

DK 546473

BA -TH 1640



Cirad-Département EMVT
Campus de Baillarguet, TA 30
34 398 MONTPELLIER Cedex 5



SCIENCES
Université Montpellier II
UFR Sciences
Place Eugène Bataillon
34 095 MONTPELLIER Cedex 5

**MASTER 2EME ANNEE BIOLOGIE
GEOSCIENCES AGRORESSOURCES ET
ENVIRONNEMENT SPECIALITE PRODUCTIONS
ANIMALES EN REGIONS CHAUDES**

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

**GESTION DES EFFLUENTS D'ELEVAGES SUR L'ILE
DE LA REUNION**

par

Mathieu VIGNE

année universitaire 2006-2007

CIRAD-Dist
UNITÉ BIBLIOTHÈQUE
Baillarguet



RESUME ET MOTS-CLES

Depuis la fin des années 1980, l'élevage sur l'île de la Réunion a subi un essor important et plus particulièrement dans les Hauts sous l'impulsion d'un désir sociologique et de mesures politiques faalicatrices. Actuellement, cette activité est largement dominée par les secteurs bovin, porcin et avicole qui témoignent d'un désir fort des éleveurs d'intensifier leurs exploitations. Cependant le développement de cette activité a eu pour conséquence l'augmentation des productions d'effluents. On observe donc aujourd'hui une grande disparité entre les régions, principalement localisées dans les Hauts où l'élevage est très présent, qui se retrouvent en excédent de matières organiques compte tenu de la faiblesse des surfaces épandables et des régions principalement côtières et spécialisées dans les cultures, notamment de la canne à sucre, et qui sont déficitaires en effluents. Mais une topographie peu avantageuse et un enclavement des zones productrices empêchent le transfert des effluents d'une région à une autre, ceci ayant pour résultat l'accumulation des matières organiques chez les éleveurs qui n'ont d'autre choix que d'user de pratiques anarchiques et contraires à la réglementation, telles que l'épandage en dose trop importante ou sur des cultures inappropriées. Pour pallier à ces problèmes de gestion, qui engendrent des stratégies de gestion, en adaptant des traitements d'effluents au contexte réunionnais permettant notamment la concentration du pouvoir fertilisant et par conséquent un transport plus aisé. De plus, pour accompagner les exploitants soit à un niveau individuel, soit à un niveau collectif, et afin de conceptualiser des nouveaux scénarios de gestion, des modèles de simulation (Magma, Biomas, MagmaS, Approzut, Echos) ont été conçus et sont actuellement en cours d'amélioration dans le contexte local.

Mots-clés : effluent, élevage, la Réunion, matière organique, modélisation, traitement, valorisation.

ABREVIATIONS

CIRAD	Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CTO	Composés Traces Organiques
DRASS	Direction Régionale des Affaires Sanitaires et Sociales
DSV	Direction des Services Vétérinaires
ETM	Eléments Traces Métalliques
ha	hectare
ICPE	Installations Classées pour la Protection et l'Environnement
kg	kilogramme
km²	kilomètre carré
m	mètre
m³	mètre cube
MES	Matière en suspension
MS	Matière Sèche
MVAD	Mission de Valorisation Agricole des Déchets
Norg	azote organique
Ndn	Nitrification-dénitrification biologique en phase liquide
N₂	di-azote
RSD	Règlement Sanitaire Départemental
SAU	Surface Agricole Utile
SMA	Système Multi-Agent
TNE	Truies Naisseur-Engraisseur
UGB	Unité Gros Bétail

SOMMAIRE

RESUME ET MOTS-CLES.....	2
ABREVIATIONS.....	3
SOMMAIRE	4
LISTE DES TABLEAUX	5
LISTE DES FIGURES	6
INTRODUCTION.....	7
I. GESTION DES EFFLUENTS : LES ACTEURS ET LES FLUX	8
1.1. La production de matière organique	8
1.1.1. Les producteurs : Les unités d'élevage.....	8
1.1.2. Les effluents produits.....	8
1.2. Les consommateurs de matière organique : Les cultures.....	10
1.3. Les flux d'effluents.....	11
1.3.1. Les différentes modalités d'utilisation des effluents.....	11
1.3.2. Les facteurs influant le choix d'utilisation des effluents	13
1.3.3. Les couples effluents-cultures	15
II. PROBLEMES DE GESTION ET RISQUES ENVIRONNEMENTAUX RESULTANTS	17
2.1. Les problèmes de gestion.....	17
2.2. Risques environnementaux	18
III. AIDES À LA GESTION ET À LA RESOLUTION DES PROBLEMES RENCONTRES ...	19
3.1. Techniques de traitement des effluents	19
3.1.1. Techniques de traitements de l'azote.....	20
3.1.2. Techniques de séparation de phase.....	20
3.2. Outils d'aide à la prise de décision.....	21
3.2.1. Au niveau de l'exploitation agricole : Magma	22
3.2.2. La gestion des flux d'effluents entre exploitations distinctes.....	23
3.2.3. la gestion collective de l'approvisionnement d'unités de traitement : Approzut....	24
3.2.4. Effets d'instruments de politique environnementale : le modèle Echos	24
3.2.5. Comparaison entre plusieurs techniques de traitement du lisier : Macsizut.....	25
CONCLUSION	27
BIBLIOGRAPHIE	28

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. <i>Secteurs de l'élevage producteurs d'effluents à la Réunion</i>	8
Tableau 2. <i>Productions d'effluent à la Réunion par type d'élevage pour l'année 2000</i>	9
Tableau 3. <i>Délais d'enfouissement après épandage des produits</i>	14
Tableau 4. <i>Distances minimales d'épandages relatives à la réglementation ICPE</i>	14
Tableau 5. <i>Distances minimales d'épandages relatives au RSD</i>	14
Tableau 6. <i>Epandage des matières organiques en fonction des pentes</i>	14
Tableau 7. <i>Règles d'attribution des effluents aux cultures</i>	16

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Répartition des quantités d'effluents produits sur l'île de la Réunion par type d'élevage en 2000	9
Figure 2. Répartition géographique des matières organiques issues des élevages de la Réunion.....	10
Figure 3. Principales régions agricoles de la Réunion	11
Figure 4. Fréquence des différents scénarios de gestion des effluents porcins au Grand Ilet	13

INTRODUCTION

L'île de la Réunion connaît depuis la fin des années 1980 un développement important de l'élevage. Une première typologie de Paillat (1998) sur les systèmes agricoles avait donné pour résultat 3 grands types correspondant à la part relative des élevages et des productions végétales dans les systèmes de production : le type 1 ($UGB/SAU > 15$) correspond aux exploitations orientés vers l'élevage hors-sol, de façon prédominante voire exclusive, le type 2 ($2,5 < UGB/SAU < 15$) qui rassemble des exploitations comprenant des productions végétales sur 2 à 8 ha et des ateliers hors-sol, laitiers ou mixtes et enfin le type 3 ($UGB/SAU < 2,5$) qui concerne les exploitations à productions végétales prédominante sur des surfaces d'importance très variable.

Cependant, les conditions pédoclimatiques très variées et les contextes socio-économiques particuliers ont pour conséquence une diversité importante des systèmes agricoles. Ainsi, d'une façon générale, on peut distinguer d'un point de vue agroclimatique, 4 zones principales dans l'île (Paillat *et al.*, 2003) : les cirques très enclavés où les surfaces cultivables sont réduites, les plaines d'altitudes (supérieures à 1000 m) où les conditions agroclimatiques permettent une culture tempérée et la mécanisation lorsque la taille est suffisante, les piémonts (entre 500 et 1000 m), enfin les zones basses (moins de 500 m) où le relief peut être varié et où existe une concurrence forte entre l'activité agricole et d'autres facteurs anthropologiques comme l'urbanisation ou encore les voies de communication.

Ces différentes conditions vont engendrer au sein des systèmes agricoles une diversité plus importante dans la gestion des effluents, définie ici comme les façons qu'a l'agriculteur d'obtenir, de conserver, d'utiliser et de redistribuer le cas échéant, dans le temps et l'espace, des matières organiques issues des élevages de son exploitation ou d'autres exploitations (Aubry *et al.*, 2003). Cette diversité de gestion a alors été représentée grâce à une étude qui a consisté à affiner la première typologie par des enquêtes réalisées dans différentes zones de l'île et qui a donné pour résultat 26 exploitations types (Paillat *et al.*, 2003).

De plus, les trajectoires d'évolution des exploitations tendent à rendre compte d'une volonté d'intensification des systèmes de production, notamment vers l'élevage hors-sol ou le maraîchage (Paillat, 1998). Cependant, selon Chabalier *et al.* (1999), seule 20 % de la surface agricole de l'île est épandable en première approche. On observe donc une opposition entre développement de l'élevage, et par conséquent augmentation de la production de matières organiques, et saturation de l'espace en possibilité d'épandage qui entraîne un excédent d'effluents sur l'île de la Réunion. C'est donc dans ce contexte que la recherche s'est donné depuis quelques années comme objectifs de connaître et comprendre les modalités de gestion des effluents par les agriculteurs pour ensuite élaborer des alternatives aux problèmes rencontrés.

Cette synthèse a pour but tout d'abord de reprendre les résultats obtenus sur la caractérisation des flux d'effluents au sein de l'île de la Réunion et d'en reporter les contraintes et les problèmes qu'ils engendrent puis de présenter une liste aussi complète que possible des différents outils et actions mis en place pour résoudre les différents problèmes rencontrés.

I. GESTION DES EFFLUENTS : LES ACTEURS ET LES FLUX

1.1. La production de matière organique

1.1.1. Les producteurs : Les unités d'élevage

A la Réunion, l'élevage s'est développé depuis une vingtaine d'années dans le cadre du Plan d'Aménagement des Hauts dont l'objectif était de stabiliser la population des Hauts autour d'une activité agricole viable afin de ralentir la migration des populations vers les zones littorales (Reynaud, 1995). Ceci a permis à l'élevage réunionnais de passer d'un stade artisanal à un stade plus industriel (Rakotomalala, 1999). C'est ainsi qu'aujourd'hui, l'activité d'élevage est principalement située sur les Hauts de l'île (voir annexe I).

Tableau 1. Secteurs de l'élevage producteurs d'effluents à la Réunion

Type d'élevage	Nombre de têtes	Nombre d'exploitant en 2000
Bovins viande	30 000 (2)	2970 (2)
Bovins lait	8 600 (2)	150 (2)
Porcins	88 461 (1)	450 (2)
Ovins	1 180 (1)	24 (2)
Caprins	36 153 (1)	1 787 (2)
Equins	459 (1)	
Volailles	2 311 000 (1)	400 (2)
Lapins	200 000 (1)	67 (2)
Cervidés	3 210 (2)	14 (2)

(1) d'après AGRESTE, 2007 (effectifs en 2004)

(2) d'après CHAMBRE D'AGRICULTURE DE LA REUNION

Le tableau 1 montre les secteurs agricoles de la Réunion potentiellement producteurs d'effluents d'élevages. Les trois grandes filières de la Réunion sont l'élevage bovin, porcine et l'aviculture qui vont être plus ou moins présentes selon les régions. Dans le Cirque de Salazie par exemple (voir annexe I), l'élevage hors-sol est dominant avec une filière porcine bien organisée et une filière avicole en plein essor (Reynaud, 1995) alors que la filière bovine viande est limitée aux « bœufs-fumier ». Dans les Hauts de l'Ouest, ce sont principalement les filières bovin lait et viande qui se sont développées avec tout de même quelques élevages porcins et avicoles. Autres exemples, dans la zone de Petit-Grand Tampon, c'est surtout l'élevage avicole est présent alors que l'élevage laitier est dominant dans les plaines d'altitude et les zones de piémont.

1.1.2. Les effluents produits

La nature, le rythme et la quantité d'effluents produits par un élevage dépendent de variables structurelles concernant l'élevage lui-même comme la nature, la taille du cheptel, le rythme de production ou le mode d'alimentation (Renault *et al.*, 1999). Les bâtiments d'élevage vont également jouer un rôle non négligeable (Aubry *et al.*, 2003). Le type de sol du bâtiment d'élevage par exemple joue un rôle important sur la nature de l'effluent produit. L'élevage sur caillebotis ou sur aire bétonnée raclée produit principalement du lisier alors qu'un gisoir (pour les porcs) ou une étable entravée (pour les bovins) produit un mélange de fumier et de purin et que les aires intégralement paillées ne produisent que du fumier. Selon Renault (1999), le type d'élevage va également influencer la quantité d'effluents produits. La production d'effluents pour les élevages sur gisoir est plus faible que pour ceux en caillebotis intégral et partiel.

Tableau 2. Productions d'effluent à la Réunion par type d'élevage pour l'année 2000 (d'après MVAD, 2007)

Type d'élevage	Quantité estimée de mat. org. en 2000 (tonne)
Porcs	178 266
Bovins à viande	277 800
Volailles	147 258
Lapins	2 917
Ovins	1 360
Caprins	19 434
Cerfs	4 548
Chevaux	1 368
TOTAL	632 951

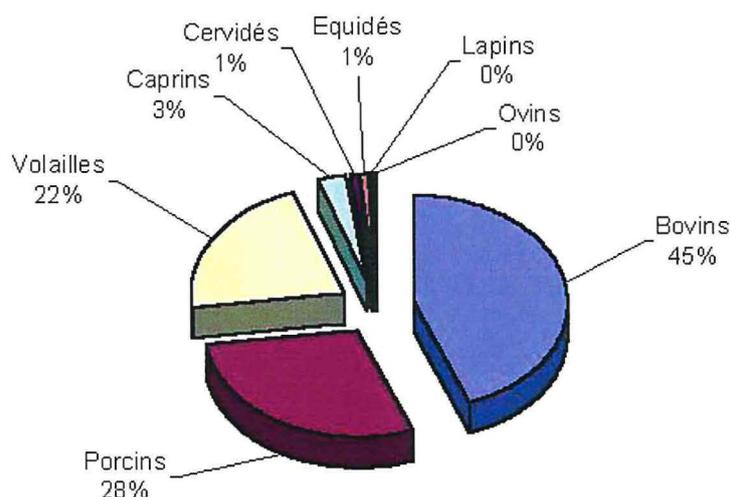


Figure 1. Répartition des quantités d'effluents produits sur l'île de la Réunion par type d'élevage en 2000 (MVAD, 2007)

On s'aperçoit grâce au tableau 2 et à la figure 1 qu'avec près de 278 000 tonnes de matières organiques produites, les bovins sont la principale source de gisements d'effluents sur l'île de la Réunion puisqu'ils représentent 45 % des effluents totaux. Viennent ensuite les porcins avec 178 266 tonnes produites en 2000 (28 %) puis les volailles (22%) alors que l'ensemble des autres productions ne représentent que 5 % des effluents produits en 2005.

Cependant, ces quantités produites ne sont pas réparties de façon homogène sur le territoire de la Réunion. On s'aperçoit rapidement grâce à la figure qu'il existe des zones à fortes production qui sont à mettre en relation avec les zones à forte concentration d'élevage : Région de Saint-Paul, Cirque de Salazie, Plaines d'altitude et sud de l'île.

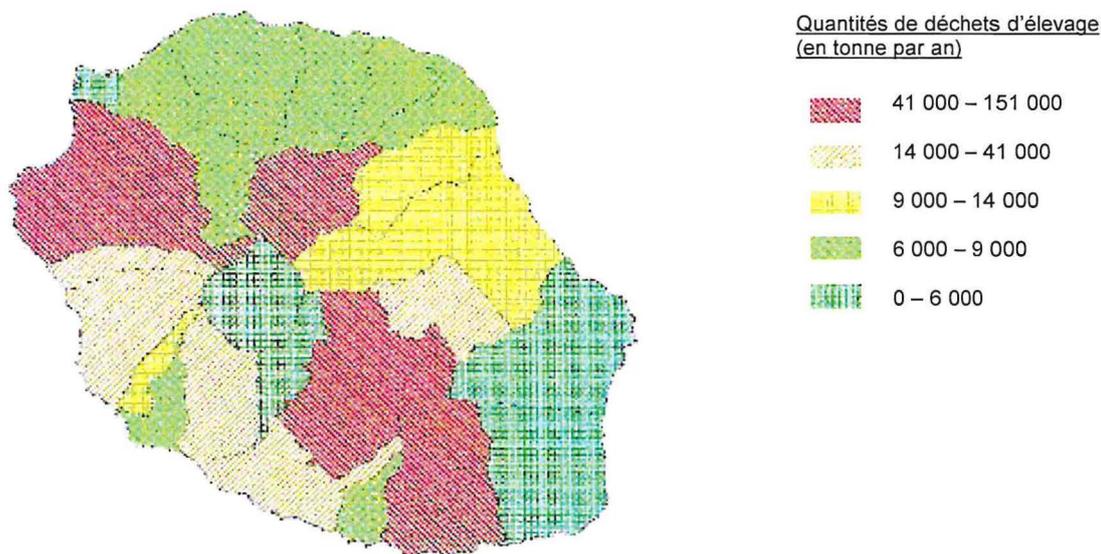


Figure 2. Répartition géographique des matières organiques issues des élevages de la Réunion (MVAD, 2007)

1.2. Les consommateurs de matière organique : Les cultures

Tout comme pour l'élevage, l'île de la Réunion comporte une grande diversité en productions végétales. Selon les données fournies par AGRESTE (2007), la canne à sucre est la culture prédominante avec 25 761 ha en 2003 soit 55 % de la SAU totale. Les cultures fourragères représentent quant à elles une superficie de près de 10 000 ha et par conséquent une surface potentielle non-négligeable d'épandage. Enfin, les cultures fruitières et les cultures maraîchères représentent les autres principales activités agricoles en terme de surface, puisqu'elles s'étendent sur respectivement 2 831 ha et environ 1 900 ha.

Cependant, malgré une diversité évidente, une spatialisation réalisée par Saint Macary *et al.* (2003) démontre qu'il existe une forte spécialisation régionale pour les productions végétales à la Réunion. Cette étude donne un zonage défini par 13 unités en fonction de quatre types d'informations que sont la pluviométrie moyenne, l'altitude qui conditionne les températures moyennes, les principales associations de cultures et d'élevages et la présence de systèmes irrigués. Les résultats de ce zonage sont représentés dans la figure 3.

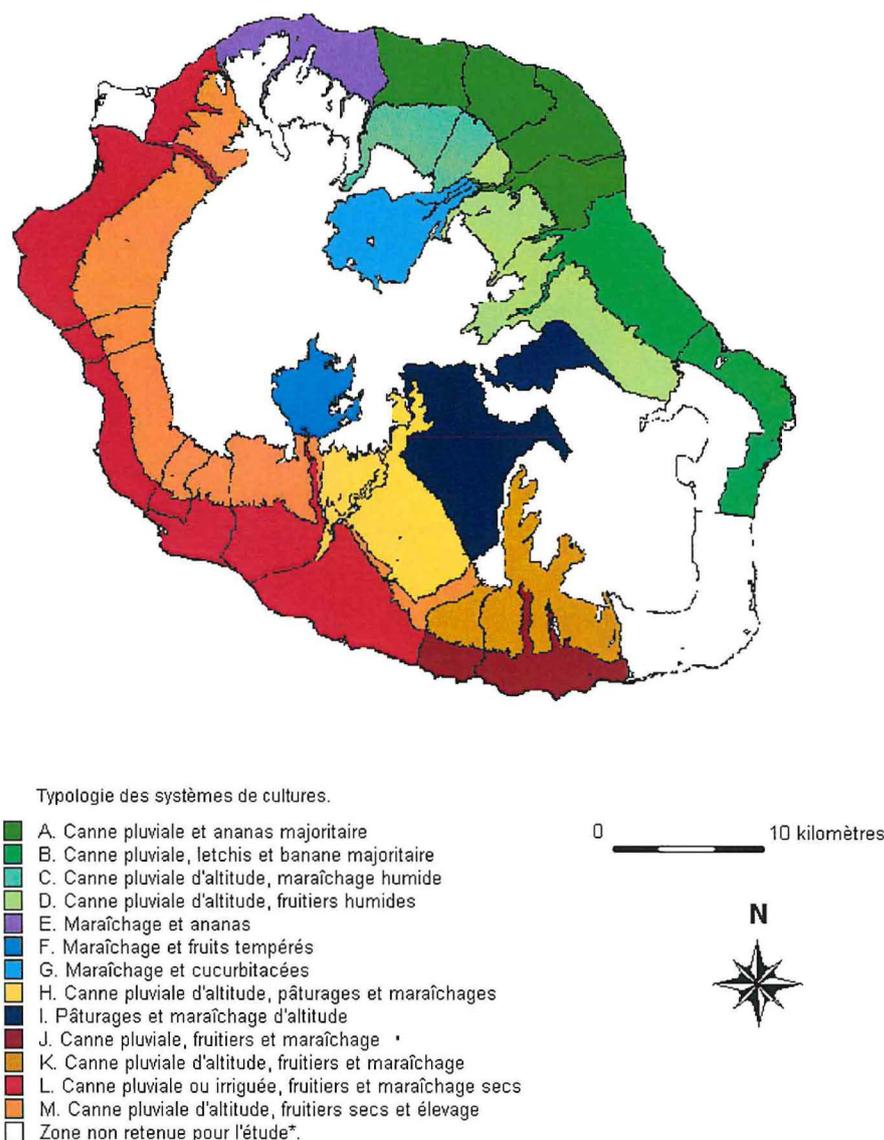


Figure 3. Principales régions agricoles de la Réunion (Saint Macary et al., 2003)

1.3. Les flux d'effluents

1.3.1. Les différentes modalités d'utilisation des effluents

Il existe différentes modalités d'utilisation des effluents sur l'île de la Réunion qui dépendent largement du type d'élevage pratiqué sur l'exploitation, qui va déterminer la nature et la quantité de l'effluent, mais aussi de la région de production, qui va déterminer la nature des cultures qui détermine pour beaucoup les possibilités d'épandage de tel ou tel effluent (Paillat et al., 2003).

Cependant, on peut définir 3 modes de gestion des effluents à la Réunion (Renault et al., 1999; Chabalière et al., 1999) : l'épandage dans l'exploitation sur les terres cultivées ou les friches, l'épandage sur les parcelles d'une autre exploitation et le mélange avec d'autres produits qui consiste à incorporer un effluent avec d'autres effluents et/ou avec un substrat carboné (bagasse, copeaux de bois, déchets d'abattoir,...).

L'épandage direct des effluents d'élevage constitue la solution de référence et elle est la plus couramment utilisée (Chabalier *et al.*, 1999). Pour la filière liquide on trouve classiquement deux modalités possibles (Aubry *et al.*, 2003) : un chantier classique où l'on épand avec une tonne à lisier et un chantier alternatif qui consiste à brancher un coude ou un tuyau à la sortie de la tonne, celle-ci étant positionnée en un point haut en bordure d'un champ. La majeure partie du lisier est épandue, la fréquence des épandages dépend fortement de la libération de la surface qui dépend elle-même de la fréquence des récoltes.

Pour la filière solide, la modalité classique est l'utilisation d'un épandeur mécanique à fumier mais d'autres modalités peuvent exister, notamment pour les jardins privés où diverses formes d'épandage manuel (fourche, brouettes,...) peuvent avoir lieu. Pour la filière solide, le stockage ne revêt que peu d'importance et là aussi, la majeure partie des effluents sont épandus mais le plus souvent en dehors de l'exploitation, il est rare que des éleveurs fassent en même temps du maraîchage.

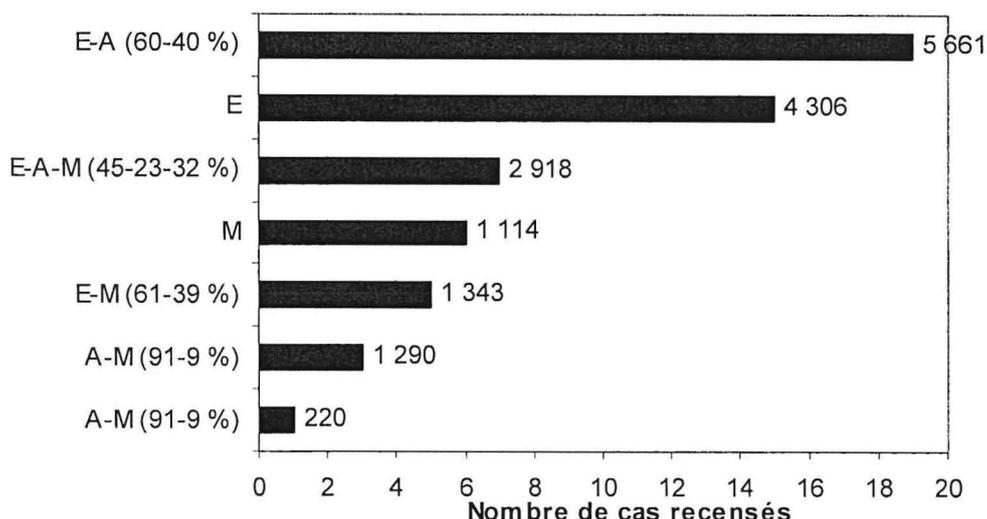
Enfin, il est important de noter ici que la vidange sauvage à la ravine, souvent dénoncée dans le passé, devient aujourd'hui rare, même dans les zones à très faibles surfaces épandables : c'est une solution de dernier recours, mais en aucun cas un mode courant de gestion (Aubry *et al.*, 2003).

Les modalités d'épandage sur les autres exploitations sont relativement différentes en fonction des zones de l'île. On observe que ces flux entre exploitation sont bien présents dans des régions comme le Cirque de Salazie (Chabalier *et al.*, 1999) qui présentent un équilibre apparent entre les productions végétales tels que le maraîchage ou les fourrages et les productions animales. Ainsi, lorsque les conditions sont favorables (proximité de cultures en adéquation avec les effluents produits, coût peu élevé du transport, accessibilité aux exploitations importatrices facile), on observe généralement (Paillat *et al.*, 2003) des flux des élevages avec atelier hors-sol prédominant vers les exploitations à productions végétales sur des surfaces d'importances variables. Dans ce cas, ce sont le plus souvent des transferts des litières et du fumier vers les cultures maraîchères et du lisier chez les producteurs de canne (Reynaud, 1995 ; Chabalier *et al.*, 1999 ; Rakotomalala, 1999 ; Paillat *et al.*, 2003). Ces échanges se font généralement sur la base de contrats oraux entre producteurs et utilisateurs. A noter, que les exploitations comprenant des productions végétales et des ateliers hors-sol, laitiers ou mixtes sont peu concernées par ces transferts entre exploitations. A l'inverse, certaines régions ne sont pas favorables à ces transferts. C'est le cas par exemple des zones basses de plaines côtières notamment dans le Nord et l'Est de l'île, dont la production est essentiellement cannière et qui sont peu productrices de lisier. Or, bien que la demande en ce produit soit forte, les lieux de production sont situés dans les piémonts, les plaines d'altitude ou les cirques rendant difficile le transport de lisier vers ces exploitations de canne à sucre (Paillat *et al.*, 2003).

Concernant le mélange, il est toujours effectué sur l'exploitation (Precheur, 1999 ; Renault *et al.*, 1999). Dans tous les cas, on a pour résultat un produit plus solide, plus facilement épandable. Ce mélange peut être épandu rapidement ou subir un compostage le plus souvent transformé en compost en utilisant de la litière de volaille (Precheur, 1999).

Le cas du Grand-Ilet (Renault *et al.*, 1999) reflète le mieux ces modes de gestion. La figure démontre que l'épandage sur l'exploitation seul (E) ou associé à un épandage sur une autre exploitation sont les cas les plus fréquents (E-A) et concernent les plus grosses quantités d'effluents alors que le mélange simple (M) lorsqu'il est effectué se fait exclusivement sur l'exploitation.

Si les effluents porcins et bovins sont principalement épandues (34 % des effluents bovins sont épandues), le mélange est une modalité non négligeable puisque sur Grand-Ilet, 15 % des effluents porcins, 68 % des litières de volailles, 100 % des lisiers de poules et 6 % du fumier e bovins sont mélangés et le plus souvent (90 % en quantité) compostés (Renault *et al.*, 1999).



Note 1 : les chiffres figurant à côté des histogrammes indiquent la quantité d'effluents gérée par chaque scénario en tonnes
 Note 2 : les pourcentages représentent les proportions respectives d'effluents de chaque destination

Figure 4. Fréquence des différents scénarios de gestion des effluents porcins au Grand Ilet (d'après Renault et al., 1999)

1.3.2. Les facteurs influant le choix d'utilisation des effluents

Tout d'abord, la gestion des effluents est soumise sur l'île de la Réunion à une réglementation précise (MVAD, 2007) instruite par le Ministère de l'écologie et du développement durable.

Le dispositif réglementaire à la gestion des effluents dans les exploitations d'élevage varie selon le régime dont relève l'élevage, ce régime étant déterminé par le niveau de risque de l'exploitation sur la simple base des effectifs d'animaux présents :

- les "petits" élevages dont les effectifs sont inférieurs à 50 pour les bovins et les porcins et 5 000 pour les volailles ainsi que les élevages caprins, ovins et équins relèvent du régime RSD (Règlement Sanitaire Départemental) instruit par la DRASS (Direction Régionale des Affaires Sanitaires et Sociales)
- les "gros" élevages dont les effectifs sont supérieurs à ceux donnés précédemment sont soumis au régime ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement) géré localement par la DSV (Direction des Services Vétérinaires).

Les ICPE ont des prescriptions visant à éviter la pollution des eaux superficielles, des nappes phréatiques ou toutes autres nuisances occasionnées par les élevages. Le RSD prévoit des prescriptions techniques concernant l'évacuation et le stockage des déjections, jus d'ensilage et eaux de lavage des logements animaux, le dépôt des matières organiques destinées à la fertilisation des sols, l'épandage et l'utilisation des matières fertilisantes, phytosanitaires et autres engrais. A terme, les prescriptions du RSD en matière d'élevage ont vocation à converger vers celles des ICPE (MVAD, 2007).

Concernant l'épandage, les élevages RSD et les ICPE sont soumis à l'obligation de conception d'un plan d'épandage basé sur les quantités d'azote épandues par unité de surface et qui indique les parcelles retenues pour recevoir les effluents et les modalités. Ces plans d'épandage doivent respecter certaines contraintes (délais d'enfouissement après épandage, distances à respecter des habitations et points d'eau, épandage en fonction des pentes ou contraintes liées aux périodes d'épandage). Les délais d'enfouissement après épandage par exemple sont exposés dans le tableau 3. Les modalités relatives aux

distances à respecter des habitations et points d'eau sont présentées dans le tableau 4 pour le RSD et le tableau 5 pour la réglementation ICPE. Enfin, les possibilités d'épandage en fonction des pentes sont présentées dans le tableau 6.

Tableau 3. Délais d'enfouissement après épandage des produits (d'après MVAD, 2007)

Modalités d'épandage	Délai maximal d'enfouissement après l'épandage (heures)
Dispositif d'injection directe dans le sol	Immédiat
Réalisation d'un traitement anti-odeurs	24
Fumiers après stockage minimal de 4 mois	24
Composts	Enfouissement non imposé
Fumiers de volaille, fientes sèches, lisiers et purins épandus avec des pendillards, autres effluents	12
Autres cas	24

Tableau 4. Distances minimales d'épandages relatives à la réglementation ICPE (Raimbault, 2005)

	Type d'effluent			
	Fumiers	Fientes de plus de 65 % de MS	Litières de volailles	Lisiers et purins
Habitations de tiers ou tout local habituellement occupé par des tiers	50 m (1)	50 m	50 m	50 m (2)
Points de prélèvement d'eau destinée à l'alimentation des collectivités humaines ou des particuliers	50 m	50 m	50 m	50 m
Berges des cours d'eau	35 m	35 m	35 m	35 m

- (1) Fumiers après stockage minimum de 2 mois dans l'installation
(2) Mise en œuvre d'un traitement ou procédé atténuant les odeurs

Tableau 5. Distances minimales d'épandages relatives au RSD (Raimbault, 2005)

	Lisiers, purins, eaux résiduaires de lavage des logements d'animaux	Fumiers et déjections solides
Habitations, zones de loisirs, établissements recevant du public	50 m (1)	100 m
Aménagements hydrographiques non destinés à l'alimentation en eau potable	35 m	
Aménagements hydrographiques destinés à l'alimentation en eau potable	50 m	
Berges des cours d'eau	200 m (2)	5 m
	35 m	

- (1) 100 m dans le cas général, 50 m si les matières sont désodorisées ou enfouies dans les meilleurs délais
(2) 35 m dans le cas général, 200 m si la pente est supérieure à 7 %

Tableau 6. Épandage des matières organiques en fonction des pentes (MVAD, 2007)

Classe de pente (p)	Matières organiques pouvant être épandues
$p \leq 7 \%$	Tous types
$7 < p \leq 20 \%$	Produits solides (Fumiers et composts)
$20 < p \leq 40 \%$	Produits normalisés homologués
$p > 40 \%$	Aucun

Cependant, quelques élevages anciens, bien que relevant du RSD, ne sont pas encore soumis au plan d'épandage. Dans ce cas, l'épandage est interdit sur les terrains affectés à des cultures maraîchères (ou qui le seront affectés dans un délai de 1 an) et à moins de 200

m des cours d'eau si la pente du terrain est supérieure à 7 %. De plus, les lisiers épandus sur pâturage devront avoir subi un stockage d'une durée minimale de 30 jours en saison chaude et 60 jours en saison froide soit un autre traitement approprié et la remise à l'herbe suivante devra se faire au minimum après 30 jours. Enfin, l'épandage par aéro-aspersion est interdit.

Pour le stockage, tous les élevages RSD dont le volume stocké est supérieur à 5 m³, les distances à respecter par rapport aux habitations est de 200 m, de 5 m par rapport aux voies de communication et de 35 m par rapport aux sources d'eau, rivages et zones aquicoles.

Les réglementations concernant les ICPE sont plus précises (MVAD, 2007). Les fumiers pailleux ayant été accumulé au moins 2 mois dans les bâtiments d'élevages peuvent être directement stockés sur la parcelle d'épandage à condition que le lieu de stockage soit changé tous les ans. Mais si la fréquence de curage est inférieure à 2 mois, les effluents doivent être stockés sur une plate-forme avant le dépôt au champ pour respecter une maturation de 2 mois. Cette plate-forme doit être situé à 35 m des points d'eau et 100 m des habitations. Concernant les fumiers et les fientes de volaille à plus de 65 % de matière sèche, le stockage est autorisé sur le sol nu si le tas est couvert par une bâche imperméable à l'eau.

Outre les conditions réglementaires, les agriculteurs ont leurs propres règles de décision régies par grand nombre de facteurs qui sont globalement similaires mais dont la hiérarchie diffère sensiblement en fonction des régions. Rakotomalala (1999) a ainsi montré au sud de l'île que les modalités d'apport des matières organiques sont régies par de nombreux facteurs tels que le type de parcelle et ses cycles culturaux (récoltes, replantation, ...), le climat, la disponibilité en main-d'œuvre et en matériel, et selon le type de matière organique, sa facilité d'utilisation et surtout le type de matière organique (effluents liquides ou solides). A Grand-Ilet (Renault et al., 1999), il semblerait que le raisonnement de l'épandage se fasse principalement en fonction du remplissage de leur fosse et en fonction des cycles structuraux tout en négligeant des éleveurs le rôle des cultures, des doses ou encore de la période. Pour la moitié d'entre eux, le lisier est considéré comme un effluent encombrant.

D'un point de vue plus général, pour la filière liquide, c'est les capacités de stockage et leur rythme de remplissage qui ont une importance remarquable sur la gestion des effluents produits. L'atteinte du "seuil de débordement" des stocks est vécue comme une contrainte forte et des décisions sont prises pour éviter d'y être confrontés (Aubry et al., 2003). Il existe une règle préférentielle d'attribution des effluents solides à une période bien particulière du cycle cultural : la replantation. Cela permet un enfouissement de cette matière organique qui fonctionne alors comme un engrais de fond (Precheur, 1999).

1.3.3. Les couples effluents-cultures

Les agriculteurs ne mettent pas n'importe quel effluent sur n'importe quelle parcelle. Dans leurs discours, ces règles de décision s'expriment sous trois formes (Aubry et al., 2003) qui dépendent des facteurs précédemment cités (voir paragraphe 1.3.2.) :

- des exclusions : "pas de lisier sur des cultures maraîchères" ;
- des préférences : "plutôt du fumier que du lisier sur des cannes replantées" ;
- des exclusivités : "que du terreau ou du compost sur cultures maraîchères du second cycle".

Tableau 7. Règles d'attribution des effluents aux cultures (d'après Aubry et al., 2003)

Cultures	Priorité d'attribution entre les différents effluents
Pérennes et semi-pérennes en production	1. Lisier de porcs 2. Lisier de bovins 3. Lisier de poules 4. Autres
Fourrages	1. Lisier de bovins 2. Lisier de porcs 3. Lisier de poules 4. Autres sauf fumier
Replantations de semi-pérennes	1. Ecumes de sucreries 2. Fumier de bovin 3. Fumier de porcs 4. Fumier de volailles 5. Compost 6. Autres
Maraîchage + curcuma	1. Fumier de volailles 2. Compost 3. Fumier de bovins 4. Fumier de porcs 5. Autres sauf lisier
Petit Maraîchage	1. Terreau 2. Compost
Intercultures	1. Lisier de porcs 2. Lisier de bovins 3. Lisier de poules 4. Autres
Friches	1. Lisier de porcs 2. Lisier de bovins 3. Lisier de poules 4. Autres

Le tableau 7 montre les échanges préférentiels entre les différents types d'effluents produits sur la Réunion et les cultures de l'île.

On s'aperçoit que les cultures pérennes et semi-pérennes en production comprenant essentiellement la canne à sucre, les fourrages, les bananiers, les agrumes ou les autres arbres fruitiers reçoivent préférentiellement du lisier car, d'un e part, cela n'est pas contraire à la réglementation et, d'autre part, l'apport d'un autre type d'effluent peut être incompatible avec le système de culture (pas de travail du sol pour enfouir du fumier, difficulté à passer un épandeur dans une plantation, etc.) : les producteurs de canne notamment effectuent des apports importants de lisier de porc, car ils croient que celui-ci permet de faire une irrigation d'appoint. Ils apportent donc une grande quantité de lisier, jusqu'à 93 tonnes par hectare. La gestion de la matière organique chez les producteurs de fruits s'apparente plus à celle de la canne qu'à celle du maraîchage, mais avec des spécialités (dates d'apport, nombres de séquences, doses) (Rakotomalala, 1999).

Les replantations de ces cultures semi-pérennes donne fréquemment lieu à un épandage d'effluent solide car il peut être enfoui par un travail du sol.

Les cultures maraîchères de plein champ donnant lieu à un travail du sol mécanisé, utilisent divers effluents solides, selon leur disponibilité et leur prix d'acquisition éventuelle hors de l'exploitation. (Lisier interdit par la réglementation)

Le maraîchage s'apparentant à du jardinage (implantation manuelle sur de petites surfaces de cultures à très forte valeur ajoutée) privilégie des fumiers très évolués (composts fins et parfois terreaux importés à la Réunion). Les litières de volaille de chair des petits élevages font parfois l'objet d'un transfert vers les zones de cultures maraîchères locales, sur la base de contrats oraux entre producteurs et utilisateurs.

Cette exportation naturelle s'explique par la facilité de manutention de transport et d'épandage de ce produit sec, peu odorant et riche en éléments fertilisants. (Chabalier *et al.*, 1999)

Les intercultures (parcelles non-cultivées pendant quelques semaines ou quelques mois), les fiches et les ravines se voient attribuer potentiellement tous les effluents et sont très prisés par les agriculteurs pour pratiquer des épandages d'urgence en cas de débordement des stocks (avec risque d'épandage non-réglementaire si replantation de la prochaine culture trop rapprochée).

Lorsqu'un effluent est disponible en quantité limitée et qu'il convient à plusieurs cultures, il peut y avoir concurrence d'utilisation. Dans ce cas, l'agriculteur utilise des règles d'arbitrage (Aubry *et al.*, 2003). Le lisier de porcs est tout d'abord épandu sur les pérennes et semi-pérennes. Le lisier de bovins quant à lui est prioritairement disposé sur les fourrages. Concernant les fumiers de bovins, ils sont tout d'abord destinés au maraîchage industriel puis seront épandus sur les semi-pérennes en replantation. Les fumiers de volaille et le compost (élaboré à partir de ces mêmes fumiers) trouvent destination en premier lieu sur le maraîchage de petite surface et le jardinage privé puis sur le maraîchage industriel. Concernant les effluents produits en moindre quantité, le lisier de lapins et le fumier de cerfs sont destinés principalement aux fourrages.

II. PROBLEMES DE GESTION ET RISQUES ENVIRONNEMENTAUX RESULTANTS

2.1. Les problèmes de gestion

Il existe un déséquilibre dans les pratiques agricoles de l'île de la Réunion. D'un côté, il y a une production excédentaire en effluents qui représentent dès lors des polluants, et d'un autre, les exploitations à dominante production végétale souffrent d'un approvisionnement insuffisant en qualité et en quantité à certaines périodes (Paillat *et al.*, 2003). Ces exploitations ont alors recours aux importations d'effluents, mais l'enclavement de certaines zones et par conséquent la difficulté d'accès à certaines régions, ont tendance à augmenter les coûts de transport. En conséquence, les éleveurs se retrouvent face à des quantités de matières organiques qui ne leur sont pas utiles, et qu'ils doivent tout de même valoriser. C'est principalement la gestion de ces excédents qui va poser des problèmes.

A la Réunion, ce sont les élevages porcins qui comptent le plus de problème de gestion des effluents. A Grand-Ilet par exemple (Renault *et al.*, 1999), 80 % de la production d'effluents porcins liquides (soit près de 20 % de la production d'effluents porcins totale) ne peuvent pas être épandus sur les parcelles des éleveurs de la région. De plus, Paillat *et al.* (2003) affirme que dans les ateliers où la production de lisier est très importante, les capacités de stockage ne dépassent généralement pas un tiers de la production annuelle. Ces effluents sont dès lors ressentis par les éleveurs comme un mal nécessaire, plus que comme une ressource en matière organique ou encore un revenu potentiel (Aubry *et al.*, 2003).

Un autre phénomène à prendre en compte provient du fait que pendant la période de mars à juillet, les producteurs de canne refusent le lisier car cette saison correspond à l'accumulation de sucre au sein des cannes qui peut être contrariée par les éléments minéraux. Ce moment est donc critique pour les éleveurs car les fosses continuent à se remplir (Paillat *et al.*, 2003).

Ces différents facteurs entraînent une gestion anarchique des épandages afin d'éviter des débordements possibles des dispositifs de stockage. Ces recours fréquents aux épandages

d' "urgence" (Paillat, 1998) ont 3 conséquences principales (Chabalier *et al.*, 1999; Paillat *et al.*, 2003) :

- des épandages de lisiers sur les friches ou dans les ravines ;
- des inadéquations entre effluents et cultures (l'apport de lisier par exemple sur maraîchage en dehors des périodes de culture est fréquent) ;
- des doses excessives sur les parcelles cultivées.

2.2. Risques environnementaux

Les problèmes de gestion cités au paragraphe précédent entraînent deux problèmes majeurs (Paillat *et al.*, 2003) :

- le risque de pollution généré par l'élevage (principalement dans les Hauts à cause des modalités d'épandages déficientes)
- la perte de fertilité des sols (surtout dans les Bas, à cause du manque de fertilisation sur la canne à sucre et la maraîchage).

On observe ainsi des risques de contamination par les nitrates, les phosphates, les éléments traces métalliques (ETM), et les composés traces organiques (CTO) éventuellement présent dans les matières organiques utilisées en agriculture qui ont des effets sur la qualité du sol, des produits agricoles récoltés de l'eau et de l'air. Concernant l'eau, lorsque des sols sont pollués ou sur-fertilisés, les éléments solubles sont facilement entraînés par ruissellement, infiltration, drainage et lixiviation et peuvent polluer les eaux de surface ou les nappes phréatiques. Par exemple, après une fertilisation azotée inadaptée (sur fertilisation, mauvaise répartition, forte pluie après l'épandage...), la culture risque de ne pas absorber tout l'azote apporté. Les nitrates présents dans le sol sont alors perdus par lixiviation et se retrouvent en partie dans les nappes phréatiques. AU cirque de Salazie, 40 % de l'azote rejeté par l'élevage est en excédent. Les effluents secs sont en déficit de 13 800 kg d'azote, alors que les effluents liquides ou pâteux sont en excédent de 92 500 kg représentant 30 % du lisier produit (Chabalier *et al.*, 1999). Cet exemple témoigne de la situation générale de l'île. Globalement, l'île est excédentaire de 2 000 tonnes par an en azote et rien que pour les effluents d'élevages (Ruiz, 2003). Les phosphores représentent également un autre risque majeur de pollution des eaux. En période de fortes précipitations, les phénomènes érosifs entraînent un ruissellement des eaux chargés en phosphore vers les eaux douces ou salées. Or, le phosphore stimule le processus de fixation de l'azote de l'atmosphère par les algues et accélère leur croissance, c'est l'eutrophisation des cours d'eau. De la même manière, des surdosages de lisier peuvent apporter du cuivre et du zinc en excès dans le sol qui se retrouvent ensuite dans les eaux souterraines.

Les risques sur l'air se situent principalement à deux échelles : la fabrication et la manipulation de matières organiques peuvent affecter la qualité de l'air à proximité du lieu d'émission (le lisier stocké dégage de l'ammoniac et dans une moindre mesure d'autres gaz) ou à une plus grande échelle, on parle dans ce cas de pollution atmosphérique.

A proximité du lieu d'émission, la formation d'ozone (O₃) par le rayonnement des ultraviolets sur les effluents stockés représente 19 % des apports de gaz à effet de serre à la Réunion. L'effet de serre est aussi amplifié par la production de protoxyde d'azote (N₂O) provenant de la transformation des produits azotés dans les sols agricoles (engrais, fumiers, lisiers, résidus de récolte). De plus, plus les quantités d'azote sont importantes, plus les émissions de ce gaz vont être fortes.

A l'heure actuelle, si les systèmes d'élevages à la Réunion sont largement compris et identifiés et bien que la recherche ait identifié les différentes conséquences des mauvaises gestions des effluents notamment grâce aux observations faites en métropole, l'impact quantitatif sur l'environnement a été peu étudié. Par exemple, l'inventaire des ETM (Eléments Traces Métaux) dans les sols a été réalisé en 2003 et n'a révélé aucune

accumulation actuellement détectable. Mais afin d'analyser les impacts de la fertilisation organique sur ces teneurs, des expérimentations aux champs et des essais en laboratoire ont été menées au Cirad et au MVAD de la Chambre d'Agriculture sans que les résultats aient été encore publiés.

III. AIDES À LA GESTION ET À LA RESOLUTION DES PROBLEMES RENCONTRES

3.1. Techniques de traitement des effluents

L'île de la Réunion est un cas particulier où le traitement des effluents devient nécessaire, plus particulièrement dans les Hauts. Par manque de surface, ces régions deviennent de véritables zones d'excédents structurels, notamment à cause e du développement des petits élevages familiaux (Farinet *et al.*, 2003). D'autres solutions existent telles que la réduction à la source ou l'optimisation de surfaces épandables mis ces dernières n'étant pas suffisantes, le recours au traitement devient incontournable (Paillat, 1998). Selon Chabalier *et al.* (1999), le traitement est défini comme toute action qui, par des moyens techniques, fait subir à l'effluent des transformations qui ont pour effet de modifier sa composition chimique et/ou sa consistance physique en vue d'éliminer ou de concentrer certains de ces éléments. Dans le cadre de la Réunion, ce traitement aura pour but principal la transformation des effluents liquides en produits solides dont les éléments fertilisants seront plus concentrés, et ceci pour deux raisons : sous réserve d'être plus élaborés (maturité plus avancée, granulométrie plus fine, etc.), les produits solides obtenus permettraient d'ôter certains inconvénients de stockage et d'utilisation au sein même des exploitations productrices que possèdent les effluents liquides comme l'exclusion sur certaines cultures ou encore l'impossibilité d'épandre à certaines périodes (Aubry *et al.*, 2003). De plus, les produits obtenus sont souvent plus facilement transportables et plus concentrés en éléments fertilisants, pourraient trouver comme destination les cultures de canne à sucre ou le maraîchage, qui sont des clients potentiels.

Parmi les nombreux procédés envisageables, les plus utilisables dans le contexte réunionnais semblent être le compostage ou l'élevage sur litière « biomaîtrisée » pour les effluents porcins et bovins (Aubry *et al.*, 2003). Pour les litières de chair et les fientes de poules pondeuses, riches en N et P, le compostage est souvent proposé comme traitement de base. Pour les élevages de poules pondeuses, le pré-séchage des fientes en bâtiments d'élevage, directement sous les cages, est associé à un séchage de finition naturel sous toiture après évacuation (Chabalier *et al.*, 1999).

Mais à l'heure actuelle, compte tenu des quantités produites, c'est le traitement des lisiers qui apparaît l'action primordiale sur l'île. Farinet (2003) propose ainsi des traitements visant la « destruction » de l'azote et la concentration des autres éléments polluants (phosphore, potassium et métaux) dans des co-produits. En sus du traitement des constituants réglementés, certaines techniques permettent la désodorisation, la stabilisation, la déshydratation ou l'hygiénisation des coproduits, ce qui améliore les conditions de leur gestion ultérieure. Il existe plusieurs techniques permettant ces différents traitements qui sont en constantes évolutions. Certaines sont dites « génériques », car basées sur un principe connu de longue date et utilisable par tous. D'autres, plus spécifiques, sont directement liées à un procédé de traitement commercial. Ces procédés de traitement commerciaux combinent souvent plusieurs techniques entre elles.

3.1.1. Techniques de traitements de l'azote

► Techniques destructrices de l'azote

La **nitrification-dénitrification biologique en phase liquide** (Ndn) est obtenue en alternant des phases aérobies et anoxiques dans un réacteur alimenté en lisier brut ou de préférence prétraité, c'est-à-dire ayant subi une séparation de phases visant à s'affranchir de la fraction particulaire, qui complique la gestion des ouvrages de traitement. L'azote ammoniacal du lisier est ainsi transformé en azote gazeux (NH_4^+ ou NO_3^- ou N_2) qui est rejeté dans l'atmosphère. Une faible partie de l'azote organique du lisier est également éliminée par cette voie après ammonification préalable (Norg ou NH_4^+). Les bases de dimensionnement de la Ndn sont bien connues, mais il s'agit d'un processus biologique, donc sensible à la température et aux inhibiteurs.

De nombreux constructeurs ont repris le concept générique de la Ndn et le développent sous différentes dénominations de procédés (Agrifiltre®, Agroclar, BioArmor, EuroBiosor, Dénitral, OTV, Porfilise, Technolyse, Ternois Epuration, Val Epure...) qui se différencient, essentiellement, par les traitements du lisier en amont ou en aval.

L'**extraction de la fraction ammoniacale du lisier** sous forme gazeuse est réalisée en combinant agitation, aération, élévation du pH ou de la température. En agissant sur ces paramètres, on peut contrôler la quantité d'ammoniac produite. Ensuite, l'élimination de cet ammoniac se fait par nitrification-dénitrification biologique en phase gazeuse (Amolis) ou par combustion catalytique à haute température (Smelox). Ces procédés concernent, généralement, du lisier ayant subi un prétraitement poussé en amont. Par rapport à la Ndn, ils ont l'avantage de permettre des débits de traitement élevés (unités de taille réduite, version mobile).

► Techniques conservatrices

Il s'agit de différentes **techniques d'extraction-concentration de l'azote ammoniacal du lisier par voie physico-chimique** qui donnent lieu au minimum à un co-produit concentré en azote ammoniacal. Suivant les procédés, le processus de concentration de l'azote permettra également la concentration du phosphore et des métaux, parfois du potassium. Les principales techniques et procédés actuellement développés sont les suivants :

- Évaporation puis épuration-condensation de vapeur (Sirven) ;
- Prétraitement poussé puis osmose inverse (Lisikit, Sefipur) ;
- Précipitation chimique de l'azote ammoniacal en phase liquide (AVDA, Kaltenbach-Thuring) ;
- Extraction de l'azote ammoniacal sous forme gazeuse puis concentration par lavage acide (Balcopure®) dans une solution aqueuse.

Tous ces procédés sont d'un niveau technologique assez élevé, ce qui peut poser des problèmes pour une gestion au niveau d'une exploitation agricole. Les deux procédés chimiques ont l'avantage de permettre des débits de traitement importants dans des installations de taille réduite.

3.1.2. Techniques de séparation de phase

L'azote organique, le phosphore et les métaux (Cu, Zn), étant essentiellement présents dans la fraction particulaire et colloïdale du lisier, la séparation de phases permet de les concentrer dans un substrat. La plupart des techniques et procédés de traitement de l'azote évoqués précédemment intègrent une étape de séparation de phases qui donne lieu à des co-produits concentrés en phosphore, métaux et parfois potassium alors que d'autres procédés de traitement du lisier de type conservateur sont uniquement basés sur ce principe. Les techniques de séparation de phases les plus courantes incluses dans les différentes techniques de traitement de l'azote sont (Farinet, 2003):

- le séparateur mécanique (inclus dans le procédé Ndn)
- la décantation de lisier brut ou tamisé (EuroBiosor, Agri-Protect)
- la décantation du lisier après Ndn (Ndn)
- la filtration sur paille (Agrifiltre®)
- la coagulation/floculation puis centrifugation ou filtration mécanique poussée (Ndn, Ecoliz®, AVDA)
- le prétraitement puis ultrafiltration (Lisikit, Sefipur, Kaltenbach-Thuring)
- la déshydratation thermique (Sirven, Kaltenbach-Thuring)
- l'imprégnation/compostage sur paille (Guernévez, Isater)

L'imprégnation-compostage sur paille ou plus simplement **compostage** est un cas très particulier. Cette technique est déjà présente dans certaines exploitations sous forme d'unités individuelles. C'est la seule technique actuelle dite de traitement total, car ne donnant pas lieu à une phase liquide traitée mais à un seul co-produit exportable sous forme de compost, à condition de respecter un ratio paille/lisier suffisant pour ne pas générer d'écoulements. Mais elle est cependant controversée compte tenu des importantes pertes d'ammoniac et d'oxydes d'azote qu'elle est supposée engendrer, ces gaz étant néfastes pour l'environnement (pluies acides, effet de serre). La MVAD (2007) mène depuis 2002 des expériences de plate-forme de compostage ayant différentes compositions selon la région et les effluents produits :

- Litière de volaille et lisier de porc (Salazie et Trois Bassins) ;
- Déchets verts et fumier de bovin (Le Port)
- Litière de volaille, papier et lisier de porc (Saint-Pierre) ;
- Litière de volaille, copeaux de bois et lisier de porc (Saint-Joseph) ;

Deux techniques de séparation de phases très performantes, **l'ultrafiltration** et le **séchage thermique**, permettent de produire une phase liquide traitée de grande qualité, proche d'une eau déminéralisée, qui peut être recyclée ou, même, dans certains cas, être rejetée directement dans le milieu naturel. Pour toutes les autres techniques de séparation, le lisier traité doit faire l'objet d'un épandage agricole ou d'un traitement complémentaire.

3.2. Outils d'aide à la prise de décision

Pour pallier aux risques de pollutions liés aux effluents de l'élevage et résoudre les déséquilibres, la maîtrise globale de la gestion de ces déchets à toutes les échelles, d'un niveau local jusqu'au niveau de l'île dans sa totalité, est apparue nécessaire. La recherche a alors élaboré un ensemble d'outils permettant aux acteurs locaux de mieux appréhender les diverses actions à mettre en place pour parvenir à ces objectifs. Souvent, la modélisation est apparue comme l'outil de représentation et d'analyse de la gestion individuelle ou collective des effluents le mieux adapté en permettant de simuler différents scénarios et d'en évaluer les risques. Les modèles de simulation présentés ici, qu'ils soient mathématiques ou informatiques, ont été conçus dans le cadre des travaux de l'Atp 99/60. Ce projet de recherche est une action thématique programmée menée par le Cirad en collaboration avec l'Inra et l'Université de la Réunion qui avaient pour but, entre autre, de concevoir de nouvelles stratégies de gestion des effluents.

Cette partie se veut cependant une simple liste non exhaustive des différents outils de simulation et modèle spécifique à l'île de la Réunion. C'est pourquoi, seuls les modèles qui avaient déjà fait l'objet d'utilisation dans le contexte de la Réunion et qui ont été validés sont décrits. Le modèle Mobe5 par exemple n'est pas spécifié car il a été réalisé dans le cadre d'un mémoire de fin d'études et qu'il n'a pas fait l'objet de vérification permettant d'assurer sa correction (Paillat *et al.*, 2003). Le modèle Stics n'est également pas cité car il ne représente pas un intérêt opérationnel dans la mesure où il n'a pas été paramétré avec suffisamment de paramètres locaux (Paillat *et al.*, 2003). Pour plus de renseignements concernant les modèles exposés, notamment sur leur structure mathématique, le lecteur pourra se reporter aux références citées en titre.

3.2.1. Au niveau de l'exploitation agricole : Magma (Guerrin, 2003)

Magma (Modèle d'aide à la gestion des matières organiques en agriculture) est un modèle de gestion des matières organiques basé sur la connaissance extraite de plusieurs dizaines d'exploitations enquêtées dans différentes régions de l'ouest de la Réunion depuis 1995. Il comprend des flux entrants que sont les flux de production de diverses matières organiques (effluents solides ou liquides, lisiers, fumiers ou même compost fabriqués à partir de certaines d'entre elles) et des flux sortants provenant des flux de consommation de ces matières par différents usages : épandage direct sur les cultures ou des friches, transformation éventuelle (par exemple, en compost), et débordements de stock en cas de dépassement de la capacité maximale de stockage.

Le but de ce modèle est d'élaborer et de tester des alternatives de gestion à proposer aux producteurs. Bien que se situant principalement au niveau individuel de l'exploitation, la modélisation et la simulation des flux d'effluents (liquides ou solides) peut également concerner le niveau collectif dans le cas par exemple de transferts d'exploitation excédentaire vers des exploitations déficitaires.

Plus précisément, Magma est un Système dynamique hybride qui incorpore à la fois des variables discrètes et continues. La structure mathématique du modèle s'articule autour d'un ensemble d'équations différentielles, près de 200, afin de représenter 6 groupes de variables de nature biotechnique ou décisionnelle concernant la gestion des matières organiques : production, événements déclenchant l'action, consommation, transport, transformation, auxquelles il faut ajouter des constantes « switches » permettant de spécifier des scénarios particuliers

Pour Guerrin (2003), le premier critère d'une bonne gestion sera de minimiser les consommations illicites de matières organiques, notamment l'épandage sur friche et le débordement des stocks, qui constituent des facteurs de risques importants pour l'environnement. En ce sens, le modèle privilégie la coordination des différents flux de consommation et non, le contrôle de la génération des matières organiques à la source, qui pourrait être coûteux pour les éleveurs (comme la modification des systèmes d'élevage). Cela signifie que les auteurs prétendent agir sur la « demande » de matières organiques (en observant les contraintes légales à leur consommation) plutôt que sur l'offre. C'est pourquoi, les principaux objets visés par les actions sont les stocks de Mo et les sites d'épandage où la consommation de ces matières intervient (cultures, friches, unités de transformation...). Plus concrètement par exemple, plutôt que de rechercher l'augmentation du cheptel de l'exploitation en ne compromettant pas l'atteinte des objectifs de gestion des effluents, on peut optimiser des paramètres tels que les surfaces cultivées, la production de compost visée, les capacités de stockage ou de transport, la combinaison de règles de décision, afin de minimiser les rejets illicites ou la charge de travail.

Pour simuler Magma, on doit spécifier un scénario rassemblant des caractéristiques de l'exploitation agricole considérée telles que l'effectif des cheptels, les flux unitaires de production d'effluents, capacités maximales de stockage, surfaces, dose maximale de fertilisation (kg d'azote par épandage), tps de travail journalier disponible pour l'épandage, capacités de transport, ... On effectue ainsi une première simulation, à partir de laquelle on concevra d'autres stratégies. On procède ainsi par optimisation pour améliorer des stratégies de gestion actuelles ou arbitraires et en construire de nouvelles. Magma permet donc de tester, au niveau d'une exploitation agricole, l'impact de différentes stratégies de gestion sur les stocks de Mo, la fertilisation des cultures, les facteurs de risques environnementaux et la charge de travail. L'utilisateur peut étudier un ensemble de stratégies prédéfinies pour les expliquer ou les comparer en prenant pour critères les rejets illicites, la fertilisation des cultures ou le temps de travail.

Un exemple concret de simulations sur exploitation est démontré dans Paillat *et al.* (2003).

3.2.2. La gestion des flux d'effluents entre exploitations distinctes

► Biomass (Guerrin *et al.*, 1998)

Biomass est un modèle basé sur la plate-forme de simulation multi-agents Geamas qui est utilisé pour représenter les échanges de déchets agricoles, les coûts de transports, et les négociations entre agriculteurs à l'échelle d'une localité. L'approche par SMA est apparue la plus appropriée pour les concepteurs sachant que l'objectif principal était de représenter l'interaction entre divers acteurs afin d'organiser l'organisation résultante.

Ce modèle a donc pour but la simulation de flux de matières organiques, d'information, et de valeur circulant entre les exploitations. Le modèle doit permettre d'effectuer des analyses de type « What-if ? » : que se passerait-il si on regroupe tels éleveurs autour d'une même plateforme ?, Si tels éleveurs adoptent telle règle de gestion ?, etc.

Pour cela, on considère une localité composée d'exploitations agricoles comportant à de degrés divers des unités d'élevages (E) et des cultures (C) réalisées sur des parcelles localisées dans l'espace, ces ensembles pouvant être vides dans le cas de mono-activités. Ces exploitations peuvent également comporter des unités individuelles ou collectives de transformation de matières organiques « brutes » (plates-formes de compostage, stations d'épuration, etc....). A noter cependant qu'une unité de transformation peut être vue comme une entité cumulant les deux fonctions de demandeur de Mo (brute) et de fournisseur de Mo (traitee). On considère que dans cette localité, les unités d'élevage suscitent une offre de Mo alors que les cultures génèrent une demande en matière fertilisante. Cet ensemble d'offres et de demandes, valides à un temps donné, constitue le marché qui est le processus central et qui permet permettant le transfert de matières organiques entre de nombreux producteurs et consommateurs, par l'intermédiaire de transporteurs. Lorsque les contraintes d'adéquation sont réunies (disponibilité en qualité et quantité, capacité à transporter les matières, coût), on considère qu'un contrat est passé entre l'offreur et le demandeur au sein de ce marché.

► MagmaS (Le Page, 2003)

MagmaS est un environnement de simulation informatique construit dans le but de tester différents scénarios de gestion des effluents d'élevages au niveau d'un ensemble d'exploitations agricoles à La Réunion. Il vise à simuler la production, la consommation et les transferts de matières organiques (effluents d'élevage) au sein d'un ensemble d'exploitations agricoles. La plate-forme de simulation MagmaS a été implémentée à partir de Cormas et est constituée par le couplage de deux modèles :

- un modèle dynamique hybride : Magma (voir plus haut) qui modélise le fonctionnement intra-exploitation (production, stockage et épandage des matières organiques) ;
- Mens, un modèle Multi Agents dans lequel les agents représentent des exploitations agricoles permettant de décrire les transferts de Mo entre elles.

Dans MagmaS, chacun des agents du modèle Mens est relié à une instance du modèle Magma représentant la même exploitation. Parmi les entités du modèle multi agents, la classe Mensfarming occupe une position centrale. Elle représente à la fois une exploitation agricole et l'exploitant qui la dirige. Cette classe possède un certains nombre d'attributs dont :

- les coordonnées géographiques de l'exploitation ;
- l'état des stocks pour chaque type de Mo ;
- le parcellaire pour chaque type de culture de l'exploitation ;

- la relation avec un autre agriculteur caractérisée par un poids d'accointance, une distance géographique, une quantité transférée pour chaque type de Mo et l'identifiant de l'exploitation avec laquelle la relation existe ;
- un type de comportement.

Pour simuler le modèle, il faut tout d'abord spécifier les caractéristiques des différents Pmo (exploitations productrices de matières organiques) et des Cmo (exploitations consommatrices) : effectifs en animaux, type d'effluents produits, types de cultures, surface. On lance alors la simulation pour une durée déterminée, le pas de temps étant de 24 heures. Lorsqu'une exploitation se trouve en situation d'excédent ou de besoin en matières organiques, il prend l'initiative de formuler une proposition (offre ou demande) à une exploitation connue et qu'il est en mesure de contacter (Ce réseau de connaissance pouvant être paramétré). La réalisation du transfert dépend alors en premier lieu de la compatibilité du type d'effluents et des quantités. A noter que tant que l'exploitant (offreur ou demandeur) n'a pas satisfait ses besoins, il va poursuivre sa recherche et ses contacts.

3.2.3. la gestion collective de l'approvisionnement d'unités de traitement : *Approzut* (Helias et al., 2003)

Approzut s'intéresse aux politiques d'approvisionnement d'une unité collective de traitement d'effluents par un ensemble d'exploitations agricoles sachant que cette unité représente une solution d'élimination des effluents (notamment les déchets liquides comme le lisier de porc). Ce modèle appartient à la catégorie des systèmes hybrides et est dédié à la simulation avec une partie continue représentant les évolutions des stocks des unités de production et de consommation et modélisée par des équations différentielles ordinaires et une partie discrète représentant l'organisation des transports comme contrôleur du système d'approvisionnement, modélisée par un programme linéaire. Les questions posées sont typiques des problèmes de gestion des stocks : qui doit livrer à l'Ut, quand et en quelle quantité?

3.2.4. Effets d'instruments de politique environnementale : le modèle *Echos* (Farolfi et al., 2001)

Le modèle Echos est un système multi agent rapporté à la zone de Grand Ilet dont le but est de simuler les dynamiques aussi bien en termes de pollution (concentration d'azotes) qu'en termes de coûts pour les exploitants suite à l'application de différentes mesures de politique environnementale et des choix de gestion des effluents faits en conséquence. Le modèle SMA a permis de coupler à toute simulation économique la dynamique de l'azote produit, transporté et assimilé par le terrain. Cette caractéristique des SMA est apparue parmi les plus adaptées pour la construction d'outils d'aide à la décision et à la négociation entre acteurs, car les mesures de politiques environnementales sont testées non seulement en termes d'efficience et d'efficacité économique, mais aussi en termes d'efficacité environnemental, mais aussi pour la définition de politiques environnementales au niveau local.

Dans le modèle, 3 groupes d'acteurs sont représentés : les éleveurs de porcs de Grand Ilet, les exploitations de la zone côtière qui produisent de la canne à sucre et l'établissement public qui définit la politique environnementale. On trouve ainsi 6 exploitations de cannes à sucre qui couvre une surface de 100 km² (10 000 ha). Les actions de producteurs de canne sont les suivantes : une fois par, ils épandent sur leur exploitation une quantité d'azote correspondant à la demande annuelle de la canne à sucre qui provient du lisier des éleveurs ou de fertilisant minéral acheté.

Les éleveurs sont représentés par 56 élevages de porcs (regroupés en 3 types selon le ration TNE/SAU). Le parcellaire de ces exploitations y est représenté de manière simplifiée comme une combinaison aléatoire de friches (50 % de la surface, capacité d'absorption de l'azote = 0) et cultures (50 %, capacité d'absorption d'azote de 387,6 kg/an). On considère que chaque éleveur a une capacité de stockage d'effluents qui lui est propre et qui est atteinte tous les 4 mois à peu près. A ce moment l'éleveur vide ses cuves selon différentes stratégies d'épandage:

- 0 : l'éleveur épand son lisier sur son exploitation de façon régulière
- 1 : l'éleveur épand son lisier sur son exploitation en respectant les réglementations puis cherche à épandre chez des éleveurs voisins s'il y a des parcelles libres toujours en respectant les normes. Et si un surplus persiste, il l'épand sur son exploitation.
- 2 : Idem que précédemment sauf qu'il transporte le surplus chez les producteurs de canne de la zone côtière les plus proches de préférence. Si aucun de ces producteurs ne veut de son lisier, il l'épand sur ses cultures.
- 3 : Une redevance pollution est ajoutée tout comme les coûts de gestion des effluents pour les éleveurs et le coût de la fertilisation de la canne pour les agriculteurs. L'éleveur va alors choisir en fonction du choix et du coût de l'année précédente la stratégie 1 ou 2 pour l'année suivante.

Pour simuler la diffusion de la pollution azotée selon la pente du terrain, une méthode a été définie : chaque mois (l'unité de temps étant le mois), 10 % de l'azote présent sur une cellule (1 ha) diffuse vers les cellules en aval à raison de 50 % dans la cellule Est, et 25 % dans les 2 cellules à Nord-est et Sud-est. Des simulations sont alors effectuées en modifiant les paramètres suivants : norme d'épandage, redevance pollution et surface des entreprises cannières.

3.2.5. Comparaison entre plusieurs techniques de traitement du lisier : Macsizut (Farinet, 2003)

Ce modèle concerne essentiellement le traitement du lisier de porc, permet de calculer les bilans de masse des différents éléments contenus dans le lisier, de chiffrer le montant des investissements et d'approcher les coûts de fonctionnement de l'unité de traitement. Il permet également de définir les éléments techniques et économiques nécessaires à la modélisation de la gestion des effluents au niveau de l'exploitation agricole et au niveau collectif (groupement d'exploitations autour d'une unité de traitement).

Macsizut vise deux objectifs :

- l'aide aux choix d'acteurs agricoles individuels ou collectifs (cas de Grand Ilet par exemple : Farinet, 2003) prenant en compte le contexte locale et permettant une évaluation comparative de différents techniques selon les co-produits générés (en quantité et en qualité), les coûts d'investissements et de fonctionnement, et la valorisation possible des co-produits.
- le paramétrage d'autres modèles permettant de simuler des flux de Mo entre unités de production et de consommation afin de tester des alternatives de gestion, au niveau d'une exploitation ou d'un territoire; notons qu'à ce niveau, une unité de traitement peut être vue, à la fois, comme une unité de consommation (de Mo brute, directement issues des élevages) et une unité de production (de Mo transformée en co-produits).

C'est un modèle statique (tableur Microsoft Excel®) qui simule le fonctionnement d'une unité de traitement de lisier de porc selon les critères, cités ci-dessus, de bilans matières et de coûts. Ces éléments ont été repris dans les modèles Biomas et Magma pour représenter les cas d'unités collectives ou individuelles de traitement. De façon générale, malgré son caractère statique, Macsizut a vocation à être utilisée parmi un ensemble de modèles

dynamiques, permettant de simuler les différents aspects de la gestion des effluents d'élevage, au niveau d'une exploitation agricole ou au niveau d'un territoire.

Il a pour premier intérêt de synthétiser et de formaliser de façon objective les références disponibles, avec la possibilité de comparer plusieurs techniques de traitement entre elles dans un contexte donné. La version actuelle ne prend en compte que 8 techniques ou procédés validés et suffisamment renseignés au 15 juillet 2001 :

- imprégnation-compostage, plus simplement dénommé "compostage" ;
- la nitrification-dénitrification biologique en phase liquide simple sans prétraitement du Lisier Brut ni décantation des boues biologiques (Ndn) ;
- la nitrification-dénitrification biologique en phase liquide avec pré-traitement du Lisier Brute par séparation de phases (1er co-produit : refus humide) et décantation du Lisier après Ndn (2ème co-produit : boue) (Ndn-S) ;
- la nitrification-dénitrification biologique en phase liquide avec pré-traitement du Lisier Brute par séparation de phases poussée (un co-produit solide) mais sans-décantation après Ndn ;
- Agrifiltre® : procédé d'épuration des lisiers de porc et des boues biologiques où l'épuration des liquides se fait en trois étapes : 1) élimination des plus grosses MES par passage sur un tamis filtrant. 2) Passage à contre-courant du liquide dans un lit de paille (renouvelé séquentiellement) pour éliminer par filtration/décantation la majeure partie des MES, 3) nitrification-dénitrification afin d'éliminer l'azote présent dans le liquide. (Richard, 2000) ;
- Balcopure® : extraction de l'azote ammoniacal sous forme gazeuse puis concentration par lavage acide dans une solution aqueuse ;
- Ecoliz®: coagulation/floculation puis centrifugation ou filtration mécanique poussée
- un procédé combinant le procédé Ecoliz® à la Ndn intéressant pour le contexte de La Réunion.

Concrètement, ce modèle a été utilisé lors d'une étude sur la région de Grand Ilet, pour calculer les coûts d'investissements et de fonctionnement des stations de traitement, ainsi que les coûts ou recettes des co-produits par traitement. Les résultats sont observables dans Tiratay (2001).

CONCLUSION

L'île de la Réunion possède un secteur agricole sans cesse en mutation où l'élevage, notamment dans les Hauts, est en plein développement mais où les effluents posent un réel problème. Les différents chiffres cités dans ce document, des surfaces en culture en passant par les effectifs en animaux ou encore les quantités d'effluents produits, en sont le premier reflet. Et s'ils sont susceptibles d'être différents actuellement sachant que la plupart d'entre eux datent de 2000 à 2003, ils représentent une photographie de l'île toujours d'actualité, du moins dans ses grands traits. Les réflexions environnementales et l'activité touristique, désireuse de limiter les nuisances causées par les effluents, n'ont fait qu'augmenter ces préoccupations.

On trouve en opposition sur l'île des régions excédentaires et des régions où la fertilisation organique est insuffisante. Tout l'enjeu à la Réunion, concernant la gestion des effluents, est le transfert des effluents provenant des régions excédentaires vers les régions potentiellement importatrices. Mais la topographie de l'île reste cependant le principal frein à la valorisation des matières organiques car en diminuant la facilité du transport, elle en augmente les coûts. Un des objectifs de la recherche à terme est donc de transformer l'effluent brut en un produit qui, bien que conservant toutes ses qualités fertilisantes, faciliterait le transport et éviterait les mauvaises gestions telles que les épandages en surdose ou le débordement des stocks. Car aujourd'hui, les effluents de la Réunion sont vraiment perçus par les éleveurs comme un déchet étant un mal nécessaire à leur activité n'ont pas encore acquis le statut de co-produits de l'élevage, pouvant même représenter une source de revenus supplémentaires. En ce sens, et pour accompagner cette démarche, les modèles de simulation se sont avérés de premier abord des aides primordiales tant pour l'aide à la gestion au niveau de l'exploitation ou à des niveaux collectifs que pour la simulation des impacts imputables aux mauvaises gestions. Le couplage de certains d'entre eux notamment a poussé encore plus loin l'utilité de ces derniers. Cependant, ces modèles ont pour la plupart été référencés par des données résultant d'études menées il y a maintenant plus d'une dizaine d'années pour certaines. Si ces références se sont révélées suffisantes dans une première approche afin de comprendre les pratiques agricoles dans le contexte réunionnais, de nouvelles études sur les zones déjà enquêtées mais aussi dans des nouvelles zones, notamment plus ciblées sur les Hauts de l'île permettraient d'améliorer ces modèles et de les réactualiser.

Actuellement, de nombreuses expérimentations sont en cours sur les possibilités et la faisabilité des différents traitements. S'il semble que les résultats n'aient pas encore été publiés, il n'y a aucun doute que ceux-ci seront une base nécessaire à la mise en place de solutions crédibles et spécifiques au contexte réunionnais qui permettraient d'assurer la viabilité de l'élevage réunionnais face à son environnement et qui contribuerait positivement à l'économie locale.

BIBLIOGRAPHIE

- AGRESTE**, 2007. *Réunion : Mémento régional* [On line]. [07/03/2007]
<URL : <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/D97406C01.pdf>>
- AUBRY C., PAILLAT J.-M., GUERRIN F.**, 2001. *Modélisation conceptuelle de la gestion des effluents d'élevages à la Réunion*. Rapport Cirad-Tera n°16/01. 58 p.
- CHABALIER P.-F., FARINET J.-L., PAILLAT J.-M.**, 1999. *Gestion, traitement et valorisation agricole des effluents d'élevage à La Réunion*. in : Gestion agrobiologique des sols et des systèmes de culture. Actes de l'atelier international, Antsirabe, Madagascar, 23-28 Mars 1998, Anae, Cirad, Fafiala, Fifamanor, Fofifa, Tafa. Montpellier, France, Cirad, collection Colloques, 658 p.
- CHAMBRE D'AGRICULTURE DE LA REUNION**, 2007. *L'agriculture réunionnaise. Chiffres clés* [On line]. [01/03/2007].
<URL : [http://www.reunion.chambagri.fr/-Chiffres-cles->](http://www.reunion.chambagri.fr/-Chiffres-cles-)
- FARINET J.-L., HURVOIS Y., PAILLAT J.-M.**, 2003. *Macszut : un modèle d'aide au choix des techniques de traitement des lisiers de porc*. in : F. Guerrin, J.-M. Paillat (éditeurs scientifiques), 2003. Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité - cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de La Réunion. Restitution des travaux de l'Atp 99/60. Actes du séminaire des 19 - 20 juin 2002, Montpellier, France, Cirad, Colloques, Cédérom.
- FAROLFI S., LE PAGE C., TIDBALL M., BOMMEL P.**, 2001. *Gestion d'effluents d'élevage à l'île de La Réunion - Analyse du comportement économique des acteurs selon une approche standard et par un système multi-agents*. Communication au Séminaire de recherche "Préservation et valorisation de l'eau dans le domaine littoral", Saint-Denis de la Réunion, 15 juin 2001. 24 p.
- GUERRIN F., COURDIER R., CALDERONI S., PAILLAT J.-M., SOULIE J.-C., VALLY J.-D.**, 1998. *Conception d'un modèle multi-agents pour la gestion des effluents d'élevage à l'échelle d'une localité rurale* [On line]. Actes des JFIADSMA'98, Pont-les-moussons, Hermès, Novembre 1998.
<URL : www2.univ-reunion.fr/~courdier/pdfs/nat_jfiad-1998_GC98a.pdf>
- GUERRIN F.**, 2001. *Magma : A model to help manage animal wastes at the farm level*. Computers and Electronics in Agriculture, 33 (1). pp 33-54.
- GUERRIN F.**, 2003. *Magma : modèle d'aide à la gestion des matières organiques au niveau de l'exploitation agricole – Description du modèle de base*. in : Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité - cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de La Réunion. Restitution des travaux de l'Atp 99/60. Actes du séminaire des 19 - 20 juin 2002, Montpellier, France, Cirad, Colloques, Cédérom.
- GUERRIN F., PAILLAT J.-M.**, 2003. *Modelling biomass fluxes and fertility transfers : Animal wastes management in Reunion Island*. in : Modsim 2003, International Congress on Modelling and Simulation, Integrative Modelling of Biophysical, Social and Economic Systems for Resource Management Solutions, Townsville, Australia, 14-17 July 2003. 6 p.
- HELIAS A., GUERRIN F., LOPEZ P., STEYER J.-P.**, 2003. *Simulation de l'approvisionnement d'une unité de traitement de lisier de porc par plusieurs unités de production - Modélisation par équations différentielles ordinaire et programmation linéaire*. in

: F. Guerrin, J.-M. Paillat (éditeurs scientifiques), 2003. Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité - cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de La Réunion. Restitution des travaux de l'Atp 99/60. Actes du séminaire des 19 - 20 juin 2002, Montpellier, France, Cirad, Colloques, Cédérom.

LE PAGE C., MARTIN M., 2003. *MagmaS : Plate-forme de simulation couplant les niveaux individuel et collectif de gestion des effluents d'élevage*. in : Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité - cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de La Réunion. Restitution des travaux de l'Atp 99/60. Actes du séminaire des 19 - 20 juin 2002, Montpellier, France, Cirad, Colloques, Cédérom.

MVAD, 2007. *Guide de la fertilisation organique* [On line]. [12/03/2007].
<URL : <http://www.mvad-réunion.org/-Guide-de-la-Fertilisation>>

PAILLAT J.-M., 1998. *Gestion des effluents d'élevage à La Réunion : transformer la nuisance en fertilité*. Programme de recherche CORDET 94 DA 51, Rapport final. 64 p.

PAILLAT J.-M., AUBRY C., MEDOC J.-M., 2003; *Une typologie des systèmes de gestion des effluents d'élevage dans les exploitations de l'île de La Réunion*. in : Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité - cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de La Réunion. Restitution des travaux de l'Atp 99/60. Actes du séminaire des 19 - 20 juin 2002, Montpellier, France, Cirad, Colloques, Cédérom.

PAILLAT J.-M., GUERRIN F., MEDOC J.-M., AUBRY C., 2003. *Simulation de stratégies de gestion de matières organiques avec le Modèle Magma : Application au cas d'une exploitation type*. in : Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité - cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de La Réunion. Restitution des travaux de l'Atp 99/60. Actes du séminaire des 19 - 20 juin 2002, Montpellier, France, Cirad, Colloques, Cédérom.

PRECHEUR H., 1999. *Gestion des effluents dans les élevages du sud de la Réunion - Construction d'un modèle d'action*. Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme d'Agronomie Approfondie Sciences et Techniques des Productions Végétales option Agronomie. ENSA de Rennes. 78 p.

RAIMBAULT T., 2005. *Adéquation actuelle entre l'offre en effluents d'élevage et les besoins des cultures sur le territoire Petit-Grand Tampon à la Réunion*. Rapport de stage de fin d'étude en vue de l'obtention du Master Professionnel Sciences et Productions Végétales option Agronomie année 2004/2005. Université de Rennes I, Cirad La Réunion, France. 44 p.

RAKOTOMALALA L., 1999. *Etude de la gestion de la matière organique en productions végétales dans le sud de l'île de La Réunion - Analyse des pratiques et constitution d'un modèle d'action*. Mémoire de stage DESS Gestion des systèmes agro sylvo pastoraux en zones tropicales. Université Paris XII. Val de Marne. Faculté des Sciences. 60 p.

RENAULT D., PAILLAT J.M., 1999. *Analyse de la production et de l'utilisation des effluents porcins à Grand Ilet, localité de l'île de La Réunion (cirque de Salazie)*. CIRAD-TERA, Programme Espaces et Ressources.

REYNAUD S., 1995. *Diagnostic des pratiques agricoles pour une meilleure compréhension des transferts d'effluents d'élevage*. Mémoire de Dea Ina-Pg. 58 p.

RICHARD S., 2000. *Adaptation du procédé AGRIFILTRE à la paille de canna à sucre*. Rapport de stage élève ingénieur 3ème année, Ecole des métiers de l'Environnement, Bruz, France. 48 p.

RUIZ L., 2003. *Valorisation agronomique des effluents et évaluation du risque environnemental. Propositions pour l'utilisation du modèle Stics*. in : Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité - cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de La Réunion. Restitution des travaux de l'Atp 99/60. Actes du séminaire des 19 - 20 juin 2002, Montpellier, France, Cirad, Colloques, Cédérom.

SAINT MACARY H., MEDOC J.-M., CHABALIER P.-F., 2003. *Systèmes de culture de la Réunion. Typologie, spatialisation et éléments pour un référentiel*. in : Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité - cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de La Réunion. Restitution des travaux de l'Atp 99/60. Actes du séminaire des 19 - 20 juin 2002, Montpellier, France, Cirad, Colloques, Cédérom.

TIRATAY M., 2001. *Evaluation des coûts de gestion collective des effluents d'élevage à La Réunion - Le cas de Grand Ilet*. URCOOPA, Saint-Paul, Réunion, France. 89 p.