Modélisation conceptuelle de la gestion des effluents d'élevage à la Réunion

C. Aubry[1], *J.-M. Paillat*[2], *F. Guerrin*[3]

Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

Délégation de la Réunion

CIRAD B.P. 20
97408
Saint-Denis
Messag
Cedex 9
téléphone :
(0262) 52.80.00
télécopie :
(0262) 52.80.01

Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

Délégation de la Réunion

Modélisation conceptuelle de la gestion des effluents d'élevage à la Réunion

C. Aubry[1], *J.-M. Paillat*[2], *F. Guerrin*[3]

Cirad – Pôle Agriculture durable, environnement et forêt
Equipe Gestion des déchets organiques
Station de la Bretagne
BP 20 – 97408 Saint-Denis Cedex 09 (La Réunion)

Avril 2001 — Rapport Cirad-Tera n° 16/01

CIRAD B.P. 20
97408
Saint-Denis
Messag
Cedex 9
téléphone :
(0262) 52.80.00
télécopie :
(0262) 52.80.01

[1]Inra-Sad, en poste à l'IRD, Antananarivo (Madagascar) <aubry@gerem.ird.mg>.
[2]Cirad-Tera/Ere, en poste à l'Inra, UMR SAS, Rennes <paillat@roazhon.inra.fr>.
[3]Inra-BIA, en poste au Cirad-Tera, équipe Gdor <guerrin@cirad.fr>.

SOMMAIRE

SOMMAIRE **3**

I. PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODOLOGIE **5**

I.1. LES MODÈLES D'ACTION DES AGRICULTEURS : BASES THÉORIQUES 6
I.1.1. Des emprunts aux théories de la décision et aux sciences de gestion *6*
I.1.2. Une extrapolation aux domaines techniques en agriculture *6*
I.2. CONSTRUCTION DES MODÈLES DE GESTION DES EFFLUENTS D'ÉLEVAGE À LA RÉUNION 8
I.2.1. Objectifs et méthodes *8*
I.2.2. Une structure modulaire du modèle de gestion des effluents *8*

II. MODULE « PRODUCTION » **10**

II.1. PRODUCTION JOURNALIÈRE D'EFFLUENTS PAR ANIMAL 10
II.1.1. Les types d'élevage *10*
II.1.2. Les types de sol des bâtiments *10*
II.2. PRODUCTION JOURNALIÈRE D'EFFLUENTS PAR LE TROUPEAU 12
II.3. QUALIFICATION DE L'EFFLUENT : PRODUCTION D'AZOTE 13
II.4. PRODUCTION D'EFFLUENT ET DILUTION PAR LES EAUX DE LAVAGE ET LA PLUIE 13

III. MODULE « EVACUATION-STOCKAGE » **15**

III.1. EVACUATION ET STOCKAGE 15
III.1.1. Cas des effluents liquides ou semi-liquides (pâteux) *15*
III.1.2. Cas des effluents solides *16*
III.2. VIDANGE DES UNITÉS DE STOCKAGE DES EFFLUENTS 17
III.3. REPRESENTATION SCHÉMATIQUE 18

IV. MODULE « EPANDAGE » **19**

IV.1. ATTRIBUTION DES EFFLUENTS AUX CULTURES 19
IV.1.1. Structuration des variables et règles d'attribution des effluents aux cultures *19*
IV.1.2. Les catégories de cultures *20*
IV.1.3. Les règles d'attribution des effluents aux cultures *21*
IV.1.4. Les règles d'arbitrage entre couples (Effluent, Culture) *22*
IV.2. SURFACES D'ÉPANDAGE 22
IV.2.1. Aspects généraux *22*
IV.2.2. Des surfaces déclarées des cultures aux surfaces épandables *23*
IV.3. POSITIONNEMENT TEMPOREL DES ÉPANDAGES 24
IV.3.1. Constats *24*
IV.3.2. Tentative de formalisation *24*
IV.3.3. Valeurs par défaut *25*
IV.3.4. De la planification à la réalisation : règles de faisabilité liées au climat *26*
IV.4. MODALITÉS DE CHANTIER D'ÉPANDAGE 26
IV.4.1. Les effluents liquides *26*
IV.4.2. Les effluents Solides *27*
IV.5. MODALITÉS DE DOSES D'APPORT 27
IV.5.1. Constats *27*
IV.5.2. Tentative de formalisation *27*
IV.6. PILOTAGE PAR LES STOCKS 29
IV.6.1. La gestion des situations d'urgence *29*
IV.6.2. La gestion anticipée pour éviter les situations d'urgence *29*

V. MODULE « TRANSFORMATION » **30**

V.1. DÉCLENCHEMENT ET DURÉE DES OPÉRATIONS 30
V.2. ATTRIBUTION DES DOSES : QUANTITÉS D'EFFLUENT « ÉPANDUES » SUR LA PLATE-FORME 31
V.3. PLATE-FORME DE TRANSFORMATION ET MATÉRIEL 32

VI. MODULE « IMPORT-EXPORT » **34**

VI.1. ARTICULATION AVEC LES MODULES DE PRODUCTION ET D'UTILISATION D'EFFLUENTS 34
VI.2. TRANSFERTS DE MATIÈRES ORGANIQUES ENTRE EXPLOITATIONS 35

VI.2.1. Mise en relation *35*
VI.2.2. Faisabilité du transfert *37*
VI.2.3. Conditions de réalisation du transfert *37*

VII. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES 43

BIBLIOGRAPHIE SPÉCIFIQUE SUR LES MODÈLES D'ACTION 44

BIBLIOGRAPHIE COMPLÉMENTAIRE 45

ANNEXE 1 : GUIDE D'ENQUÊTE SUR L'UTILISATION D'EFFLUENTS D'ÉLEVAGE 47

I. DONNÉES STRUCTURELLES SUR L'EXPLOITATION 47
II. PARCELLAIRE, GESTION DES PÂTURES, FOURRAGES ET CULTURES 49
III. RÈGLES DE FERTILISATION PAR CULTURE 49
IV. ORGANISATION DU TRAVAIL SUR L'EXPLOITATION 50
V. PRODUCTION D'EFFLUENTS 51

ANNEXE 2 : STRUCTURE ET INFORMATIONS DE LA BASE DE DONNÉES D'EXPLOITATIONS SOUS ACCESS® - BDEX 53

ANNEXE 3 : VARIABLES CONCERNANT L'APPROVISIONNEMENT EN LITIÈRE DES ÉLEVAGES 54

ANNEXE 4 : CALCUL DES COÛTS DE GESTION DES EFFLUENTS 55

ANNEXE 5 : TYPOLOGIE DES EXPLOITATIONS POUR LA GESTION DES EFFLUENTS D'ELEVAGE 58

I. PROBLEMATIQUE ET METHODOLOGIE

La résorption des déchets organiques par l'agriculture est devenue un enjeu important. Le développement de l'élevage intensif est conditionné par la capacité de traitement des déchets ou par leur valorisation comme fertilisants des cultures. Les problèmes de pollution organique et minérale font donc l'objet de nombreuses recherches, qui visent à trouver des solutions adaptées pour la gestion de ces déchets. Par contre, les problèmes de diminution de fertilité des sols, qui pourraient être résolus par des transferts de matière organique, sont peu étudiés en milieu tempéré du fait de la disponibilité en intrants (engrais chimiques).

A la Réunion, les effluents d'élevage représentent plus des ¾ de l'azote des déchets organiques (MVAD, 1997). Le développement des élevages depuis une dizaine d'années a conduit à une concentration importante d'effluents dans certaines localités, avec les risques de pollution qui en découlent, du fait de l'exiguïté des surfaces épandables. Par ailleurs, les cultures en zone tropicale (productions maraîchères sur andosols) ont besoin d'un apport important de matière organique pour maintenir la fertilité des sols soumis à une forte érosion. Le déséquilibre entre régions s'accroît ; certaines sont productrices de biomasse carbonée (canne à sucre dans les Bas), d'autres, dans les Hauts, produisent des effluents d'élevage chargés en azote, à partir d'une alimentation en grande partie importée.

Pour valoriser les excédents de déchets, différentes stratégies de gestion doivent être conçues, et leurs modalités de mise en œuvre par les acteurs concernés (agriculteurs, organismes professionnels et de développement, collectivités territoriales et services de l'Etat) doivent être précisées. Pour cela, il faut trouver des solutions permettant d'adapter l'« offre » de matières organiques (MO) des élevages à la « demande » des cultures à deux niveaux de gestion : (i) au sein de l'exploitation (niveau individuel), (ii) entre exploitations (niveau collectif). C'est précisément la justification de l'Action thématique programmée « Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité » conduite par une équipe pluridisciplinaire, depuis 1999 à La Réunion (Paillat et Guerrin, 1998).

La modélisation constitue un outil de représentation et d'analyse des pratiques de gestion des MO, permettant de simuler différents scénarios d'organisation. Au niveau de l'exploitation, les simulations doivent permettre de tester des stratégies pour améliorer l'organisation globale des travaux, les pratiques de stockage, de traitement ou d'épandage. Au niveau collectif, elle peut être utilisée pour représenter les transferts de matières, les coûts de transfert, et les négociations entre agriculteurs. L'intérêt agronomique et les risques environnementaux doivent également être analysés à ces deux niveaux de gestion. Avec ces objectifs, plusieurs modèles sont en cours de construction depuis 2 ans : *Magma*[4] (Guerrin, 2000a ; Guerrin, 2000b), au niveau individuel de gestion, *Biomas*[5] (Guerrin *et al.*, 1999) et *MagmaS*[6] (Piquet et Le Page, 2001) au niveau collectif des transferts de MO, *Mobe*$_5$[7] (Tommasino, 1999) pour l'évaluation agronomique et environnementale.

Dans une perspective d'aide à la décision, la modélisation « instrumentale » en cours, suppose d'avoir analysé et formalisé au préalable les modes de gestion technique des agriculteurs. Un modèle conceptuel explicitant les variables sur lesquelles portent les décisions des acteurs, les règles qui guident leurs actions, les échelles spatiales et temporelles auxquelles ils conçoivent ces règles, et les indicateurs de pilotage technique qu'ils utilisent a été construit. Il s'agit donc d'un « modèle d'action » au sens de Sébillotte et Soler (1990). Celui-ci est structuré en plusieurs modules qui décrivent surtout la gestion individuelle des MO mais aussi, en partie, leur gestion collective. Ce modèle d'action doit permettre de compléter le développement des modèles de simulation : *Magma*, pour ce qui concerne les aspects individuels, et *MagmaS*, pour les aspects collectifs.

Ce rapport présente donc cette formalisation conceptuelle, élaborée à partir d'enquêtes menées dans différentes régions de l'île de la Réunion. Après avoir rappelé les bases scientifiques sur lesquelles s'appuie ce travail de recherche, notamment pour la construction de modèles d'action, nous exposerons la méthodologie utilisée pour représenter la gestion de la MO par les agriculteurs réunionnais au niveau des exploitations et des transferts entre exploitations. Le corps principal du rapport est constitué par la description des différents modules de gestion articulés entre eux et contenant la formalisation des actions sous forme de variables et de règles de décision.

---

[4] Modèle d'aide à la gestion de la matière organique au niveau de l'exploitation agricole.
[5] Modèle de gestion de la biomasse agricole par système multi-agents.
[6] Modèle d'aide à la gestion des matières organiques d'origine agricole spatialisée.
[7] Modèles biophysiques pour l'évaluation de l'impact environnemental de l'épandage d'effluents d'élevage.

I.1. LES MODELES D'ACTION DES AGRICULTEURS : BASES THEORIQUES

Pour pouvoir agir de façon efficace sur des comportements techniques d'agriculteurs, encore faut-il comprendre comment ceux-ci construisent ces comportements et comment ils les traduisent en actes techniques. C'est cette préoccupation, à la fois heuristique et opérationnelle, qui a amené un courant de recherches en agronomie, dans les années 1970, à analyser les pratiques agricoles et à théoriser les prises de décision des agriculteurs (Osty, 1978 ; Tessier, 1979 ; Milleville, 1987 ; Gras *et al.*, 1989).

Une première étape définit le concept de fonctionnement de l'exploitation agricole comme l'enchaînement des prises de décisions dans un ensemble de contraintes et d'atouts, en vue d'atteindre un ou plusieurs objectifs définis par l'agriculteur et sa famille qui gouvernent les processus de production présents dans l'exploitation (Sébillotte, 1979). L'un des intérêts majeurs de ce concept sera sa large utilisation à l'échelle régionale pour organiser en typologies la diversité des fonctionnements des exploitations et, ainsi, mieux comprendre la diversité des pratiques agricoles et des réactions des agriculteurs face à une innovation technique (Capillon et Sébillotte, 1980 ; Capillon et Manichon, 1988 ; Capillon, 1993). Cependant, on constate qu'il subsiste, au sein d'un type de fonctionnement donné, une variabilité de pratiques qui suggère qu'un même système de contraintes et d'atouts peut être géré différemment par les agriculteurs ; *a contrario,* la variabilité interannuelle des pratiques, pour une même production dans une exploitation donnée, laisse entrevoir une certaine stabilité et une logique sous-jacentes, qui renvoient à une analyse plus poussée des modes de raisonnement et des processus décisionnels des agriculteurs.

I.1.1. Des emprunts aux théories de la décision et aux sciences de gestion

C'est par des emprunts aux sciences de la décision et de la gestion, surtout développées dans les domaines industriels, que les agronomes vont progressivement mieux comprendre et représenter les prises de décision des agriculteurs. En particulier, les notions de rationalité limitée et de « solution satisfaisante » développées par des économistes (Cyert et March, 1963 ; Simon, 1957)[8], et les notions d'apprentissage développées par les psychologues et les cogniticiens (Piaget, cité par Hoc, 1987), ont été importantes pour mieux comprendre les processus décisionnels des agriculteurs (Papy, 1994 ; Cerf, 1994). De même, les concepts et outils de la gestion (Girin, 1990 ; Roy, 1992 ; Hatchuel et Sardas, 1992) ou de la gestion de production (Bouquin, 1991 ; Giard, 1988) permettent de mieux représenter les décisions des agriculteurs. On emprunte notamment à ces disciplines et courants de recherche :

(i) l'idée qu'un acteur devant gérer une production élabore des plans prévisionnels d'action, découpant le temps en fonction des tâches à accomplir pour obtenir cette production et déterminant les moments et modalités de contrôle du processus (Bouquin, 1991) ;

(ii) que, dans une entreprise, il existe des centres de décision hiérarchisés en fonction du terme sur lequel elles portent : on distingue couramment des décisions stratégiques, de long terme, portant sur la nature des productions, sur les stratégies d'équipement, commerciales, financières, etc., des décisions tactiques, portant sur le cycle de production, et des décisions opérationnelles portant sur la conduite en temps réel du processus de production ;

(iii) qu'on peut représenter comme dans l'industrie les décisions de production sous un double aspect : la planification et le pilotage (Besson et Bouquin, 1991).

Ces dernières notions sont particulièrement importantes pour nous. Par *planification*, on entend la conception anticipée des décisions sous forme de plans d'action : dans l'industrie, ce sont classiquement les décisions portant sur les gammes de fabrication, la définition des enchaînements entre ateliers, la fonction de lancement. Par *pilotage*, on entend la conduite en temps réel du processus de production, dans le cadre du plan d'actions planifiées : il peut s'agir d'une simple adaptation du plan au contexte précis rencontré (avec des indicateurs pour identifier la situation et la rapprocher d'une catégorie connue) ou d'adaptations plus innovantes lorsqu'une situation originale est rencontrée, mais en tentant de rester le plus possible dans le cadre du plan d'action préexistant.

Dans l'industrie, planification et pilotage relèvent le plus souvent de centres de décision distincts et hiérarchisés et passent par l'existence de règles écrites, de procédures formelles de fabrication, de plans explicites de production émis par l'encadrement (qui conçoit) en direction des ateliers d'exécution (qui mettent en œuvre), un problème de gestion important étant les formes de coordination entre ces centres (de Terssac, 1993).

I.1.2. Une extrapolation aux domaines techniques en agriculture

Dans l'exploitation agricole, planification et pilotage sont des fonctions généralement concentrées chez le même individu, l'agriculteur, du fait qu'il est le plus souvent seul (ou avec un très petit nombre de collabora-

[8] Exprimant qu'un acteur doit se construire une représentation simplifiée de la réalité complexe pour agir, et qu'il ne cherche pas une solution optimale aux problèmes qu'il rencontre, mais une solution qui lui paraît satisfaisante compte tenu de sa vision des contraintes et de ses objectifs.

teurs) pour gérer l'exploitation. Néanmoins, elles sont importantes à distinguer conceptuellement, car la planification est en quelque sorte le « moteur » des pratiques que l'on peut observer. Cependant, elle n'est pas facile d'accès : en effet, elle reste très implicite, puisque l'agriculteur n'a pas ou peu à transmettre des règles à d'autres, et que, de plus, il est rarement interrogé par l'extérieur sur ses formes de raisonnement. Il s'agit, selon l'expression de Jacobsen (1994), d'une *« unspoken knowledge (..) rarely put down on the paper »*. Par rapport à la gestion de production industrielle, la gestion de production dans l'exploitation agricole présente d'ailleurs certaines spécificités (Aubry, 2000). Alors que, dans l'industrie, la gestion de la production procède pour beaucoup d'une division technique et sociale du travail, en agriculture, elle procède plutôt d'une division temporelle et spatiale des tâches.

Dans l'industrie, on a :

- des centres de décisions *individualisés* et *hiérarchisés*,
- une planification *explicite* de la production (règles de fabrication, procédures..),
- des problèmes majeurs de *coordination* entre acteurs hiérarchisés.

En comparaison, les principales spécificités de l'activité de production agricole sont :

- un *seul* décideur, planifiant et pilotant à la fois,
- d'où le caractère *implicite* de ses décisions,
- des processus de production *longs* et soumis à *aléas*.

Cependant, comme tout décideur, l'agriculteur développe des activités de planification pour agir et pilote ses processus de production. L'étude des décisions portant sur la gestion de divers systèmes techniques montre, en effet, que l'agriculteur organise ses décisions selon des plans préalables, qu'il anticipe en se donnant *ex-ante* des règles d'ajustement, qu'il cherche dans l'action à se rapprocher d'une procédure d'analyse et de choix connue dont il a fixé auparavant les grandes lignes (Papy, 1994 ; Cerf, 1994 ; Aubry, 1995).

La notion de modèle d'action de l'agriculteur est la représentation qu'un observateur extérieur peut donner de ce fonctionnement décisionnel, c'est à dire de l'organisation anticipée des décisions et des modes prévus de pilotage. C'est un cadre conceptuel de représentation des décisions de l'agriculteur, au moins des décisions techniques qui présentent un caractère récurrent permettant un processus d'apprentissage et la constitution de procédures de routine. Une définition générique du modèle d'action de l'agriculteur (Sébillotte, 1990 ; Sébillotte et Soler, 1988 ; Duru *et al.*, 1988 ; Papy, 1994) a pu être ainsi élaborée.

Un modèle d'action comprend :

(i) un ou plusieurs *objectifs généraux* qui définissent le terme vers lequel convergent les décisions de l'agriculteur ;

(ii) un *programme prévisionnel* d'actions et des états-objectifs intermédiaires, qui définissent des points de passage obligés et des moments où l'agriculteur pourra faire des bilans en vue de « mesurer » où il en est de la réalisation de ses objectifs ; pour ce faire, il fixe des *indicateurs* qui servent aux décisions ;

(iii) un corps de *règles de décision* qui définit, pour chaque étape du programme, la nature des décisions à prendre pour parvenir au déroulement souhaité des opérations ; se trouvent aussi définies la nature des solutions de rechange à mettre en œuvre pour des événements perturbateurs perçus comme possibles.

Concrètement, lorsqu'on cherche à représenter des modèles d'action pour des décisions d'un type donné, il s'agit d'identifier les objectifs poursuivis, les éléments sur lesquels l'agriculteur doit décider (qu'on appelle alors variables décisionnelles) et les règles de décision. On montre qu'on peut formaliser et catégoriser ces variables et ces règles de décision (Aubry *et al.*, 1998a, 1998b). On identifie aussi les unités de gestion qui concernent l'agriculteur et on montre ainsi que les modèles d'action se traduisent notamment par le découpage du temps en périodes et de l'espace en blocs. Cette démarche de modélisation des décisions a déjà porté sur de nombreux volets des décisions techniques dans l'exploitation agricole : conduite d'ateliers productifs en culture ou élevage (Aubry, 1995 ; Aubry *et al.*, 1996), gestion de ressources productives comme le travail, les équipements ou l'eau d'irrigation (Papy *et al.*, 1988 ; Attonaty *et al.*, 1993 ; Chatelin *et al.*, 1993 ; Le Gal, 1995), les décisions d'assolement (Maxime *et al.*, 1995 ; Aubry *et al.*, 1998b).

L'objectif de ces recherches sur les modes de décision et de gestion des agriculteurs est de produire des modèles « conceptuels » des décisions techniques pour la compréhension et pour l'action. Ces modèles peuvent alors servir de base à une représentation informatique permettant de simuler de nouveaux comportements, d'étudier l'effet de telle ou telle variable sur la décision et ses résultats techniques, etc. Ces préoccupations s'inscrivent dans les courants actuels de recherche en gestion, où la modélisation est définie comme *« une démarche visant à identifier des problèmes de décision, à les représenter pour en favoriser la résolution »* (Thépot, 1995).

Dans le domaine de la gestion des effluents d'élevage à La Réunion, nous nous sommes efforcés d'adapter ces notions. Nous avons cherché, en effet, à travers l'analyse des décisions de nombreux agriculteurs, à construire une représentation la plus générique possible de leur gestion sous forme de modèles conceptuels articulant des variables et des règles de décision.

I.2. CONSTRUCTION DES MODELES DE GESTION DES EFFLUENTS D'ELEVAGE A LA REUNION

Munis des outils théoriques exposés ci-dessus, nous allons chercher à modéliser la gestion des effluents d'élevage dans les exploitations à La Réunion. Après avoir précisé ce dont il s'agit, nous exposerons les données utilisées et la structure modulaire du modèle de gestion obtenu.

I.2.1. Objectifs et méthodes

Quoi et Pourquoi ?

Nous appelons *gestion des effluents d'élevage dans les exploitations* les façons d'obtenir, de conserver, de transformer, d'utiliser, et de redistribuer le cas échéant, dans le temps et l'espace, des matières organiques issues d'élevages. Pour cette gestion, l'exploitation est un système ouvert : elle peut recevoir et céder des effluents, recevoir ou céder des surfaces d'épandages, etc.

L'objectif de la modélisation conceptuelle que nous tentons ici est double :

(i) il s'agit de structurer les décisions de gestion des effluents sous forme de variables et de règles pour représenter d'une façon commune la diversité des modes de gestion des agriculteurs, guider de nouvelles enquêtes dans d'autres exploitations et, surtout, servir de base à la construction de modèles informatiques (tels que *Magma* ou *MagmaS*) permettant de simuler différentes pratiques de gestion ;

(ii) il s'agit de constituer, à partir des enquêtes, un référentiel de valeurs et de règles « expertes », pouvant servir à remplacer des données manquantes pour les simulations.

Comment ?

Pour construire ces modèles et base de données, nous avons utilisé 4 sources d'informations, d'objectifs et de précisions variés.

Des enquêtes spécifiques pour élaborer des modèles d'action ont été menées dans le cadre de deux mémoires de DAA[9] (Prêcheur, 1999 ; Rakotomalala, 1999). Elles ont porté sur 19 exploitations choisies pour représenter une large gamme de systèmes de production, chez des PMO[10], des CMO[11] et des mixtes PMO/CMO. Ces enquêtes ont cependant été concentrées géographiquement dans le Sud de l'île (Les Lianes, Plaine des Grègues et Est de Petite-Ile). Le guide d'enquête utilisé est donné en Annexe 1.

Des enquêtes préalables, réalisées dans diverses régions de l'île pour des objectifs variés, mais toujours en rapport avec la gestion des effluents d'élevage, ont aussi été utilisées en complément des précédentes. L'ensemble de ces données (au total environ 200 exploitations enquêtées dans toute l'île) a permis la constitution d'une base de données d'exploitations (*BDEX*), dont la structure et la construction sont résumées Annexe 2.

En parallèle aux enquêtes spécifiques portant sur les modèles d'action, un travail complémentaire a porté sur les réseaux de transferts d'effluents entre exploitations dans le Sud de l'île (Carut et Paillat, 2001). Ce travail a permis tout spécialement de construire le module « Import-Export » du Modèle de gestion des effluents d'élevage.

Enfin, une tentative de validation du logiciel *Magma* et de son utilisation en aide à la décision a été menée dans le cadre d'un autre mémoire de DAA (Viard, 2000) : du point de vue des modèles d'action, ce travail a été très utile pour compléter certaines variables et mieux expliciter des règles de gestion ; ces conclusions sont valables dans un petit nombre de cas mais très précisément connus (quelques exploitations de la *BDEX*, deux agriculteurs).

I.2.2. Une structure modulaire du modèle de gestion des effluents

On a abouti, d'après les enquêtes, à structurer le modèle générique de gestion des effluents en 5 modules. Ces modules représentent des unités de gestion relativement autonomes mais qui peuvent s'interconnecter via certaines variables. Comme dans d'autres modèles décrivant des processus de décision technique, on s'efforce de structurer chacun de ces modules autour de variables et de règles de gestion pour lesquelles on donne un formalisme le plus générique possible.

Parmi les variables, on distingue les variables structurelles et les variables de gestion proprement dites :

- Les *variables structurelles* sont les éléments du système de production qui relèvent de décisions stratégiques de l'agriculteur, en amont et plus ou moins indépendamment de la gestion des effluents : nature et taille des élevages, bâtiments, équipements, nature des cultures et taille des soles, niveaux de main d'œuvre, etc.
- Les *variables de gestion* décrivent la manipulation et l'utilisation des effluents produits sur l'exploitation ou importés de l'extérieur. Ce sont surtout ces variables de gestion que nous avons tenté d'identifier et de formuler.

---

[9] Diplôme d'agronomie approfondie.

[10] Fonction de production de matière organique.

[11] Fonction de consommation de matière organique.

Pour schématiser la gestion de la matière organique au sein de l'exploitation (Figure 1), on considère 3 entités : la production de MO (PMO), la consommation de MO (CMO) et les transferts de MO (TMO). Dans la production de MO on trouve :

(i) un module « Production » qui ne comprend pas de règles de décision, mais qui permet de générer des effluents (quantité, qualité) à partir des variables structurelles « troupeau » et « bâtiments » ;

(ii) un module « Evacuation-stockage » qui permet de gérer avec des règles cette production d'effluents.

Dans la consommation, on trouve le module « Epandage » sur les cultures et le module « Transformation », qui peut être considéré comme un cas particulier de l'épandage. Au même titre que le module « Production », le module « Transformation » ne comprend pas ou peu de règles de décisions. Ce module permet de transformer les MO qui seront gérées au niveau du module « Evacuation-stockage ».

Les transferts de MO se réalisent au niveau du module « Import-export » correspondant à l'interface entre l'exploitation et l'extérieur. Ce module est constitué :

(i) d'un sous-module, interne à chaque exploitation, qui permet de calculer les offres et les demandes de MO grâce aux informations données par les modules « Epandage » et « Evacuation-stockage » et qui ne comprend pas de règles de décision,

(ii) d'un sous-module mettant en jeu deux exploitations et permettant de réaliser les transferts de MO grâce à des règles de décisions.

Nous allons donc décrire dans les chapitres qui suivent les différents modules de ce modèle conceptuel de gestion des effluents d'élevage à la Réunion :

- « Production » (chapitre II),
- « Evacuation-Stockage » (chapitre III),
- « Epandage » (chapitre IV),
- « Transformation » (chapitre V),
- « Import-Export » (chapitre VI).

On indiquera, pour chaque module, ses variables structurelles, ses variables de gestion et les règles de décision correspondantes. Chaque fois que cela est possible du fait des renseignements obtenus dans les enquêtes ou du fait de connaissances d'expert préexistantes, nous donnerons également leurs valeurs et contenus par défaut.

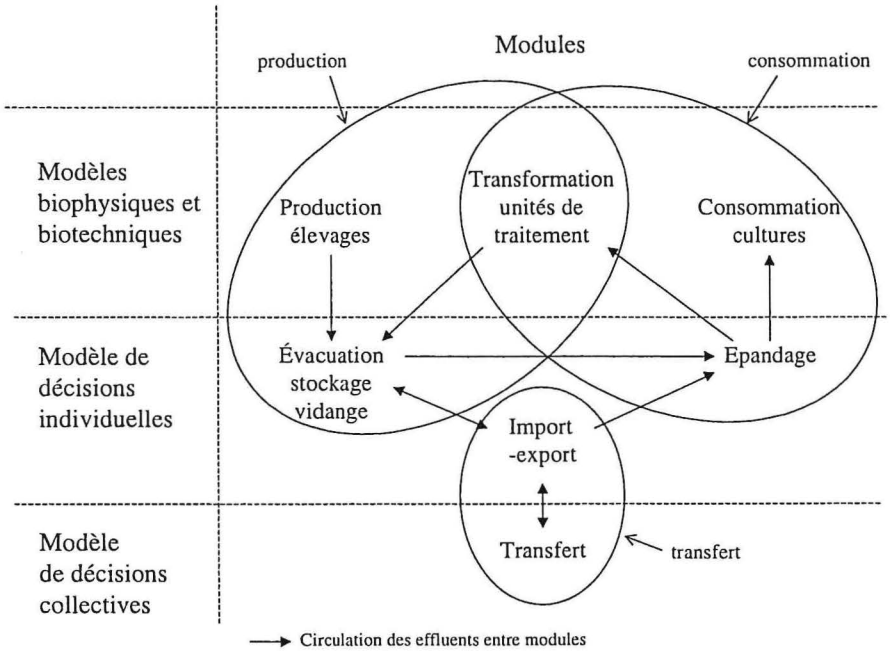


Figure 1. Schématisation de la gestion de la MO au sein d'une exploitation[12].

[12] *Consommation cultures*, qui apparaît sur la figure 1 comme un « module », ne fait pas partie de la gestion proprement dite de la MO mais plutôt de ses effets agronomiques ; il n'est donc pas traité dans ce rapport.

II. MODULE « PRODUCTION »

Le module « Production » ne contient pas de règles de gestion, car il dépend d'une façon automatique de variables structurelles concernant l'élevage (nature de l'élevage, nombre d'animaux, rythmes de production...) et les bâtiments d'élevage.

Pour l'essentiel, ces variables structurelles sont déterminées par des considérations d'ordre technico-économique, en amont de la gestion des effluents. Il n'est cependant pas exclu, dans certains cas, que les problèmes de gestion d'effluents puissent, en retour, interroger l'agriculteur sur ces choix structurels et l'amener à en réviser certains.

Nous considérerons aussi comme variable structurelle le type d'alimentation (par exemple, monophase ou biphase en alimentation porcine), même si ce choix peut être en partie fait dans une optique de gestion d'effluents (réduction à la source des pertes en éléments minéraux dont l'azote). Enfin, des variables non prises en compte dans un premier temps sont apparues très déterminantes des quantités produites, notamment dans la filière liquide, lors des tentatives de validation et d'utilisation du modèle *Magma* chez les agriculteurs (Viard, 2000). Il s'agit (i) de la proportion de surface de bâtiments ou de fosses non couvertes susceptibles de recevoir des eaux de pluie, et plus accessoirement, (ii) les eaux de lavage pouvant diluer les effluents. Dans les situations d'élevage des Hauts de La Réunion, compte tenu de la pluviométrie élevée, la surface non couverte peut à elle seule amener à doubler ou tripler, à certaines époques de l'année, la quantité d'effluents qu'il faut effectivement gérer. On introduira donc en entrée une variable caractérisant cette couverture et en sortie, on prendra en compte la quantité produite d'effluents corrigée par ce facteur, la quantité diluée représentant la véritable variable de gestion.

De plus, nous générerons dans ce module la qualité des effluents produits, exprimée en termes de teneur en matière sèche et de valeur azotée, dans la perspective des évaluations agronomiques et environnementales de la gestion. Si les variables concernées ne font pas partie du modèle de gestion au sens strict, nous les intégrons ici comme variables de sortie du module « Production » pour des raisons pratiques.

On propose de construire par étapes la détermination de ces quantités à gérer par (i) le calcul de la production journalière d'effluents par animal, (ii) son intégration à l'échelle du troupeau, (iii) la prise en compte des facteurs de dilution, et (iv) les éléments décrivant la qualité des effluents produits (MS[13], N, densité). Les valeurs présentées ici sont en grande partie issues des travaux de Ziegler et Héduit (1991).

II.1. PRODUCTION JOURNALIERE D'EFFLUENTS PAR ANIMAL

Il faut connaître la production journalière d'effluents par animal en kg/animal/j. Celle-ci est déterminée par 2 variables structurelles principales (Tableau 1) : le type d'élevage (15 cas possibles) et le type de sol du bâtiment (5 cas possibles) qui déterminent également le type d'effluent et sa teneur en MS (Tableau 2). On peut accepter une variabilité de 25% autour des données de production journalière et de teneurs en MS.

II.1.1. Les types d'élevage

Parmi les élevages porcins, on distingue les élevages naisseur-engraisseur où la production du troupeau (truies, verrats, porcelets, porcs charcutiers) est intégralement rapportée à la truie (TNE), les élevages engraisseurs où l'unité est le porc charcutier produit (PCP) et les élevages naisseurs (NAI) où la production est rapportée à la truie (truies, verrats, porcelets avant sevrage).

Parmi les élevages de bovins, on distingue les vaches laitières (VL) des vaches allaitantes (VA) et ensuite les élèves selon leur âge.

Pour les petits ruminants, la production est rapportée à la brebis mère ou à la chèvre mère.

Pour les volailles, on distingue chacune des espèces : poules pondeuses (PP), poulets de chair, dindes, canards, pintades. Pour les lapins, c'est la cage mère (élevage naisseur-engraisseur) qui intègre la production de l'ensemble du cheptel.

II.1.2. Les types de sol des bâtiments

Les types de sol des bâtiments déterminent le type d'effluent produit : lisier pour caillebotis et aire bétonnée raclée, fumier + purin pour gisoir (porcs) ou étable entravée (VL, VA, bovins à l'engraissement), fumier + lisier pour les aires partiellement paillée (bovins), fumier pour les aires intégralement paillées. De plus, compte tenu de l'interaction entre type d'élevage et type de sol, un même effluent aura des compositions différentes (teneurs en MS, N, P, K). Nous devrons donc, dans la perspective d'évaluer la gestion des effluents du point de vue agronomique et environnemental, aller plus loin, par calcul, dans la caractérisation d'un effluent.

[13] Matière sèche.

Tableau 1. Production journalière d'effluent par animal (kg de matière fraîche/animal/j) selon le type d'élevage et le type de sol.

		5 types de sol	Caillebotis	Gisoir ou étable entravée		Aire raclée	Stabulation partielle (50% paillée)		Aire paillée (100%)
Type d'animaux	15 types d'élevage	unité	lisier	fumier	purin	lisier	fumier	lisier	fumier
porcs	TNE	truie	55	41	8,4				49
	ENG	PCP	2,1	1,6	0,35				2
	NAI	truie	16	12	2,2				14,4
bovins	VL	vache		22	15	45	25	17	39
	VA	vache		19	13	40	22	15	35
	jeunes > 12 mois	taurillon/ génisse		12	8	25	14	9	22
	jeunes < 12 mois	taurillon/ génisse				15	8	5,5	13
	veaux < 6 mois	veau	10						8,5
petits ruminants	ovins/ caprins	brebis/ chèvre							3,5
volailles et lapins	PP	poule	0,14						
	lapins	cage mère	0,25						
	canards	canard	0,15						
	poulets	poulet							0,1
	dindes	dinde							0,3
	autres	unité							0,2

Autres : pintades, coq, cou nu, poulet fermier

Tableau 2. Teneur en MS (%) des effluents produits selon le type d'élevage et le type de sol.

		5 types de sol	Caillebotis	Gisoir ou étable entravée		Aire raclée	Stabulation partielle (50% paillée)		Aire paillée (100%)
Type d'animaux	15 types d'élevage	unité	lisier	fumier	purin	lisier	fumier	lisier	fumier
porcs	TNE	truie	4	17	1				21
	ENG	PCP	6	17	1				21
	NAI	truie	1,5	17	1				21
bovins	VL	vache		21	3	9	25	9	25
	VA	vache		21	3	11	24	11	24
	jeunes > 12 mois	taurillon/ génisse		21	3	11	24	11	24
	jeunes < 12 mois	taurillon/ génisse				11	24	11	24
	veaux < 6 mois	veau produit	2						19
petits ruminants	ovins/ caprins	brebis/ chèvre							30
volailles et lapins	PP	poule	26						
	lapins	cage mère	26						
	canards	canard	39						
	poulets	poulet							58
	dindes	dinde							54
	autres	unité							56

Autres : pintades, coq, cou nu, poulet fermier.

II.2. PRODUCTION JOURNALIERE D'EFFLUENTS PAR LE TROUPEAU

Pour accéder à la production journalière d'un effluent pour l'ensemble du troupeau, il faut faire le produit de la production journalière par animal avec le nombre d'animaux présents et corriger la quantité obtenue par la durée de présence journalière des animaux dans les bâtiments, exprimée en nombre d'heures de présence par 24 heures.

Le nombre d'animaux présents se détermine de 2 manières :

- Pour les élevages reproducteurs (NAI, VL, VA) ou assimilés, on considère que l'engraissement est régulier tout au long de l'année et rapporté à l'unité reproductrice (TNE, ovins/caprins, lapins), on comptabilise donc le nombre d'unités reproductrices présentes (NRP) durant 365 j. Les jeunes bovins en croissance < 12 mois (JBC) sont également présents toute l'année. Pour les poules pondeuses, NRP = 0 durant la période de vide sanitaire.
- Pour les élevages d'engraissement (ENG, jeunes bovins > 12 mois, veaux, volailles de chair), il faut connaître les effectifs d'animaux en production à un instant donné. Il y a deux façons de déterminer ces effectifs :
  - (i) Pour les volailles de chair (canards, poulets, dindes, autres), on utilise la surface de bâtiments d'élevage et la densité d'élevage. L'effectif d'animaux en production est nul durant la période de délai entre deux cycles[14]. Pendant un cycle, on a EAP = SBE × DVM, où EAP est l'effectif, SBE la surface du bâtiment d'élevage et DVM la densité d'élevage. DVM varie avec la saison pour les poulets (Tableau 3). On peut mettre une variabilité sur la durée du cycle de production et le délai entre cycles de ± 5j lorsque ces valeurs sont différentes de 365 j.
  - (ii) Pour les porcs à l'engraissement, les bovins en engraissement et les veaux, l'effectif d'animaux présents est quasi régulier tout au long de l'année (conduite en bandes : le nombre de places occupées et celui de places sous vide sanitaire sont quasi-constants) ; il correspond au rapport entre le nombre d'animaux produits par an et le nombre de cycles par an, lui-même déterminé par 365/(DEC + DCP). Délai entre cycles (DEC) et durée du cycle de production (DCP) sont donnés dans le Tableau 3.

Tableau 3. Durée en jours des cycles de production (DCP), délai entre cycles (DEC), valeurs UGB (unité gros bétail) et son coefficient de correction selon l'alimentation (porcs et bovins), densité d'élevage DVM (volailles) et sa variation selon la saison et le type d'élevage, durées de présence dans les bâtiments (DPB).

Type d'animaux	15 types d'élevage	Unité	UGB (par unité)	Correction UGB/aliment	DVM (nb / m^2)	DCP (j)	DEC (j)	DPB (heures)
porcs	TNE	truie	1,25	-17 à 20 % (biphase)		365		24
	ENG	porc	0,12	-17 à 20 % (biphase)		156	21	24
	NAI	truie	0,35	-17 à 20 % (biphase)		365		24
bovins	VL	vache	1	+ 20 à 30% (herbe)		365		16
	VA	vache	0,7	+ 20 à 30% (herbe)		365		0
	jeunes > 12 mois	taurillon/ génisse	0,6	+ 20 à 30% (herbe)		240	30	24
	jeunes < 12 mois	taurillon/ génisse	0,3			365		0
	veaux < 6 mois	veau	0,14			80	21	24
petits ruminants	ovins/ caprins	brebis/ chèvre	0,2			365		24
volailles et lapins	PP	poule	0,007			344	21	24
	lapins	cage mère	0,06			365		24
	canards	m^2 bâtiment	0,04		7 à 10	49 à 84	21	24
	poulets	m^2 bâtiment	0,09		16.5 été 17.5 hiver	42	21	24
	dindes	m^2 bâtiment	0,075		7.5	84	21	24
	autres	m^2 bâtiment	0,075		11	84	21	24

Autres : pintades, coq, cou nu, poulet fermier

[14] Délai entre cycles = période de raclage du fumier + vide sanitaire (*cf.* Fig. 4).

II.3. QUALIFICATION DE L'EFFLUENT : PRODUCTION D'AZOTE

Pour des raisons de simplicité, nous ne retiendrons que la valeur azotée pour qualifier l'effluent. Pour ce faire, on utilise la production d'azote estimée par le CORPEN[15] pour un UGB, soit : N = 73 kg/UGB/an. Cette valeur serait actuellement évaluée à 85 kg/UGB/an, ce qui correspond sans doute mieux aux conditions d'élevage à La Réunion, notamment en ce qui concerne les bovins, alimentés en grande partie à l'herbe. On peut retenir ces deux valeurs comme encadrement. La production journalière d'azote par un UGB sera donc comprise entre 0,2 et 0,23 kg/j. Cette valeur est corrigée par l'alimentation le cas échéant. De même, cette valeur corrigée peut tenir compte d'un pourcentage de pertes en azote variable selon la saison. Cette information est donnée dans le module « Evacuation-Stockage ».

Pour connaître la production d'azote du troupeau quotidiennement, on multiplie les effectifs ou la surface des bâtiments pour les volailles de chair par leur valeur respective en unité de bétail présent. Chaque unité de bétail produit 0,2 à 0,23 kg N/jour. Après corrections et prise en compte, de la durée de présence dans les bâtiments, on obtient, pour un effluent donné, la quantité d'azote produite chaque jour par le troupeau que l'on somme quotidiennement pour obtenir un stock d'azote produit.

II.4. PRODUCTION D'EFFLUENT ET DILUTION PAR LES EAUX DE LAVAGE ET LA PLUIE

Comme nous l'avons signalé, l'agriculteur aura à gérer les effluents directement produits par les animaux augmentés, éventuellement, par la dilution intervenant entre la production et le stockage.

Cette dilution provient essentiellement de deux facteurs : les eaux de lavage des bâtiments (théoriquement, les eaux blanches en élevage laitier devraient être évacuées hors des fosses à lisier ou des fumières, mais la réalité est généralement autre) et les eaux de pluie parvenant aux stockages via des surfaces non couvertes au dessus des aires d'exercice. On fait donc intervenir les eaux de lavage, la pluie quotidienne et la surface non couverte, pour déterminer la quantité d'eau ajoutée (QEA) à l'effluent au cours d'une journée. La production d'effluent par les animaux (QPE) et QEA alimentent donc quotidiennement la quantité d'effluent dilué à gérer. On considérera pour les truies et pour les vaches laitières sur aire raclée une quantité par défaut d'eaux de lavage de 10 litres par animal (truie ou vache) et par jour.

En parallèle, on peut calculer la quantité de MS produites par le troupeau en sommant quotidiennement les QPE × TMS (avec TMS : teneur en matière sèche donnée au Tableau 2).

Ainsi, pour un effluent donné, trois variables sont définies : quantité produite d'effluent dilué (QDE) accompagnée de la quantité d'azote (QNE) et de la quantité de MS (QMSE) correspondantes.

A partir de ces quantités, on peut appréhender quotidiennement les variations de valeurs de l'effluent produit par le troupeau :

- Teneur en MS : TMSE = QMSE / QDE = (QPE × TMSE)/QDE,
- Teneur en N (en kg/t) : TN = QNE / QDE,
- Teneur en N (kg/m^3) : TNVE = TN × DEN.

La densité (DEN en kg/m^3) peut être définie par 2 fonctions de la teneur en MS (TMS en %) :

- Pour les effluents liquides (TMS < 10%) : DEN = 12,5 . Ln(TMS) + 1007
- Pour les effluents solides ou pâteux (TMS ≥ 10%) : DEN = 979 . $e^{(-0,0137.TMS)}$

On donne en annexe 3 un complément concernant l'approvisionnement en litière des élevages.

Par ailleurs, il serait intéressant de prévoir une variation d'effectif à l'échelle de l'année, avec une limite maximale associée, pour prendre en compte les extensions d'élevages éventuellement prévues. Ces variables pourront faire l'objet de simulations (scénarios d'évolution du cheptel). Elles vont agir, selon le type d'élevage, sur les effectifs reproducteurs, les animaux produits ou la surface de bâtiments de production.

Du fait de la limitation des degrés de liberté, une fois déterminées les variables structurelles d'amont, le module « Production » ne comprend pas de règles de décision : il se présente surtout comme un enchaînement de variables structurelles d'entrée, à partir desquelles on calcule des variables intermédiaires et de sortie. Ce module fonctionne entièrement à partir de valeurs expertes données dans les tableaux 1, 2, et 3. La Figure 2 donne un schéma global du module « Production » et la Figure 3 récapitule les variables et leur enchaînement.

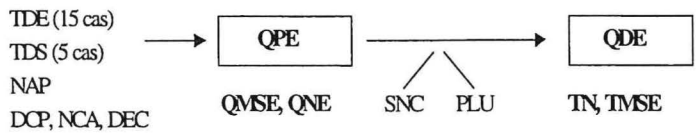
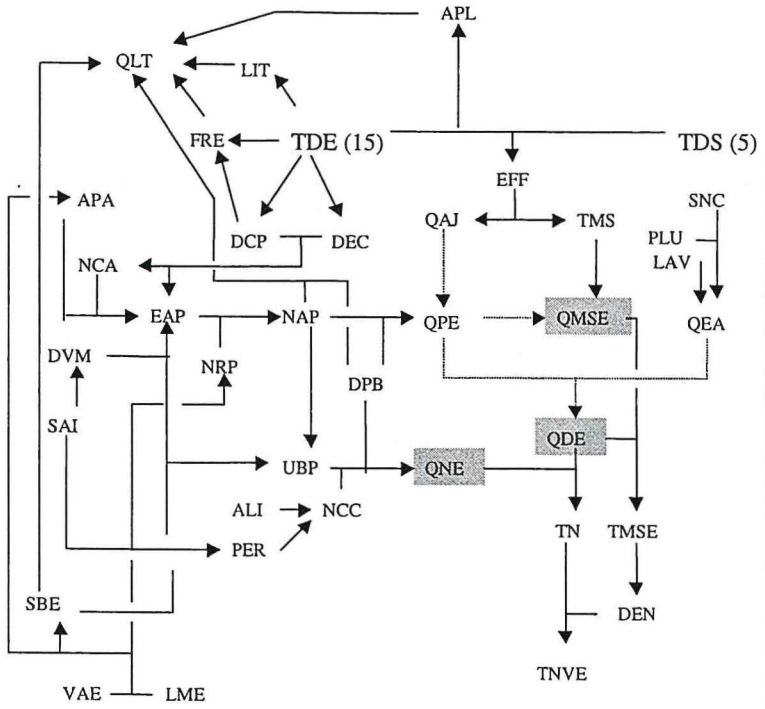


Figure 2. Schéma global du module « Production ».

[15] Comité d'orientation pour la réduction de la pollution des eaux par les nitrates, pesticides et polluants d'origine agricole.



ALI : alimentation (biphase /herbe)
APA : nombre d'animaux produits par an
APL : apport de litière par animal ou par m²
DCP : durée d'un cycle de production
DEC : délai entre cycles
DEN : densité de l'effluent
DPB : durée de présence dans bâtiments (h/j)
DVM : densité de volailles au m²
EAP : effectif d'animaux en production
EFF : type d'effluent
FRE : fréquence d'apport de litière
LAV : eaux de lavage (m³/j)
LIT : type de litière
LME : limite max. de taille de cheptel
NAP : nombre d'animaux présents
NCA : nombre de cycles par an
NCC : norme Corpen corrigée
NRP : nombre de reproducteurs présents
PER : % de pertes en azote (volatilisation)
PLU : pluie (mm/j)
QAJ : quantité par animal par jour
QDE: quantité d'effluent dilué
QEA : quantité d'eau ajoutée (m³/j)
QLT : quantité de litière apportée
QMSE : quantité de MS de l'effluent
QNE : quantité d'azote de l'effluent
QPE : quantité produite d'effluent
SAI : saison (été ou hiver)
SBE : surface bâtiment d'élevage
SNC : surface non couverte (m²)
TDE : type d'élevage
TDS : type de sol
TMS : teneur en MS effluent
TMSE : teneur en MS de l'effluent
TN : Teneur en azote de l'effluent (kg/t)
TNVE : Teneur (vol.) en N de l'effluent (kg/m³)
UBP : unité de bétail présent
VAE : variation inter-annuelle d'effectif

Figure 3. Variables du module Production pour chaque type d'effluent et enchaînements.

III. MODULE « EVACUATION-STOCKAGE »

Le module « Evacuation-Stockage » est sous la dépendance des variables structurelles « type de sol des bâtiments », « taille des structures de stockage » (fosses, préfosses, etc.) et des variables « type d'effluent » et « quantités d'effluents à gérer » issues du module « Production ». Ce module donne lieu, cependant, dans ses différentes sous-parties, à l'expression de variables et de règles de gestion qui peuvent être formalisées.

Comme pour le module « Production », l'évacuation et le stockage des effluents vont dépendre du type d'effluent et du type de sol des bâtiments : écoulement direct du lisier dans les fosses ou préfosses si caillebotis, raclage du lisier si aire raclée ou stabulation partielle, écoulement direct du purin dans les fosses, raclage fréquent d'un fumier pâteux dans les étables entravées et les gisoirs, enlèvement cyclique du fumier dans les stabulations et aires paillées. La nature de l'effluent, liquide ou solide, conditionne donc sa gestion. Nous présenterons donc les variables et règles de ce module en distinguant la filière effluent liquide (ou semi-liquide) de la filière effluent solide.

De plus, ce module est connecté à divers niveaux (selon, notamment, la nature de l'effluent) aux modules d'utilisation « Epandage » et « Transformation » ainsi qu'au module d'interface « Import/Export », via des règles d'arbitrage pour l'utilisation des effluents.

III.1. EVACUATION ET STOCKAGE

III.1.1. Cas des effluents liquides ou semi-liquides (pâteux)

Pour les effluents liquides, on distingue les lisiers produits sur caillebotis, principalement en production porcine, des lisiers raclés sur aire bétonnée. Pour ces effluents, il y a toujours évacuation directe ou réalisée fréquemment par l'éleveur, vers une unité de stockage caractérisée par un volume bien défini. Cette évacuation peut ainsi être continue ou discontinue selon les types d'élevage.

Lisiers sur caillebotis

Dans le cas de la production porcine sur caillebotis, la conduite en bandes permet d'effectuer des vides sanitaires dans les différentes salles d'élevage situées sur des fosses individualisées, appelées préfosses. La vidange des préfosses et le nettoyage des salles sont effectués à chaque départ d'animaux (ventes des porcs charcutiers, changement de bâtiment entre maternité, post-sevrage et engraissement).

La vidange des préfosses est régulière et dépend du temps de présence des animaux dans chacun des bâtiments : vidange de la préfosse maternité tous les 49 j (28 j de présence des animaux + 21 j de vide sanitaire), vidange des préfosses de post-sevrage tous les 77 j (56 + 21), vidange des préfosses d'engraissement tous les 121 j (100 + 21). A la vidange, la préfosse qui contient la quantité de lisier produite sur la période d'élevage considérée alimente une fosse de stockage. Pour réaliser cette gestion de préfosses et fosses, en connexion avec le module « Production », il serait nécessaire au préalable de séparer l'élevage de porcs en 3 ateliers (maternité, post-sevrage, engraissement) ayant des durées de cycle de production différentes et produisant des lisiers différents. Cependant, l'intérêt de cette gestion séparée est limitée car celle-ci n'implique pas de temps de travaux et donc de coûts pour l'éleveur.

Pour simplifier, nous pouvons donc considérer la gestion de l'ensemble de l'élevage avec une capacité de stockage cumulant les fosses et une fraction des préfosses. Dans la mesure où celles-ci ne peuvent être pleines toutes en même temps, pour un fonctionnement correct de l'élevage (*i.e.* réalisation des vides sanitaires), on considérera qu'en moyenne les préfosses sont remplies au maximum jusqu'à la moitié de leur capacité totale. Une règle d'ajustement aux aléas liée à l'utilisation du lisier peut consister à utiliser la capacité résiduelle des préfosses (l'autre moitié) comme volume de sécurité en cas de risque de débordement des fosses. A l'inverse, dans le cas d'un besoin de lisier à épandre, l'éleveur peut vider également les préfosses pour partie, si la quantité dans la fosse est insuffisante.

Pour implémenter ces règles d'ajustement, il faut créer trois capacités de stockage :

- une capacité minimale correspondant aux fosses,
- une capacité moyenne correspondant aux fosses + la moitié des préfosses,
- une capacité maximale correspondant aux fosses + les préfosses.

Dans le cas général, c'est la capacité moyenne qui est utilisée pour le remplissage. Si le seuil de débordement est atteint et que l'éleveur ne trouve pas d'utilisation, on considérera qu'il y aura débordement lorsque cette capacité moyenne sera dépassée. Pour l'épandage, c'est la capacité minimale qui est prise en compte en tant que stock maximal disponible.

Si l'éleveur choisit de mobiliser la règle d'ajustement consistant à utiliser la capacité totale des fosses et préfosses, alors le seuil de déclenchement interviendra sur la capacité maximale de stockage. Il y aura débordement lorsque cette capacité sera dépassée. Cette pratique supprime le vide sanitaire sur certaines salles d'élevage ; elle est risquée pour les éleveurs, qui ne mobiliseront donc cette règle d'ajustement qu'en dernier recours.

A l'inverse, si l'éleveur choisit d'utiliser au maximum sa production de lisier, par exemple lors d'un besoin important d'épandage, ce sera la capacité moyenne qui sera prise en compte comme stock maximal disponible pour cet épandage. A priori, il n'y a aucun risque associé à cette pratique.

Mises à part ces deux règles d'ajustement pour les élevages possédant des fosses et préfosses, on peut considérer que l'écoulement direct du lisier ou du purin ne fait pas l'objet d'une gestion par l'agriculteur.

Cependant, en terme de temps de travaux, l'éleveur consacre chaque jour du temps au nettoyage manuel des caillebotis et aires bétonnées de l'élevage, en moyenne 10 minutes par tonne de lisier produit (cette donnée peut bien sûr être demandée à l'agriculteur, si il y a enquête). De manière à traiter les différents élevages de façon comparable par rapport au coût, on peut considérer ce temps comme intervenant dans la gestion des effluents.

Lisiers sur aire raclée

Dans le cas des lisiers sur aire raclée, principalement pour les vaches laitières et les bovins en engraissement, mais également parfois en production porcine (au moins pour la partie de l'élevage conduite sur aire bétonnée), on définit quatre variables de gestion pour l'évacuation du lisier : la fréquence, la durée de l'opération (nécessaire au calcul des coûts), le chantier, la quantité. Les modalités prises par ces variables, qui peuvent être définies pour chaque élevage (informations à recueillir par enquête), ne sont pas ou peu (modalité de chantier) sous la dépendance de règles.

La fréquence de raclage dépend du type d'élevage : 2 à 3 fois par jour pour les vaches laitières (heures de traites généralement), 1 fois par jour pour les bovins en engraissement, et les porcs (ateliers naisseur-engraisseur ou engraisseur). Pour les bovins, la durée de l'opération dépend de la quantité d'effluent évacuée et de la modalité de chantier : 20 min/t si évacuation manuelle, et 10 min/t si évacuation mécanique au rabot ou au tracteur. Pour les porcs, cette durée semble très variable (10 à 50 min/t) ; elle est peu dépendante des quantités évacuées, mais semble dépendre de l'importance de la surface bétonnée (gisoirs). Les données fournies par les enquêtes sont trop imprécises ou contradictoires pour définir des règles pertinentes. La quantité évacuée est celle produite entre deux raclages par les animaux présents.

III.1.2. Cas des effluents solides

Pour les fumiers , principalement pour les aires paillées et parfois pour les stabulations partielles, en terme de gestion, trois variables doivent être prises en compte : la période de raclage, le chantier de raclage et la quantité d'effluent évacuée.

La période de raclage (Figure 4) est définie par des règles de déclenchement et de fin. Le déclenchement de l'opération se fait après l'événement qui est la sortie des animaux du bâtiment ; comme le vide sanitaire doit durer au moins 3 semaines, on peut concevoir un délai généralement court (2 à 3 jours maximum) entre la sortie des animaux et le raclage du bâtiment ; la durée du cycle de production et le délai entre deux cycles (DEC) déterminent donc la fréquence de la mobilisation de la règle de déclenchement. Ces valeurs sont données dans le module « Production » (Tableau 3).

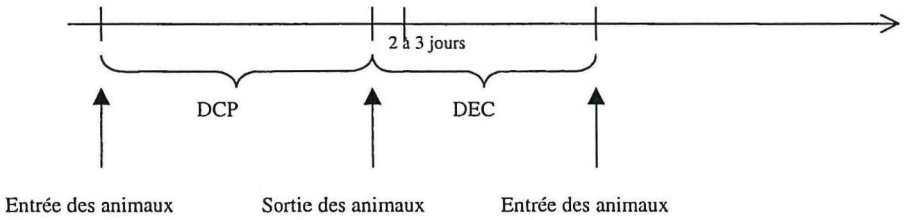


Figure 4. Positionnement de la période de raclage par rapport au cycle d'élevage (DCP) et à la durée entre cycles (DEC) incluant le vide sanitaire.

La règle de fin correspond plutôt à une durée d'opération dépendante des modalités de chantier. Cette durée dépend de la quantité évacuée et du type de fumier (ou d'élevage) : 20 min/t pour les bovins, 15 min/t pour les volailles et 10 min/t pour les porcs. L'évacuation du bâtiment peut également être réalisée par un tiers ; la règle de déclenchement est la même, par contre la durée a alors peu d'importance car elle n'occasionne pas de coût pour l'éleveur.

On constate l'existence dans les exploitations de deux types de chantiers de raclage, l'un manuel, l'autre mécanique. Ces deux types ne sont généralement pas présents simultanément dans une exploitation, car ils dépendent de la nature et de la taille de l'élevage : généralement, en bovins laitiers, le chantier est mécanique, alors qu'il est manuel en porcs. C'est ainsi que cette nature du chantier ne semble pas déterminer la durée de l'opération de raclage (d'autres enquêtes et suivis seraient nécessaires pour confirmer ou infirmer ce point).

La quantité d'effluent évacuée correspond à la totalité de l'effluent produit (en tenant compte de sa dilution, le cas échéant) sur la période d'élevage considérée ou entre deux nettoyages.

Contrairement aux effluents liquides, toujours dirigés vers les stockages, une règle d'attribution du fumier à l'utilisation (épandage, transformation, exportation) ou à une unité de stockage (plate-forme bétonnée, couverte ou non, ou sur le champ) est mobilisée pour définir le devenir de l'effluent évacué des bâtiments. Cette règle consiste en une priorité entre les différents modules d'utilisation pour l'attribution du fumier évacué. Par défaut on peut définir la règle suivante : *(Epandage sur cultures maraîchères de l'exploitation) Prioritaire sur (Exportation) Prioritaire sur (Transformation) Prioritaire sur (Stockage).* Ceci reflète l'état actuel des priorités, la généralisation de stations de compostage, individuelles ou collectives, pourrait modifier cet ordre.

Le choix de la plate-forme de stockage relève également d'une règle de priorité d'attribution : *(Fumière couverte) Prioritaire sur (Fumière non couverte) Prioritaire sur (Stockage sur le champ).* Les capacités des fumières sont difficiles à définir car les hauteurs ne sont pas limitées, théoriquement. Cependant, on peut proposer une hauteur maximale de 3 m (à préciser avec l'éleveur) ; le volume dépend alors de la surface de la fumière. Pour les stockages sur le champ, il n'y a aucune limite de surface et donc de volume.

III.2. VIDANGE DES UNITES DE STOCKAGE DES EFFLUENTS

La vidange est soumise à une règle générale de déclenchement qui est activée par un module d'utilisation (Epandage, Exportation, Transformation). Cette règle aboutit à la définition d'une date de vidange.

Ces modules ont un degré de priorité qui peut dépendre de la nature de l'effluent et des cultures concernées et qui est de la forme générale : *Pendant(t1,t2), (Module A) Prioritaire sur (Module B).*

Cependant on peut définir des règles d'arbitrage par défaut entre ces modules, en fonction essentiellement de la nature de l'effluent :

(i) pour les liquides : *(Epandage) Prioritaire sur (Transformation) Prioritaire sur (Exportation),*

(ii) pour le fumier de volailles : *(Transformation) Prioritaire sur (Epandage) Prioritaire sur (Exportation),* si nécessité de composter du lisier de porcs, sinon (iii) ou (iv),

(iii) pour les autres solides avec les besoins liés à la replantation des cultures pérennes et semi-pérennes et à la plantation des cultures maraîchères (cf Module « Epandage ») : *(Epandage) Prioritaire sur (Exportation) Prioritaire sur (Transformation),*

(iv) pour les autres solides sans besoins liés à la replantation : *(Exportation) Prioritaire sur (Epandage) Prioritaire sur (Transformation).*

Cependant, l'éleveur utilise une règle d'ajustement dite « règle de forçage » lorsqu'il craint un débordement de l'unité de stockage, principalement pour les effluents liquides stockés dans les fosses (il y a peu de contrainte pour les solides facilement stockables). Cette règle consiste à forcer un module d'utilisation, généralement celui d'épandage : un apport supplémentaire (non planifié) sur les cultures disponibles à l'épandage est alors pratiqué. Les surfaces (internes ou externes à l'exploitation) peuvent être rendues disponibles en modifiant la modalité du chantier d'épandage (exemple de l'utilisation du tuyau ou du coude au lieu d'une tonne à lisier pour l'épandage de lisier sur canne à sucre lorsque celle-ci a repoussé ; *cf.* Module « Epandage »).

S'il n'y a pas de culture disponible, la vidange des effluents liquides pourra se faire vers le module « Transformation » s'il existe dans l'exploitation, mais en faible quantité pour éviter une saturation du tas de compost. Sinon, l'éleveur recherchera des preneurs pour se débarrasser de l'effluent. Le débordement de la fosse est un dernier recours, en principe peu utilisé.

Le seuil de déclenchement de la règle de forçage de l'utilisation correspond à un niveau d'effluent dans la fosse décidé par l'éleveur, en fonction de sa perception des risques et de sa connaissance *a priori* des solutions possibles. Par défaut, on peut prendre ce seuil comme 85 à 90% de la capacité maximale de stockage.

De plus, essentiellement pour le lisier de porc, l'éleveur peut utiliser une règle d'optimisation de la capacité de stockage, qui consiste à maximiser l'utilisation de l'effluent durant une période (par exemple celle de la coupe de canne). L'objectif sera alors de vider la fosse (voire les préfosses) complètement avant la fin de la période d'épandage possible sur l'ensemble de ses surfaces (en particulier sur la canne à sucre). Cette stratégie est alors à décrire dans le Module « Epandage ».

Les quantités vidangées sont, dans le cas général, définies par les modules d'utilisation (« Epandage », « Transformation », « Import/Export »). Ces quantités conditionnent la durée de l'opération de vidange des unités de stockage et déterminent donc la règle de fin de vidange.

Le matériel utilisé pour la vidange est déterminé par le type d'effluent, le transport (distance à parcourir) et l'utilisation finale (stockage, transformation, épandage). Ce matériel appartient généralement à l'exploitation si un épandage sur les cultures de l'exploitation est possible, sinon il est fourni par un tiers. Des cas intermédiaires se rencontrent lorsque l'éleveur n'a pas de culture mais doit évacuer son lisier : le tracteur est fourni par le preneur de lisier et l'éleveur fournit la citerne.

Différentes modalités de la variable chantier de vidange sont possibles :

(i) pour les effluents liquides, on utilise un tracteur avec une tonne, la vidange de la fosse se fait avec la pompe de la tonne (on donne en Annexe 4 des données par défaut pour les débits de chargement et vidange des tonnes),

(ii) pour les effluents solides, l'opération de chargement peut être soit manuelle (1 h/t pour un opérateur) pour de petites quantités (< 10 à 15 t), soit avec la fourche du tracteur (10 min par remorque de 6 à 7 t). Cependant, les modalités de chantier dépendent également du transport : pour de faibles distances (< 10 km) le tracteur est souvent utilisé ou une camionnette pour les faibles quantités (< 2 t), au delà, on utilise plutôt un camion. La brouette n'est utilisée (modalité « manuel ») que pour des distances < 500 m et de faibles quantités (< 1 t).

Par ailleurs, le stockage pose un problème de composition des différents effluents (variation de la composition chimique) et de quantités stockées (diminution des masses et volumes pour les effluents solides). En effet, les matières organiques se transforment plus ou moins selon les modalités de stockage. Le Tableau 4 tente de donner une estimation des pertes occasionnées par le stockage. Ces valeurs, qui peuvent être très variables, restent à valider par des expérimentations. Elle peuvent cependant être utilisées en ajoutant une fonction de diminution journalière sur les quantités produites définies dans le module « production » : QDE, QMSE et QNE, et sur les stocks définis dans le module « Evacuation-stockage ». Les composts subissent davantage de transformations liées à l'aération forcée des tas et à la réhumectation régulière (fumier de volailles) ; ces cas sont traités dans le module « Transformation ».

Tableau 4. Estimations des pertes (volume, masse, MS, N) occasionnées par le stockage des effluents.

Effluents	Pertes de volume (% volume / 4 mois)	Pertes de masse (% masse / 4 mois)	Pertes de MS (%MS / 4 mois)	Pertes d'azote (%N / 4 mois)
Lisier de porcs	Nulle	nulle	peu	25
Lisier de bovins	Nulle	nulle	peu	10
Fumier de volailles	20	20	30	25
Fumier de bovins	20	30	10	10

III.3. REPRESENTATION SCHEMATIQUE

La Figure 5 présente les principales variables et règles utilisées dans le module « Evacuation-stockage », ainsi que son articulation avec les autres modules.

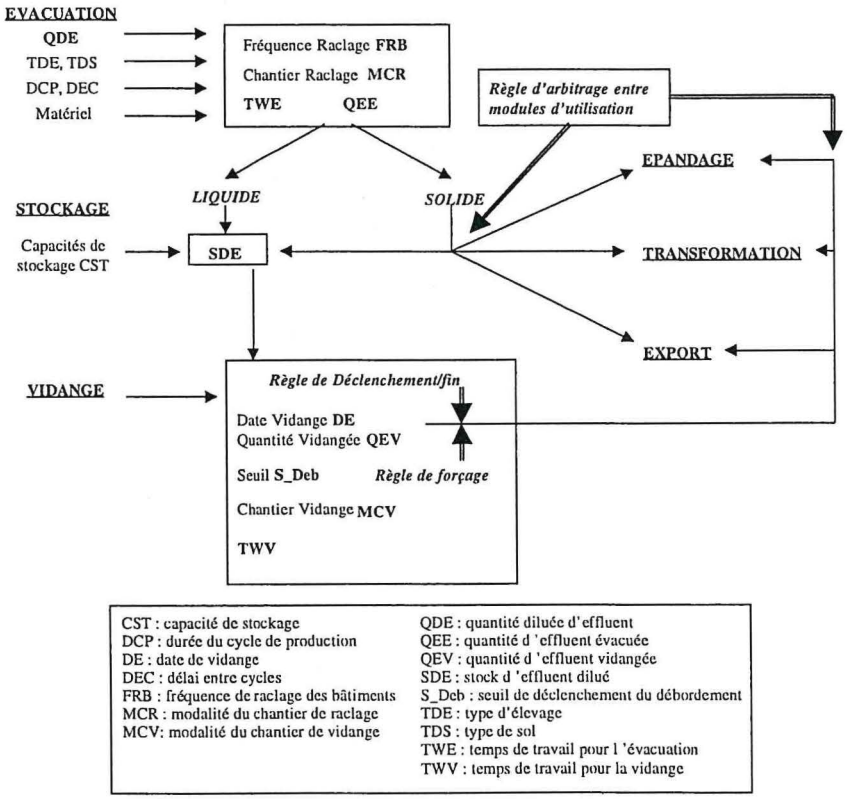


Figure 5. Représentation schématique du module « Evacuation –Stockage ».

IV. MODULE « EPANDAGE »

Ce module synthétise les décisions concernant l'utilisation des effluents produits sur l'exploitation et/ou importés via le module « Import/Export » : on se réfère ici à l'utilisation de ces effluents sur des surfaces d'épandage, qu'elles soient celles de l'exploitation ou celles disponibles à l'extérieur dans le cadre d'un plan d'épandage plus ou moins formalisé. L'utilisation d'effluents pour la transformation est traitée dans le module « Transformation », où l'on verra que le tas de compostage peut être assimilé à une « culture » particulière. L'exportation d'effluents est traitée dans le module « Import/Export », sous la dépendance des règles d'arbitrage entre utilisations définies dans le module « Evacuation-Stockage ».

Ce module « Epandage » comprend en fait plusieurs sous-modules correspondant à des enchaînements de décisions concernant :

- l'attribution des effluents aux cultures,
- la définition des surfaces d'épandage,
- l'épandage proprement dit, structuré autour des décisions de positionnement temporel des épandages, de modalités de chantiers, de doses à épandre, et de faisabilité (réalisation des actions d'épandage prévues).

Nous examinons ci-après chacun de ces sous-modules.

IV.1. ATTRIBUTION DES EFFLUENTS AUX CULTURES

On constate que les agriculteurs ne mettent pas n'importe quel effluent (produit sur l'exploitation ou importé) n'importe où : ils prennent des décisions quant à l'attribution des effluents ou catégories d'effluents selon les cultures ou catégories de culture. Ces décisions témoignent de façon souvent implicite d'effets attendus ou redoutés de tel effluent sur telle culture, ou de prise en compte de la réglementation telle qu'elle est connue. Ces décisions s'expriment dans le discours sous trois formes :

- des exclusions : « Pas de lisier sur des cultures maraîchères »,
- des préférences : « Plutôt du fumier que du lisier sur les cannes replantées »,
- des exclusivités : « Que du terreau ou du compost sur telle culture maraîchère ».

Entre exploitations, le contenu de ces règles peut varier. Cependant on peut, d'une part, proposer une structure commune à ce sous-module, sous la forme de variables et de règles, d'autre part, proposer des valeurs de variables et des règles par défaut.

IV.1.1. Structuration des variables et règles d'attribution des effluents aux cultures

Ce sous-module définit la relation de correspondance entre effluents disponibles et cultures disponibles en définissant les couples admis (Effluent, Culture) sur l'exploitation considérée et les ordres de priorité des effluents disponibles en fonction des cultures en cas de concurrence.

Le sous-module admet donc comme *variables d'entrée* les variables cultures et effluents. Il donne comme *variables de sortie* des couples (Effluent, Culture) et des priorités entre couples. La variable culture est une variable structurelle de l'exploitation mais son utilisation dans ce sous-module amène à créer une variable intermédiaire : les catégories de cultures. La variable effluent résulte du module « Production » ou du module « Import/export ». Ce sous-module comprend aussi deux types de règles de décision : les règles d'attribution des effluents aux cultures d'une part, et des règles d'arbitrage en cas de concurrence, d'autre part (Figure 6).

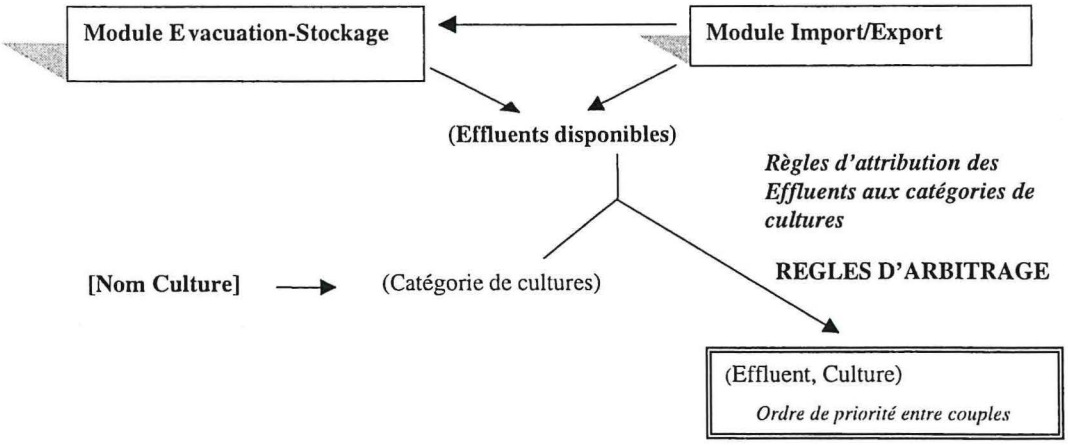


Figure 6. Représentation schématique du sous-module « Attribution des Effluents ».

IV.1.2. Les catégories de cultures

On constate chez les agriculteurs que les exclusions, préférences ou exclusivités s'expriment moins par culture que par catégories de cultures. Ces catégories ne sont pertinentes que pour cet aspect de la gestion (attribution d'effluents aux cultures) et d'autres catégories peuvent être faites pour d'autres aspects de cette gestion ou de la conduite des cultures. On propose de distinguer six catégories de cultures.

Catégorie 1 : les cultures pérennes et semi-pérennes en production (par opposition aux replantations)

Elles comprennent la canne à sucre, les fourrages, les bananiers et les agrumes ou autres arbres fruitiers. L'ananas, au moins celui de cycle de 18 à 24 mois, entre également dans cette catégorie. Le chouchou, du point de vue de la gestion des effluents, est aussi placé dans cette catégorie.

Du point de vue des effluents, cette catégorie reçoit préférentiellement voire exclusivement du lisier, pendant tout ou partie du cycle annuel : cette affectation est liée, soit à une possibilité offerte par ce type de cultures d'accueillir sans dommage du lisier (pas de réglementation contraire), soit à la difficulté ou à l'impossibilité d'accueillir autre chose (pas de travail du sol permettant d'enfouir du fumier, résidus solides de fumier indésirables pour l'alimentation animale dans les fourrages coupés ou pâturés), soit encore à des considérations pratiques renvoyant aux chantiers d'apport des effluents (on passe difficilement avec un tracteur et un épandeur à fumier dans un verger d'agrumes ou un champ de bananiers, on peut plus facilement épandre du lisier au tuyau).

Catégorie 2 : les replantations des cultures pérennes et semi-pérennes

A intervalles variés selon la culture et les décisions de conduite technique, ces cultures sont replantées pour régénérer la production (classiquement, tous les 7 à 10 ans pour la canne à sucre, par exemple). Cette replantation donne lieu à arrachage de la vieille culture, travail du sol et mise en place de nouveaux plants.

Du point de vue des effluents, cette catégorie peut recevoir des effluents solides car il y a arrachage du couvert précédent et travail du sol. L'effluent solide, mais parfois également liquide, est alors apporté avant ce travail du sol, qui l'enfouit. On constate que les agriculteurs utilisent plutôt du fumier de bovins, compte tenu des coûts (le fumier de bovins coûte moins cher que le fumier de volailles pour une culture qui n'entrera en production que de façon différée). Fréquemment, cette catégorie de cultures donne aussi lieu à des apports d'effluents après replantation, en démarrage de végétation : on peut alors utiliser du lisier et on rejoint alors la catégorie précédente.

Catégorie 3 : le maraîchage de type I

Il s'agit de cultures maraîchères donnant lieu à travail du sol préalable, susceptible d'enfouir de la matière organique. Bien qu'on ne puisse faire une liste exhaustive, on trouve là le plus souvent les cultures implantées en fin de saison cyclonique (février), qui ne seront pas irriguées (carottes, laitues, tomates, choux, oignons...) mais pour lesquelles un travail du sol peut avoir lieu en terrain encore humide. On ajoute aussi à cette catégorie le curcuma.

Du point de vue des effluents, le lisier est exclu (réglementation) au moment de l'implantation ou en cours de production. On recourt à des effluents solides divers, selon leur disponibilité et le prix qu'on est prêt à consentir, et qui sont enfouis par le travail du sol. Comme précédemment, le fumier apporté par épandeur est une matière couramment utilisée dans cette catégorie de culture. Du lisier peut parfois être apporté pendant une interculture suffisamment longue (de 4 à 5 mois, par exemple, mais pas entre deux cycles de laitue espacés de 10 à 15 jours), sur des parcelles ayant reçu ou destinées à recevoir du maraîchage : ce cas est traité dans la catégorie interculture. La réglementation n'autorise l'épandage de lisier sur cultures maraîchères que s'il est réalisé au minimum 1 an avant la récolte des produits.

Catégorie 4 : le maraîchage de type II

Il s'agit de cultures maraîchères qui ne donnent pas lieu à un travail du sol préalable mais s'apparentent plutôt à du jardinage (implantation manuelle, au trou). Ces cultures sont souvent faites sur de petites surfaces, en saison sèche, souvent irriguées (arrosées) et, *a priori*, présentent de fortes valeurs ajoutées. On y trouve des carottes ou des tomates de 2ème cycle, des bulbilles d'oignons, des pastèques, etc.

Du point de vue des effluents, on a encore interdiction du lisier (réglementation) à l'implantation ou en cours de production, mais, de plus, l'absence de travail du sol exclut le recours à des effluents solides grossiers. La matière organique est apportée au trou, à la main lors de la plantation ou du semis. On rencontre ici soit du fumier de volailles très évolué et très fin, soit du compost évolué (encore très rare semble-t-il), mais le plus souvent c'est du terreau acheté ou du Végéthumus®. Le coût élevé consenti pour cet apport (dépassant généralement les 15 000 F/ha) laisse penser que cette catégorie de cultures est considérée comme « de luxe » et probablement très rémunératrice.

Nous ne pouvons pas, à l'heure actuelle, clairement préciser quelles cultures maraîchères entrent *a priori* dans l'une ou l'autre de ces catégories. Ce qui est sûr, c'est que ces deux catégories maraîchères existent, souvent co-existent dans une exploitation, et qu'elles donnent lieu à des attributions d'effluents différents. La catégorie 4 est une « cliente » privilégiée à l'avenir pour du compost résultant de la transformation d'effluents, mais plusieurs maraîchers ont dit qu'ils seraient alors très exigeants sur le degré d'évolution et la présentation (gra-

nulométrie très fine) d'un tel produit pour remplacer les produits du commerce. Le coût de ces derniers rend les maraîchers attentifs aux nouvelles matières organiques « locales » de substitution qui pourraient limiter ces coûts.

Catégorie 5 : l'interculture.

Il s'agit de terres que l'on ne cultive pas sur une période assez longue (quelques mois au moins), par exemple entre un cycle de maraîchage automnal (février-juin) et un cycle printanier–estival (octobre-décembre), voire des durées plus longues éventuellement. Nous considérons l'interculture comme une culture particulière, gérée du point de vue des effluents par les agriculteurs. En effet, ces terres sont considérées en quelque sorte comme des zones « tampons », pouvant recevoir tous effluents, notamment du lisier dans des cas d'urgence (débordement de fosse), donc a priori sans restriction de dates. Pour l'interculture, en particulier entre cycles de maraîchage, il s'agit alors de définir les durées pendant lesquelles une parcelle peut être effectivement considérée comme telle (la proximité de l'implantation de la culture suivante peut rendre impossible l'épandage de lisier, par exemple, en fin d'interculture). Malgré cette gestion particulière, sur le plan de la fertilisation, il conviendra cependant d'associer l'interculture à la culture suivante, dont les besoins seront en grande partie couverts par les apports réalisés en interculture.

Catégorie 6 : les friches et ravines

Les friches sont des terres temporairement abandonnées pour la culture (plusieurs années de non culture), les ravines sont les vallées creusées par les cours d'eau.

La pratique montre une large utilisation des friches dans le même sens que l'interculture, même si cela n'est pas autorisé par la réglementation. Par contre, les ravines sont considérées comme exutoire de dernier recours par les agriculteurs. Il n'y a pas de gestion de l'épandage à la ravine, puisqu'il s'agit essentiellement d'un débordement des installations de stockage. La réglementation interdit clairement d'y envoyer des effluents.

Remarque : nous verrons dans le module Transformation l'existence d'une septième « catégorie », le support ligno-cellusosique utilisé dans la méthode d'imprégnation-compostage.

Derrière ces catégories de culture et les attributions d'effluents, se profilent des rôles attendus ou redoutés des effluents. Tout n'est pas explicite, loin de là, dans le discours des agriculteurs, mais on peut cependant tirer quelques constantes :

- Les apports d'effluents d'élevage ne sont pas considérés comme un substitut, même partiel, aux apports d'engrais chimiques, puisque presque tous les agriculteurs, sur toutes les cultures, pratiquent aussi des apports d'engrais chimiques à des doses ne tenant souvent aucun compte des apports de matières organiques. La méconnaissance de la composition des effluents (teneurs en éléments minéraux), probablement très variable (entre effluents et, pour un même effluent, selon la période de l'année, le degré de dilution, etc.), et l'absence de diffusion de références de type « méthode des bilans » pour raisonner les fertilisations sur les cultures, sont des facteurs expliquant cette conduite absolument générale.
- Sur les andosols (cas très général du maraîchage), les effluents sont unanimement considérés comme des amendements dont le rôle est plus de maintenir une structure physique du sol favorable à l'enracinement et de stimuler l'activité biologique souvent déficiente que d'amener des éléments nutritifs.
- Les apports de lisier de porc sur canne après coupe sont considérés comme ayant un certain rôle sur le démarrage de la repousse (*i.e.* apports d'éléments nutritifs), mais aussi et souvent, comme une irrigation (apports post-coupe pendant la saison sèche) au moins dans la partie sous le vent de l'île. On trouve le même type de rôle attribué aux apports sur fourrages coupés.
- Sur les replantations, l'apport d'effluents solides est surtout vu comme un amendement.

IV.1.3. Les règles d'attribution des effluents aux cultures

On peut faire exprimer à l'agriculteur des règles d'attribution des effluents aux cultures qu'il fait, en les regroupant selon certaines catégories. Pour toute culture d'une exploitation, selon sa catégorie, l'agriculteur attribue les effluents selon un ordre préférentiel.

En toute rigueur, l'ordre préférentiel d'attribution des effluents aux cultures est à demander à l'agriculteur sur la base de la connaissance préalable de ses cultures et de ses effluents disponibles. Une interdiction se présentera comme l'absence de l'effluent dans la liste, une exclusivité comme la présence de ce seul effluent dans la liste. Entre exploitations, le contenu de ces règles peut varier essentiellement :

- selon la disponibilité d'un effluent donné *dans* et *hors* de l'exploitation : par exemple, la difficulté à se procurer du fumier peut amener à mettre du lisier sur canne replantée, si le lisier, lui, est disponible ;
- selon la combinaison des cultures consommatrices d'un effluent donné sur l'exploitation : pour reprendre le même exemple, si on a à la fois des cannes replantées et une culture maraîchère, le fumier disponible va en priorité au maraîchage ; ceci relève donc de règles d'arbitrage entre cultures (cf. § IV.1.4).

On peut cependant donner des règles d'attribution par défaut (Tableau 5) qui semblent relativement stables.

Tableau 5. Règles d'attribution des effluents aux cultures.

Catégorie de culture	Attribution prioritaire par défaut
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, *exclu pour les fourrages.*
Replantations	1. Ecumes de sucrerie 2. Fumier de bovins 3. Fumier de porcs 4. Fumier de volailles 5. Compost 6. Autres
Maraîchage de type 1 plus curcuma	1. Fumier de volailles 2. Compost 3. Fumier de bovins 4. Fumier de porcs 5. Autres, sauf lisier *exclu.*
Maraîchage de type 2	1. Terreau 2. Compost (si très évolué).
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

IV.1.4. Les règles d'arbitrage entre couples (Effluent, Culture)

Lorsqu'un effluent est disponible en quantité limitée ou à des moments précis de l'année et qu'il convient à plusieurs cultures, il peut y avoir concurrence d'utilisation ; il peut être nécessaire alors d'établir des ordres de priorités entre les couples (Effluent, Culture). C'est, en particulier, le cas lorsqu'il y a dans une exploitation plusieurs cultures de la même catégorie. Dans un tel cas, l'agriculteur doit alors arbitrer. Comme toute règle d'arbitrage, la priorité donnée à une culture sur une autre est susceptible de varier selon la période de l'année. On exprime donc les règles d'arbitrage en fonction de périodes (t1,t2), de la façon suivante :

Pour Effluent_i, Pendant (t1,t2), (Culture_j) Prioritaire sur (Culture_k)

Lorsque le cas se présente (plusieurs cultures « candidates » au même effluent), il faut demander à l'agriculteur ses règles d'arbitrage, mais on peut, néanmoins, en déduire certaines par défaut à partir des enquêtes déjà réalisées (Tableau 6).

Tableau 6. Règles d'arbitrage entre cultures pour l'utilisation d'effluents.

Effluent	Période	Expression de règles d'arbitrage entre cultures
Lisier de porcs	Toute l'année	*(Pérennes et semi-pérennes + Replantations) Prioritaire sur (Interculture, Friche)*
Lisier de bovins	Pendant (fin_coupe, coupe +15j)	*(Fourrages) Prioritaire sur (Autres pérennes et semi-pérennes)*
Fumier de bovins Fumier de volailles	Pendant (Plantation -1mois, Plantation)	*(Maraîchage type 1) Prioritaire sur (Replantations)*
Fumier de volailles Compost	Toute l'année	*(Maraîchage type 2) Prioritaire sur (Maraîchage type 1) Prioritaire sur (Autres)*

IV.2. SURFACES D'EPANDAGE

IV.2.1. Aspects généraux

Les surfaces d'épandage peuvent être considérées comme une variable structurelle mais il apparaît que cette variable doit subir certaines transformations pour correspondre à la réalité de la gestion des effluents par les agriculteurs. D'une part, l'agriculteur peut disposer de surfaces d'épandage dans son exploitation (s'il est aussi CMO) ou hors de son exploitation, chez des voisins ou relations. Si la présentation de plans d'épandage est une obligation légale pour installer ou agrandir certains élevages, on constate que:

- Des plans informels existent même chez ceux qui ne sont pas aux normes : il s'agit le plus souvent d'arrangements à l'amiable avec des voisins, qui « prêtent » leurs terres, notamment, pour accueillir du lisier en surplus. Ces plans sont plus ou moins bien formalisés, le plus souvent verbaux, et de stabilité interannuelle très variable.
- Même dans le cas de plans légaux, la pratique n'est pas toujours exactement conforme (apparition de surfaces d'accueil ne figurant pas dans les plans et inversement).

Il faut donc demander aux agriculteurs, pour chaque campagne culturale, de quelles surfaces il disposent, à l'intérieur comme à l'extérieur de leur exploitation. La disponibilité de ces surfaces extérieures peut être accompagnée de certaines restrictions émises par le prêteur concernant :

- la nature des effluents épandables (les règles d'attribution des effluents aux cultures peuvent être différentes entre le prêteur et l'agriculteur considéré),
- les périodes d'épandage, les quantités épandues, les chantiers d'épandage.

La qualification des surfaces extérieures doit donc permettre de saisir toutes ces éventuelles restrictions. Il existe également des restrictions importantes sur les terres que l'exploitant possède en propre ou sur les terres prêtées qui concernent l'aptitude à l'épandage. En effet, une grande partie des surfaces ne se prête pas au passage d'un tracteur, l'épandage ne peut s'y réaliser que manuellement. Il est donc nécessaire de demander à l'agriculteur les surfaces réellement utilisées pour l'épandage, quelles que soient les modalités, et non seulement celles de l'exploitation (qui comprennent souvent les friches et ravines).

D'autre part, on pourrait penser que dans une exploitation CMO ou PMO/CMO les surfaces d'épandage sont égales à la somme des surfaces épandables, déclarées pour chaque culture (variable structurelle). Or, ce n'est pas aussi simple, et il faut introduire des variables supplémentaires pour deux catégories de cultures : les semi-pérennes et les cultures maraîchères.

IV.2.2. Des surfaces déclarées aux surfaces épandables

Cultures pérennes et semi-pérennes

Ces cultures donnent lieu à des replantations à dates variées qui se traduisent, sur le plan de la gestion des effluents, par des règles différentes d'attribution des effluents aux cultures (cf. ci-dessus) et de positionnement des apports.

Pour une surface de culture déclarée épandable en variable d'entrée, la proportion replantée est fonction de la décision que l'agriculteur prend concernant la durée de la culture. On a donc, à l'échelle du cycle annuel, pour toute culture semi-pérenne :

(Surface en Production) = [Surface déclarée] – [Surface en Replantation]

avec : *(Surface en Replantation) = [Surface déclarée] / [Durée de culture]*

On a donc une nouvelle variable à introduire, la durée de culture, et deux variables calculées : la surface en production et la surface en replantation. La durée de culture peut être demandée par culture semi-pérenne à l'agriculteur. On peut cependant proposer des valeurs par défaut pour cette variable (Tableau 7).

Tableau 7. Valeurs par défaut de la variable durée de culture en pérennes et semi-pérennes.

Culture pérenne ou semi-pérenne	Durée de culture	Remarques
Canne à sucre	7 ans	5 ans si forte infestation de ver blanc
Chloris, cannes fourragères, graminées tempérées	5 ans	Jusqu'à 8 ans ; le renouvellement peut être fait par semis direct pour éviter le retournement.
Kikuyu	15 à 20 ans	Voire davantage si la prairie ne se dégrade pas
Banane	Très variable	Jusqu'à 10 ans pour certaines variétés, le remplacement des souches s'effectuant au fur et à mesure de la mortalité ; comme pour l'ananas, le renouvellement peut avoir lieu tous les ans dans les systèmes intensifs (type Antilles)
Agrumes	15 ans	Voire plus ?
Ananas	2 ans	Il existe de l'ananas en culture annuelle
Autres fruitiers	15 ans ou plus selon les fruitiers	Dépend de la productivité des arbres et des mortalités ; généralement, on remplace les pieds au fur et à mesure

Remarque : *lorsque le renouvellement est fait au fur et à mesure de la mortalité des plants, ou pour des durées de culture supérieures à 10 ans, on ne considère pas de surfaces en replantation.*

Cultures maraîchères

En maraîchage, les cycles de production courts peuvent permettre de pratiquer une même année, sur une même parcelle, plusieurs cycles d'une même culture ou de cultures différentes. Du point de vue des effluents d'élevage on pourra ainsi avoir plusieurs épandages au cours d'une même année. Il peut être alors utile de raisonner en terme de « surface développée » plutôt que de ne considérer que la surface déclarée de la parcelle. On détermine cette surface développée comme suit :

- dans le cas d'une succession de plusieurs cycles d'une même culture sur une même parcelle de superficie totale S pendant une période T, la surface développée Sd est égale au cumul des surfaces $s_i \leq S$ occupées à chaque cycle au cours de T (soit le produit de S par le nombre de cycles au cours de T si pour tout i, on a $S = s_i$; $i = 1, \ldots, n$ est le nombre de cycles au cours de T);
- dans le cas d'une succession faisant intervenir différentes cultures $j = 1, \ldots, m$, on effectue le même calcul pour chacune d'elles : $Sd_j = \sum_i s_{ij}$ (cela revient, dans le cas où l'on a coexistence de plusieurs cultures sur une même parcelle, à considérer des sous-parcelles).

Remarques :

1. On reste ici dans le cadre réunionnais (prédominance de cultures semi-pérennes et maraîchères) et à l'échelle du traitement annuel de la gestion des effluents. La notion de succession de cultures pourrait être

utilisée dans des contextes de cultures à cycle annuel où l'on voudrait analyser pluri-annuellement la gestion des effluents.

2. Compte tenu de la très grande variabilité des pratiques de succession des cultures maraîchères sur une parcelle et de nombre de cycles annuels possibles pour une même culture, nous ne pouvons donner ici de tableau par défaut concernant ces variables. Cependant, ces décisions dépendent, pour partie, des conditions climatiques précises liées surtout à l'orientation géographique (côte Est ou Ouest) et à l'altitude. On pourrait construire par petite région maraîchère des données expertes concernant au moins les durées de cycle des principales cultures.

Une fois déterminées les correspondances effluents-cultures et les surfaces d'épandage, le processus décisionnel d'épandage lui-même peut-être considéré. Comme pour toute opération culturale (Aubry, 1995 ; Aubry *et al.*, 1998), on peut représenter les décisions de l'agriculteur selon trois volets partiellement interdépendants : (i) les décisions de positionnement temporel de l'opération, (ii) les décisions de chantiers de l'opération, et comme l'épandage met en œuvre un intrant, (iii) les décisions relatives aux quantités de cet intrant.

IV.3. POSITIONNEMENT TEMPOREL DES EPANDAGES

IV.3.1. Constats

Lorsqu'on interroge les agriculteurs sur la façon dont ils déterminent les dates d'épandage des effluents, on obtient des réponses qui, généralement, font montre d'une forte volonté de planification, même si les réalisations effectives sont soumises à des aléas partiellement intégrés dans le processus décisionnel.

Voici le type d'informations que l'on obtient :

- Canne à sucre en production : *« j'épands* après *la coupe de la parcelle mais avant le bourgeonnement, si je passe avec la tonne à lisier, pour ne pas écraser les pousses », « j'attends d'avoir assez de surface libre pour épandre plusieurs tonnes à lisier », « une fois que toutes les coupes sont finies», « si c'est avec la tonne à lisier, pas possible de passer s'il a plu dans les 3 jours avant, avec le coude ou le tuyau, on peut », « pas après le 15 mars sinon, ça fait baisser le taux de sucre »*,
- Fourrage : *« Après la récolte de la parcelle, et dans la semaine qui suit », « après chaque coupe en saison des pluies mais une coupe sur deux entre mai et novembre »*,
- Maraîchage type1 : *« 15 jours avant la plantation »*,
- Maraîchage type2 : *« au trou à la plantation »*.

IV.3.2. Tentative de formalisation

A partir des informations de ce type collectées lors des enquêtes, on peut proposer une formalisation conforme aux formalismes généraux du positionnement d'une opération culturale, mais adaptée à la nature de celle-ci. On constate que le raisonnement des positionnements temporels des épandages se fait chez l'agriculteur par couple (Effluent, Culture). C'est donc par couple qu'on propose de renseigner dans l'exploitation les variables et règles de décision suivantes.

Intervalle de temps (IT)

Cette variable définit les périodes de l'année au cours desquelles l'épandage selon un couple (Effluent, Culture) est possible (et impossible en dehors d'elle). Par exemple, de nombreux agriculteurs considèrent qu'il ne faut pas apporter de lisier sur la canne après le 15 mars car un tel apport serait susceptible de compromettre la teneur en sucre (fonction du stress nutritionnel et hydrique subi par la plante). Comme on apporte au plus tôt après la coupe (débutant en juillet) on peut définir IT dans ce cas par (1 juillet, 15 mars).

Evénement cultural déclenchant l'action d'épandage (EDA)

Cette variable traduit le fait que l'agriculteur raisonne très généralement la date d'épandage par rapport à une autre opération à faire sur la culture considérée : on apporte l'effluent après une coupe ou une récolte, avant une plantation, etc. Notons que l'action d'épandage peut, selon les cas, *précéder* ou *suivre* un tel événement. A cette variable est associée une règle d'enchaînement reliant dans le temps les deux opérations. Cette règle d'enchaînement prend la forme : *Pour tout* (E_j, C_i) *Si* $(t > EDA_i)$, *Alors (Apport* (E_j, C_i)*)* (ici, dans le cas où l'EDA précède l'épandage). Il peut y avoir plusieurs EDA pour une même culture au cours d'une année : par exemple, le fourrage est généralement coupé 5 à 10 fois par an.

Il peut exister des cas où l'apport n'est pas dépendant d'un EDA. On l'a constaté sur la banane où les apports de MO sont sans relation avec les récoltes réalisées tout au long de l'année (on n'épand cependant pas pendant qu'on récolte) ; c'est aussi le cas, évidemment, pour les intercultures et friches.

Délai d'étalement (DE)

Par rapport à un EDA donné, cette variable permet de déterminer l'intervalle *(date de début au plus tôt, date de fin au plus tard)* de l'épandage correspondant. Le DE tient compte du rythme de développement de la culture, de contraintes pratiques ou d'effets attendus de l'apport d'effluent. Par exemple : on peut épandre juste après une coupe de canne à sucre, mais il faut épandre avant le bourgeonnement afin de ne pas écraser les jeunes pousses

avec le tracteur ; on épand juste après une coupe de fourrage ou dans la semaine qui suit car, sinon, on craint de récupérer des résidus dans la prochaine coupe ; on apporte le fumier au moins une dizaine de jours avant plantation pour qu'il ait eu le temps d'évoluer, etc. Chaque EDA est ainsi assorti d'un délai d'étalement de durée éventuellement variable selon la période de l'année et les modalités de chantier. Les DE sont nécessairement inclus dans l'intervalle de temps IT. A ces DE est associée une règle de déclenchement qui s'exprime de la façon suivante : *Suite à EDA_i, si t appartient à DE_i, alors (apport possible à t), sinon (report d'apport).*

Nombre d'apports (NSA)

Pour les cultures donnant lieu à plusieurs EDA par cycle, il faut décider si chaque EDA est accompagné ou non d'un épandage. Les agriculteurs peuvent, en effet, décider de ne faire un apport qu'une fois sur deux (par exemple pour le fourrage) ou de regrouper les apports sur la sole cultivée en une ou deux fois alors que les différentes parcelles de la sole ont donné lieu à plusieurs EDA (par exemple pour la canne). On a donc : NSA ≤ nombre d'EDA. Cette variable est importante pour les cultures recevant de nombreux apports par an (fourrages, bananes) que ces apports soient ou non sous la dépendance d'EDA.

NB : la définition du NSA suppose préalablement connues certaines variables relatives à la conduite de la culture (nombre de coupes par an, par exemple) qui doivent être renseignées comme variables structurelles.

Délai entre apports (DEA)

Il s'agit de l'intervalle minimum à respecter entre apports successifs (notamment lorsqu'il s'agit de cultures à cycles courts). Les raisons peuvent tenir aux caractéristiques de l'effluent (délai de décomposition, par exemple), de la culture (risque de contamination par des éléments indésirables) ou à d'autres raisons (prix de la MO, par exemple). La combinaison des deux variables (NSA, DEA) permet de situer dans le temps la position prévue de chaque apport en cas d'apports multiples.

Enfin, le positionnement temporel d'un apport dépend des éventuelles autres opérations concomitantes à réaliser sur la culture considérée ou sur d'autres cultures. Par exemple, pendant la période de coupe de la canne, on peut avoir à faire des épandages sur les parcelles déjà récoltées et la récolte de parcelles qui ne le sont pas encore. Des règles d'arbitrage permettent d'établir un ordre de priorité entre activités concurrentes. Ces règles sont à demander à l'agriculteur compte tenu de la variabilité des situations possibles. Cependant, généralement, les épandages d'effluents sont non prioritaires sur les opérations de récolte ou d'implantation (sauf s'il y a urgence à vidanger les stocks pour les effluents liquides). On considérera que si on ne définit pas de règles d'arbitrage entre opérations c'est que l'agriculteur a les moyens, en main d'œuvre et en matériel, de mener ces opérations simultanément.

IV.3.3. Valeurs par défaut

Lorsqu'elle sont nécessaires (par exemple, si l'on n'a qu'une parcelle de canne avec une seule coupe, les variables NSA et DEA ne sont pas à renseigner), les enquêtes montrent qu'on obtient généralement sans difficulté majeure les valeurs réelles correspondant à l'exploitation. Malgré cela, on donne dans le Tableau 8 des valeurs ou des règles par défaut, traduisant ainsi le caractère commun de certaines contraintes pour les exploitants.

Tableau 8. Variables et règles de positionnement des apports par défaut.

Culture	EDA	Règle d'enchaînement Apport / EDA	Délai d'étalement par rapport à EDA (DE)	Nb. d'apport (NSA)	Délai min. entre apports (DEA)
Canne à sucre	Coupe	Apport après EDA	(+1j, +1mois)* (+1j, fin mars)*	1 à 2	3 mois
Fourrage	Coupes	Apport après EDA	(+1j, +15j)	nb coupes	1 mois
Banane	-	-	-	12	1 mois
Ananas	Plantation	Apport avant EDA	(-2mois, -0j)	1	
Replantation	Plantation	Apport avant EDA	(-1mois, -0j)	1	-
		Apport après EDA (lisier de porc)	(+1 mois, +3 mois)	1	
Maraîchage type 1 + curcuma	Plantation	Apport avant EDA	(-1mois, - 0j)	1	-
Maraîchage type 2	Plantation	Apport = EDA	(0j)	1	-

** Délai variable selon la modalité d'apport : il ne peut être réalisé à la tonne à lisier qu'avant le bourgeonnement de la canne (délai : 1 mois environ après la coupe). En toute rigueur, il dépend de la saison, et pourrait être généré par un modèle biophysique. Si l'apport est réalisé sans entrée d'engin dans la parcelle (tuyau, coude), l'apport peut avoir lieu plus tard. La limite de fin mars est cependant impérative sur canne coupée, car un apport plus tardif risque de limiter la teneur en sucre qui est fonction du stress subi.*

Les règles d'arbitrage entre opérations utilisées par défaut sont :

(Récolte(culture_i)) Prioritaire sur (Apport(culture_i')),
(Apport(maraîchage)) Prioritaire sur (Apport(ananas)) Prioritaire sur (Apport(fourrage)) Prioritaire sur (Apport(canne à sucre)) Prioritaire sur (Apport(banane)) Prioritaire sur (Apport(fruitiers)).

IV.3.4. De la planification à la réalisation : règles de faisabilité liées au climat

La planification trace un cadre souhaité pour les positionnements temporels de toute opération, mais la réalisation effective dépend aussi de facteurs aléatoires (Figure 7).

Le facteur aléatoire commun à toute opération culturale est le climat, et on constate chez les agriculteurs, pour la gestion des effluents comme pour d'autres opérations, l'existence de règles d'adaptation qu'on appelle *règles de faisabilité*. D'autres aléas peuvent intervenir liés aux pannes de matériel mais ceux-ci donnent rarement lieu à des règles d'ajustement préalablement définies. D'autre part et d'une manière spécifique à la gestion des effluents liquides (lisier), la réalisation effective des apports est aussi sous la dépendance d'un autre facteur difficile à planifier qui est l'urgence à déstocker compte tenu des risques de débordement des fosses : c'est ce que l'on appelle le pilotage par les stocks. Nous reviendrons § IV.6 sur ce mode particulier de gestion des effluents liquides.

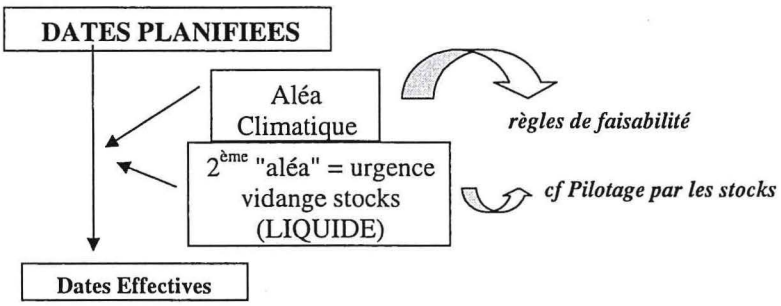


Figure 7. De la planification des dates aux dates effectives.

Concernant le climat, les agriculteurs expriment des règles déterminant la possibilité d'épandage en fonction de la pluviométrie, souvent par appréciation qualitative de la portance du sol. Ces règles sont en interaction avec le type de chantier d'apport, selon que celui-ci nécessite ou non le passage d'un tracteur sur la parcelle (cf. ci-après). La portance du sol est souvent appréciée par rapport à une quantité de pluie tombée pendant une durée donnée. Les règles peuvent être exprimées par un certain nombre de jours d'attente avant de pouvoir pénétrer dans une parcelle après une pluie. Sachant que cette quantification est très floue et difficilement exprimable par l'agriculteur on peut proposer des règles du type : *Si (pluie(j) > 5 mm) et (pluies(j-3,j-1) > 10 mm), Alors attendre 2 jours.* On pourrait également utiliser des références biotechniques pour déterminer les jours praticables selon le type de sol, sa couverture (sol nu, mulch, prairie) et le travail du sol réalisé.

A noter que pour le maraîchage de cycle 1, quoiqu'il arrive, on fera l'apport de MO. Les ajustements seront alors de repousser la date de plantation, de modifier la modalité d'épandage (manuel au lieu de mécanique) ou même de modifier l'assolement (on ne fera pas tel type de culture ou on en fera une réputée moins exigeante en MO) si l'approvisionnement en MO n'a pu avoir lieu avant une date limite de plantation (cas des Hauts de l'Ouest par exemple ; cf. Vimeux, 1998).

IV.4. MODALITES DE CHANTIER D'EPANDAGE

L'agriculteur planifie les modalités de chantier que peut prendre une opération d'épandage, c'est à dire les combinaisons [matériel × traction × hommes] que l'on peut constituer sur l'exploitation pour réaliser cette opération. Il existe souvent plusieurs modalités de chantier possibles pour un même effluent. Des règles permettent d'attribuer les modalités de chantier aux cultures et aux parcelles en fonction de certains critères basés sur des caractéristiques permanentes ou conjoncturelles.

IV.4.1. Les effluents liquides

Pour les effluents liquides, on a le plus souvent deux modalités possibles dans les exploitations :

- L'une, classique, consiste à épandre avec une tonne à lisier de capacité donnée (variable structurelle) : le chantier est donc de type [Tonne X ; Tracteur Y ; Opérateur Z]. L'application de cette modalité implique le passage de l'attelage sur le champ. On l'appelle *modalité Tonne*.
- Une autre modalité qui ne nécessite pas le passage de l'attelage sur le champ consiste à brancher un coude ou un tuyau à la sortie de la tonne, celle-ci restant en bordure de champ. Avec l'utilisation du coude, l'attelage se déplace le long d'un chemin de bordure ; le lisier s'écoule à partir d'un point haut, sa répartition est alors peu uniforme. Avec l'utilisation du tuyau, un opérateur se déplace sur la parcelle pour l'arroser avec le tuyau, un second opérateur restant proche de l'attelage pour les manœuvres (ouverture, fermeture, déplacement de l'attelage) ; la répartition est donc assez bonne, voire meilleure qu'avec l'épandage à la

tonne dans le cas de parcelles à topographie accidentée. Pour simplifier, on appelle ces deux cas *modalité Tuyau* [Tonne X ; Tracteur Y ; Tuyau ; Opérateurs Z, Z'].

La modalité Tuyau sert à épandre du lisier dans quatre types de situations :

(i) surfaces trop pentues pour le passage d'un attelage (parcelle généralement implantée en culture semi-pérenne et conduite manuellement) ;

(ii) cultures ne permettant pas le passage d'un attelage (bananes, fruitiers, chouchou) ;

(iii) périodes trop pluvieuses (cf. règles de faisabilité) où la nécessité d'épandre (risque de débordement des fosses, rapprochement des dates limites de IT) implique de recourir à un autre moyen que l'attelage ;

(iv) besoin d'épandage apparaissant au delà des délais d'étalement de la modalité Tonne (par exemple, après le bourgeonnement de la canne).

On a donc des règles d'attribution des modalités aux situations caractérisées par les attributs *(Culture, Effluent, Parcelle, Date)* qui s'expriment sous la forme :

Si (Situation Type(i) ou (ii) ou (iii) ou (iv)), Alors (Modalité Tuyau) Sinon (Modalité Tonne)

IV.4.2. Les effluents Solides

Pour les effluents solides, il existe aussi plusieurs modalités possibles qui dépendent de l'effluent et de la situation d'épandage.

La modalité classique est l'utilisation d'un épandeur mécanique à fumier, de capacité variée (variable structurelle), qui nécessite le passage d'un attelage sur le champ. Le chantier est du type [Epandeur X ; Tracteur Y ; Opérateur Z]. Le temps d'épandage est fonction de la capacité de l'épandeur et de son débit.

D'autres modalités existent cependant :

- Avec passage sur le champ : épandage manuel à partir d'une remorque tractée si l'exploitant ne possède pas d'épandeur ; modalité de type [Remorque X ; Tracteur Y ; Opérateurs Z, Z'],
- Sans passage sur le champ : épandage manuel (fourche, brouette) à partir de tas constitués dans le champ ou sur sa bordure par déchargement de camion ou de remorque, épandage à la main à partir d'un sac, etc.

Ces modalités se rencontrent fréquemment en maraîchage, sur de petites surfaces, notamment lorsqu'il n'y a pas de travail du sol préalable (maraîchage type 2). L'épandage à la fourche et à la brouette se rencontre aussi en maraîchage de type 1 ou sur cultures replantées (par exemple, épandage au sillon pour la canne). Le temps de travail est très variable (à demander à l'agriculteur).

Si plusieurs modalités sont applicables sur une exploitation, il existe nécessairement des règles d'attribution des modalités aux situations. Il est cependant difficile de donner des règles par défaut compte tenu de la grande variabilité des situations possibles. La seule constante entre exploitations est la règle générale suivante :

Si (Praticabilité impossible), Alors (Modalité sans passage de tracteur sur le champ).

Rappelons que les règles de faisabilité, notamment celles liées au climat, dépendent des modalités. Les exigences en matière de portance du sol, par exemple, sont beaucoup plus fortes pour des modalités impliquant un passage de tracteur sur le champ que pour des modalités sans passage.

IV.5. MODALITES DE DOSES D'APPORT

Autant la prévision des dates d'épandage ou des chantiers semble relativement claire pour les agriculteurs et peut être facilement formalisée, autant la prévision des doses d'effluents à épandre paraît, pour eux, beaucoup moins évidente.

IV.5.1. Constats

Interrogés sur les façons de déterminer les doses qu'ils décident d'épandre sur les parcelles, les agriculteurs ont diverses réactions, non exclusives les unes des autres :

- (rarement) ils ne connaissent pas du tout les doses épandues : c'est parfois le cas chez des CMO qui accueillent du lisier d'un voisin et n'ont pas connaissance des quantités mises chez eux par celui-ci (cas où l'épandage est réalisé par l'éleveur lui-même) ;
- ils font référence à une contrainte d'un module décisionnel d'amont : contrainte de stockage en effluent liquide *« J'épands tant qu'il faut pour vider la fosse »* ou de coût pour un approvisionnement extérieur (cas notamment avec un effluent solide en maraîchage) : *« J'épands 2 camions pour ne pas dépenser plus de x Francs à l'ha »* ;
- ils évoquent un indicateur qualitatif : pour du fumier *« Il faut qu'il y en ait au moins sur toute la surface et environ telle épaisseur »*, pour du lisier *« ... jusqu'à ce que le tracteur patine »* ou *«... tant que ça ne coule pas en bas de la parcelle »* ; ce type de réaction est fréquent de la part des éleveurs produisant du lisier et rencontrant des problèmes de surfaces d'accueil ;
- une quantité minimale de travail : « On ne sort pas le tracteur pour moins de 2 tonnes à lisier à épandre » ;
- un effet attendu de l'effluent : *« Je mets plus de lisier en saison sèche pour irriguer »*.

IV.5.2. Tentative de formalisation

Il ressort de ces constats deux choses importantes :

1. La quantité épandue est rarement l'objet d'une planification en tant que telle ; elle résulte plutôt de décisions de pilotage par rapport à des contraintes de temps, d'organisation du travail, de prix (lorsque la MO est achetée), d'urgence de vidange, de praticabilité des parcelles, etc.
2. Il n'y a pas de raisonnement par rapport à la « demande » des cultures en référence à des besoins nutritionnels. Ceci est capital car contraire aux hypothèses implicitement faites au début de ce travail et justifie donc pleinement qu'on évalue l'impact agronomique et environnemental de comportements peu raisonnés par rapport à leurs conséquences.

Il est donc rare qu'il y ait une expression directe de doses par l'agriculteur, sauf en maraîchage *(« Je mets 20 tonnes/ha de fumier à la plantation »)* où, même, la détermination des doses n'est pas toujours très claire. Un biais peut exister dans les enquêtes, dans le sens ou l'agriculteur, si on le questionne sur la dose apportée à l'hectare, a tendance à donner les recommandations des organismes de développement (fiches de la Chambre d'Agriculture) qui peuvent, en fait, être très éloignées de ses pratiques. Il est dès lors plus judicieux de demander les quantités épandues parcelle par parcelle, même si les réponses obtenues sont imprécises (souvent exprimées en nombre de remorques ou de tonnes à lisier).

On peut cependant proposer un ensemble de trois variables permettant de rendre compte pour chaque couple (Effluent, Culture) de ces processus décisionnels très flous : *Quantité minimale, Quantité maximale, Quantité visée* (facultative) pour lesquelles des valeurs à prendre par défaut ont pu être déterminées à partir des enquêtes réalisées (Tableau 9).

Notons que cette « indécision » sur les doses à apporter renvoie à la difficulté de connaître les valeurs fertilisantes des effluents. Nous avons perçu une demande à ce sujet et à propos des besoins des cultures et des règles de détermination des doses (que nous ne sommes pas, pour l'instant, en mesure de proposer). Ainsi, le Module Epandage fait-il appel à de nombreuses variables de gestion et règles de décision représentées schématiquement par la Figure 8.

Tableau 9. Valeurs par défaut des doses d'effluent apportées à l'hectare par apport.

Culture	Effluent	Quantité visée	Quantité mini	Quantité maxi
Canne à sucre, fourrage, ananas, fruitiers	Lisier porcs ou bovins	40 m^3	10 m^3	60 m^3
Banane	Lisier porcs ou bovins	50 m^3	10 m^3	80 m^3
Replantation	Ecume,	10 t	5 t	15 t
	Fumiers (bovins, porcs, volailles)	20 t	10 t	40 t
Maraîchage type 1	Fumier de volaille ou de Bovins, compost	15 t	5 t	25 t
Maraîchage type 2	Terreau	2 t	1 t	4 t
	Compost	5 t	1 t	8 t
Interculture, friche		-	10 m^3	80 m^3

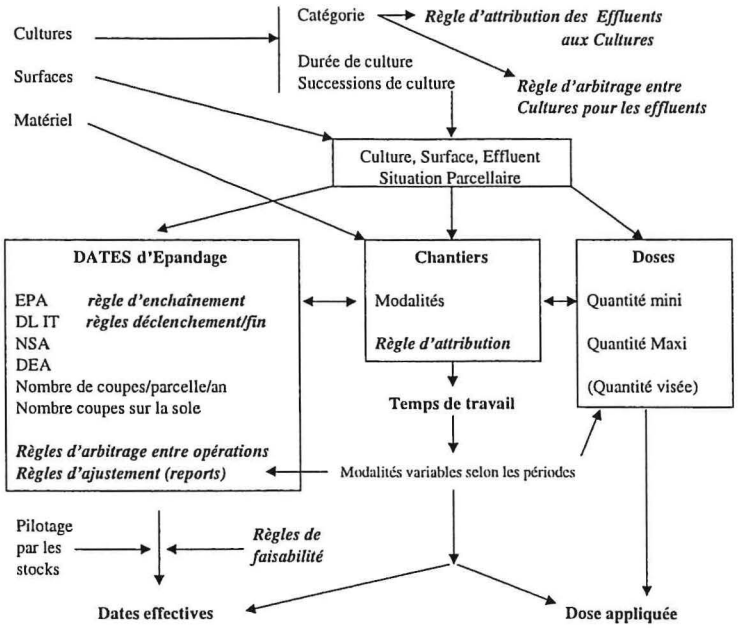


Figure 8. Schématisation des relations entre règles et variables du module « Epandage ».

IV.6. PILOTAGE PAR LES STOCKS

Pour les effluents liquides il arrive que la nécessité de vidanger les stocks dont les capacités maximales sont atteintes rende nécessaire un épandage d'« urgence ». Il s'agit alors de trouver des surfaces d'accueil pour cet apport. Nous avons vu dans le module « Evacuation-Stockage » qu'il existe pour les agriculteurs en filière liquide une variable « Seuil de débordement » qui agit comme déclencheur d'apport d'urgence. Nous appellerons « Pilotage par les stocks » les décisions prises dans ces situations d'urgence ainsi que celles qui tentent d'éviter de telles situations.

IV.6.1. La gestion des situations d'urgence

On constate dans les exploitations que ces situations sont vécues comme des contraintes fortes et que des décisions sont prises pour éviter d'y être confronté (cf. ci-après). Ces situations se rencontrent surtout entre fin mars et juillet où l'on ne pratique pas d'épandage de lisier sur la canne à sucre à cause du risque de limitation du taux de sucre (la canne est la culture d'accueil de lisier la plus fréquente). C'est pendant cette période que les risques d'épandage de lisier sur friches ou ravines sont les plus élevés.

On comprend dès lors l'intérêt manifesté par de nombreux PMO en filière liquide pour des cultures pouvant accueillir du lisier pendant la majeure partie de l'année ou, au moins, de fin mars à juillet : fourrages, bananes, intercultures...

Lorsqu'il y a une situation d'urgence à épandre, on constate cependant que les agriculteurs, qu'il s'agisse de leurs propres surfaces ou de celles des autres, tentent au maximum de respecter certaines règles du module « Epandage » surtout celles relatives aux dates : EDA, intervalles de temps, délais d'étalement et délais entre apports. C'est cette dernière variable qui peut être la plus forcée. Ils adaptent leur pratique selon trois volets décisionnels :

- en priorité la modalité de chantier : on passe d'une modalité Tonne à une modalité Tuyau pour contourner la contrainte de Délai d'étalement ou les règles de faisabilité ;
- les doses : les quantités maximales annoncées sont alors appliquées, voire dépassées ! (on hésite moins à épandre trop qu'à déroger aux contraintes de dates) ;
- les surfaces d'épandage : on mobilise le plus possible le « plan d'épandage » plus ou moins formalisé dont on dispose et on peut faire appel exceptionnellement à des surfaces d'accueil extérieures (voir module « Import-export »).

La pratique d'épandage illicite « à la ravine » semble donc être un dernier recours.

IV.6.2. La gestion anticipée pour éviter les situations d'urgence

On constate que les agriculteurs essaient d'éviter le plus possible de se retrouver dans une situation d'urgence. Plusieurs moyens de gestion semblent mobilisés pour cela, certains souhaitables d'autres beaucoup moins :

- les règles de vidange des stocks peuvent être pensées pour éviter le risque de débordement en choisissant des règles de déclenchement d'évacuation très souples ou en fixant pour seuil d'« alerte » une valeur suffisamment basse (module « Evacuation-Stokage ») ;
- le choix de fortes capacités de stockage (souvent exprimées en nombre de mois) ou la priorité donnée à la couverture des surfaces drainant les pluies sont des mesures très efficaces, mais coûteuses, pour anticiper les risques (mesures structurelles) ;
- augmentation anticipée des doses épandues (module « Epandage ») ; l'objectif sera, par exemple, de vider la totalité des fosses avant la fin de la période d'épandage sur canne (décembre) de manière à maximiser la capacité de stockage durant l'inter-campagne sucrière ;
- recherche anticipée de nouvelles surfaces d'accueil proches ou décision de faire d'autres cultures si la situation de l'exploitation le permet (module « Epandage ») ;
- augmentation du nombre d'apports lorsque les cultures le permettent ;
- transformation des effluents (actuellement encore peu pratiquée à la Réunion bien que plusieurs projets soient à l'étude) qui peut être vue comme une solution d'anticipation aux risques de débordement.

Ainsi, le pilotage par les stocks montre l'existence chez les agriculteurs de règles d'urgence et d'un ensemble de décisions d'anticipation pour limiter le risque d'occurrence de situations vécues comme perturbatrices. Une conclusion générale s'impose : la vidange à la ravine devient aujourd'hui assez rare, même dans les zones à très faible surface épandable et, de ce point de vue, la situation a favorablement évolué depuis une dizaine d'années. Mais le problème majeur est l'épandage de doses très importantes d'effluents sur les cultures, notamment de lisier sur canne à sucre. Ce phénomène très général rend encore plus pertinente l'évaluation des impacts agronomiques et environnementaux de la gestion des effluents.

V. MODULE « TRANSFORMATION »

Pour valoriser le plus possible les effluents d'élevage produits, il est nécessaire que ceux-ci soient compatibles avec une utilisation par les cultures. Or, ce n'est pas toujours le cas. On constate par exemple dans certaines régions, une production importante d'effluents sous forme de lisiers, alors que les principales cultures demandent un effluent solide. Ce contexte incite donc à rechercher des méthodes de transformation, mises en œuvre de façon individuelle ou collective, permettant de réaliser une meilleure adéquation effluent/culture. Un autre objectif de la transformation, obtenu souvent concomitamment, est de réaliser un traitement permettant de réduire la charge azotée. Cet objectif peut s'avérer nécessaire dans les zones de forts excédents (Grand-Ilet, par exemple).

Il existe de nombreux types de procédés de traitement-transformation des effluents d'élevage. Dans le contexte de l'élevage réunionnais, la méthode la plus utilisable est le compostage pour les fumiers et l'imprégnation-compostage sur supports carbonés pour les lisiers. Au niveau collectif, d'autres procédés plus complexes sont envisageables, mais ils nécessitent des installations souvent coûteuses.

Il nous a semblé intéressant d'introduire cette possibilité de transformation pour simuler la gestion des effluents : si quelques exploitations réunionnaises seulement l'utilisent, elle peut constituer une alternative dans de nombreux cas. Ce module répond donc à cette préoccupation.

On distinguera deux cas d'utilisation de ce module : le compostage par retournement d'un fumier (de bovins ou volailles) et l'imprégnation-compostage sur support carboné pour le lisier. Dans le premier cas, la gestion concerne l'apport sur la plate-forme de compostage du fumier, les retournements éventuels (manuels ou mécaniques) et l'enlèvement de la plate-forme. Dans le second cas, la gestion concerne l'apport préalable d'un support carboné (celui-ci peut être un effluent sec comme le fumier de volailles), l'épandage fractionné de lisier sur ce support, les retournements qui suivent chaque épandage et l'enlèvement de la plate-forme.

Pour l'apport d'effluent ou de support, les règles sont empruntées au module « Epandage » ; on considère la plate-forme comme une *unité de consommation*, au même titre que les cultures. Pour l'évacuation de l'effluent produit, les règles sont comparables à celles utilisées dans le module « Evacuation-stockage » et on peut considérer que la plate-forme de compostage est une *unité de production*, au même titre que les élevages. Les actions de retournement relèvent directement du module « Transformation ».

Sur le plan biophysique, la transformation s'accompagne de pertes en éléments fertilisants (essentiellement l'azote), en masse et en volume, qui ont des répercussions sur la gestion de l'épandage du produit obtenu.

V.1. DECLENCHEMENT ET DUREE DES OPERATIONS

Trois phases sont distinguées dans la conduite du compostage : l'*imprégnation* (le cas échéant), la *fermentation*, la *maturation*. Classiquement, on compte au minimum 6 semaines de présence sur la plate-forme qui correspondent à la phase de fermentation (4 semaines) et au début de maturation (2 semaines). Si une maturation plus complète est souhaitée sur la plate-forme, on peut augmenter le délai jusqu'à 3 mois (Figure 9). Au delà, le compost est soit utilisé, soit entreposé à l'extérieur sur une autre plate-forme ou sur le champ. Dans le cas de l'imprégnation de lisier sur support carboné, une phase d'imprégnation allonge le temps de séjour. Chez les quelques éleveurs de la Réunion qui la pratique, on compte environ 4 à 6 apports de lisier espacés d'une semaine. Selon le temps de maturation sur la plate-forme, la durée de présence d'un tas (ou andain) sera donc de 6 à 12 semaines dans le cas du compostage de fumier et de 10 à 18 semaines pour l'imprégnation-compostage.

Le fumier ou le support carboné est apporté en début de cycle de compostage à condition qu'un emplacement soit libre. Le déclenchement de l'apport de support en provenance de l'extérieur n'a pas de règles précises, si ce n'est l'existence d'un approvisionnement antérieur. Par contre, le déclenchement de l'apport de fumier produit sur l'exploitation (bovin ou volaille) est réalisé au niveau du module « Evacuation-stockage », suivant les règles d'attribution aux différents modules d'utilisation décrits précédemment ; par exemple, le fumier de volailles est évacué des bâtiments après chaque cycle d'élevage. Cet apport sur la plate-forme peut être considéré comme un EDA pour les opérations suivantes : les retournements dans le cas du fumier, les épandages de lisier chaque semaine suivis immédiatement de retournements s'il y a une phase d'imprégnation (dont la durée dépend du nombre d'apports : 4 à 6).

La règle de déclenchement de l'enlèvement du compost produit dépend de la durée choisie pour la maturation sur plate-forme (2 à 8 semaines) et est liée à une utilisation déclenchée par les modules « Epandage » ou « Import-export ». La durée de séjour ainsi déterminée permet de connaître le nombre de cycles annuels possibles sur la plate-forme.

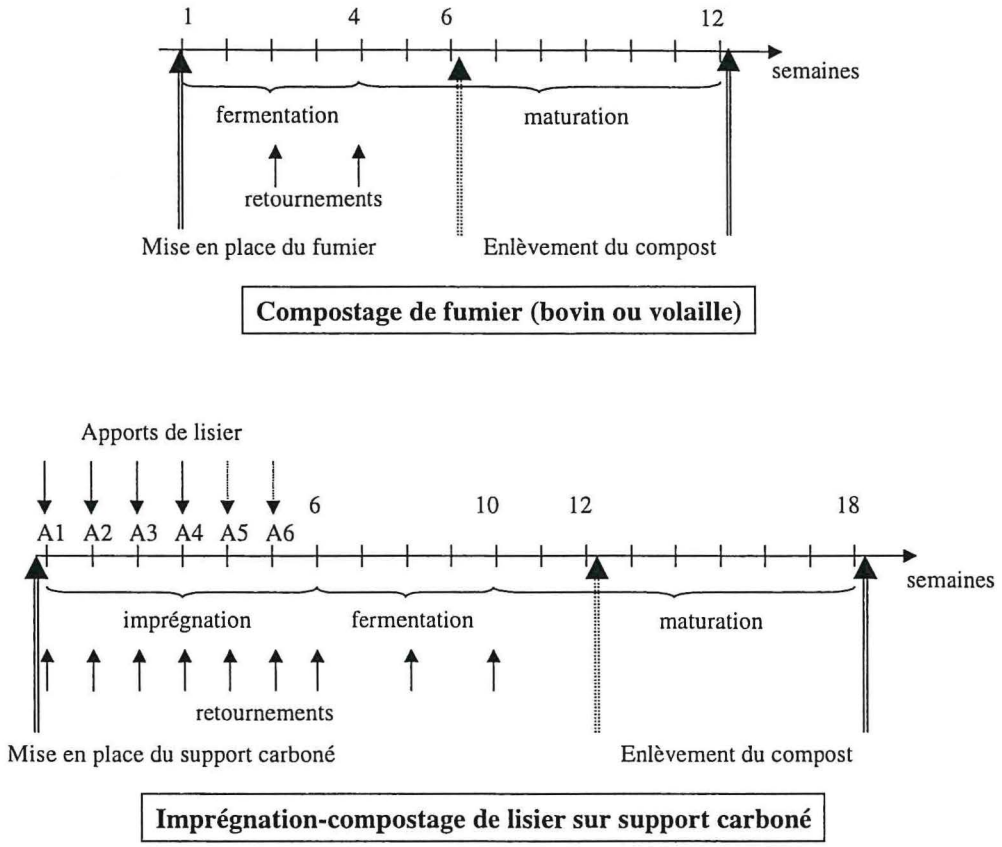


Figure 9. Position des interventions dans les deux cas de transformation étudiés.

V.2. ATTRIBUTION DES DOSES : QUANTITES D'EFFLUENT « EPANDUES » SUR LA PLATE-FORME

Dans le cas du fumier produit sur l'exploitation pour être composté (avec ou sans imprégnation de lisier pour le cas du fumier de volailles), le volume mis en compostage correspond à tout ou partie du volume sorti des bâtiments d'élevage ; on considère dans ce cas que le support peut être limitant pour les quantités de lisier à transformer. Dans le cas d'un approvisionnement extérieur (pour l'imprégnation-compostage uniquement), le volume dépend de la quantité de lisier à imprégner sur le support ; on considère alors que le support est non limitant par rapport à l'objectif souhaité en terme de quantité de lisier à transformer. Le Tableau 10 donne quelques indications pour l'imprégnation-compostage de lisier de porc sur différents supports. Ces données demeurent cependant à affiner par des expérimentations.

Tableau 10. Données par défaut pour l'incorporation du lisier sur différents supports carbonés.

Support	Teneur en MS (%)	Densité au transport (kg/m^3)	Densité à la confection du tas (kg/m^3)	Quantité nécessaire (kg/m^3 de lisier)	Nombre d'incorporations (espacées d'une semaine)
Paille de canne	85	150	100	70	6
Bagasse de canne	50	250	200	200	4
Copeaux de bois	70	150	120	80	6
Fumier de volailles	70	350	300	300	4

La densité du lisier incorporé est d'environ 1020 kg/m^3, et celle du compost produit voisine de 500 kg/m^3.
La teneur en MS du lisier est estimée à 4% et celle du compost produit à 35%.

Durant les différentes phases, on enregistre des pertes sous forme gazeuse : eau, MS, MO, N. Actuellement, peu de données sont disponibles dans le contexte de la Réunion pour connaître avec précision ces pertes qui peuvent être très variables selon les conditions de réalisation. Néanmoins, pour la modélisation, on propose de retenir quelques ordres de grandeur qui devront être confirmés par des expérimentations *ad hoc* (Tableau 11). Etant donné que la majorité des pertes intervient pendant la phase thermophile qui correspond principalement à la fermentation et au début de maturation (2ème retournement), on considérera que les pertes sont identiques

quelle que soit la durée de la phase de maturation sur la plate-forme ; on considère que la phase d'imprégnation est également en grande partie thermophile.

Tableau 11. Pertes retenues pour différents modes de compostage (% de chaque élément apporté au tas).

Type de compost	Perte volume	Perte masse brute	Perte MS	Perte MO	Perte N
Fumier de bovin	50	65	40	40	25
Fumier de volailles * (+ eau ajoutée)	30	30-(fumier) (eau + fumier = 70)	65	65	55
Lisier de porc sur fumier de volailles	30	75	60	60	70
Lisier de porc sur bagasse	30	75	25	25	55
Lisier de porc sur paille de canne	30	75	10	10	55
Lisier de porc sur copeaux de bois	30	75	10	10	55

* *Pour composter le fumier de volailles dont la teneur en MS est élevée (70 à 75%), il est nécessaire d'ajouter de l'eau, le compostage étant optimum pour une teneur comprise entre 35 et 45% de MS.*

V.3. PLATE-FORME DE TRANSFORMATION ET MATERIEL

On peut retenir quatre modalités de chantier utilisées à la Réunion pour faire les retournements :

- tracteur + retourneur (largeur = 2 à 4 m) + chauffeur,
- retourneur électrique automoteur (largeur = 2 m) + opérateur,
- tracteur + fourche + chauffeur,
- manuellement.

Des temps de travaux par défaut sont proposés au Tableau 12. Pour l'épandage du lisier sur les tas, la modalité tracteur + tonne + chauffeur est utilisée le plus fréquemment. Dans le cas où les fosses surplombent la plate-forme, l'écoulement peut être par gravité et ne nécessite donc pas d'équipement particulier si ce n'est un tuyau de section et longueur suffisantes.

Les temps de travaux liés à l'épandage des matières organiques sont identiques à ceux utilisés dans le module « Epandage ». Pour le lisier, ils comprennent le remplissage et la vidange de la citerne (débit de pompe de 36 m^3/h) et un temps de transport faible (5 minutes aller et retour) car la plate-forme est généralement proche des fosses de stockage. Avec l'épandage par gravité au tuyau, on considère un temps identique : il n'y a qu'une vidange, mais les débits sont inférieurs. Pour les effluents solides produits sur l'exploitation, on utilise également les données du module « Epandage » : débits de chargement et déchargement de 36 t/h. Les temps de transport sont également limités du fait de la proximité des installations (5 minutes aller et retour). Pour l'approvisionnement en supports carbonés, outre les temps de chargement et déchargement sensiblement identique à ceux des effluents solides, les temps de transport peuvent être très importants. On utilisera alors les données du module « Import-export » qui spécifient les temps en fonction de la voirie et du type de matériel utilisé.

Tableau 12. Temps de travaux pour chaque retournement selon la modalité de chantier retenue.

	Retourneur avec tracteur (largeur de 4 m)	Retourneur électrique automoteur (largeur de 2 m)	Tracteur avec fourche ou godet	Retournement manuel (pour une personne)
min/t de compost	0,3	1,50	2	30
min/m^3 de support	0,15	0,75	1	15

La dimension de la plate-forme conditionne la quantité de compost réalisable. Généralement, les andains font la longueur de la plate-forme. La largeur de la plate-forme détermine le nombre de tas simultanément en compostage. Si le retournement s'effectue au tracteur avec un retourneur attelé, il faut compter une largeur d'andain perdue pour le passage du tracteur (2,5 m) tous les deux andains (2 × 3,5 m), soit 1/4 de surface supplémentaire (Figure 10). Si le retourneur est automoteur et enjambe l'andain, la place perdue entre deux andains est limitée à 10%. Si le retournement s'effectue avec la fourche du tracteur, il faut prévoir une place d'andain libre sur l'ensemble de la plate-forme pour y déplacer le compost.

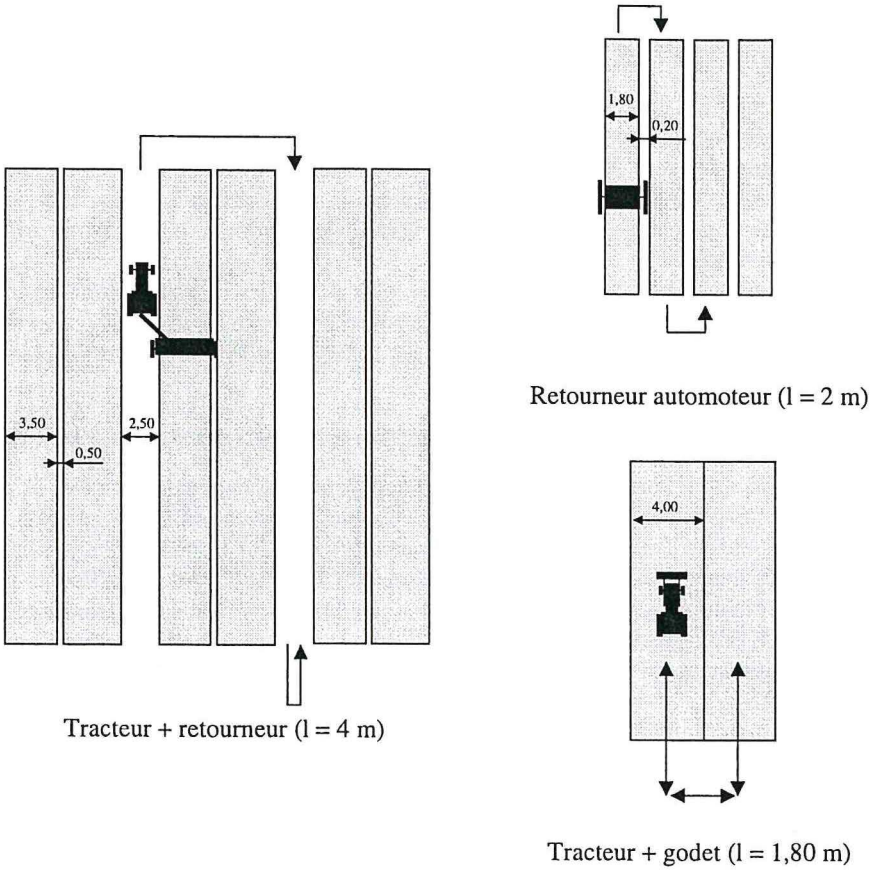


Figure 10. Organisation de différents chantiers de retournements sur une plate-forme de compostage.

Le nombre d'andains en compostage présents simultanément sur la plate-forme est égal à la largeur de la plate-forme divisée par la largeur moyenne pour un andain (largeur d'andain + passage). Le volume de chaque batch de support carboné utilisé ou d'effluent solide apporté est le produit de sa section S par sa longueur L (longueur de la plate-forme). La section est généralement de forme trapézoïdale : $S = (l + l/2) \times H/2$ (avec l : largeur et H : hauteur), $H = 0{,}4 \times l$, d'où $S = 0{,}3 \times l^2$, la largeur dépendant du matériel utilisé pour le retournement (de 2 à 4 m).

La quantité totale de compost pouvant être produite sur la plate-forme est le produit de la quantité mise dans un andain (diminuée des pertes en volume ou masse selon le calcul effectué) par le nombre d'andains et par le nombre de cycles de compostage.

VI. MODULE « IMPORT-EXPORT »

De nombreuses exploitations à La Réunion sont du type PMO/CMO et gèrent les matières organiques en interaction entre elles. En effet, certaines exploitations plus spécialisées en élevage sont excédentaires en effluents d'élevage, d'autres plus orientées vers la production végétale sont déficitaires en matières organiques. Des transferts ont lieu dans le temps et l'espace entre exploitations plus ou moins distantes. Ceux-ci sont dépendants des réseaux d'agriculteurs, des matières organiques transférées, des cultures destinataires et des conditions d'acheminement (matériel, voirie).

Il existe donc, au sein de la plupart des exploitations, en plus des règles de production et d'utilisation interne des effluents d'élevage (chapitres II à V), des règles de transfert avec l'extérieur. Nous présentons dans ce chapitre ces règles de transfert et tenterons de les formaliser dans le module « Import-export », celui-ci jouant le rôle d'interface entre l'exploitation et l'extérieur.

VI.1. ARTICULATION AVEC LES MODULES DE PRODUCTION ET D'UTILISATION D'EFFLUENTS

Le module « Production » que nous avons défini ne comprend pas de règles de décision, la gestion effective des effluents produits par l'exploitant étant décrite dans le module « Evacuation-stockage ». La production peut également provenir du module « Transformation » (il s'agit alors de MO transformée). Comme on considère qu'il y a toujours stockage avant utilisation des MO quelque soit leur type, tous les effluents produits (par les élevages ou après transformation) « passent » toujours par le module « Evacuation-stockage ». Il s'agit des quantités PE_{ij} d'effluents E_i produits durant diverses périodes de temps j. Le module « Import-export » est alors considéré comme consommateur potentiel d'effluents E_i pour l'exportation selon les règles de priorité d'utilisation définies au § III.2.

Nous avons, par ailleurs, présenté les modules « Epandage » et « Transformation » décrivant l'utilisation des effluents interne à l'exploitation. Le module « Epandage » définit un besoin en effluents BE_i durant diverses périodes de temps j. Le module « Import-export » est alors considéré comme « producteur » d'effluents E_i importés sur la période j considérée. La règle de priorité dans ce cas est de n'importer des effluents qu'en dernier recours (l'auto-consommation des effluents produits par l'exploitation est prioritaire sur l'importation).

Dans chaque exploitation, pour chaque période de temps et pour chaque effluent, deux quantités sont ainsi déterminées : une *production* PE_{ij} et un *besoin* BE_{ij}. La différence entre ces deux quantités, QE_{ij}, définit au *niveau collectif* (c'est-à-dire relativement aux autres exploitations) la capacité importatrice ou exportatrice de l'exploitation pour chaque effluent E_i à la période j. Lorsque cette différence est négative, l'exploitation est importatrice (CMO), lorsqu'elle est positive, elle est exportatrice (PMO).

Les quantités QE_{ij} sont « virtuelles » au sens où elles ne sont pas individualisées dans des stocks. Elles constituent respectivement l'offre et la demande de l'exploitation en effluents. Les stocks « réels » ne seront décrémentés que lorsqu'un transfert vers l'extérieur aura lieu ; de même, ils ne seront incrémentés que lorsqu'un approvisionnement de l'extérieur aura lieu.

Une représentation schématique des relations entre le module « Import-export » et les autres modules est présentée Figure 11. Ce module doit permettre le couplage entre le modèle de gestion individuelle *Magma*, représentant un ensemble d'exploitations diverses, et un modèle de gestion collective, *MagmaS*, réalisant le couplage entre ces exploitations. Si l'on souhaite que *Magma* puisse fonctionner isolément en tenant compte des importation et exportation d'effluents, il faut créer une variable (soit arbitrairement, soit sur la base de données réelles) donnant au cours du temps l'offre et la demande extérieures d'effluents, sensées répondre aux critères de sélection de l'agriculteur (adéquation effluent/culture, prix, possibilités de transport) et représentant en quelque sorte le résultat de négociation non simulées dans ce cadre (contrairement au système multi-agents *Biomas* où le processus de négociation est modélisé ; Guerrin *et al.*, 1999).

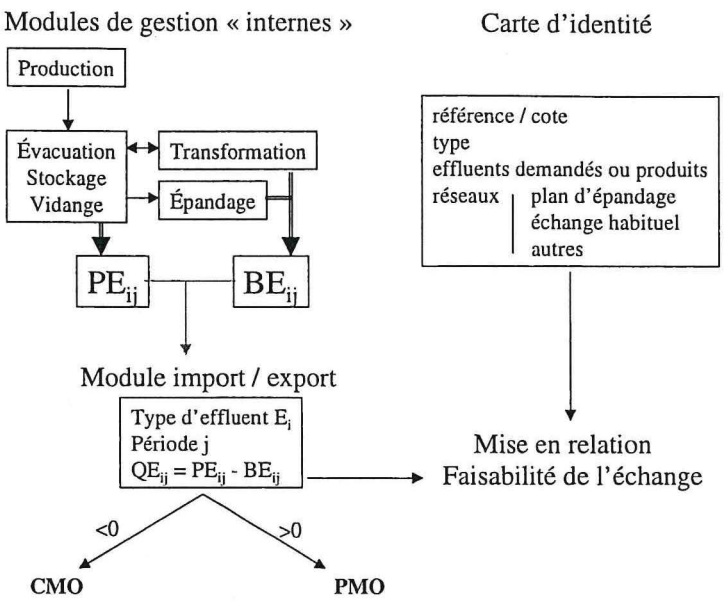


Figure 11. Représentation du module « Import-export » et de la carte d'identité permettant la réalisation des transferts de matières organiques entre exploitations.

VI.2. TRANSFERTS DE MATIERES ORGANIQUES ENTRE EXPLOITATIONS

Nous présentons ici les règles permettant de formaliser les transferts de matières organiques établies sur la base des enquêtes réalisées en 1999 dans le Sud de l'île (Carut et Paillat, 2001). Dans le cas du couplage entre modèle de gestion individuelle et modèle de gestion collective, c'est à travers la mise en relation des modules « Import-export » des différentes exploitations que seront réalisés les transferts.

La seule information concernant le bilan offre/demande QE_{ij} calculée dans le module « Import-export » d'une exploitation n'est pas suffisante pour organiser les négociations et les transferts entre exploitations. Pour que l'exploitant, PMO ou CMO entre en « communication » avec l'extérieur, il faut lui spécifier une « carte d'identité » (cf. Figure 11) contenant les informations suivantes :

- localisation de l'exploitation par rapport aux voies de communication (ou cotes géographiques) ou distances entre exploitations, permettant de calculer les trajets et les coûts de transfert ;
- type d'exploitation au regard de la gestion des effluents en utilisant la typologie réalisée par Reynaud (1995) et apparaissant dans la *BDEX*,
- types d'effluents demandés ou produits habituellement au cours de l'année,
- réseaux de connaissances auxquels appartient l'exploitant (plan d'épandage, échanges habituels, relations diverses...).

D'autres informations sont également nécessaires pour déterminer les conditions de réalisation des transferts :

- la quantité d'effluent produit ou nécessaire sur l'année pour répondre à l'objectif de planification des approvisionnements en MO (Vimeux, 1998),
- la qualité de l'effluent,
- le rôle attribué à l'effluent,
- le matériel de chargement et de transport,
- le temps disponible pour effectuer le transport,
- la distance maximale de transport admise (ou le temps maximal admis pour un voyage),
- le prix maximal consenti pour l'approvisionnement.

Le module « Import-export » s'enrichira donc de cette « carte d'identité » de l'exploitation et des informations utiles pour déterminer les transferts qui seront décrits selon 3 phases successives :

- mise en relation, qui correspond à la définition du réseau d'accointances des exploitants (cf. *Biomas*),
- faisabilité du transfert,
- réalisation sous certaines conditions qui permettront ou non d'aboutir.

VI.2.1. Mise en relation

Cette première étape vise à créer les réseaux d'échanges entre agriculteurs répartis sur un territoire donné. Ce réseau, une fois constitué, est considéré comme stable. Si ces réseaux sont déjà connus (par exemple, suite à enquêtes menées dans une localité) on pourra les spécifier directement dans le modèle. Sinon on devra les créer à partir de règles de comportement décrites ci-après.

Lorsqu'un PMO est très excédentaire en MO, Prêcheur (1999) montre que l'éleveur va chercher à acquérir de nouvelles terres ou des « prêteurs de terres » de façon durable. On considère alors que ces nouvelles surfaces d'épandage modifient la variable structurelle « Surface » définie dans le module « Epandage ». Il ne s'agit donc plus de transfert inter-exploitation mais d'une gestion interne de l'épandage au même titre que les parcelles en propriété (décideur unique). Par contre, dans le cas où le prêt de terres est occasionnel, non pérenne pendant plusieurs années, on considérera qu'il s'agit alors d'un transfert entre exploitations (décideurs multiples).

La première condition à vérifier pour que deux exploitations Ex1 et Ex2 (Figure 12) entrent en relation est l'adéquation entre les effluents demandés et les effluents produits habituellement sur une base pluri-annuelle. Cette adéquation étant vérifiée, on utilise ensuite deux voies pour assurer la mise en relation : (1) soit on connaît explicitement les relations entre exploitations et elles peuvent alors être mises en relation directement, (2) soit on ne connaît pas ces relations (par exemple, on peut savoir que l'exploitation Ex1 épand du lisier à l'extérieur sans savoir chez qui) et l'on utilisera alors le voisinage associé au type défini par la typologie de Reynaud (1995) (*cf.* Annexe 5).

Dans le premier cas, les critères de mise en relation sont examinés successivement en utilisant les données d'enquête :

(i) Existence préalable d'un plan d'épandage : on considère que l'exploitation Ex1 « prêtant » des terres à Ex2 dans le cadre d'un plan d'épandage (ces surfaces étant déjà comptabilisées dans la gestion interne de Ex2) est prioritairement sollicitée pour prêter de nouvelles surfaces (autres que celles du plan) ;

(ii) Existence de transferts antérieurs : on retrouve ici la notion d'apprentissage résultant des réussites ou échecs de négociations passées ;

(iii) Autres réseaux : amis, famille.

Dans le second cas, on regardera les liens possibles dans un voisinage proche défini par la localisation des exploitations. Selon le type d'effluent transférable, le voisinage peut être plus ou moins étendu : moins de 10 km pour des effluents liquides, jusqu'à 50 km pour les effluents solides. Généralement, les transferts se font entre types bien définis ce qui permet de restreindre les relations possibles au sein du voisinage (Tableau 12).

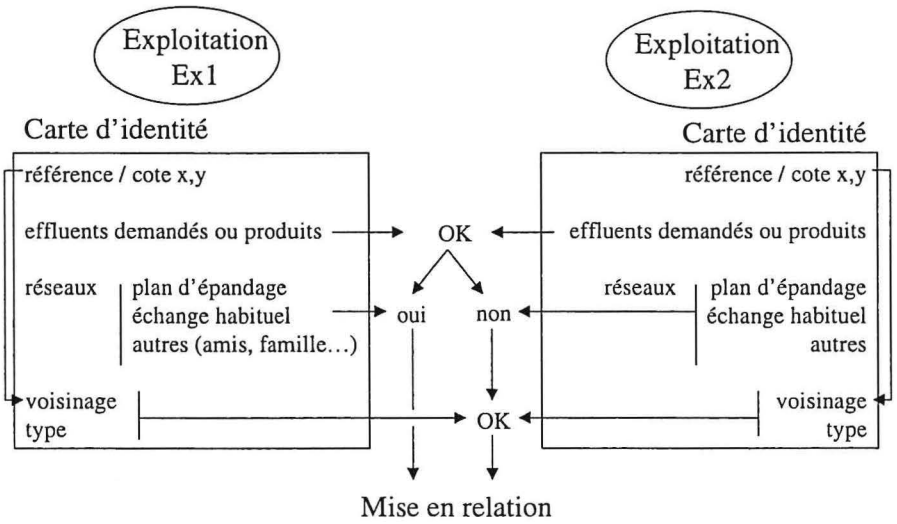


Figure 12. Mise en relation de deux exploitations pour transférer des effluents.

Tableau 12. Echanges entre types d'exploitations selon les effluents (d'après Reynaud, 1995 ; cf. annexe 5).

Effluent transféré	Type producteur →	Type consommateur
Lisier de porc	I	IIc ou III
Lisier de bovin	II	III
Fumier de porc	I	III
Fumier de volaille	I ou II	III
Fumier de bovin	II	III
Fumier de bovin	IIIa	IIIb ou IIIc

VI.2.2. Faisabilité du transfert

Dans le contexte des transferts de MO inter-exploitations, on appellera « pilotage » la satisfaction des besoins actuels d'une exploitation par son approvisionnement immédiat auprès d'une autre exploitation, et « planification » l'anticipation des besoins d'une exploitation par des approvisionnements réalisés en prévision d'une utilisation future.

Pilotage

Pour qu'un transfert ait lieu entre deux exploitations Ex1 et Ex2 appartenant à un même réseau de relations, il faut, pour un effluent E_i et une période j donnés, que Ex1 (CMO) présente une quantité Q_1E_{ij} négative et Ex2 (PMO) présente une quantité Q_2E_{ij} positive (Figure 13).

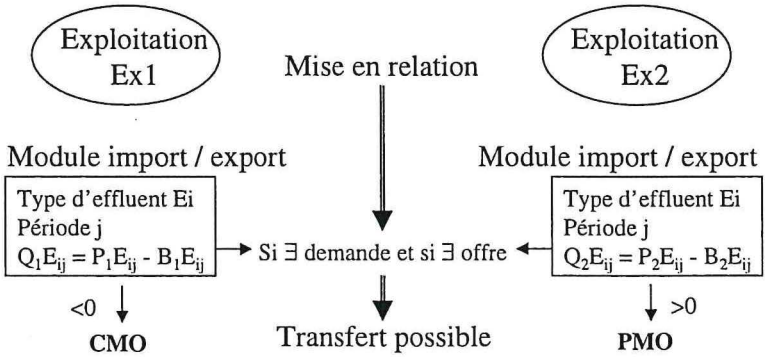


Figure 13. Faisabilité du transfert entre deux exploitations pour un effluent et une période donnés.

Planification

Pour les effluents liquides, il n'y a pas ou peu d'approvisionnement par anticipation, car cela suppose d'avoir une capacité de stockage adéquate. Pour les effluents solides, si la quantité demandée à la période j est nulle, mais qu'il existe un besoin (a priori non couvert en interne) du même type d'effluent à une période j' (j'>j) et qu'il existe une offre à la période j, le CMO peut anticiper son approvisionnement et stocker la MO en bord de champ. Mais cette anticipation doit tenir compte de la production propre à l'exploitation : par exemple, un PMO/CMO ne va pas s'approvisionner en fumier de volailles à l'extérieur pour ses cultures maraîchères s'il sait qu'il doit évacuer son bâtiment d'élevage avant la période de besoin des cultures. Inversement, s'il dispose d'un excédent à une période donnée, il ne va pas accepter d'exporter sa MO s'il sait qu'il en aura besoin un peu plus tard.

Pour fonctionner, il faut donc que, dans chaque exploitation modélisée, le module « Import-export » reçoive par anticipation :

- les besoins des cultures de l'exploitation du module « Epandage » ;
- la production de MO sur l'exploitation du module « Evacuation-stockage ».

A partir de là, il pourra établir pour chaque type de MO une « table » des bilans offre/demande (QE_{ij}) avec *x* mois d'avance (6 mois parait être l'horizon maximal de planification).

VI.2.3. Conditions de réalisation du transfert

Trois données sont importantes pour caractériser un transfert de MO entre deux exploitations : la quantité d'effluent transférée (et sa qualité, au moins en valeur fertilisante), qui assure la prestation de transport, et le coût de la transaction.

Quantité d'effluent transférée

Celle-ci est déterminée par la comparaison des modules « Import-export » des deux exploitations, respectivement Q_1E_{ij} et Q_2E_{ij} : la quantité transférée est égale à la quantité la plus faible entre l'offre et la demande, qu'elles soient définies par pilotage ou planification.

Qui transporte ?

La règle de base est que c'est l'exploitant qui est à l'initiative du transfert qui transporte l'effluent (il s'agit du « demandeur » du transfert qui peut être offreur ou demandeur de MO). Mais il ne peut le faire qu'à trois conditions : (1) qu'il ait le matériel requis, (2) qu'il ait la disponibilité en temps, et (3) que la distance à parcourir soit inférieure à la distance maximale admise (Figure 14).

1. S'il n'a qu'une partie du matériel, mais qu'à eux deux les exploitants réunissent le matériel nécessaire, alors c'est celui qui possède le matériel de traction qui fait le transport. Ce cas, assez général, correspond au producteur de lisier qui ne possède qu'une tonne et qui compte sur le tracteur du CMO pour assurer le transport

avec sa tonne. S'il n'a pas du tout de matériel propre mais que son partenaire le possède, c'est ce dernier qui fait le transport ; sinon, le demandeur du transfert fait appel à un transporteur.

2. Entre deux partenaires, c'est celui qui dispose de temps qui fait le transport. Si aucun des deux n'en a, le demandeur du transfert fait appel à un transporteur.
3. Si la distance est inférieure à la distance maximale acceptable par le demandeur du transfert, alors c'est lui qui fait le transport ; sinon, et si elle est inférieure à la distance acceptable par l'autre partenaire, c'est ce dernier qui fait le transport ; sinon, le demandeur du transfert fait appel à un transporteur. Cette règle s'applique sous réserve de la satisfaction des contraintes de temps et de matériel décrites précédemment.

Dans le cas où le CMO fait le transport, si l'effluent est du lisier, il faut que sa qualité corresponde au rôle qui lui est attribué. Si le rôle est l'irrigation et si le lisier est très dilué, le CMO fera effectivement le transport. Dans le cas contraire, si le rôle est la fertilisation, le CMO refusera de faire le transport ; le PMO devra donc l'assurer lui-même s'il répond aux 3 conditions précédentes ou faire appel à un transporteur.

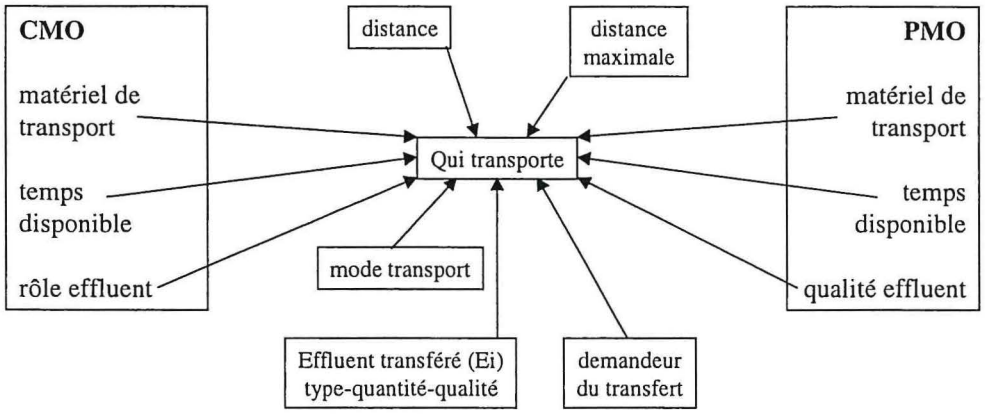


Figure 14. Variables prises en compte (en gras dans le texte) pour déterminer qui transporte.

Il y a donc trois possibilités pour faire le transport de l'effluent : le CMO, le PMO ou un TMO (transporteur). Pour connaître qui effectue le transport, il faut donc renseigner six variables : (1) le demandeur du transfert, (2) le moyen de transport requis, (3) les matériels disponibles, (4) le temps disponible, (5) la distance à parcourir et (6) la distance maximale admissible pour effectuer un transport. Nous détaillons ces variables ci-après.

Qui demande le transfert ?

La demande est formulée généralement par le CMO qui doit fertiliser ses cultures (pilotage) ou qui s'approvisionne en vue d'une fertilisation ultérieure (planification). La planification correspond aussi souvent à la nécessité de faire mûrir la matière organique avant son utilisation (cas fréquent pour le fumier de volailles ou l'écume de sucrerie en maraîchage).

Dans le cas où le CMO n'a aucun besoin immédiat ou d'anticipation à moyen terme, le PMO, après avoir satisfait ses besoins internes, peut devenir demandeur du transfert dans trois situations :

- Si le niveau de stockage des effluents liquides atteint un seuil (en principe remplissage à 90% du stock) ;
- Si le PMO souhaite vider complètement ses fosses (par exemple, en fin de campagne sucrière de manière à avoir suffisamment de capacité de stockage pour attendre la prochaine campagne), il s'agit alors d'une planification dans la gestion des stocks ;
- Si le PMO doit impérativement évacuer un bâtiment d'élevage (volailles) et ne souhaite pas stocker le fumier sur son exploitation pour des raisons sanitaires.

Dans le cas du fumier de volailles et parfois du fumier de bovins, le CMO peut adresser sa demande à un TMO « habituel » qui jouera alors le rôle de CMO en allant s'approvisionner auprès d'un éleveur. A l'inverse, le TMO peut proposer du fumier à des CMO « habituels », il jouera alors un rôle de PMO. Ce cas, qui est fréquent dans les transferts, perturbe les notions d'accointance et de rôle définies dans Biomas (Guerrin et *al.*, 1999) puisqu'il obligerait à donner le rôle de consommateur et/ou producteur à un transporteur.

Quel est le mode de transport requis ?

Le mode de transport est d'abord défini par la nature de l'effluent :

Si l'effluent est liquide, lisier (porc, volailles, bovins) ou purin (porcs, bovins), alors le mode de transport est la tonne à lisier tirée par un tracteur ; il y a très peu de cas d'utilisation d'un camion avec citerne pour ce genre de transport ;

Si l'effluent est solide, fumier (volailles, bovins, porcs) ou compost, alors le mode de transport dépend de la distance à parcourir et des quantités à transporter :

- Si Distance > 10 km, Alors Camion ; avec 4 modalités possibles de poids total en charge, PTAC = 3,5 - 7 - 12 - 18 t, soit respectivement 1,8 - 4,5 - 8,5 - 12 t ou 7 - 12 - 16 - 25 m^3 de MO transportées.

- Si Distance ≤ 10 km, alors Tracteur + Remorque ; avec 4 modalités possibles de tonnage transporté : 4 - 6 - 8 - 10 t, ou, très rarement, pour les petites quantités (< 2 t), voiture + remorque (750 kg).
- Si Distance ≤ 0,5 km et qu'on a affaire à de petites quantités (< 1 t), la brouette (60 kg) peut également être utilisée ; cette modalité correspond à une activité de jardinage.

Quels sont les matériels disponibles pour effectuer le transport ?

La réponse à cette question est fournie par les données « d'interface » du PMO et du CMO. Il s'agit de faire l'inventaire des matériels disponibles chez l'un et l'autre et de les comparer au matériel requis pour le transfert. Si le demandeur du transfert possède le matériel requis, il fait le transport ; sinon on recherche le matériel chez l'autre partenaire ou la complémentarité des matériels des deux partenaires ; sinon le demandeur prend les services d'un TMO. En répondant à cette question, on détermine donc le moyen de transport utilisé.

Quelle est la disponibilité en temps du PMO et du CMO ?

Il n'y a pas de règle concernant cette variable dont les valeurs peuvent être obtenues par enquête. On pourrait envisager un calcul basé sur les calendriers de travaux des exploitants pour déterminer la réponse.

Quelle est la distance à parcourir ?

Cette information est donnée par la position relative des exploitations réalisant le transfert (par exemple, cotes géographiques notées dans les cartes d'identité des exploitations) ou les distances connues entre elles. Ces renseignements peuvent être obtenus à partir d'une carte ou établis par un SIG. Pour davantage de précision dans le calcul des temps de transport, la distance peut être spécifiée par tronçons de différents types de voies (route, voie communale, chemin...) auxquels on associe une vitesse moyenne de déplacement dépendant du moyen de transport utilisé (c'est ce qui a été fait dans le modèle Biomas).

Quelle distance maximale le PMO ou le CMO consentent à parcourir ?

Pour savoir qui accepte de faire le transport, il faut comparer la distance à parcourir à la distance maximale acceptable par chacun des partenaires. Ces distances peuvent éventuellement être différentes pour chacun des acteurs car elles dépendent principalement du type de transport. Par enquête, elles peuvent être obtenues directement ou calculées à partir du temps maximal consenti par voyage (comprenant transport aller-retour, chargement et déchargement ; en général il n'excède pas 2 heures). Le temps maximal utilisable pour le transport est la différence entre le temps maximal consenti par voyage et le temps de chargement et déchargement qui dépend de la modalité (manuel ou mécanique) et du matériel utilisé. La distance maximale est le produit du temps de transport par la vitesse, fonction de la voirie et du mode de transport (cf. Tableau 13 et Figure 15).

Par défaut, on utilisera les valeurs suivantes pour les temps de chargement et déchargement :

- pour le lisier, les débits de remplissage et de vidange de la tonne correspondent dans les deux cas au débit de la pompe, soit 36 m^3/h (10 minutes pour une citerne de 6 m^3) ;
- pour les MO solides, les débits de chargement et déchargement (épandage) sont de 36 t/h (15 minutes pour un épandeur de 15 m^3 ou 9 t de fumier) ; s'il y a simplement déchargement, sans épandage, le temps est très faible (2 minutes) ;
- pour les effluents solides chargés manuellement, des enquêtes seraient nécessaires ; on peut cependant retenir 1 heure de travail à 4 personnes pour une remorque contenant 15 m^3 de fumier (environ 9 t), soit un débit de 9 t/h si 4 personnes sont mobilisables, ou environ 2 t/h par personne.

Tableau 13. Vitesses de déplacement (km/h) à vide (Vv) et à plein (Vp) selon le matériel utilisé et la voirie.

Types de voie	Tracteur + remorque		Camions	
	Vv	Vp	Vv	Vp
Chemin d'accès aux parcelles	5	2		
Chemin d'exploitation	10	4	10	5
Voirie rurale bétonnée	15	8	20	10
Voirie départementale	25	15	60	40
Voirie nationale	25	20	80	60
Route de montagne (<18t)	15	10	40	30

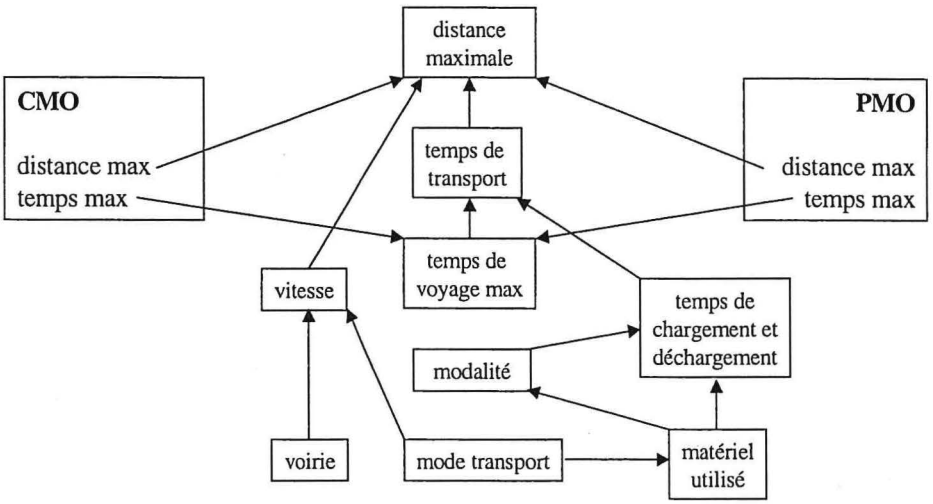


Figure 15. Variables permettant de déterminer la distance maximale consentie pour un transport de MO.

Coût de la transaction

Le transfert ne sera réalisé que si le montant de la transaction correspond à ce que le CMO consent à payer. Ce coût dépend du type d'effluent et, éventuellement, de sa qualité. Etant spécifique à chaque consommateur, cette information doit être renseignée par enquête. Pour valider un transfert de MO, il faut donc déterminer le montant de la transaction (F/t ou F/m^3) et le comparer au coût maximal consenti. Ce montant dépend de 2 facteurs (Figure 16) : le volume transporté par voyage et le prix du voyage (comprenant l'ensemble de la prestation : chargement, transport aller-retour et déchargement, et le prix de la MO elle-même).

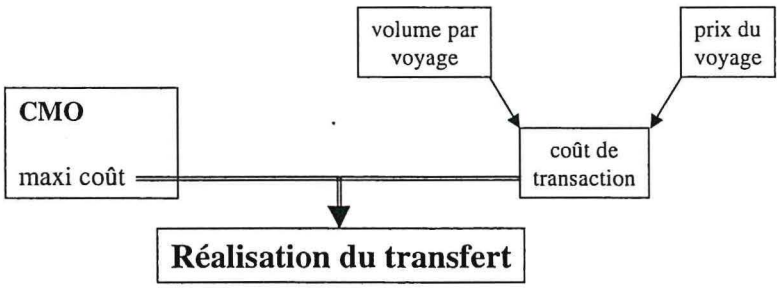


Figure 16. Variables permettant de connaître le coût de transaction validant ou non le transfert.

Quel est le volume transporté par voyage ?

Il dépend du moyen de transport utilisé et du type d'effluent. Les Tableaux 14 et 15 récapitulent les caractéristiques de différents moyens de transport pour différents types d'effluent transporté.

Tableau 14. Charges maximales transportées (t) par différents moyens de transport selon le type d'effluent.

Transport	Charge utile (t)	Volume utile (m^3)	Fumier volaille (350 kg/m^3)	Compost (500 kg/m^3)	Fumier bovin (700 kg/m^3)	Lisier (1000 kg/m^3)
Camion 3,5 t	1,8	7	1,8	1,8	1,8	
Camion 7 t	4,5	12	4	4,5	4,5	
Camion 12 t	8,5	16	6	8	8,5	
Camion 18 t	12	25	9	12	12	
Camion 30 t	20	34	12	17	20	
Camion 42 t	29	72	25	29	29	
Tracteur +	4	13	4	4	4	4
remorque	6	18	6	6	6	6
ou	8	23	8	8	8	8
citerne	10	30	10	10	10	10

Tableau 15. Volumes maximaux transportés (m^3) par différents moyens de transport selon le type d'effluent.

Transport	Charge utile (t)	Volume utile (m^3)	Fum. volailles (350 kg/m^3)	Compost (500 kg/m^3)	Fum. bovins (700 kg/m^3)	Lisier (1000 kg/m^3)
Camion 3,5 t	1,8	7	7	3,5	2,5	
Camion 7 t	4,5	12	12	9	6,5	
Camion 12 t	8,5	16	16	16	12	
Camion 18 t	12	25	25	24	17	
Camion 30 t	20	34	34	34	28,5	
Camion 42 t	29	72	72	58	41,5	
Tracteur +	4	13	11,5	8	5,5	4
remorque	6	18	17	12	8,5	6
ou	8	23	23	16	11,5	8
citerne	10	30	29	20	14,5	10

A quel prix s'effectue un voyage ?

Le prix du voyage dépend du prix payé pour la MO (éventuellement nul), de qui transporte (PMO, CMO ou TMO) et de qui paie le transport (en principe, le demandeur du transfert) ; cf. Figure 17. Le Tableau 16 donne quelques indications sur les prix de transfert pratiqués (d'après Carut et Paillat, 2001).

Tableau 16. Récapitulatif des coûts de transaction (F/m^3) pratiqués dans les transferts.

Demandeur transfert		CMO	CMO	CMO	CMO	PMO	PMO	PMO
Payeur		CMO	CMO	CMO	CMO	CMO	PMO	PMO
Qui transporte ?		CMO	PMO	TMO	TMO	CMO	TMO	PMO
Mode de transport		tracteur	tracteur	25 m^3	7 m^3	tracteur	tracteur	tracteur
Lisier de porcs	Matière	0	0				0	0
	Transport	0	20				20	0
	Total	0	20				20	0
Lisier de bovins	Matière	0	0				0	0
	Transport	0	20				20	0
	Total	0	20				20	0
Fumier de porcs	Matière	0	0					
	Transport	0	20					
	Total	0	20					
Fumier de bovins	Matière	75	75	75	75			
	Transport	0	20	30	60			
	Total	75	95	105	135			
Fumier de volailles	Matière	35	35	35	35	0		
	Transport	0	20	55	100	0		
	Total	35	55	90	135	0		
Compost*	Matière	170	170	170	170			
	Transport	0	20	40	70			
	Total	170	190	210	240			

** Un seul cas de transfert a été recensé, ces prix sont donc à considérer avec précaution.*

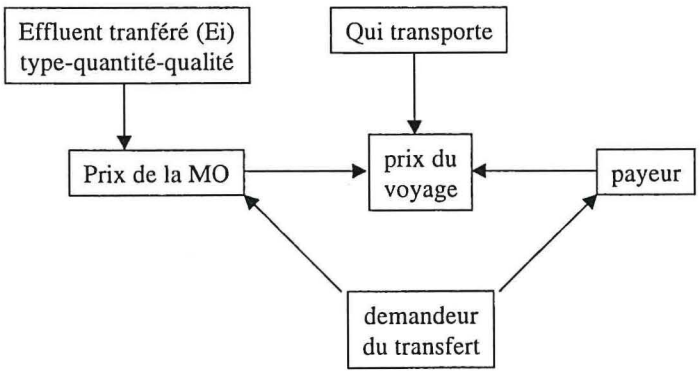


Figure 17. Variables déterminant le prix du voyage.

Relations entre les variables conditionnant le transfert de MO

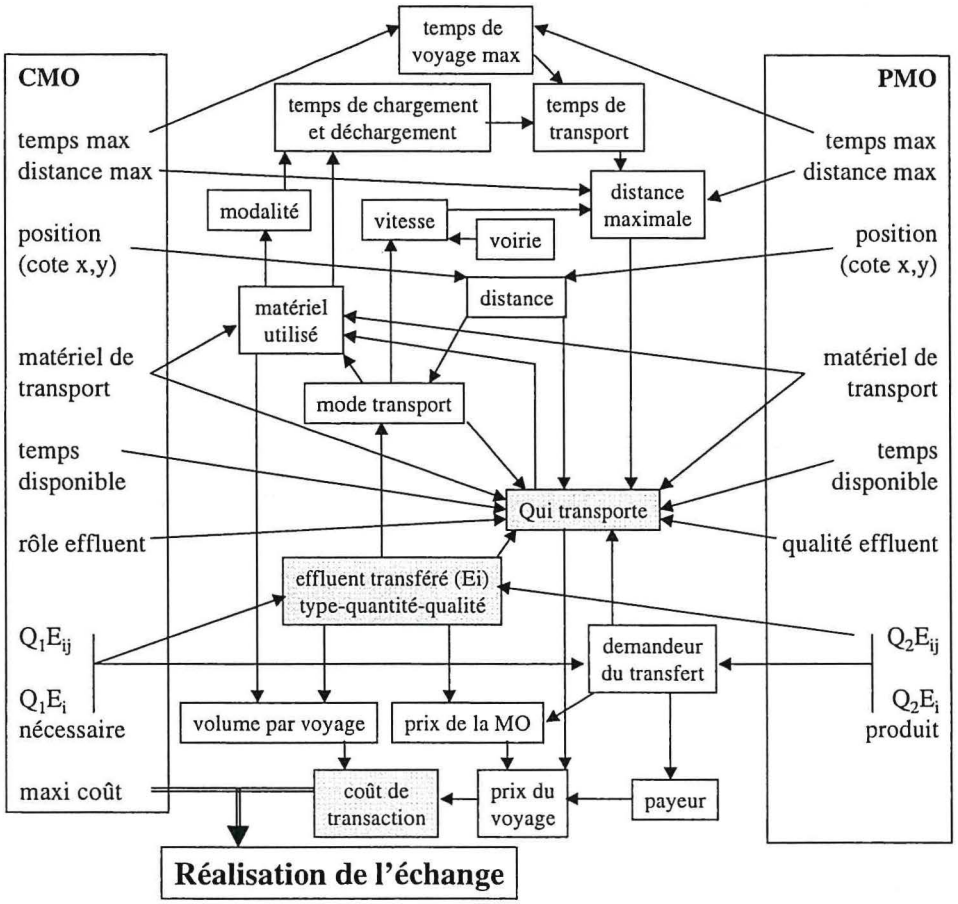


Figure 18. Schéma récapitulant les relations entre les différentes variables caractérisant les transferts.

VII. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous avons formalisé dans ce rapport les principales règles de décisions utilisées par les agriculteurs pour gérer les matières organiques au sein de leur exploitation et pour transférer ces matières organiques vers d'autres exploitations. La présentation de ce « modèle d'action » sous forme de modules permet de mieux comprendre et représenter les décisions de l'agriculteur. Cependant, ces entités décisionnelles ne sont pas aussi séparées dans la réalité et nous avons vu les liens qui permettent de passer d'un module à l'autre, notamment à travers les règles d'arbitrage pour l'utilisation des effluents produits.

Dans l'objectif de simuler le fonctionnement d'une exploitation donnée, il est préférable de procéder par enquête pour renseigner les différentes modalités prises par les variables. On devra néanmoins souvent recourir à des valeurs par défaut pour renseigner certaines variables, car l'agriculteur ne connaît pas toujours tous les paramètres de gestion des effluents dans son exploitation. De même, pour simuler des scénarios de gestion par grands types d'exploitation, il n'est pas nécessaire de connaître précisément les modalités prises par les variables dans les exploitations individuelles. C'est pourquoi, autant que possible, nous avons donné des valeurs par défaut qui peuvent être utilisées en l'absence de données plus précises. Reste que certaines valeurs, notamment pour les variables structurelles devront être renseignées par enquêtes ou à partir de fichiers des organismes de développement ou de la DAF.

En complément à cette formalisation du modèle d'action de l'agriculteur pour la gestion des matières organiques, un travail est en cours pour définir les différents types d'exploitation rencontrés et les scénarios de gestion de la MO correspondants.

A partir de ces différentes mises en forme résultant du travail d'enquêtes et d'analyse des pratiques réalisé à la Réunion depuis 1995, les modèles *Magma*, *Biomas* et *MagmaS* devraient pouvoir être peaufinés pour représenter de façon réaliste la gestion des MO dans les exploitations réunionnaises. Un travail d'analyse, basée sur la simulation de différents scénarios élaborés pour chaque type d'exploitation, sera ensuite effectué.

On peut envisager plusieurs développements de ces travaux sur le modèle d'action et la construction de scénarios de gestion :

1. A l'échelle régionale, il serait intéressant de simuler avec *MagmaS* la gestion de la MO sur des territoires déjà bien étudiés comme Salazie et la zone sud de l'Ile. On pourrait utiliser pour cela les fichiers de recensement des exploitations agricoles (RGA, enquêtes DAF, fichiers des organismes de développement) donnant les caractéristiques structurelles des exploitations.
2. A l'échelle des systèmes de culture : on pourrait simuler avec *Magma* la gestion des MO selon les types d'exploitation et différentes alternatives ; les résultats de simulation (effluents, cultures, calendrier d'épandage, doses, modalités d'application) pourraient servir de données d'entrée à des modèles biophysiques (*Stics, Mobe*$_5$) simulant le devenir des éléments fertilisants dans le système sol-plante. Il en résultera une évaluation agronomique (croissance des plantes) et environnementale (risques de pollution) des différents systèmes et alternatives de gestion simulés.
3. On peut également envisager d'extrapoler ces résultats à d'autres territoires tels que l'ensemble de la Réunion ou la Bretagne, et d'autres systèmes de production situés dans d'autres régions.

BIBLIOGRAPHIE SPECIFIQUE SUR LES MODELES D'ACTION

Attonaty, J.M., Chatelin, M.H. & Mousset, J. (1993). A Decision Support System based on farmer's knowledge to assess him in decision making about work organisation and long term evolution. *Int. Seminar of CIGR Models Computer Programs and Expert Systems for Agricultural Mechanization,* Florenza, I, 1-2 oct. 1993.

Aubry, C. (1995). *Gestion de la sole d'une culture dans l'exploitation agricole. Cas du blé d'hiver en grande culture dans la région picarde.* Thèse INA-PG, Paris, 271 p. + annexes.

Aubry, C. (2000). Modélisation de la gestion de production dans l'exploitation agricole. *Revue Française de Gestion*, n°129, 32-46.

Aubry, C., Havet, A. & Navarette M. (1996). Management of technical systems on the farm. *2nd European Symposium on Rural and Farming Systems Research*, Granada, Spain, 27-29 march, 6p.

Aubry, C., Papy, F., & Capillon, A. (1998a). Modelling decision-making processes for annual crop management. *Agricultural Systems*, Vol 56, 1, 45-65.

Aubry, C., Biarnès, A., Maxime, F. & Papy, F. (1998b). Modélisation de l'organisation technique de la production dans l'exploitation agricole : la constitution de systèmes de culture. *Etud. Rech. Syst. Agraires Dév.*, 31, 25-43.

Besson, P. & Bouquin, H. (1991). Identité et légitimité de la fonction contrôle de gestion. *Revue Française de Gestion*, janvier-février 1991, 60-71.

Bouquin, H. (1991). *Le contrôle de gestion.* Coll. Gestion, Presses Universitaires de France, 331 p.

Capillon, A. (1993). *Typologie des exploitations agricoles. Contribution à l'étude régionale des problèmes techniques.* Thèse de doctorat de l'INA-PG, Paris, Tomes I et II, 48 et 301 p.

Capillon, A. & Sébillotte, M. (1980). Etude des systèmes de production des exploitations agricoles. Une typologie. *Caribbean Seminar on Farming Systems Research Methodology*, IICA-INRA, Pointe à Pitre, 85-111.

Capillon, A. & Manichon, H. (1988). *Guide d'étude de l'exploitation agricole à l'usage des agronomes. Relance Agronomique.* ADEPRINA-APCA, Paris, 41 p + annexes.

Cerf, M. (1994). *Essai d'analyse psychologique des connaissances techniques et pratiques des agriculteurs : application au raisonnement de l'implantation des betteraves sucrières.* Thèse de doctorat, Paris VIII, département Psychologie des processus cognitifs, 274 pages + annexes.

Chatelin, M.H., Aubry, C., Leroy, P., Papy, F. & Poussin, J.C. (1993). Pilotage de la production et aide à la décision stratégique. *Cahiers ESR*, INRA, 28, 120-137.

Cyert, R.M. & March, J.G. (1963). *A behavorial theory of the firm.* New-York, Prentice Hall.

Duru, M., Papy, F. & Soler, L.G. (1988). Le concept de modèle général et l'analyse du fonctionnement de l'exploitation agricole. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 74, 81-91.

Giard, V. (1988). *Gestion de la production.* Paris, Editions Economica, Coll. Gestion.

Girin, J. (1990). *Analyse empirique des situations de gestion : éléments de théorie et de méthode.* Epistémologie et sciences de gestion, Martinet A-C coordinateur, Economica, Paris, 141-182.

Gras, R., Benoit, M., Deffontaines, J.P., Duru, M., Lafarge, M., Langlet, A. & Osty, P.L. (1989). *Le fait technique en agronomie.* Activité agricole, concepts et méthodes d'étude. Coll. INRA-L'Harmattan, 183 p.

Hatchuel, A. & Sardas, J.C. (1992). *Le pilotage des systèmes complexes de production. Planification hiérarchisée et coopération dans l'incertain.* Les rationalisations de la production, Cepadues, Toulouse.

Hoc, J.-M. (1987). *Psychologie cognitive de la planification.* Sciences et Technologies de la connaissance. Presses Universitaires de Grenoble, 197 p.

Jacobsen, B.H. (1994). Farmers' decision making behaviour : empirical findings from Denmark. *38th seminar of EAAE*, Copenhagen, 3-5/10/94, 77-89.

Le Gal, P.Y. (1995). *Gestion collective des systèmes de culture en situation d'incertitude : cas de l'organisation du travail en double culture dans le delta du fleuve Sénégal.* Thèse INA-PG, Paris, 213 pp. + annexes.

Maxime, F., Mollet, J.M., Papy, F. (1995). Aide au raisonnement de l'assolement en grande culture. *Cahiers Agricultures*, 4 : 351-62.

Milleville, P. (1987). Recherches sur les pratiques des agriculteurs. *Cahiers Rech. Dev.*, 16, 3-7.

Osty, P.L. (1978). L'exploitation agricole vue comme un système. Diffusion de l'innovation et contribution au développement. *Bull. Tech. Inf.*, 326, 43-49.

Papy, F. (1994). Working Knowledge concerning technical systems and decision support. *Rural and Farming Systems Analysis, European Perspectives*, JB Dent & MJ McGregor Eds, Cab International, UK, 222-235.

Papy, F., Attonaty, J.M., Laporte, C. & Soler, L.G. (1988). Work Organization Simulation as a basis for farm management advice. *Agricultural. Systems*, 27, 295-314.

Roy, B. (1992). Science de la décision ou science de l'aide à la décision ? *Revue Internationale de Systémique*, vol 6, n°5, 497-529.

Sébillotte, M. (1979). Analyse du fonctionnement des exploitations agricoles. Trajectoire et typologie. *Eléments pour une problématique de recherche sur les Systèmes agraires et le développement*. Assemblée Constitutive du département SAD, Toulouse, 20/11/1979, 20-30.

Sébillotte, M. (1990). Les processus de décision des agriculteurs. Conséquences pour les démarches d'aide à la décision. *Modélisation Systémique et Systèmes Agraires*, INRA, Paris, Brossier et al. Eds., 103-117.

Sébillotte, M. & Soler, L.G. (1988). Le concept de modèle général et la compréhension du comportement de l'agriculteur. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 74, 59-70.

Sébillotte, M. & Soler, L.G. (1990). Les processus de décision des agriculteurs. Acquis et questions vives. *Modélisation systémique et Systèmes agraires*, INRA, Paris, Brossier et al. Eds, 88-102.

Simon, H. (1957). *Administration behaviour: studymaking processive in administration organization*. Economica, Paris (French translation in 1975), 332 p.

Tessier, J.H. (1979). Relations entre techniques et pratiques. *Bull. INRAP*, 38, 1-3.

Thépot, J. (1995). La modélisation en sciences de gestion ou l'irruption du tiers. *Revue Française de Gestion*, janvier-février 1995, 66-70.

de Terssac, G. (1993). Organisation du travail et sociologie. *Revue Française de Gestion*, Nov.-Déc., 90-100.

BIBLIOGRAPHIE COMPLEMENTAIRE

Carut, L. & Paillat, J.M. (2001). Analyse des échanges de déchets d'élevage entre producteurs et consommateurs de matière organique dans le sud de l'île de la Réunion. *Rapport Cirad-Tera*, La Réunion. A paraître.

Guerrin, F. (2000a). Simulation of actions to help animal wastes management at the farm level. *MCPL'2000, IFAC/IFIP/IEEE 2nd Conference on Management and Control of Production and Logistics*, 5-8 July 2000, Grenoble (F), CD-Rom session R6–P135.

Guerrin, F. (2000b). Magma: a model to help animal manure management at the farm level. *Agricontrol'2000, IFAC Conf. on Modelling and Control in Agriculture, Horticulture and Post-Harvest Processing*, 10-12 July 2000, Wageningen (NL), p. 159-164.

Guerrin, F., Courdier, R., Calderoni, S., Paillat, J.-M., Soulié, J.-C., & Vally, J.-D. (1999). Biomas : un modèle multi-agents pour aider à la gestion négociée d'effluents d'élevage. *Modèles et systèmes multi-agents pour la gestion de l'environnement et des territoires* (N. Ferrand, Ed.), Actes de colloques, Cemagref éditions, Clermont-Ferrand (F), 5-8 octobre 1998, p. 359-378.

MVAD (1997). Le Gisement de déchets organiques à la Réunion. Inventaire 1996 et évolution. *Rapport technique Chambre d'Agriculture*, Saint Denis de la Réunion, 136p.

Paillat, J.M. & Guerrin, F. (1998). *Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité à l'échelle d'un territoire. Cas de la gestion individuelle et collective des effluents d'élevage à l'île de la Réunion*. Proposition d'action thématique programmée 99/60, Cirad Tera/Ere, La Réunion, 17p.

Piquet, E., & Le Page, C. (2001). *Couplage VisualWorks/Vensim. DDE ou DLL ?* Rapport Cirad-Tera/Ere, La Réunion, 21 p.

Prêcheur, H. (1999). *Gestion des effluents dans les élevages du sud de la Réunion - Constitution d'un modèle d'action*. Mémoire DAA, Ensa Rennes, Cirad, St Denis de La Réunion, 52 p. + annexes.

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 DESS « Gestion des systèmes agro-sylvo-pastoraux en zones tropicales », Université Paris XII-Créteil, Cirad, La Réunion, 55 p. + annexes.

Reynaud, S. (1995). *Diagnostic des pratiques agricoles pour une meilleure compréhension des transferts d'effluents d'élevage*. Mémoire DAA Agronomie, INA-PG, Paris, 58 p. + annexes.

Tommasino, L. (1999). *Choix et couplage de modèles du système sol-plante pour l'aide à la gestion des effluents d'élevage à la Réunion*. Mémoire de DAA Génie de l'Environnement, Ensa Rennes, 52 p. + annexes.

Viard, G. (2000). *Mise à l'épreuve d'un modèle d'aide à la gestion des effluents d'élevage ; validation et potentialités d'aide à la décision en agriculture*. Mémoire DAA Sciences animales, INA-PG, Paris, 68 p.+ annexes.

Vimeux, L. (1998). *La gestion de la matière organique dans les exploitations en diversification maraîchère des Hauts de l'Ouest de l'Ile de la Réunion*. Mémoire Ingénieur ISA, Beauvais.

Ziegler, D. & Héduit, M. (1991). *Engrais de ferme - Valeur fertilisante, gestion, environnement.* Document technique ITP, ITEB, ITCF, Paris, 35 p.

ANNEXE 1 : GUIDE D'ENQUETE SUR L'UTILISATION D'EFFLUENTS D'ELEVAGE

EA n°.....

Nom de l'agriculteur
Prénom
Adresse
Tel
Statut juridique de l'exploitation
Date de l'enquête
Enquêteur

I. DONNEES STRUCTURELLES SUR L'EXPLOITATION

SAU = ha
Friches = ha (% SAU)
Bois ou autres = ha (% SAU)
Nombre de parcelles =
Distance maximale siège/parcelle =
Mode de faire valoir
Prix du fermage

Surface mécanisable / SAU : %
Chargement : UGB / SFP

SFP : ha
SFA : ha
STH : ha
Taille moyenne des parcelles =
culture/élevage =
propriété : ha (%)
Fermage : ha (%)
Autres : ha (%)

La famille

Composition de la famille vivant sur l'exploitation :
* nombre d'enfants d'âge scolaire :
* âge du chef d'exploitation :
* niveau de formation :
* si le chef a plus de 55 ans, la succession est-elle assurée et à quel terme ?
* D'autres membres de la famille résident-ils à proximité ?

Exigences de la famille (revenu, qualité de vie, travail, patrimoine) :
* Revenu extérieur ? Autres activités (chambre d'hôtes, tourisme) ?
* Activités ou responsabilités au sein d'une organisation de vulgarisation technique :

Les productions

*** assolement (en place en)**

Culture	*Surf. (ha)*	*% SAU*	*Rendement moyen*	*Destination % (V, Au, Tr)*	*Evolution récente de l'assolement (depuis 4 - 5 ans)*
DE VENTE					
Total C vente					
FOURRAGERE					
Prairies					
dont					
Fauche					
Pâture					
Mixte					
Total SFP					
Dérobées					

V = vente, Au = autoconsommation, Tr = troupeau de l'exploitation; dans ce cas préciser le(s)quel(s)

Principaux objectifs par rapport aux cultures fourragères (être autosuffisant...) ?
Jugement de l'agriculteur sur la qualité de ses fourrages.

*** Productions animales**

Atelier (race)	*Eff. moyen /an(UGB)*	*Product. annuelle*	*Destination (V,Au,Renouvel.)*	*Si hors-sol*	
				Nombre bandes/an (effectif)	*Ecart interbandes*

Reproduction : intervalle entre vêlage
Nb d'IA par animal
Evolution de chaque atelier depuis 4-5ans et évolution future prévue :

*** Valorisation des productions animales ou végétales ?**

La main d'œuvre

Personne	*% emploi **	*Activités sur l'exploitation*		*Activité hors exploitation*	
		Nature	*période*	*nature*	*période*
Permanents **Total Perm.**					
Saisonniers **Total sais.**					
Enf. Vac Scol					
Entraide Entreprise/CUMA					

** taux d'emploi sur l'exploitation par an (approximatif, de type < 25, 25, 50, 100% ou intermédiaires)*

Commentaires (adaptation quantitative et qualitative de la main d'œuvre aux activités de l'exploitation, coûts salariaux, évolution depuis 4-5 ans et évolution future prévue).

Les équipements et bâtiments de stockage

EA n°...

Matériel	Caractéristiques (largeur, nombre de chevaux etc.)	Mode d'accès : propre, CUMA	Remarques (date, état, perspectives..)
Traction			
Travail du sol et Semis			
Epandages -engrais et phytos - effluents (liquides et secs)			
Récolte			
Transports			
Equipements d'élevage : salle de traite mobile, séchage en grange			

Recours à l'entreprise et entraide

Matériel	*Utilisation*	*Coût*	*Remarques*

Bâtiments d'élevage

Animal concerné	*capacité*	*Litière /sol*	*Mode d'évacuation des effluents*

Bâtiments ou aires de stockage d'effluents

Destination	*Caractéristiques (capacité, durée, période etc.)*	*Date de construction et motif (règlement...)*	*Avantages et inconvénients*

Degré d'autonomie en matière d'équipement ?
Projets en matière d'équipements ? Capacité financière à acheter de nouveaux équipements

II. PARCELLAIRE, GESTION DES PATURES, FOURRAGES ET CULTURES

Caractéristiques des parcelles

EA n°.....

Parcelle Nom ou n°	*Surface (ha)*	*Distance ferme (km)*	*Type de sol (selon l'agriculteur)*	*Caractéristiques défavorables : pente, cailloux, sol superficiel, petite taille, forme, accessibilité etc.*	*Engins mécaniques possibles* ?*	*Epandage d'effluents*		
						y-a-t-il déjà eu apport d'effluent	*pourrait-il y en avoir? **	*Si impossible, pourquoi*

* *S'il y a des obstacles à la mécanisation dans la parcelle, préciser pourquoi (pente, taille etc.) et quels types d'engins sont concernés (tous, que engins récolte, que épandage etc.).*

** *Attention : on veut savoir là et dans la question suivante si la parcelle présente, selon l'agriculteur, une contrainte absolue à l'épandage d'effluents (pente, pierrosité, taille ou forme, proximité source eau potable etc..), même si l'agriculteur n'a jamais recouru à des effluents. On veut déterminer la surface non épandable par contrainte parcellaire seule pour le moment.*

Utilisation des parcelles

EA n°...

Parcelle n°	Culture (espèce)	Dates de fauche (ou pâture)	Indicateurs pour faucher (ou pâturer)	Dates d'épandage	Délai d'épandage

Utilisation potentielle d'effluents sur les parcelles

EA n°....

Mois---------													**remarques**
Culture (ha)													

Récapitulatif : les surfaces d'épandage potentielles et leur dynamique

EA n°....

(1) SAU (ha)	*Commentaires (raisons des interdictions, des écarts SPTE-SEP, SEP,SEE etc.*
(2) Surf. interdite à l'épandage car parcellaire- SIE (ha)	
(3) Surf.Pot Epandage SPTE– (1-2)	
(4) Surf. où épandage possible du fait des cultures et fauches (SEP) (ha)	
(5) Surf. d'épandage effectif –SEE- (ha)	

Dynamique des surfaces épandables possibles au cours de l'année

EA n°....

Mois													**remarques**
SEP (cultures)													

III. REGLES DE FERTILISATION PAR CULTURE

Culture =

*** Modalités et dates prévues de fertilisation**

Engrais	*Dose en kg/ha*	*Date(s) d'apports*	*Variations prévues de doses, dates ou forme d'engrais entre parcelles de la sole **

** variations rencontrées selon la parcelle (type de sol, profondeur, cailloux pente etc.), le précédent cultural ou l'histoire culturale (ancienne prairie par ex.) ou selon l'état de la culture. Faire préciser les critères utilisés*

Comment décidez-vous de votre (vos) doses d'apports et de votre (vos) dates d'apport sur cette culture (références, conseils, calculs, mesures éventuelles sur les parcelles..)

*** Enregistrement des pratiques lors de cette campagne**

Pratique réalisée		*Parcelles ou groupes de parcelles*	*remarques*
Modalité (dose)	*Dates d'apport*		

*** Utilisation actuelle d'effluents d'élevage sur cette culture**

- si OUI :

- Nature, quantités et dates d'apports prévues
- Comment décidez-vous des doses apportées et des dates d'apport (références, lesquelles, calculs, opportunités, réglementations etc...)
- Tenez-vous compte de la Matière organique apportée dans la fertilisation minérale ? sinon, pourquoi (connaissances des compositions, des quantités apportées etc..) ?
- Variations éventuelles de nature, de quantités ou de dates d'apports d'effluents sur cette culture en fonction des parcelles une année donnée et/ou entre années
- Avez-vous assez de terres pour écouler tous vos effluents ?
- Connaissez-vous la valeur fertilisante de vos effluents ?
- Quelle en est l'adéquation avec les besoins de vos cultures ?

IV. ORGANISATION DU TRAVAIL SUR L'EXPLOITATION

EA n°...

Activité *	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	remarques

** Comprend et dans cet ordre : les ateliers d'élevage s'il y en a (une ligne par atelier), les productions végétales, de vente et fourragères, y compris les prairies (une ligne par culture), et les activités extérieures éventuelles. Demander un déroulement moyen, au minimum mois par mois, en indiquant la nature des opérations faites (labour, semis, coupe etc.).*

Récapitulatif par période

EA n°

Période							
Opérations à faire							
Chantiers constitués							
Simultanés Possibles							
Simultanés Impossibles							
Arbitrages si concurrences							
Taux d'emploi estimé							

Dans les périodes d'inadéquation entre l'offre et la demande, comment faites-vous face ?

EA n°... : Commentaires sur l'Organisation du travail et l'épandage d'effluents

Périodes de l'année qui sont des pointes de travail selon l'agriculteur:

Sur le seul plan de l'organisation du travail, à quelles périodes vous serait-il possible de faire des apports d'effluents? A quelles périodes considérez-vous que c'est impossible du fait du taux d'occupation de la main d'œuvre et /ou des équipements ?

Seriez-vous prêts à aller épandre chez les cultivateurs dans des périodes creuses ?

Temps de transport des matières organiques entre élevage et cultures

Temps d'épandage

V. PRODUCTION D'EFFLUENTS

Calendrier des flux d'effluents

Production

Atelier	Animaux	Nature	Tonnage												

Stockage

Nature de l'effluent	Lieu de stockage	Durée du stockage	Date de vidange												

D'après vous, les capacités de stockage sont-elles suffisantes pour épandre ou transférer aux moments opportuns ?

Diagramme donnant le taux de remplissage des unités de stockage au cours du temps
Exemple : volume dans la fosse = lisier + eaux de lavage + pluies

Devenir des effluents :

Nature de l'effluent	Quantité épandue	Quantité perdue	Quantité vendue	Quand ?	A qui ?	Quel prix ?

D.L.= déjection liquide, D.S. = déjection solide

Epandage

Avez-vous un plan d'épandage (sur l'EA et hors EA) ?

Culture parcelle	Surf totale	Surf fumée	Dose /ha												

L'épandage pose-t-il des problèmes avec le voisinage ?

Transformation

Transformez-vous vos effluents ?
Compostage :

Etes-vous prêts à le faire vous-mêmes ? (travail + se procurer des substrats carbonés) ?
A quelles conditions êtes-vous prêts à participer à une unité collective de compostage ? (coût, travail, transport)
Etes-vous prêts à amener vos effluents et à quelles périodes de l'année ?

Plan de répartition des flux :

Positionnement des bâtiments d'élevage, des lieux de stockage, de dépôts aux champs, des pratiques d'épandage

Descriptif des travaux (opérations et main d'œuvre)
Nettoyage, évacuation
Stockage
Enlèvement
Epandage
Qualité des effluents produits

Conduite du troupeau
Pour voir les conséquences de la conduite du troupeau sur la quantité et la qualité des effluents d'élevage
Alimentation du troupeau au cours de l'année (prévision et adaptation)
Part des concentrés, des fourrages achetés et des fourrages produits
Constituez-vous des lots pour l'alimentation ?

Type d'animaux	*Effectifs*	*Période*	*Période*	*Période*	*Période*

Comment décidez-vous de la mise à l'herbe, de la mise en stabulation ?
Observez-vous une variabilité de la qualité des effluents au cours de l'année ?
Si oui, pour quelles raisons a priori (changement d'alimentation) ?
Est-ce pris en compte dans leur valorisation ?
Connaissez-vous la composition de vos effluents (analyses, calculs) ?

Questions ouvertes :
Quels sont vos projets en ce qui concerne les déjections animales ?
Les effluents vous posent-ils des problèmes ?
Stockage/ production continue, épandage, clients, qualité/utilisation
Quelle source de conseil, d'information avez-vous sur les effluents et leurs utilisations ?

Réseaux producteurs-utilisateurs :
Connaissez-vous d'autres producteurs d'effluents ?
Connaissez-vous des utilisateurs d'effluents ? Quelle est leur demande ?
Y a-t-il des liens entre ces acteurs ?

- Si oui, précisez
- Si non, quels sont les principaux obstacles à la mise en place d'un réseau ? transport, entente...

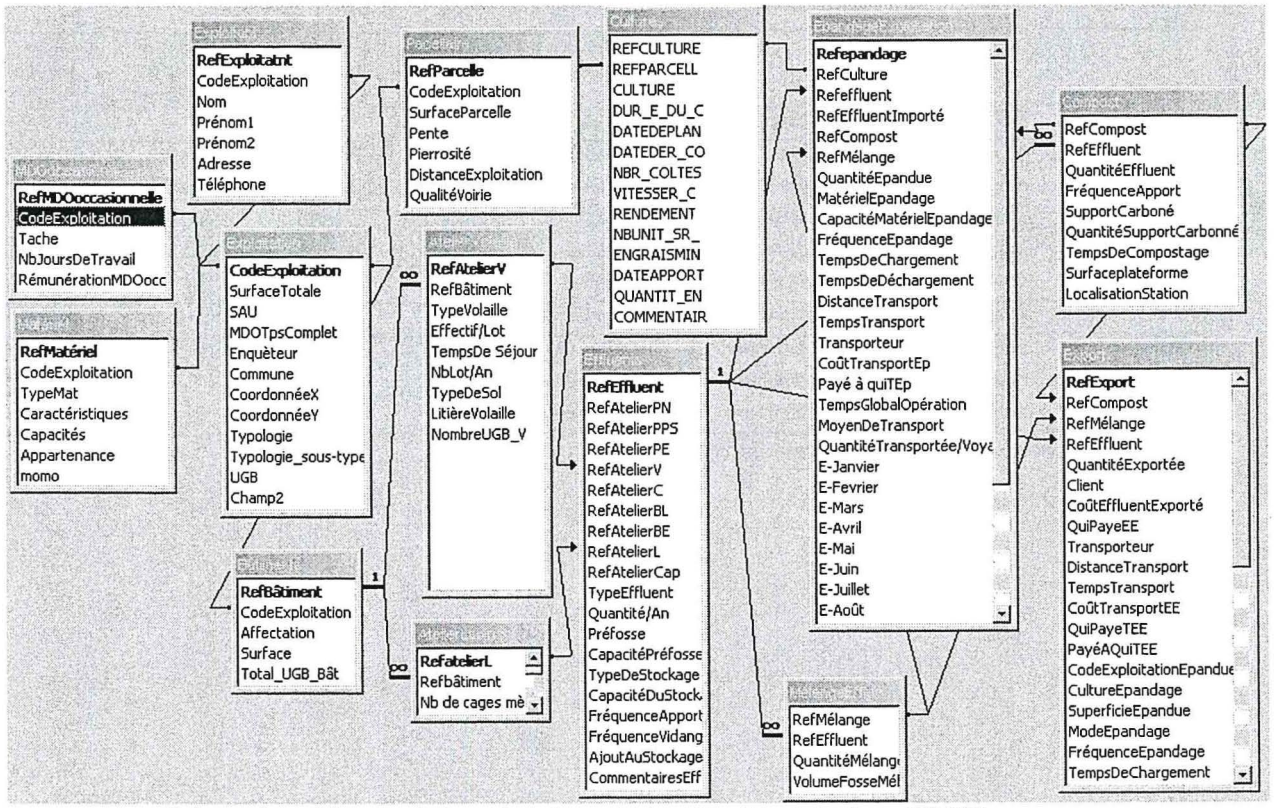
ANNEXE 2 : STRUCTURE ET INFORMATIONS DE LA BASE DE DONNEES D'EXPLOITATIONS SOUS ACCESS® - BDEX

Cette base de données contient des informations relatives à 192 exploitants agricoles de la Réunion, dont une grande partie est localisée dans le cirque de Salazie. Les informations concernent l'équipement des exploitations (bâtiments et matériel agricole), les cheptels, la production d'effluents d'élevage associée, les parcelles agricoles et leur usage.

Les tables concernant les équipements sont nommées : *Exploitation, Bâtiment, Materiel.*

Les tables concernant les activités d'élevage sont celles décrivant les différents ateliers (*AtelierVolaille, AtelierLapins*, etc.) ainsi que les productions d'effluents (*Effluents, Mélange Effluent, Compost, Epandage Exploitation, Export*, ces tables étant liées principalement par le champ *RefEffluent*).

Les tables concernant le parcellaire sont nommées *Parcellaire* et *Cultures*, cette dernière étant liée à la table *EpandageExploitation* par le champ *RefCulture* (on épand sur une parcelle). La figure ci-dessous donne les liens entre ces différentes tables.



Principales tables et relations de la base de données d'exploitations (BDEX).

ANNEXE 3 : VARIABLES CONCERNANT L'APPROVISIONNEMENT EN LITIERE DES ELEVAGES

Pour compléter le module de production, une variable *approvisionnement en litière* (copeaux de bois, paille de canne, divers cartons et sous-produits de l'industrie) peut être rajoutée. La litière ne concerne que l'étable entravée, la stabulation partielle et l'aire totalement paillée. De même, tous les types d'élevage ne sont pas concernés (Tableau A3.1).

Pour les volailles de chair, la litière est apportée en une seule fois au début de chaque cycle de production. Pour les autres productions, elle est apportée tous les 2 à 3 jours. Le type d'élevage détermine le type de litière et la fréquence d'apport ; le type de sol et le type d'élevage déterminent les quantités par animal ou par m^2. Pour les volailles (apport de litière à chaque cycle), la fréquence est dépendante de la durée des cycles. Pour avoir les quantités totales mises à chaque apport, il faut multiplier par le nombre d'animaux (NAP) corrigé par la durée de présence dans les bâtiments ou la surface selon les cas.

Tableau A3.1. Type de litière et apport par animal ou par m2 de bâtiment (kg/animal/j ou kg/m2/cycle) et fréquence d'apport, selon le type d'élevage et le type de sol.

		unité	Type de litière	Fréquence	Etable entravée	Stabulation partielle (50% paillée)	Aire paillée (100%)
porcs	ENG	PC présent	Divers	2 à 3 j			3 à 4
bovins	VL	vache	Paille	2 à 3 j	2 à 3	4 à 6	10 à 15
	VA	vache	Paille	2 à 3 j	2 à 3	4 à 6	8 à 12
	jeunes > 12 mois	taurillon/génisse	Paille	2 à 3 j	2 à 3	4 à 6	6 à 8
	jeunes < 12 mois	taurillon/génisse	Paille	2 à 3 j		2 à 4	4 à 6
	veaux < 6 mois	Veau présent	Paille	2 à 3 j			2 à 3
petits ruminants	ovins/caprins	brebis/chèvre	Paille	2 à 3 j			4 à 6
volailles	poulets	m^2 bâtiment	Copeaux	Cycle			4 à 6
	dindes	m^2 bâtiment	Copeaux	Cycle			4 à 6
	autres	m^2 bâtiment	Copeaux	Cycle			4 à 6

Autres : pintades, coq, cou nu, poulet fermier.

ANNEXE 4 : CALCUL DES COUTS DE GESTION DES EFFLUENTS

On peut distinguer 5 postes de coûts (F/m^3) : production de MO, transformation de MO, transport de MO, transaction commerciale de MO et utilisation de MO.

Production de MO : C1 = C11 + C12 + C13

C11 = 0, on considère le coût de production de MO par les animaux nul car c'est un sous-produit de la production animale.

C12 = coût d'évacuation des bâtiments d'élevage, dépend des temps de travaux de main d'œuvre (W) et de matériel utilisé (T), calculé sur une année complète.

$C12 = [W_1 \times PHo + T_1 \times (PHt + PHf + PHr) + I_1 / a_1] / QMO$

avec : PHo = prix horaire de main d'œuvre = 70 F/h

PHt = 130 F/h pour tracteur, PHf = 50 F/h pour fourche, PHr = 50 F/h pour remorque (ou épandeur) ou citerne

W_1 et T_1 sont à déterminer par enquêtes

I_1 = investissement dans les installations d'évacuation (tuyaux, vannes, trappes, évacuateurs, chaînes, racleurs...), à déterminer par enquêtes

a_1 = durée d'amortissement des équipements d'élevage = 10 ans

QMO = quantité de MO produite par an (m^3)

C13 = coût du stockage des déjections.

$C13 = [Dst \times Ej \times PU] / [a_2 \times QMO]$ avec : $QMO = Ej \times 365$

avec : Ej = production journalière de déchet

Dst = durée de stockage nécessaire (j), variable selon les déchets et les cycles de cultures, 4 mois minimum, généralement 6 mois

PU = prix unitaire de stockage : fosse (F/m^3) pour lisiers et fientes et plate-forme (F/m^2) bétonnée ou non pour fumiers et litières, bétonnée et couverte pour compost

a_2 = durée d'amortissement des installations d'élevage = 15 ans généralement

Transformation de MO : C2 = C21 + C22 - P22 + C23 + C24

C21 = coût des supports carbonés

$C21 = [Qsc \times Psc] / QMO$

avec : Qsc = Qlis / R Qlis = QMO

R = Rc = ratio d'incorporation du lisier (ou boues) sur le support en compostage = 1.5 pour la litière (d = 0.4), 2 pour les copeaux de bois (d = 0.3), à déterminer pour la bagasse (d = 0.2) et pour la paille (d = 0.15),

R = Rf = ratio d'incorporation du lisier en biofiltration = 10 m^3 lisier / m^3 paille

Qlis = quantité (m^3) de lisier à traiter

Psc = 250 F/t livrée en vrac pour la bagasse, 550 F/t livrée en balle pour la paille de canne, 0 F/t pour la litière sur site, à déterminer pour les copeaux.

C22 = coût d'amortissement des installations de traitement

$C22 = [I_3 / a_3 + I_4 / a_4] / QMO$

avec : I_3 = total des investissements en équipements

I_4 = total des investissements en génie civil

I_3 et I_4 à reprendre sur les calculs de Macsizut pour chacun des procédés simulés (Bioarmor, Agrifiltre, Valepure, compostage)

a_3 = durée d'amortissement des équipements = 7 ans

a_4 = durée d'amortissement du génie civil = 15 ans

P22 = produit d'amortissement des subventions

$P22 = [I_3 / a_3 + I_4 / a_4] \times Ts / QMO$, Ts = taux de subventions = 70%

C23 = coût de fonctionnement des installations de traitement

$C23 = Cen + [Cmt + Can + Cff] / QMO$

avec : Cen = KWH × Pkwh, KWH = énergie dépensée par m^3 de lisier traité (voir selon procédé),

Pkwh = prix du kwh
Cmt = $0.02 \times I_3$ = coût de maintenance
Can = coût du suivi en analyses = 10000 F/an
Cff = frais financiers = $[I_3 + I_4] /2 \times Ti$, Ti = taux d'intérêt = 8.5%

C24 = coût de main d'œuvre et de matériel pour le traitement
$C24 = [W_2 \times PHo + T_2 \times (PHt + PHf + PHrt)] / Q_{MO}$
avec : PHo = prix horaire de main d'œuvre = 70 F/h
PHt = 130 F/h pour tracteur, PHf = 50 F/h pour fourche, PHr = 50 F/h pour remorque (ou épandeur) ou citerne, PHrt = 200 F/h pour retourneur automoteur
$W_2 = T_2 = 0.2$ h / m^3 de lisier incorporé + 0.1 h / m^3 de support carboné (ou fumier) à malaxer, travail réalisé avec tracteur + fourche
$W_2 = T_2 = 0.4$ h / m^3 de support carboné (ou fumier), travail réalisé avec un retourneur automoteur

Transport de MO : C3 = C31 + C32 + C33

C31 = coût du chargement de la MO
$C31 = [W_3 \times PHo + T_3 \times (PHt + PHf + PHr)] / Q_{MO}$
avec : PHo = prix horaire de main d'œuvre = 70 F/h
PHt = 130 F/h pour tracteur, PHf = 50 F/h pour fourche, PHr = 50 F/h pour remorque (ou épandeur) ou citerne
$W_3 = T_3 = 10$ min / 6 m^3 pour lisier et boues (citerne) et 15 min / 15 m^3 pour fumier et compost (épandeur)

C32 = coût du transport
$C32 = [D / Vp + D / Vv] \times [PHo + PHt + PHr] / Q_{MO}$ pour tracteur + remorque
$C32 = [(D / Vp \times PTC) + (D / Vv \times PV)] \times Pth / Q_{MO}$ pour camions
avec : D = distance en km entre points de livraison,
Vp = vitesse à plein en km/h, Vv = vitesse à vide en km/h, selon voirie
PHo = prix horaire de main d'œuvre = 70 F/h, PHt = 130 F/h pour tracteur, PHr = 50 F/h pour remorque (ou épandeur) ou citerne
PTC = poids total en charge en t, PV = poids à vide en t, pour les camions
Pth = prix par tonne "horaire" pour les camions = 50 F/t.h

C33 = coût du déchargement
$C33 = [W_4 \times PHo + T_4 \times (PHt + PHr)] / Q_{MO}$
avec : PHo = prix horaire de main d'œuvre = 70 F/h
PHt = 130 F/h pour tracteur, PHr = 50 F/h pour remorque (ou épandeur) ou citerne
$W_4 = T_4 = 5$ min par citerne ou épandeur

Transaction de MO :

C4 = prix de vente de la MO, variable selon la MO, à déterminer par enquête
C4 lisier = C4 fientes = C4 boues = C4 écumes = 0
C4 litière = 50 F/t
C4 fumier (bovin) = 100 F/t
C4 compost = 150 F/t

Utilisation de MO :

C51 = coût d'épandage de la MO
$C51 = [W_5 \times PHo + T_5 \times (PHt + PHr)] / Q_{MO}$
avec : PHo = prix horaire de main d'œuvre = 70 F/h
PHt = 130 F/h pour tracteur, PHr = 50 F/h pour remorque (ou épandeur) ou citerne
W_5 et T_5 = 10 min / citerne (6 m^3) ou 15 min / épandeur (15 m^3)
si l'épandage est manuel, W_5 et T_5 sont à déterminer par enquêtes

Tableau A4.1. Coûts horaires de fonctionnement et charges de différentes catégories de camions.

	libellé	tarif	catégories	PTC (t)	PV (t)	Charge (t)
main d'œuvre	PHo	70 F/h	camion < 3.5 t	3.5	1.7	1.8
tracteur	PHt	130 F/h	camion < 7 t	7	2.5	4.5
remorque	PHr	50 F/h	camion < 12 t	12	3.5	8.5
fourche	PHf	50 F/h	camion < 18 t	18	6	12
retourneur	PHrt	200 F/h	camion < 30 t	30	10	20
camion	Pth	50 F/t.h	camion < 42 t	42	13	29

Tableau A4.2. Vitesses moyennes de déplacement selon le type de voie empruntée.

vitesse (km/h)	tracteur + remorque		camions	
	Vv	Vp	Vv	Vp
chemin d'accès parcelles	5	2		
chemin d'exploitation	10	4	10	5
voirie rurale bétonnée	15	8	20	10
voirie départementale	25	15	60	40
voirie nationale	25	20	80	60
route de montagne (<18t)	15	10	40	30

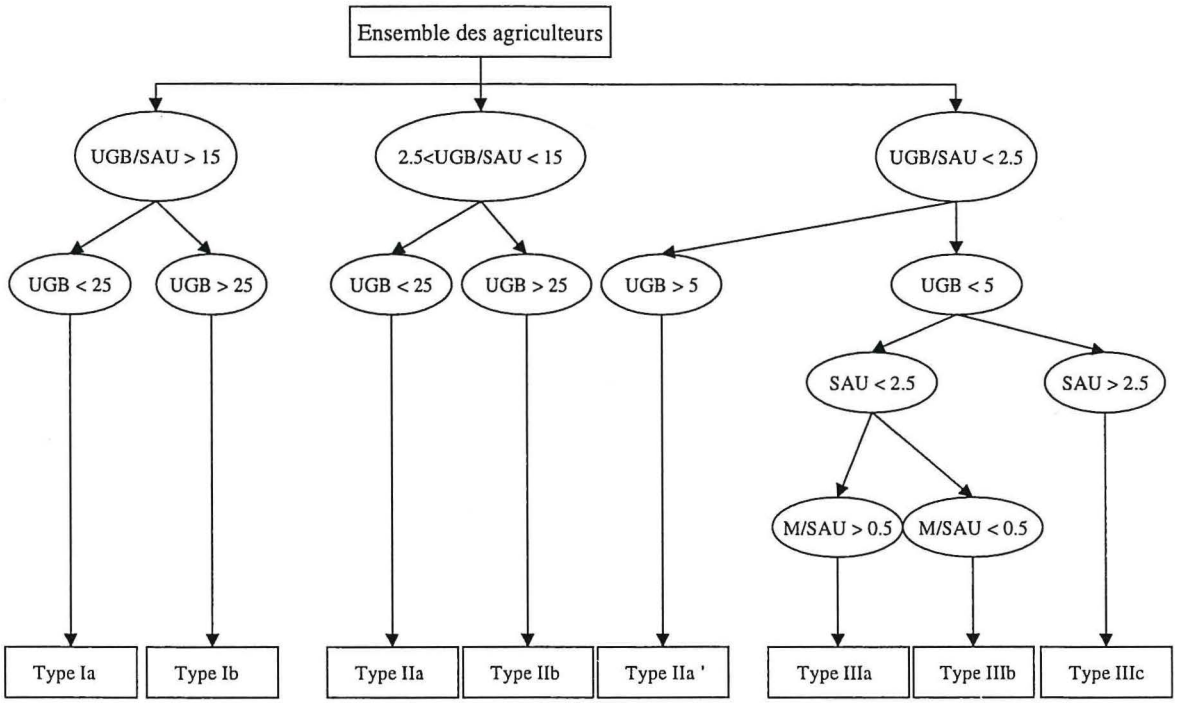
Tableau A4.3. Densités de différents produits organiques.

produit	densité	produit	densité	produit	densité
paille	0.15	litière	0.4	fientes	0.8
bagasse	0.2	compost	0.6	boues	0.9
copeaux	0.3	fumier / écumes	0.7	lisier	1.0

ANNEXE 5 : TYPOLOGIE DES EXPLOITATIONS POUR LA GESTION DES EFFLUENTS D'ELEVAGE

Clef de détermination de la typologie basée sur le rapport UGB/SAU (d'après Reynaud, 1995), avec :

- UGB : nombre d'unités de gros bétail ;
- SAU : surface agricole utile ;
- M : surface en maraîchage



UGB/SAU > 15

- Type Ia : Hors-sol petites structures
- Type Ib : Hors-sol grosses structures

2.5 < UGB/SAU < 15

- Type IIa : Diversifié orientation production végétale
- Type IIb : Diversifié orientation hors-sol
- Type IIa' : Bovin semi-intensif

UGB/SAU < 2.5

- Type IIIa : Maraîcher intensif
- Type IIIb : Traditionnel
- Type IIIc : Production végétale