                            |
| Sainte-Rose      | 6,9  | 43                              |
| Saint-Pierre     | 11,9   | 29,6                            |
| <b>moyenne</b>   | <b>14,7</b>                                  | <b>31,9</b>                     |
|                  |  |                                 |
| <b>Feuillus</b>  |  |                                 |
| Le Port          | 1,1  | 47,8                            |
| Sainte-Rose      | 0,7  | 51,6                            |
| Saint-Pierre     | 1,1  | 58,2                            |
| <b>moyenne</b>   | <b>1,0</b>                                   | <b>52,5</b>                     |
|                  |  |                                 |
| <b>Palmiers</b>  |  |                                 |
| Le Port          | 0,5  | 44,7                            |
| Sainte-Rose      | 1  | 59,4                            |
| Saint-Pierre     | 1,5  | 50                              |
| <b>moyenne</b>   | <b>1,0</b>                                   | <b>51,4</b>                     |

### 3.3 Teneurs en ETM des cendres associées aux végétaux des trois stations de compostage.

Il convient tout d'abord de noter que les concentrations en ETM des cendres sont très nettement supérieures à celles mesurées dans les végétaux (tableau 4). Par exemple, les concentrations en Ni des cendres sont de deux ordres de grandeur supérieures à celles mesurées pour les végétaux.

Les concentrations suivent l'ordre décroissant suivant : Zn>Cr>Ni>Cu>>Cd (tableau 4 et figure 2), ordre qui est différent de celui décrit pour les végétaux.

*Tableau 4 : concentration moyenne (N=3) des cendres associées aux végétaux (herbacées, feuillus et palmiers) échantillonnés sur les 3 stations de compostage*

|                  | <b>Cu</b>                         | <b>Zn</b> | <b>Ni</b> | <b>Cr</b> | <b>Cd</b> |
|------------------|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                  | mg.kg <sup>-1</sup> matière sèche |           |           |           |           |
| <b>Herbacées</b> |                                   |           |           |           |           |
| Le Port          | 51                                | 373       | 162       | 208       | 0,32      |
| Sainte-Rose      | 78                                | 533       | 156       | 174       | 0,65      |
| Saint-Pierre     | 86                                | 442       | 226       | 237       | 0,47      |
|                  |                                   |           |           |           |           |
| <b>Feuillus</b>  |                                   |           |           |           |           |
| Le Port          | 101                               | 710       | 102       | 155       | 0,82      |
| Sainte-Rose      | 105                               | 634       | 243       | 312       | 3,1       |
| Saint-Pierre     | 83                                | 637       | 116       | 155       | 0,75      |
|                  |                                   |           |           |           |           |
| <b>Palmiers</b>  |                                   |           |           |           |           |
| Le Port          | 129                               | 988       | 143       | 198       | 4,01      |
| Sainte-Rose      | 96                                | 764       | 193       | 272       | 1,48      |
| Saint-Pierre     | 91                                | 627       | 235       | 298       | 0,45      |

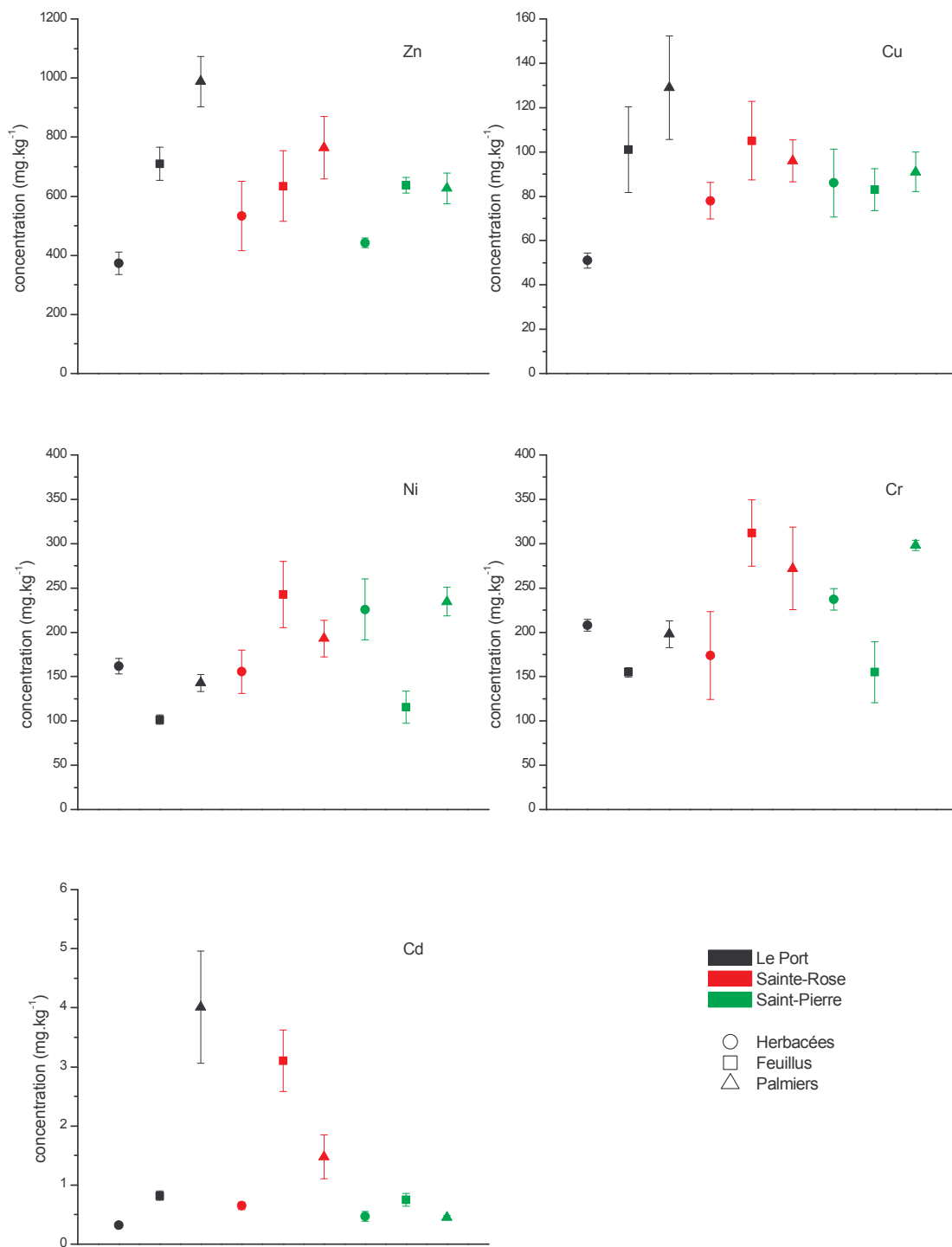


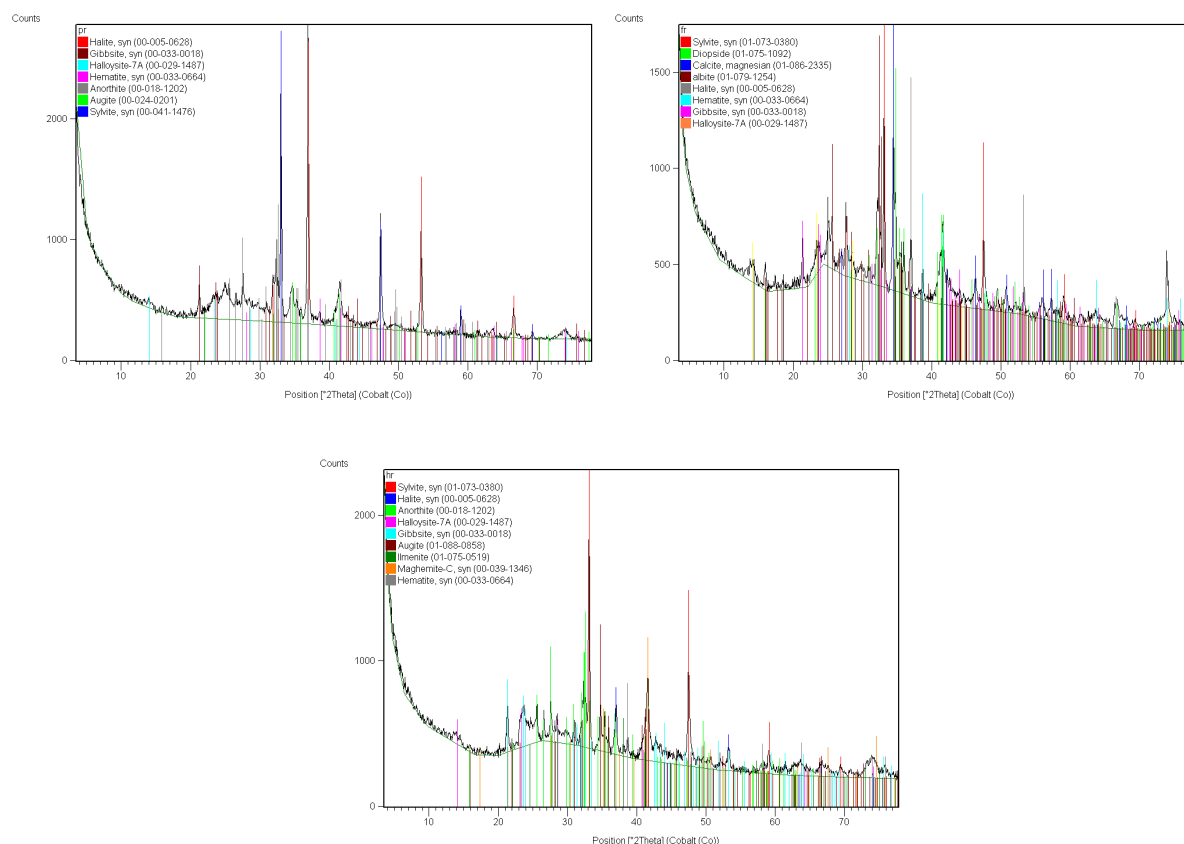
Figure 2 : concentrations moyennes ( $\pm$  écart-type) en ETM pour les cendres associées aux végétaux prélevés sur les stations de compostage de La Réunion.



### 3.4 Identification des phases porteuses des ETM au sein des cendres.

La diffraction des rayons X est une technique d'analyse qui permet d'identifier la présence de matériaux cristallisés au sein d'une matrice solide. L'interprétation des diffractogrammes dont certains sont reportés sur la figure 3 a permis de détecter dans les cendres une série de minéraux qui sont classiquement décrits dans les sols réunionnais (Doelsch et al., 2006a; Doelsch et al., 2006b) :

- des minéraux silicatés (halloysite, diopside, anorthite, augite)
- des oxydes d'aluminium (gibbsite), de fer (hématite, maghémite) et de titane (ilménite)



*Figure 3* : diffractogramme des cendres pour la station du Port (pr=palmiers, fr =feuillus, hr=herbacées)

La présence de ces minéraux permet d'indiquer sans ambiguïté que les résidus prélevés à la surface des végétaux sont des particules de sol. Ainsi, les fortes concentrations en ETM des cendres peuvent s'expliquer par les fortes concentrations en ETM des sols réunionnais.

Toutefois, il reste à démontrer que les quantités de sol « collées » aux végétaux permettent d'expliquer les fortes teneurs en ETM des composts produits à La Réunion. Ces aspects seront exposés dans le paragraphe suivant.

### 3.5 Détermination des concentrations en ETM d'un compost de déchets verts produit à La Réunion

Le processus de compostage induit par définition une perte de matière (eau, carbone, azote, ...). Les analyses étant réalisées sur les végétaux bruts, une méthode de calcul doit permettre de passer des résultats d'analyses en ETM des « végétaux+résidus » aux concentrations en ETM des composts. La méthode devait également prendre en compte le fait que les résultats d'analyses soient exprimés en matière sèche (M.S).

Pour obtenir un coefficient de réduction de matière sèche nous avons considéré par station (cf. tableaux 5 et 6):

- le taux de matière sèche des végétaux et des composts,
- le taux de refus de criblage par rapport aux quantités de végétaux entrants sur chaque station,
- le coefficient de réduction (en matière fraîche) et le taux de réduction en M.S,
- la répartition massique en pourcentage des groupes de végétaux (herbacées, feuillus, palmiers).

*Tableau 5 : Les chiffres clés par station*

| Station  | Le Port | Saint-Pierre | Sainte-Rose |
|--|---------|--------------|-------------|
| Teneur en M.S des végétaux                     | 49,66 % | 60,84 %      | 58,57 %     |
| Teneur en M.S des composts                     | 75,24 % | 60,04 %      | 41,07 %     |
| Coefficient de réduction des matières fraîches | 0,68    | 0,68         | 0,62        |
| Taux de refus de criblage                      | 12%     | 4%           | 26%         |
| Taux de réduction en (M.S)                     | 51,5%   | 68,4%        | 73,4%       |

*Tableau 6 : Estimation de la répartition des végétaux par groupe et par station*

|              | Palmiers | Feuillus | Herbacées |
|--------------|----------|----------|-----------|
| Saint-Pierre | 30%      | 69%      | 1%        |
| Le Port      | 30%      | 69%      | 1%        |
| Sainte-Rose  | 40%      | 58%      | 2%        |

A partir des données qui viennent d'être présentées et des résultats d'analyses ETM, nous avons calculé la concentration théorique d'un compost en considérant les différents types de végétaux et les résidus collés à ces végétaux.

Nous avons ainsi pu déterminer les quantités d'ETM apportées d'une part par les végétaux et d'autre part par les résidus. Ces données sont présentées dans les Tableaux 7 et 8.

*Tableau 7 : concentrations en ETM apportées par les végétaux*

|                | <b>Cu</b>                       | <b>Zn</b>   | <b>Ni</b>   | <b>Cr</b>   | <b>Cd</b>   |
|----------------|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                | mg.kg <sup>-1</sup> compost sec |             |             |             |             |
| Saint-Pierre   | 6,0                             | 16,7        | 2,25        | 1,48        | 0,03        |
| Le Port        | 6,7                             | 23,7        | 1,33        | 1,7         | 0,1         |
| Sainte-Rose    | 8,4                             | 24,1        | 2,27        | 2,32        | 0,05        |
| <b>moyenne</b> | <b>7,0</b>                      | <b>21,5</b> | <b>1,95</b> | <b>1,83</b> | <b>0,06</b> |

*Tableau 8 : concentrations en ETM apportées par les résidus*

|                | <b>Cu</b>                       | <b>Zn</b>   | <b>Ni</b>   | <b>Cr</b>   | <b>Cd</b>   |
|----------------|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                | mg.kg <sup>-1</sup> compost sec |             |             |             |             |
| Saint-Pierre   | 1,75                            | 12,6        | 2,39        | 3,38        | 0,02        |
| Le Port        | 1,16                            | 7,84        | 2,53        | 3,32        | 0,03        |
| Sainte-Rose    | 1,59                            | 11,1        | 3,31        | 4,14        | 0,01        |
| <b>moyenne</b> | <b>1,50</b>                     | <b>10,5</b> | <b>2,74</b> | <b>3,61</b> | <b>0,02</b> |

Etant donné les fortes concentrations en Cr et Ni des résidus, leur contribution à la concentration finale du compost est supérieure à celle des végétaux. A l'inverse, la fraction la plus importante de Zn, Cu et de Cd est apportée par les végétaux.

Ces résultats ont permis de calculer la concentration théorique d'un compost de déchets verts produit sur chacune des trois stations de compostage de La Réunion. Comme nous le voyons dans le Tableau 9, les résultats obtenus pour les 3 stations sont très proches. En outre, les teneurs calculées sont faibles et comprises entre 36 (pour Zn) et 0,05 mg.kg<sup>-1</sup> (Cd) de compost sec. Elles ne sont que peu comparables aux concentrations mesurées lors des analyses de compost prélevés sur les stations de La Réunion (Tableau 10).

*Tableau 9 : concentrations en ETM théoriques d'un compost de déchets verts produit à La Réunion*

|                | <b>Cu</b>                       | <b>Zn</b> | <b>Ni</b>  | <b>Cr</b>  | <b>Cd</b>   |
|----------------|---------------------------------|-----------|------------|------------|-------------|
|                | mg.kg <sup>-1</sup> compost sec |           |            |            |             |
| Saint-Pierre   | 7,7                             | 29        | 4,6        | 4,9        | 0,05        |
| Le Port        | 7,9                             | 32        | 3,9        | 5,0        | 0,12        |
| Sainte-Rose    | 9,9                             | 35        | 5,6        | 6,5        | 0,06        |
| <b>moyenne</b> | <b>8,5</b>                      | <b>32</b> | <b>4,7</b> | <b>5,5</b> | <b>0,08</b> |

*Tableau 10 : comparaison des concentrations théoriques et mesurées en ETM des composts de déchets verts de La Réunion*

|                            | <b>Cu</b>                       | <b>Zn</b> | <b>Ni</b> | <b>Cr</b> | <b>Cd</b> |
|----------------------------|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                            | mg.kg <sup>-1</sup> compost sec |           |           |           |           |
| Moyenne théorique          | 8,5                             | 32        | 4,7       | 5,5       | 0,08      |
| Moyenne analytique (N=49)  | 81                              | 249       | 97        | 103       | 0,78      |
| m.théorique / m.analytique | 11%                             | 13%       | 5%        | 5%        | 10%       |

La moyenne analytique ou mesurée, basée sur quarante-neuf résultats d'analyse ETM, provient de l'étude précédente réalisée sur les sources en ETM des composts réunionnais (Payet et al., 2007).

Les végétaux et les résidus collés contribuent faiblement à la concentration mesurée puisqu'ils représentent de 13 % (pour Zn) à 5% (pour Ni) de la quantité totale en ETM analysée (Tableau 10).

Les différences significatives que nous observons dans le Tableau 10, ne peuvent pas être expliquées par des problèmes analytiques ou les approximations que nous avons faites pendant le calcul.

Autrement dit, **notre échantillonnage ne prend pas en compte une source importante des ETM retrouvés dans les composts, qui représente 95 % pour Cr et Ni**. Nous n'avons en effet prélevé que les végétaux sur lesquels aucune motte de terre n'était visible sur les parties racinaires ou superficielles. Nous ne pouvons donc pas exclure que ce choix soit à l'origine des écarts importants que nous observons entre concentration théorique et analysée (Tableau 10).

Nous avons alors déterminé la masse de sol qu'il conviendrait d'ajouter au compost théorique pour obtenir une concentration finale identique à celle analysée. Pour cela, nous avons utilisé les concentrations moyennes en Cr et en Ni des sols publiées pour La Réunion (Doelsch et al., 2006c), respectivement 306 et 201 mg.kg<sup>-1</sup>.

Ces résultats sont présentés dans le tableau 11. Les mélanges compost ou végétal + sol sont exprimés :

- en fonction des masses exprimées en matières sèches car c'est l'unité utilisée pour exprimer les concentrations ;
- en fonction des masses de produit frais pour correspondre aux quantités de produits (compost, végétal ou sol) réellement présentes sur les stations de compostage ;
- en fonction des volumes des produits, pour permettre une « visualisation » des résultats.

A 1 kg de compost théorique sec, il faudrait ajouter environ 0,7 kg de sol sec pour que les concentrations entre composts analysés et compost théorique soient comparables. Cette masse de sol nécessaire semble improbable lorsqu'on raisonne en termes de masse de compost sec. Mais, pour produire 1 kg de compost sec ou 1,7 kg de compost frais, il faut disposer de 8 kg de végétaux dans lesquels il faudrait ajouter 1,2 kg de sol frais, soit 13 % de la masse totale. Nous pouvons également traduire ces résultats en volume, en utilisant pour les sols une densité de 1,1 et pour les végétaux une densité de 0,4, ce qui donne : 0,6 m<sup>3</sup> de sol pour 20 m<sup>3</sup> de végétaux, soit 3% environ du volume total.

Ces ordres de grandeur ne semblent pas déraisonnables et permettraient d'expliquer les fortes teneurs en ETM des composts réunionnais.

*Tableau 11 : détermination des masses (ou volume) de sol à ajouter au compost théorique pour que les concentrations en Cr et Ni correspondent aux valeurs mesurées des composts produits à La Réunion.*

|   |         | Expression des résultats en kg de matière sèche | Expression des résultats en kg de produit frais |      | Expression des résultats en volume (m <sup>3</sup> ) |
|---|---------|---|---|------|--|
| Composition du mélange compost ou végétal + sol pour obtenir les teneurs en Cr et Ni mesurées dans les composts de La Réunion | compost | 1   | 1,7   |      |  |
|   | végétal |   |   | 8    | 20   |
|   | sol     | 0,7   | 1,2   | 1,2  | 0,6  |
| Pourcentage de sol par rapport au mélange final   |         | 41 %  | 41 %  | 13 % | 3 %  |



## 4 Conclusion :

Cette étude montre que la proportion des ETM amenée par les végétaux est très faible, environ 2% pour Cr et Ni. Nous avons en outre montré que ces végétaux ne peuvent pas être considérés comme « hyper-accumulateurs » en raison des faibles concentrations en ETM mesurées.

Par contre, les résidus déposés à la surface des végétaux sont particulièrement riches en ETM. Mais en raison de leur faible proportion, ils n'apportent que 3,5 % de Cr et 2,7% de Ni retrouvés dans le compost. Nous avons montré que la partie minérale des résidus correspond au cortège minéralogique classiquement retrouvé dans les sols réunionnais.

Autrement dit, nous n'avons pas identifié la principale source en ETM des composts réunionnais qui représente 95 % du Cr et Ni mesuré. Rappelons que nous avons volontairement, lors de l'échantillonnage, évité de prélever les mottes de terre associées aux racines ou aux végétaux (pour des raisons de représentativité de l'échantillonnage).

A partir des données collectées, nous avons estimé la proportion de sol à ajouter à un compost « théorique » pour obtenir les concentrations en ETM mesurées dans les composts réunionnais. Nos calculs indiquent que le sol frais représenterait 13% de la masse totale des végétaux avant compostage. En terme de volume, le sol représenterait alors moins de 3 % du volume total des végétaux avant compostage. Ces ordres de grandeur ne nous semblent pas déraisonnables. Ils permettraient d'expliquer les concentrations élevées en Cr et Ni des composts réunionnais par la présence de petites quantités de sol naturellement riche en ETM.

Afin de tenter de diminuer de manière significative les concentrations en ETM des composts produits à La Réunion, il pourrait être intéressant d'éliminer, avant le broyage des déchets verts, les mottes de terre (qui sont une source importante d'éléments traces métalliques) et/ou de laver les végétaux avant le compostage. Cependant, les faisabilités technique et économique de ces opérations devront être envisagées.

Au terme de cette étude, nous pensons que les fortes concentrations en Cr et Ni des composts de déchets verts produits à La Réunion s'expliquent par la présence, avec les végétaux, de sols naturellement riches en ETM.

## 5 Perspectives :

Si le problème de respect de la norme NF U44-051 des composts réunionnais mis sur le marché demeure, les résultats exposés dans cette étude fournissent des éléments pour l'obtention d'une éventuelle dérogation à cette norme ou homologation de ces composts.

En outre, il serait intéressant de s'appuyer dans cette démarche sur les résultats en cours d'acquisition dans le cadre de l'étude conduite par le CIRAD à la demande de la DAF et l'OLE : « Evaluation de la mobilité et de la phytodisponibilité des éléments traces métalliques (ETM) des sols de la Communauté Intercommunale Réunion Est (CIREST) en perspective d'une demande de dérogation à la réglementation sur l'épandage des boues de stations d'épuration ». L'objectif de cette étude est de fournir les éléments scientifiques qui permettront d'envisager la formulation d'une demande de dérogation à la réglementation sur l'épandage des boues de stations d'épuration. Il sera notamment évalué la mobilité et la phytodisponibilité de Cr et Ni de sols réunionnais, résultats qui pourront étayer d'éventuelles demandes pour les composts.



## Liste des tableaux et des figures

|  |    |
|--|----|
| Tableau 1 : concentrations en Cr et Ni de composts échantillonnés à La Réunion (en mg/kg MS).....  | 4  |
| Tableau 2 : concentration moyenne (N=3) des végétaux (herbacées, feuillus et palmiers) échantillonnés sur les 3 stations de compostage et valeurs limites permettant de considérer une plante comme hyperaccumulatrice. .... | 9  |
| Tableau 3 : quantités moyennes de résidus associés aux végétaux prélevés sur les stations de compostage de La Réunion .....  | 12 |
| Tableau 5 : Les chiffres clés par station.....   | 16 |
| Tableau 6 : Estimation de la répartition des végétaux par groupe et par station.....   | 16 |
| <br>   |    |
| Figure 1 : concentrations moyennes ( $\pm$ écart-type) en ETM pour les végétaux prélevés sur les stations de compostage de La Réunion. ....  | 11 |
| Figure 2 : concentrations moyennes ( $\pm$ écart-type) en ETM pour les cendres associées aux végétaux prélevés sur les stations de compostage de La Réunion. ....  | 14 |
| Figure 3 : diffractogramme des cendres pour la station du Port (pr=palmiers, fr =feuillus, hr=herbacées) .....   | 15 |

## Bibliographie

- Doelsch, E., 2004. Eléments traces métalliques - Inventaire pour l'île de La Réunion (sols, déchets et végétaux), CIRAD-MVAD.
- Doelsch, E., 2005. Eléments traces métalliques - Evaluation de la biodisponibilité des ETM vis-à-vis de différents organes végétaux (racine, feuille, fruit) par des essais de cultures maraîchères, CIRAD-MVAD.
- Doelsch, E. et al., 2006a. New Combination of EXAFS Spectroscopy and Density Fractionation for the Speciation of Chromium within an Andosol. *Environ. Sci. Technol.*, 40(24): 7602-7608.
- Doelsch, E., Deroche, B. and Van de Kerchove, V., 2006b. Impact of sewage sludge spreading on heavy metal speciation in tropical soils (Reunion, Indian Ocean). *Chemosphere*, 65(2): 286-293.
- Doelsch, E., Van de Kerchove, V. and Saint Macary, H., 2006c. Heavy metal content in soils of Reunion (Indian Ocean). *Geoderma*, 134(1-2): 119-134.
- Payet, N. and Van de Kerchove, V., 2007. Compost de déchets verts urbains réunionnais : recherche de la source d'ETM, Chambre d'Agriculture de La Réunion.