

**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

**Modélisation conceptuelle  
des flux d'azote en exploitation  
d'élevage bovin laitier  
à la Réunion**

*J. Vayssières, F. Guerrin, J.-M. Paillat<sup>1</sup>,  
R. Martin-Clouaire<sup>2</sup>, J.-P. Rellier<sup>2</sup>, P. Lecomte<sup>3</sup>*



Modélisation conceptuelle  
des flux d'azote en exploitation  
d'élevage bovin laitier  
à la Réunion

*J. Vayssières, F. Guerrin, J.-M. Paillat<sup>1</sup>,  
R. Martin-Clouaire<sup>2</sup>, J.-P. Rellier<sup>2</sup>, P. Lecomte<sup>3</sup>*

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)

Mars 2004 — Rapport Cirad-Tera n° 15/04

<sup>1</sup> Cirad-Tera, UMR Sol Agronomie Spatialisation, Inra, Rennes.

<sup>2</sup> Inra-MIA, Unité de Biométrie et Intelligence artificielle, Toulouse.

<sup>3</sup> Cirad-EMVT, Pôle Elevage, Station de Ligne Paradis, La Réunion.



# SOMMAIRE

<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>3</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>4</b>
<b>I. METHODOLOGIE</b> .....	<b>5</b>
I.1 OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	5
I.2 SOURCES D'INFORMATION UTILISEES .....	6
I.3 CADRE DE REPRESENTATION CONCEPTUELLE D'UN SYSTEME DE PRODUCTION .....	6
<i>I.3.1 Décomposition du système de production en trois sous-systèmes</i> .....	6
<i>I.3.2 Représentation conceptuelle de stratégies de conduite</i> .....	7
<b>II. REPRESENTATION DES FLUX D'AZOTE EN EXPLOITATION D'ELEVAGE BOVIN LAITIER.....</b>	<b>8</b>
II.1 DECOMPOSITION DE L'EXPLOITATION EN QUATRE ATELIERS .....	8
II.2 ATELIER GESTION DES PRAIRIES.....	10
II.3 ATELIER GESTION DES ALIMENTS.....	11
II.4 ATELIER GESTION DU TROUPEAU .....	12
II.5 ATELIER GESTION DES FERTILISANTS .....	13
<b>III. MODELISATION DE LA CONDUITE DE L'ATELIER GESTION DES FERTILISANTS .....</b>	<b>14</b>
III.1 CARACTERISTIQUES DU MODELE D'ACTION .....	14
<i>III.1.1 Terminologie</i> .....	14
<i>III.1.2 Flux soumis à décision</i> .....	15
III.2 ELEMENTS DE STRATEGIE DETERMINANT LA GESTION DES FERTILISANTS.....	15
III.3 DESCRIPTION DES ACTIVITES DE L'ATELIER GESTION DES FERTILISANTS .....	16
<i>III.3.1 Module d'approvisionnement des stocks de fertilisants</i> .....	16
III.3.1.1 Activité d'évacuation des effluents.....	16
III.3.1.2 Activité d'achat d'engrais minéraux.....	18
<i>III.3.2 Module d'utilisation des stocks de fertilisants</i> .....	18
III.3.2.1 Evénements déclenchant l'utilisation des fertilisants.....	18
III.3.2.2 Priorités entre les activités d'utilisation selon le type de fertilisant .....	19
III.3.2.3. Activités d'épandage .....	19
III.3.2.4 Activité de vente.....	21
<i>III.3.3 Module de compostage du fumier</i> .....	21
III.3.3.1 Activité de mise en andains .....	22
III.3.3.2 Activité de retournement des andains .....	22
<i>III.3.4 Exemple de formalisation d'un plan de gestion des fertilisants</i> .....	23
<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>24</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>26</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>29</b>

## INTRODUCTION

Si l'élevage de ruminants aboutit à l'élaboration de produits à haute valeur biologique et alimentaire, il entraîne également le rejet dans l'environnement de matières organiques non digérées par l'animal, généralement riches en azote. Ces flux, potentiellement générateurs de risques environnementaux et de nuisances, font l'objet de préoccupations sociétales auxquelles il est demandé aux filières et aux éleveurs d'apporter des réponses.

Afin d'évaluer la part du compartiment animal (notamment des élevages) dans les flux d'azote découlant de la gestion de la biomasse sur un territoire, on peut tirer parti des nombreuses données issues de travaux de recherche conduits en milieux tempérés et tropicaux (LECOMTE et al., 2002). Ces travaux fixent des ordres de grandeur et décrivent les processus complexes de transformation et de transport auxquels participent les éléments carbonés et azotés (par exemple, la production de lait à partir d'une ration alimentaire ou l'évolution d'un fumier en compostage). L'évaluation successive des différents compartiments ne permet pas, au stade actuel, de fermer le cycle de l'azote à l'échelle de l'agro-écosystème d'élevage. Elle fait entrevoir, par contre, l'intérêt d'une approche intégrée et, au-delà de la perspective trop souvent négative attachée aux effluents d'élevage, les nombreux points sur lesquels l'éleveur peut intervenir positivement au travers de la conduite de son système de production, directement ou indirectement, pour : i) contrôler les sorties d'azote sous différentes formes (émissions gazeuses, vente d'effluents solides), ii) contribuer à la séquestration du carbone, iii) limiter la dégradation de la fertilité des sols, voire l'améliorer. Face à la forte croissance des productions de lait et de viande qui se profile dans les pays du Sud ou à la Réunion, confrontés à la nécessité d'un développement durable, un important travail de recherche mérite d'être poursuivi sur la diversité des pratiques de gestion des matières azotées dans les systèmes de production et sur la représentation de la complexité et des synergies qui découleraient d'une intégration accrue de la conduite de la ressource, de l'animal et des produits. Une modélisation permettant la simulation dynamique de l'évolution des systèmes de production et de leurs impacts environnementaux potentiels, selon des stratégies de conduite actuelles ou hypothétiques, permettrait d'avancer plus rapidement sur ces questions.

Ce questionnement sur les « flux d'azote », commun à de nombreuses situations, est en phase avec les questions environnementales liées au développement des filières animales à la Réunion. Ces questions se posent, notamment, dans le cadre du projet de Parc national des Hauts de la Réunion. Une grande partie des élevages laitiers actuels se trouveront, sans doute, en zone périphérique du parc et auront, de ce fait, un intérêt accru vis-à-vis d'outils permettant d'évaluer la qualité des modes de gestion innovants qui sont en train d'être mis en place. D'une part, la Sicalait<sup>6</sup> tente d'organiser l'approvisionnement en paille de canne à sucre des élevages laitiers pour permettre l'apport de ressources alimentaires complémentaires, le paillage des aires de repos et la production de fumier, qui pourra être composté et servir à la fertilisation organique des prairies. La production de compost, produit organique plus stable et exempt de nuisances olfactives, contrairement au lisier, peut s'envisager à l'échelle de l'exploitation individuelle. En ce sens, la Sicalait et l'Union des AFP conduisent, avec l'appui du Cirad et de l'Inra, des expérimentations sur le compostage des fumiers de bovins réalisés avec de la paille de canne à sucre. D'autre part, des projets de recherche récents, menés par le Cirad en collaboration avec l'Inra et l'université de la Réunion, visent la durabilité environnementale des élevages. L'équipe Gestion des déchets organiques (Gdor) du Pôle Agriculture durable, environnement et forêt (Padef), a ainsi conçu un modèle de gestion des effluents d'élevage au niveau de l'exploitation agricole (Magma), permettant de prendre en compte différents types d'élevages et de cultures (GUERRIN, 2001). De même, le pôle Elevage du Cirad a abordé la problématique des indicateurs environnementaux : le bilan et l'efficacité azotée ont été évalués pour différents types d'exploitations d'élevage bovin laitier (GOUSSEFF et GRIMAUD, 2002). Dans cette approche, l'exploitation était considérée comme une « boîte noire », dont seules les entrées et sorties de matières azotées sont mesurées. Un premier travail d'analyse des flux internes à l'exploitation laitière avait été réalisé par CHOLLET (1998). Ce travail, qui visait principalement les risques de pertes d'azote au niveau de la surface fourragère, a mis en évidence l'intérêt de mieux gérer les apports d'azote sur les prairies en fonction du niveau d'intensification de la production laitière et de la quantité de concentrés azotés entrant dans l'exploitation. Partant de ces premiers travaux, la construction d'un modèle de simulation des flux d'azote au niveau global de l'exploitation nous paraît être un moyen utile pour mieux comprendre les pratiques de gestion des matières azotées des éleveurs réunionnais et les aider à élaborer des stratégies de gestion à la fois agronomiquement efficaces et respectueuses de l'environnement.

D'un point de vue méthodologique, la construction de ce modèle de flux d'azote en élevage bovin laitier est l'occasion de tester l'ontologie des systèmes de production agricoles élaborée par l'Unité de Biométrie et intelligence artificielle de l'Inra de Toulouse (MARTIN-CLOUAIRE et RELIER, 2003), sur un système de production complexe (exploitation d'élevage), différent du cas ayant servi à la construire (la production de tomate sous serre). Cette ontologie à vocation générique définit une structure conceptuelle et un vocabulaire destinés à guider l'acquisition de la connaissance sur les exploitations agricoles et à faciliter la formalisation de leur fonctionnement sous la forme de modèles simulables par l'intermédiaire des logiciels *Dièse* et *Control Dièse* spécifiquement développés à cette fin.

En préalable à la construction d'un tel modèle de simulation, ce rapport présente les premiers éléments de description conceptuelle des exploitations d'élevage bovin laitier à la Réunion. Dans un premier temps (chapitre I), nous préci-

---

<sup>6</sup> La Sicalait, unique coopérative laitière réunionnaise, et l'Union des associations foncières pastorales (UAFP) constituent les deux principales organisations professionnelles de la filière lait.

sons les objectifs de notre démarche et présentons les notions élémentaires de formalisation d'un système de production agricole. Ensuite (chapitre II), nous proposons une représentation du système de production laitier sous la forme d'un diagramme de flux d'azote comportant quatre modules interconnectés, qui correspondent aux quatre ateliers principaux identifiés dans les exploitations : Gestion des prairies, Gestion des aliments, Gestion du troupeau, et Gestion des fertilisants. Enfin (chapitre III), nous détaillons le système de décision associé au module Gestion des fertilisants au sein de l'exploitation.

## I. METHODOLOGIE

### I.1 OBJECTIFS DE L'ETUDE

Les principaux objectifs de ce projet de modélisation sont les suivants :

- ⇒ constituer un cadre de synthèse des données et des connaissances relatives aux exploitations d'élevage provenant d'approches très diverses (zootechnie, pastoralisme, agronomie, gestion,...) ;
- ⇒ tester l'ontologie de modélisation des systèmes de production agricoles (MARTIN-CLOUAIRE et RELIER, 2003) ;
- ⇒ généraliser à l'ensemble des flux le modèle d'aide à la gestion des effluents d'élevage Magma (GUERRIN, 2001) ;
- ⇒ aider, à terme, les acteurs agricoles à la gestion globale de l'azote dans les exploitations laitières, en permettant de tester par simulation la diversité des pratiques des éleveurs et d'évaluer les conséquences, sur le système de production et sur l'environnement, de nouvelles pratiques de gestion (par exemple, le paillage des aires de repos permettant de produire du fumier et sa transformation en compost pour fertiliser les prairies).

D'autres attentes évoquées par la profession ne nous semblent pas directement intégrables dans ces objectifs. D'une part, un modèle de simulation de flux ne pourra pas, en tant que tel, justifier l'adaptation des normes environnementales au contexte réunionnais pour tenir compte, notamment, des fortes potentialités de production fourragère et, donc, de la capacité accrue d'absorption d'azote par le milieu en comparaison avec les zones tempérées. Par contre, les essais agronomiques de longue durée, envisagés par la Sicalait, l'UAFP et le Cirad, visant à comparer les fertilisations minérale et organique (lisier, fumier, compost) des prairies pourraient, en partie, répondre à cette attente. D'autre part, le modèle informatique prévu à la suite de ce travail de modélisation conceptuelle, ne sera pas délivré sous la forme d'un outil directement utilisable par les techniciens, vulgarisateurs ou éleveurs. Outre, qu'un modèle de simulation n'a pas forcément le caractère opérationnel requis pour la gestion d'une exploitation agricole, réaliser un outil robuste, adapté aux besoins d'utilisateurs variés, bien documenté, et doté d'une interface accessible à un non spécialiste, représente un travail de développement d'une toute autre ampleur. Par contre, ce modèle pourra être utilisé, avec l'appui des chercheurs agronomes et modélisateurs, pour aider la réflexion des techniciens ou des éleveurs sur leurs pratiques et les innovations projetées.

En référence à la démarche issue de l'expérience acquise dans l'élaboration du modèle Magma (GUERRIN, 2001), ce projet de modélisation peut être décomposé en 9 étapes :

1. Enquêtes auprès des exploitants dans les différentes régions d'élevage de l'île de façon à couvrir la diversité de fonctionnement des exploitations.
2. Construction d'une typologie des exploitations basée sur des critères de fonctionnement, afin de définir des exploitations types pouvant servir de base aux simulations.
3. Formalisation des processus biophysiques majeurs sous la forme de flux et de stocks et paramétrage simplifié des fonctions permettant de les décrire.
4. Réalisation d'un « modèle d'action » formalisant le système décisionnel de l'exploitant, c'est-à-dire réalisant une synthèse des principaux paramètres structurels et des variables d'état permettant de décrire le fonctionnement d'une exploitation, ainsi que des variables de contrôle et des règles de gestion des éleveurs.
5. Eventuellement, mise en forme de ces modèles biophysique et décisionnel selon le cadre de formalisation proposé par l'ontologie des systèmes de production agricoles (MARTIN-CLOUAIRE et RELIER, 2003).
6. Implémentation informatique du modèle sous une forme à définir.
7. Validation du modèle par simulation de scénarios de gestion correspondant aux pratiques actuelles, dont les résultats seront confrontés aux réalités agronomiques, zootechniques et socio-économiques des exploitations.
8. Conception et évaluation de scénarios de gestion alternatifs aux pratiques actuelles.
9. Evaluation du potentiel d'adoption de ces alternatives par les éleveurs selon différents points de vue (performances technico-économique, adaptation à différentes contraintes, notamment de disponibilité en temps de travail).

Le travail présenté dans ce rapport aborde en partie les étapes 3 à 5 décrites ci-dessus. Il constitue la première ébauche d'un modèle conceptuel permettant de représenter les relations entre les entités fonctionnelles d'un système de production bovin laitier. Cette représentation prend, notamment, la forme de diagrammes des flux d'azote relatifs aux quatre ateliers principaux identifiés au sein des exploitations : Gestion des prairies, Gestion des aliments, Gestion du troupeau, et Gestion des fertilisants. Ces flux sont de deux types : ceux qui correspondent aux processus biophysiques, non contrôlés directement par l'éleveur, et ceux qui résultent des activités contrôlées par l'éleveur. Les activités de gestion des fertilisants (engrais minéraux, effluents d'élevage et leurs dérivés) ont été étudiées de façon plus approfondies, du fait de nos acquis en ce domaine (GUERRIN et PAILLAT, 2003). Nous présentons une version préliminaire d'un « modèle d'action » relatif à cet atelier, en synthétisant la connaissance que nous en avons sous la forme de paramètres structurels, de variables de gestion et de règles décisionnelles, censées représenter de façon générique la diversité des pratiques des éleveurs.

## I.2 SOURCES D'INFORMATION UTILISEES

Nous avons utilisé trois sources d'information principales :

- Les données synthétisées sous la forme du modèle d'action pour la gestion des effluents d'élevage, généralisé à l'ensemble des types d'élevages et de cultures rencontrés à la Réunion (AUBRY et al., 2001) ; notre étude représente une spécialisation de ce modèle d'action aux élevages bovins laitiers.
- Les dires d'experts, notamment J. Lepetit et J.-M. Paillat ; le premier est technicien à la Sicalait, il suit les élevages laitiers réunionnais depuis 7 ans et s'est largement investi dans les projets récents d'approvisionnement des élevages en paille de canne, comme fourrage de complément et litière pour les animaux, et le compostage des fumiers résultant (SICALAIT, 2002). Le second est chercheur au Cirad-Tera. Depuis 2000, mis à disposition de l'Inra-EA (UMR Sol, Agronomie, Spatialisation) à Rennes, il a étudié pendant plus de 10 ans les élevages réunionnais (MANDRET et al., 2000), notamment pour le conditionnement de la production herbagère par enrubannage et la gestion des effluents d'élevage (GUERRIN et PAILLAT, 2003).
- Les résultats d'une enquête réalisée en août 2003 par E. Nataf, stagiaire à la Sicalait et au Pôle Elevage du Cirad Réunion ; cette enquête, qui a concerné 23 exploitations considérées comme représentatives de la diversité de fonctionnement des élevages, avait pour but de réactualiser une typologie des élevages laitiers basée sur des critères technico-économiques (ALARY, 2001 ; TACHE, 2000) et de comprendre les trajectoires d'évolution des élevages.

## I.3 CADRE DE REPRESENTATION CONCEPTUELLE D'UN SYSTEME DE PRODUCTION

La connaissance préalable d'une partie de l'ontologie des systèmes de production agricoles (MARTIN-CLOUAIRE et RELIER, 2003) a constitué un apport méthodologique pour la formalisation du système de production bovin laitier (clarification et guide d'acquisition des connaissances). La formation de J. Vayssières à cette ontologie par R. Martin-Clouaire et J.-P. Relier, a été organisée en février 2003 à l'unité de Biométrie et Intelligence artificielle de l'Inra à Toulouse. Une exploitation d'élevage bovin laitier (EBL) constitue bien une production agricole pilotée et la tâche visée est la simulation de son évolution, évaluée en termes technique et environnemental<sup>7</sup>, au cours d'une certaine période de temps, en fonction de modifications des pratiques et de variations des conditions environnementales non contrôlées. Il y a bien un décideur unique, le chef d'exploitation, qui assume la supervision du système de production.

### I.3.1 Décomposition du système de production en trois sous-systèmes

La figure 1 présente l'organisation d'un système de production agricole, telle que proposée par l'ontologie ; le système peut être décomposé en trois sous-systèmes : le système décisionnel, le système opérant et le système piloté.

Le système piloté est composé d'entités biophysiques (troupeau, parcelles cultivées) et il est le siège de processus dont découlent les flux de matière en son sein. Ces processus sont de deux types :

- ⇒ Des processus (relativement) « autonomes » (non entièrement déterminés par le système décisionnel ni complètement influencés par le système opérant) : il s'agit, par exemple, du métabolisme animal conduisant à la production de lait, fèces, biomasse, à partir de l'alimentation ingérée, la pousse de l'herbe sur les parcelles, la transformation de fumier en compost, etc.
- ⇒ Des processus (relativement) « contrôlés » (entièrement déterminés par le système décisionnel et complètement influencés par le système opérant) : il s'agit, par exemple, des flux d'approvisionnement des stocks de fourrage ou d'effluents par l'intermédiaire, respectivement, d'opérations de fauche des prairies ou de raclage des bâtiments d'élevage, de l'exportation de lait par le biais d'opérations de traite des animaux, de stockage et de collecte, etc.

<sup>7</sup> Une évaluation économique pourrait être envisagée par la combinaison du modèle de flux à un module économique exogène.

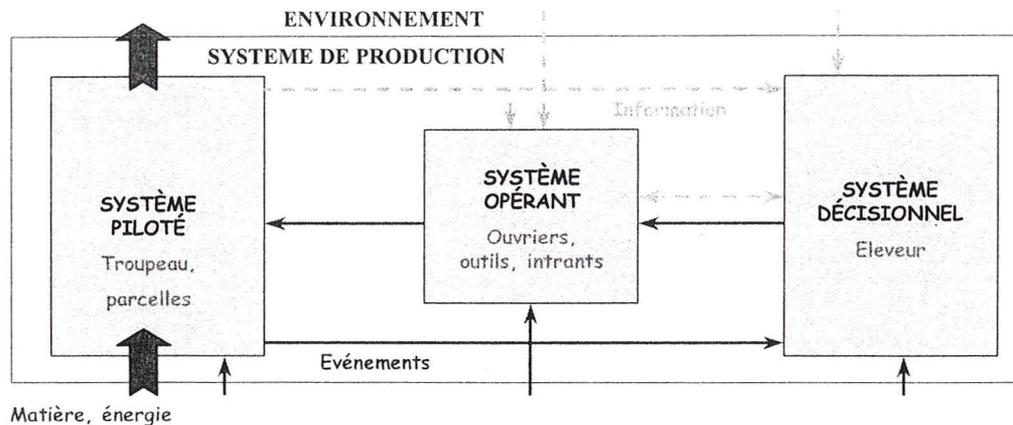


Figure 1. Représentation d'un système de production agricole en trois sous-systèmes.

Le système décisionnel est en charge du système piloté par l'intermédiaire du système opérant qui met en œuvre la stratégie choisie. Ce sous-système génère une liste d'activités préconisées et exprime des règles de gestion en accord avec cette stratégie.

Le système opérant détermine et exécute tout ou partie des activités préconisées par le système décisionnel, exerçant ainsi une influence sur l'état du système piloté. Son unique composant est l'ensemble des types de ressources (« pool » de ressources) qui peuvent être utilisées pour la mise en œuvre de la stratégie. Cette mise en œuvre tient compte de la disponibilité des ressources et de l'état de l'environnement du système de production. D'une manière générale, les ressources sont des éléments du système de production nécessaires à la réalisation des activités (main d'œuvre, outils et engins agricoles, stocks de matières azotées...).

Les représentations du système piloté et du système opérant peuvent être traitées de façon relativement indépendante, alors que la définition du système décisionnel s'appuie sur un schéma général du système de production, incluant sa composante biophysique qui détermine largement la structure et les finalités de l'exploitation. La priorité est donc donnée à la formalisation du système piloté. C'est pourquoi, nous proposons, chapitre II, une description globale du système de production avant de décrire plus en détails, chapitre III, le système décisionnel relatif à la gestion des fertilisants dans l'exploitation.

### I.3.2 Représentation conceptuelle de stratégies de conduite

Dans le cadre générique de modélisation des systèmes de production, la gestion technique du système est explicitée dans la *stratégie* de conduite du décideur.

Au centre de la problématique de conduite se trouve le concept d'*activité*. Dans sa forme la plus simple, une activité, alors qualifiée de *primitive*, spécifie une *opération* à réaliser sur une *entité biophysique* par un *opérateur*. Une activité est aussi caractérisée par ses conditions d'ouverture et de fermeture, définies par des fenêtres temporelles (date au plus tôt, date au plus tard) ou des prédicats sur des états (e.g. atteinte d'un stade physiologique, disponibilité d'une ressource). Ces conditions servent, avec d'autres, à déterminer les activités potentiellement exécutables.

L'*opération* désigne la tâche à réaliser (par exemple, un épandage de lisier, une fauche) indépendamment de ses conditions de réalisation ; elle a un caractère intentionnel. Pour être exécutable, une opération doit satisfaire des préconditions sur l'état du système piloté (e.g., hauteur d'herbe suffisante pour la fauche). L'exécution d'une opération se traduit par l'assignation de nouvelles valeurs à des variables d'état du système. Par exemple, une opération de fauche modifie la quantité de matière sèche disponible sur la parcelle. Le changement causé par une opération n'est généralement pas instantané et se réalise progressivement durant la période d'exécution ; toute opération possède une vitesse d'exécution.

Les activités primitives peuvent être sujettes à des contraintes supplémentaires spécifiant des relations temporelles entre elles (séquençage, synchronisation, délais entre activités, parallélisme) ou des fonctions indiquant leur caractère itératif ou optionnel. Ces contraintes sont exprimées par des opérateurs de composition, dont les plus usuels sont : *before*, *meet*, *overlap*, *co-start*, *or*, *and*, *iterate* et *optional* (cf. l'exemple donné § III.3.4 sur la gestion des fertilisants). Appliqués à des activités, ces opérateurs génèrent d'autres activités. Toute activité, primitive ou non, est caractérisée par un état dont les valeurs possibles sont : *dormante*, *en-attente*, *ouverte*, *fermée* ou *annulée*. L'ouverture et la fermeture d'une activité construite par composition à l'aide d'un opérateur dépendent des conditions d'ouverture et de fermeture des activités primitives sous-jacentes et de la sémantique des opérateurs de composition.

La macro-activité dont descendent toutes les activités primitives est appelée *plan*. Pour faire face à l'aléa, les activités d'un plan doivent être flexibles, ce qui est obtenu grâce à la spécification de conditions souples d'ouverture et de fermeture et à certains opérateurs de composition. A un moment donné de la consultation du plan, on peut inférer quel-

les sont les activités ouvertes, c'est-à-dire celles dont on doit considérer l'exécution. Déterminer les activités à exécuter nécessite de résoudre le problème d'allocation des ressources nécessaires (outils, opérateurs,...). Les contraintes sur les ressources (leur disponibilité, en particulier) et les conditions de faisabilité des opérations font que des choix doivent être faits sur les activités à exécuter. Ces choix reposent sur des *règles de préférence* qui représentent, par exemple, des besoins de continuité d'exécution, des considérations de rentabilité ou d'urgence (cf. Annexe 1, pour plus de précision sur les opérations et les ressources dans un système d'élevage bovin laitier).

Un plan ne donne que l'itinéraire à suivre dans des conditions « normales ». En plus de la flexibilité dans l'exécution de chaque activité, il peut être nécessaire d'adapter une stratégie si des circonstances particulières surviennent (aléas climatiques, contingences diverses). La spécification de ces adaptations se fait par l'intermédiaire de règles d'*ajustement conditionnel*. La partie déclencheur de ces règles est, soit un prédicat temporel qui devient vrai lorsqu'une certaine date est atteinte, soit une condition relative à un état qui est satisfaite quand l'état courant correspond à la situation décrite par la condition. La partie conséquence d'une règle d'ajustement conditionnel peut être n'importe quel changement dans la stratégie : modification du plan (suppression ou insertion d'activités), modification du choix des ressources pour l'exécution de certaines activités, modification du rythme d'examen du plan ou des ajustements conditionnels eux-mêmes.

Les états référencés dans les conditions d'ouverture ou de fermeture des activités et dans les ajustements conditionnels, sont des informations directement accessibles au décideur (via des capteurs ou ses propres observations) ou qu'il synthétise subjectivement sous la forme d'*indicateurs* de décision (par exemple, un indice de risque de maladie). Un indicateur peut se baser sur des faits passés concernant, par exemple, des états biophysiques ou des activités déjà exécutées. Il peut aussi tenir compte de prédictions.

Comment sont générées les actions effectuées sur le système biophysique ? Selon un rythme spécifié dans la stratégie du décideur ou en réaction à certains événements, le système décisionnel interprète le plan et en extrait l'ensemble pertinent des activités à considérer à ce moment-là. Cet ensemble est transmis au système opérant qui s'attache à déterminer le ou les sous-ensembles d'activités dont il peut effectivement lancer l'exécution. Il doit, pour cela, leur allouer les ressources nécessaires. Souvent il n'est matériellement pas possible de lancer immédiatement l'exécution de toutes les activités proposées par le système décisionnel. De ce fait, plusieurs jeux d'activités peuvent être envisagés. Une fois cette détermination faite, le système opérant choisit un jeu d'activités selon les préférences que le décideur a exprimées dans sa stratégie et exécute les opérations correspondantes. L'exécution est poursuivie jusqu'à ce que survienne un événement lié à un changement sur les ressources (fin d'exécution d'une opération qui libère des ressources ou fin d'une journée de travail). Après une interruption, le système opérant procède à nouveau à la détermination des jeux d'activités exécutables, ou le système décisionnel procède à une nouvelle consultation du plan si la stratégie le demande. De la même manière qu'il doit examiner périodiquement son plan, le décideur doit examiner périodiquement les ajustements conditionnels de sa stratégie et exécuter les actions qui s'appliquent. Le rythme normal de cet examen est donné dans la stratégie mais certains événements peuvent aussi le causer. Ces événements peuvent provenir de l'extérieur (forte augmentation du prix d'un intrant particulier) ou de l'intérieur du système de production. Dans ce cas, ils peuvent être la conséquence d'autres événements (libération de certaines ressources) ou provenir d'alarmes générées par le système piloté (e.g. la fosse à lisier lorsque son niveau dépasse 90% de sa capacité).

## **II. REPRESENTATION DES FLUX D'AZOTE EN EXPLOITATION D'ELEVAGE BOVIN LAITIER**

Le modèle conceptuel de flux présenté dans ce rapport est une représentation, parmi d'autres possibles, du fonctionnement des exploitations laitières à la Réunion. Elle est singulière, en ce sens qu'elle traduit la vision d'observateurs particuliers (du Cirad, de la Sicalait), à un moment donné (en 2003), pour répondre à certains objectifs (évaluation technique et environnementale de la gestion des exploitations, évaluation de la capacité d'adoption de nouvelles pratiques). Cette représentation cherche à simplifier la réalité en retenant les traits pertinents de fonctionnement des exploitations, tout en essayant de refléter leur diversité, selon les stratégies des éleveurs<sup>8</sup> et leur environnement spécifique. En conséquence, elle peut être amenée à évoluer.

### **II.1 DECOMPOSITION DE L'EXPLOITATION EN QUATRE ATELIERS**

L'étude du système de production laitière nous a conduit à appréhender l'exploitation comme un système comprenant quatre ateliers principaux (correspondant à des stocks globaux) entre lesquels s'organisent des flux d'azote. Il s'agit des ateliers de gestion des prairies, gestion des aliments, gestion du troupeau et gestion des fertilisants. La figure 2 donne une vision simplifiée de ce système.

---

<sup>8</sup> La stratégie de l'éleveur répond à ses objectifs de base tels que niveau de revenu, temps libre, accumulation de terres,...

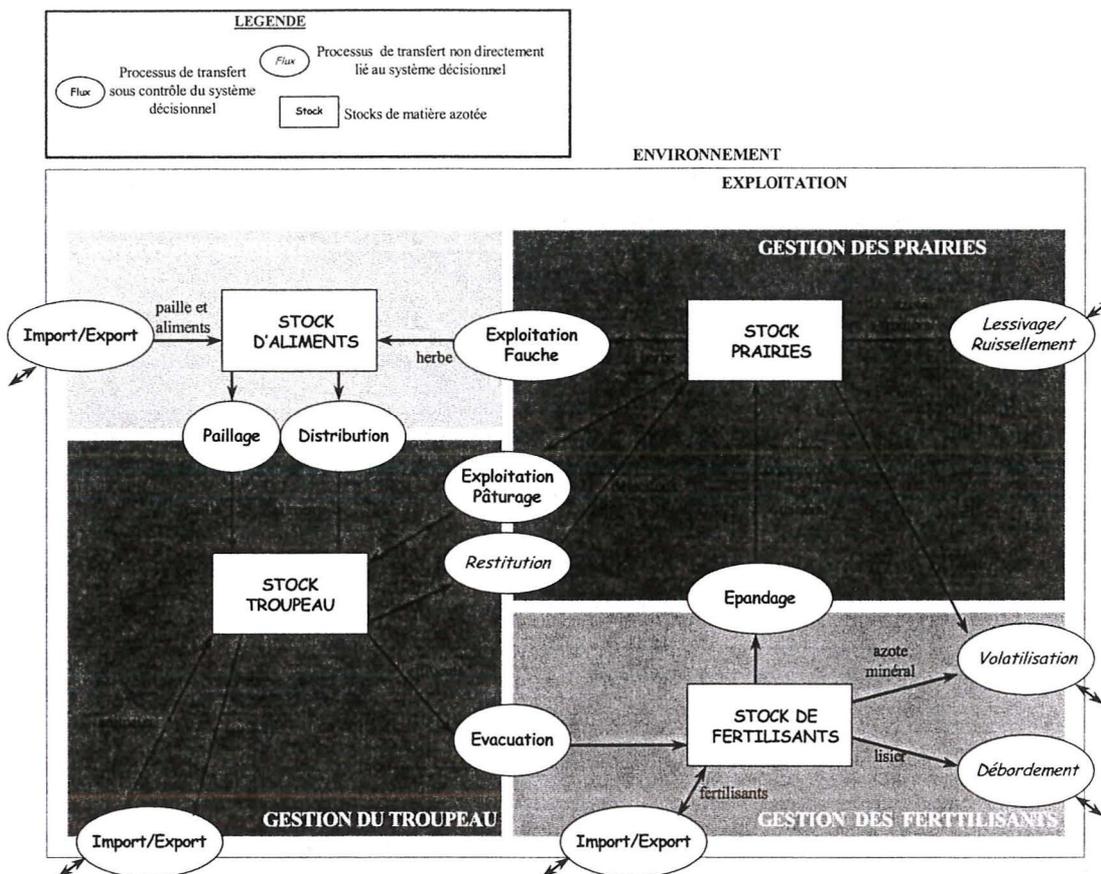


Figure 2. Représentation globale d'une exploitation d'élevage bovin laitier par un diagramme de flux.

Deux types de flux sont distingués :

- ⇒ les flux « autonomes » ; par exemple, les flux de volatilisation d'ammoniac.
- ⇒ les flux « contrôlés » ; par exemple, les flux d'effluents épandus sur les prairies.

Les prairies sont fertilisées par des épandages d'engrais organiques ou minéraux et par les déjections des animaux en pâture (restitution). Une partie de ces fertilisants s'échappe de manière incontrôlée dans l'environnement par lessivage, ruissellement et volatilisation. L'herbe produite par les prairies est exploitée par la fauche ou par le pâturage des animaux. L'herbe fauchée sert à constituer les stocks d'aliments. Ces stocks sont aussi approvisionnés par des importations, essentiellement constituées de paille et d'aliments concentrés. Ces denrées sont distribuées pour alimenter le troupeau et fournir une litière aux animaux<sup>9</sup>. De l'alimentation dépend la production de lait qui est exportée. La composition du troupeau varie en fonction de l'importation (renouvellement) et de l'exportation (réforme voulue ou subie) d'animaux de différents âges. Les pratiques d'alimentation et de paillage déterminent la production d'effluents qui est évacuée vers les dispositifs de stockage des fertilisants. Ces stocks font aussi l'objet d'importations (achat d'engrais<sup>10</sup>) et d'exportations (vente de compost ou de fumier) et génèrent des flux de volatilisation et de débordement des unités de stockage.

Cette représentation met en évidence :

- l'aspect cyclique des transferts d'azote entre les ateliers au sein de l'exploitation ; le recyclage des matières azotées s'effectue par l'intermédiaire de deux cycles : l'un, constitué des flux *Exploitation fauche, Distribution, Evacuation et Epandage* (alimentation des animaux à l'étable), l'autre, plus court, constitué des flux *Exploitation pâturage et Restitution* (exploitation directe par pâturage) ;
- l'existence de flux périphériques, qui lient le système de production à son environnement ; l'exploitation est, en effet, un système ouvert, sujet à des importations ou des exportations contrôlées de matières azotées ou à des processus biophysiques occasionnant, notamment, des « fuites » vers l'environnement.

<sup>9</sup> La paille de canne à sucre est aussi bien utilisée pour alimenter le troupeau que pour pailler les stabulations.

<sup>10</sup> L'achat concerne uniquement les engrais chimiques, pas les fertilisants organiques produits sur l'exploitation ou fournis gracieusement par une autre exploitation.

La décomposition du système de production en ateliers fonctionnels et la représentation des flux existant en leur sein, permet d'envisager la construction d'indicateurs techniques ou environnementaux utilisables par l'exploitant dans la gestion de chaque atelier. Après implémentation, la simulation d'un modèle de flux comme celui-ci, pourra permettre d'évaluer, par exemple, dans quelle mesure une stratégie de gestion basée sur la maximisation des flux de recyclage internes affectera les flux périphériques (entrées, sorties) et influera ainsi sur les performances globales du système, exprimées en termes d'efficacité azotée (sorties N/entrées N) ou de bilan d'azote ((entrées - sorties)/SAU). Nous détaillons dans ce qui suit les stocks et les flux relatifs à chaque atelier.

## II.2 ATELIER GESTION DES PRAIRIES

L'atelier Gestion des prairies peut être décrit par les flux correspondant à l'ensemble des moyens mis en œuvre et des façons de conduire, de fertiliser et d'exploiter dans le temps et l'espace les surfaces en herbe ou en fourrages de l'exploitation (Figure 3).

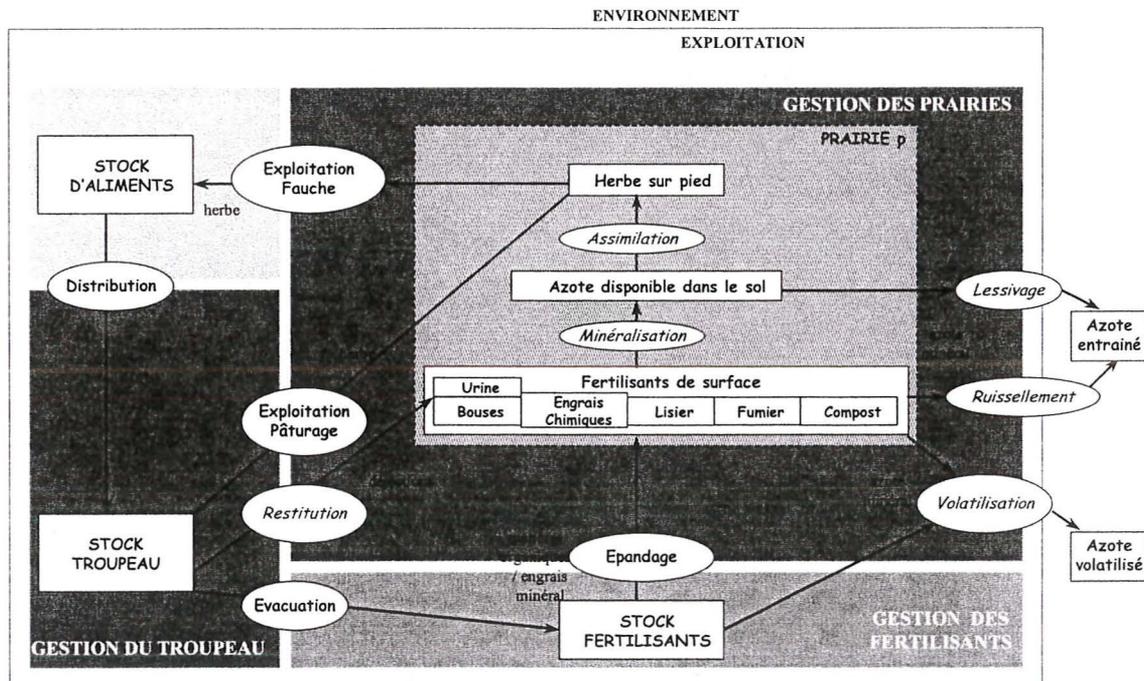


Figure 3. Diagramme de flux d'azote détaillant l'atelier Gestion des prairies.

L'apport de fertilisants aux parcelles se fait par l'intermédiaire d'épandages contrôlés par l'éleveur ou, directement, par restitution des animaux au pâturage. Le stock global *Prairie* est décomposé en 3 sous-stocks : Fertilisants de surface, Azote disponible dans le sol, Herbe sur pied, reliés par des processus biophysiques : Minéralisation et Assimilation. Il est nécessaire de distinguer les différentes catégories de fertilisants apportés à la parcelle car, à chacune d'elles, sont associés des processus ayant des caractéristiques différentes : volatilisation et ruissellement variables selon les formes de l'azote présentes, cinétique de minéralisation dépendant de la stabilité des matières organiques et influant donc différemment sur l'azote disponible pour les plantes. Une partie de cet azote disponible est lessivée, avec une intensité fonction des caractéristiques de chaque parcelle (couvert, nature du sol) et des conditions climatiques ; l'autre partie conduit, par assimilation, à la constitution du stock d'herbe sur pied qui sera ultérieurement fauchée.

En accord avec BODET et al. (2001), la représentation de la figure 3 part de l'hypothèse que le sol des prairies est un support stable, où les engrais de ferme (lisier, fumier, compost) et les engrais chimiques représentent l'unique source d'azote. En toute rigueur, il serait nécessaire de considérer le pool de matière organique du sol comme un stock, celui-ci faisant l'objet de flux d'immobilisation par la biomasse d'une partie de l'azote provenant des fertilisants, et de minéralisation de ce pool vers le stock d'azote disponible pour l'assimilation des plantes. Cependant, ces fonctions sont difficiles à paramétrer dans les conditions de la Réunion (des essais sont cependant en cours pour mieux les appréhender). Dans un esprit de simplification du système sol-plante, nous considérons que ce compartiment du sol est stable, c'est-à-dire invariant du point de vue de l'azote endogène (équilibre des flux d'entrée et sortie) ; ceci revient à ne considérer que l'apport de fertilisants exogènes comme source de variation de ce stock. La fixation de l'azote atmosphérique (y compris biologique) et la dénitrification sont également volontairement négligés. A la Réunion, très peu de légumineuses sont cultivées dans les prairies et la dénitrification dans les andosols n'a pas encore fait l'objet d'études ; cette fonction serait donc difficile à paramétrer dans nos conditions.

On propose aussi, dans ce modèle, de ne pas distinguer les fractions ammoniacale, nitrique et organique de l'azote contenu dans les fertilisants de surface, même si, en toute rigueur, il serait nécessaire de considérer pour chacun, au

minimum, une part d'azote minéral, une part d'azote organique facilement minéralisable, et une part d'azote organique faiblement minéralisable. Le paramétrage de ces fonctions de minéralisation, qui dépendent de nombreux facteurs liés au sol et au climat ne nous paraît pas possible actuellement à la Réunion. Nous préférons donc considérer autant de catégories de fertilisants que nécessaire avec, pour chacune d'elles, une proportion d'azote volatilisé à l'épandage et une vitesse de libération de l'azote dans la solution du sol. Cette proportion et cette vitesse pourront être modulées par les conditions climatiques (température, pluie) pour couvrir, autant que possible, la diversité des contextes géographiques.

A partir du stock d'azote disponible dans le sol, nous devons définir deux fonctions : l'une, correspondant au lessivage, dépendant de la pluie et de la quantité d'azote disponible dans le sol ; l'autre, correspondant à l'assimilation par les plantes, dépendant de la croissance végétale, elle-même dépendant de la quantité d'azote disponible (des seuils seront à définir) et des conditions climatiques (pluie, température, rayonnement). Il sera nécessaire de réfléchir à la précision requise (faible) pour la croissance de l'herbe dans le modèle, au regard de nos objectifs de gestion du système de production. Néanmoins, l'évolution de la valeur fourragère (énergie, azote) devra être prise en compte tout au long de la croissance de la biomasse végétale car elle conditionne l'équilibre de la ration du troupeau. Cette valeur, pour un cultivar donné, dépend de l'assimilation d'azote et du climat. Des fonctions simples devront donc être paramétrées pour tenir compte de l'âge du fourrage à la récolte. Enfin, le dernier flux à considérer sera celui de la production de l'herbe exploitée par la fauche ou le pâturage.

### II.3 ATELIER GESTION DES ALIMENTS

L'atelier Gestion des aliments peut être décrit par les flux correspondant à l'ensemble des moyens mis en œuvre et des façons d'obtenir, de transformer, de conserver, d'utiliser dans le temps et l'espace, tous aliments potentiellement consommables par le troupeau (Figure 4). L'exploitation peut importer des aliments et de la paille (nous considérons que l'apport de litière fait partie de cette gestion). Elle peut aussi exporter du fourrage vers d'autres exploitations (c'est parfois le cas, notamment, sous forme de balles enrubannées).

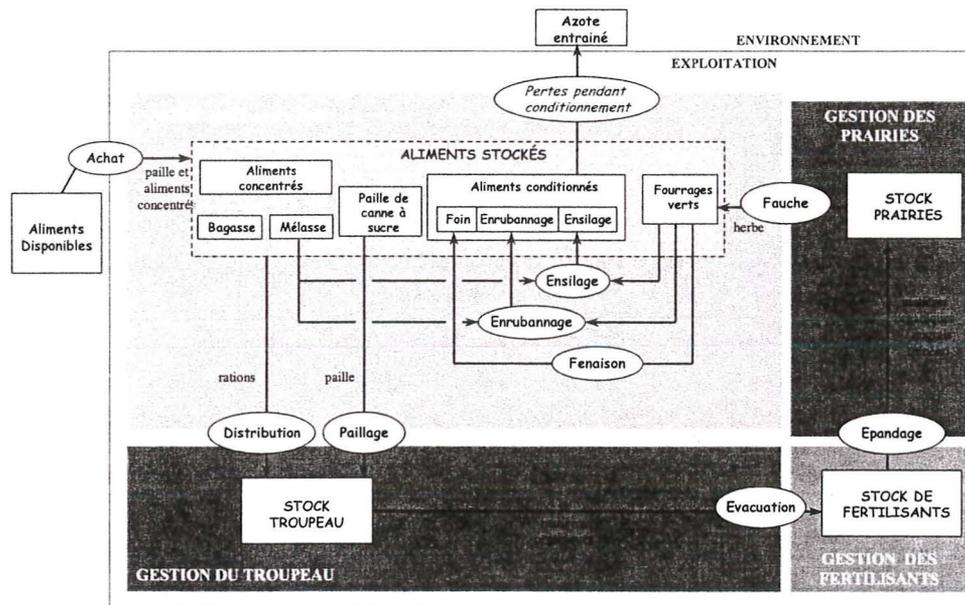


Figure 4. Diagramme de flux d'azote détaillant l'atelier gestion des aliments.

La figure 4 distingue les stocks d'aliments selon leur nature. Les fourrages issus de la fauche des prairies de l'exploitation peuvent être directement distribués (en vert) ou conditionnés afin de conserver le surplus de production. On distingue trois modes de conditionnement : la fenaion, l'ensilage et l'enrubannage. La fenaion est surtout pratiquée avec du Chloris dans les Bas et les piedmonts du sud-ouest, en contexte climatique favorable. Les deux autres procédés aboutissent à des produits assez similaires, mais l'enrubannage est aujourd'hui beaucoup plus pratiqué que l'ensilage car il permet une plus grande souplesse des chantiers de récolte et son utilisation est moins contraignante<sup>11</sup>. Ces deux modes de conditionnement de l'herbe supposent le séchage du fourrage coupé (ressuyage pour l'ensilage et préfanage pour l'enrubannage) et un épandage de mélasse sur les andains d'herbe fauchée. En effet, les fourrages récoltés à la Réunion, même ceux d'origine tempérée, présentent des teneurs en glucides solubles insuffisantes, notamment en période estivale chaude et humide, pour être suffisamment acidifiés par les fermentations lactiques. Pour les trois procédés, le fourrage peut subir des pertes pendant son conditionnement fonction des conditions climatiques. Ces pertes, qui sont assez limitées, sont émises vers l'environnement (principalement par volatilisation ou ruissellement pour les ensilages très humides) et alimentent le stock d'azote entraîné hors de l'exploitation.

<sup>11</sup> L'utilisation de l'ensilage impose, après ouverture du silo, une avancée quotidienne avec risque de pertes d'aliments.

L'achat d'aliments à l'extérieur de l'exploitation dépend de leur disponibilité auprès des fournisseurs (stock Aliments disponibles). Ce flux peut concerner l'ensemble des aliments, quelle que soit leur nature, même s'il s'agit essentiellement des aliments concentrés, du foin, de la mélasse et de la paille de canne à sucre. Cette dernière est utilisée à la fois comme fourrage et pour le paillage des aires de repos.

Le flux principal sortant de l'atelier Gestion des aliments est constitué par la distribution aux animaux de rations alimentaires, dont la détermination tiendra compte de l'herbe consommée au pâturage et pourra combiner différents aliments stockés. Afin d'élaborer ces rations, chaque aliment, outre sa valeur azotée qui nous intéresse directement dans la gestion des flux, devra être caractérisé par ses valeurs alimentaires : teneur en matière sèche (MS), unité d'encombrement (UE), unité fourragère pour la production du lait (UFL), protéines digestibles intestinales liées au métabolisme de l'azote (PDIN) et protéines digestibles intestinales liées au métabolisme de l'énergie (PDIE). La prise en compte de l'évolution de la qualité des aliments au cours du stockage sera réduite à l'essentiel. Tout au plus, pense-t-on à faire varier les valeurs alimentaires (notamment azotées) des stocks de fourrage conservés en fonction des conditions météorologiques à la récolte. Les pertes de matières sèches du fourrage pourront également être modulées par les conditions climatiques au cours du séchage ou du stockage (notamment pour la paille de canne à sucre stockée sans protection particulière). Les fourrages non utilisés pour l'alimentation (jugés impropres pour des raisons de mauvaise conservation par exemple) seront considérés comme des refus, qui iront augmenter les effluents produits par le troupeau (cf. § II.4).

## II.4 ATELIER GESTION DU TROUPEAU

L'atelier Gestion du troupeau peut être décrit par les flux correspondant à l'ensemble des moyens mis en œuvre et des façons de constituer, de conduire, d'alimenter le troupeau et d'écouler ses productions dans le temps et l'espace (Figure 5). L'exploitation peut recevoir et céder des animaux. Le lait et les pertes gazeuses liées à l'activité métabolique des animaux et à l'activité biologique de la litière sont également des sorties du système enregistrées au niveau de cet atelier.

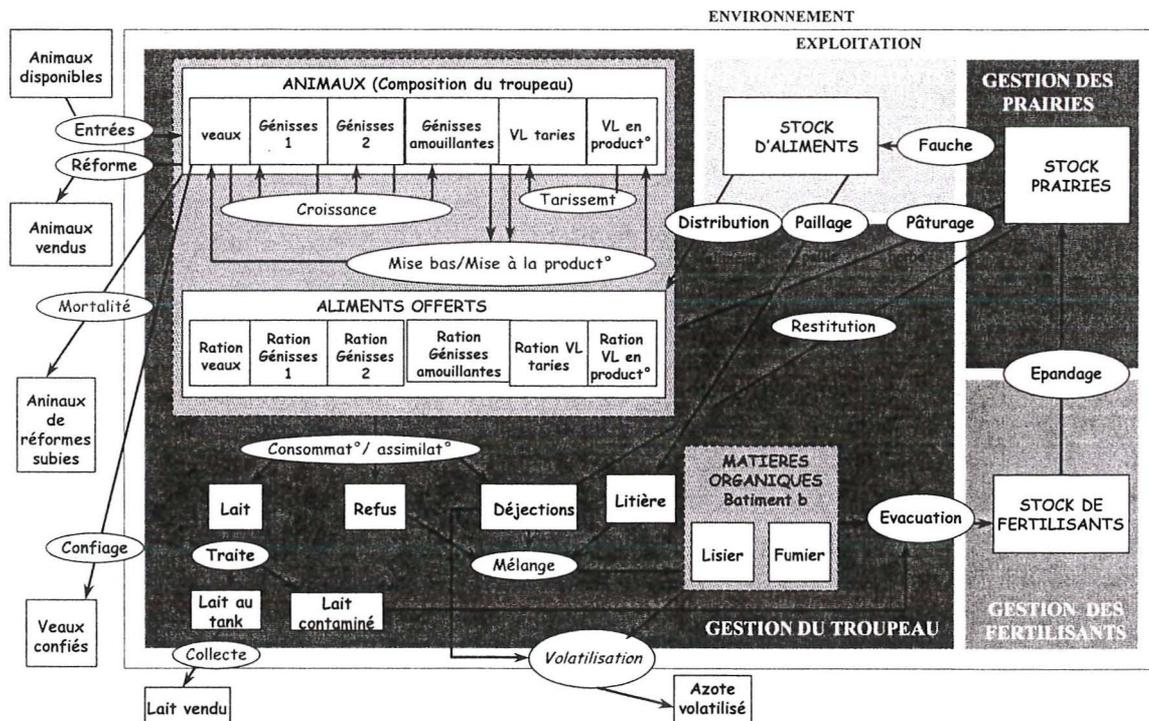


Figure 5. Diagramme de flux d'azote détaillant l'atelier gestion du troupeau.

L'atelier gestion du troupeau est l'atelier le plus complexe de par le nombre de flux et de stocks qu'il est nécessaire de distinguer. Le stock principal Troupeau est décomposé en sous-stocks dont les principaux sont : Animaux, Aliments offerts, Lait et Matières organiques, ces deux derniers correspondant aux productions principales de l'atelier.

Les animaux constituent les « producteurs » de l'atelier. Ils sont classés en 6 catégories<sup>12</sup> définies selon leur stade physiologique : du veau à la vache laitière en passant par les génisses de différents âges. Il est nécessaire de distinguer

<sup>12</sup> Ces catégories ne correspondent pas nécessairement aux lots définis par l'éleveur, dont les pratiques d'allotements peuvent aboutir à des regroupements de catégories : veaux et génisses de moins d'un an, génisses de plus d'un an et vaches tarées, vaches en production et génisses amouillantes. Ce dernier lot bénéficie d'un traitement privilégié.

ces différentes catégories car la taille et la composition du troupeau peuvent évoluer en fonction de la stratégie de l'éleveur. La composition du troupeau dépend des choix de l'éleveur en terme d'entrée, de confiage et de réforme des animaux ainsi qu'aux processus biologiques de mortalité, croissance, mise bas, et tarissement. Ces processus sont représentés sous la forme de flux d'animaux faisant varier l'effectif de chaque catégorie : chaque catégorie est soumise à un taux de mortalité spécifique ; les veaux et les génisses passent d'une catégorie à l'autre (croissance) selon leur « gain moyen quotidien » (GMQ de masse) et l'âge au premier vêlage ; les génisses amouillantes et les vaches laitières tarées sont mises à la reproduction selon l'intervalle entre 2 vêlages. Le tarissement des vaches laitières en production obéit à la durée moyenne de lactation (variable d'une exploitation à l'autre). Les entrées et les réformes (dont la vente de la totalité des veaux mâles) concernent toutes les catégories d'animaux selon les choix de l'éleveur. L'offre en animaux provenant de l'extérieur (animaux disponibles) peut constituer une contrainte sur les entrées, c'est le cas par exemple des génisses récupérées auprès de la Sicalait dont la disponibilité découle directement du nombre de veaux femelles confiés à la coopérative les années précédentes<sup>13</sup>.

A chaque catégorie d'animaux correspond une ration alimentaire constituée par la quantité d'herbe prélevée au pâturage et les aliments distribués à l'auge par l'éleveur. De la composition du troupeau et de la nature des aliments offerts découlent les productions quotidiennes de lait et de déjections. L'assimilation sera dépendante de l'équilibre des rations ; par exemple, un excès azoté dans la ration se traduira, outre d'éventuels problèmes métaboliques, par une excrétion supérieure d'azote dans les urines.

Les productions du troupeau sont le lait, les refus alimentaires, les déjections et, indirectement, les effluents qui leur sont associés. La part ingérée de la ration<sup>14</sup> couvre, dans un premier temps, les besoins d'entretien et de croissance des animaux. Dans un deuxième temps, elle définit la production de lait. La part d'azote non utilisée est éliminée dans les déjections. Le lait est trié au moment de la traite s'il est contaminé (antibiotique utilisé contre les mammites par exemple). Le lait sain est mis en tank refroidi, en attendant la collecte laitière (lait vendu). Le lait contaminé est généralement vidé dans la fosse à lisier ; on considère donc qu'il est évacué vers le stock de fertilisants.

La production de déjections s'accompagne de pertes d'ammoniac vers l'atmosphère qu'il est nécessaire de quantifier par une proportion de l'azote contenu dans les urines. La nature de l'effluent produit dépend des déjections et du type de bâtiment. Le lisier correspond uniquement à des déjections, alors que le fumier est constitué par un mélange de déjections, de litière et de refus alimentaires. On considère que le lisier, ainsi que les eaux de lavage blanches ou brunes, sont évacués directement vers les fosses de stockage, d'où leur sortie immédiate de l'atelier gestion du troupeau. Il n'en est pas de même pour le fumier qui s'accumule dans les bâtiments et est évacué périodiquement. Dans le cas de litière accumulée, des processus biophysiques interviennent au cours de la période d'accumulation caractérisée par l'apport quotidien de déjections et l'apport périodique de paille (plusieurs fois par semaine). La dégradation conjointe des déjections et de la paille conduit à des pertes par voie gazeuse et à une organisation partielle de l'azote des déjections par la biomasse microbienne de la litière, constituant ainsi un fumier. Pour l'azote, il s'agit principalement de pertes sous forme d'ammoniac, mais aussi de protoxyde d'azote et d'azote moléculaire.

## II.5 ATELIER GESTION DES FERTILISANTS

L'atelier Gestion des fertilisants peut être décrit par les flux correspondant à l'ensemble des moyens mis en œuvre et des façons d'obtenir, de conserver, de transformer, d'utiliser, et de distribuer, dans le temps et dans l'espace, tous les fertilisants épanchables : matières organiques issues de l'élevage et engrais minéraux achetés (Figure 6). Des pertes vers l'environnement (volatilisation, débordement de stock) sont constatées lors de la manipulation et du stockage des fertilisants.

Les stocks de fertilisants sont de trois catégories : les engrais chimiques, les effluents d'élevage (lisier et fumier) et le compost. Les engrais chimiques sont achetés à l'extérieur de l'exploitation. Les effluents proviennent de l'évacuation des bâtiments d'élevage. Ils alimentent des fosses à lisier ou des tas de fumier. Le lisier peut être dilué, du fait de l'évacuation du lait contaminé, et, surtout, des arrivées d'eaux de pluie et de lavage (blanches et brunes) dans la fosse à lisier. A cet égard, il importerait d'évaluer ces flux ainsi que les surfaces non couvertes pouvant drainer des eaux de pluie. La fosse à lisier peut déborder en cas d'insuffisance d'épandage. Les fumières ne débordent pas, car elles n'ont pas de capacité fixe, et des tas de fumier peuvent en outre être constitués au champ. Néanmoins, pour une gestion durable des fertilisants, le stock de fumier ne doit pas s'accumuler indéfiniment, mais doit être régulé par les épandages ou les exportations. Les jus de fumières s'écoulent normalement dans une fosse qui est souvent celle servant au lisier. Une faible part de l'azote contenu dans le fumier est ainsi transférée vers le lisier. Au cours du stockage, des processus biophysiques interviennent ; ils se traduisent par des pertes d'azote par voie gazeuse : ammoniac, protoxyde d'azote et azote moléculaire. Le paramétrage de ces pertes difficilement maîtrisables doit être envisagé.

---

<sup>13</sup> En 2003, un éleveur peut confier 30 % des veaux femelles produits sur l'exploitation (s'il est adhérent depuis au moins 5 ans). Ces femelles seront élevées par la Sicalait. Lorsqu'elle seront amouillantes, il pourra les racheter s'il le souhaite.

<sup>14</sup> On a : [ration – part ingérée = refus alimentaires]

Le compost est issu de la transformation du fumier mis en andains sur une plate-forme (éventuellement bétonnée ou couverte). Les andains sont, en principe, retournés deux fois, de manière à accroître l'apport d'oxygène nécessaire à la transformation aérobie et à homogénéiser le compost. Puis, le fumier en compostage subit une maturation. Au cours de ce processus, qui s'étale sur une période relativement longue (plusieurs mois), on observe le départ d'une partie de l'azote sous forme gazeuse : ammoniac, protoxyde d'azote et azote moléculaire. Cette volatilisation est accélérée par les retournements.

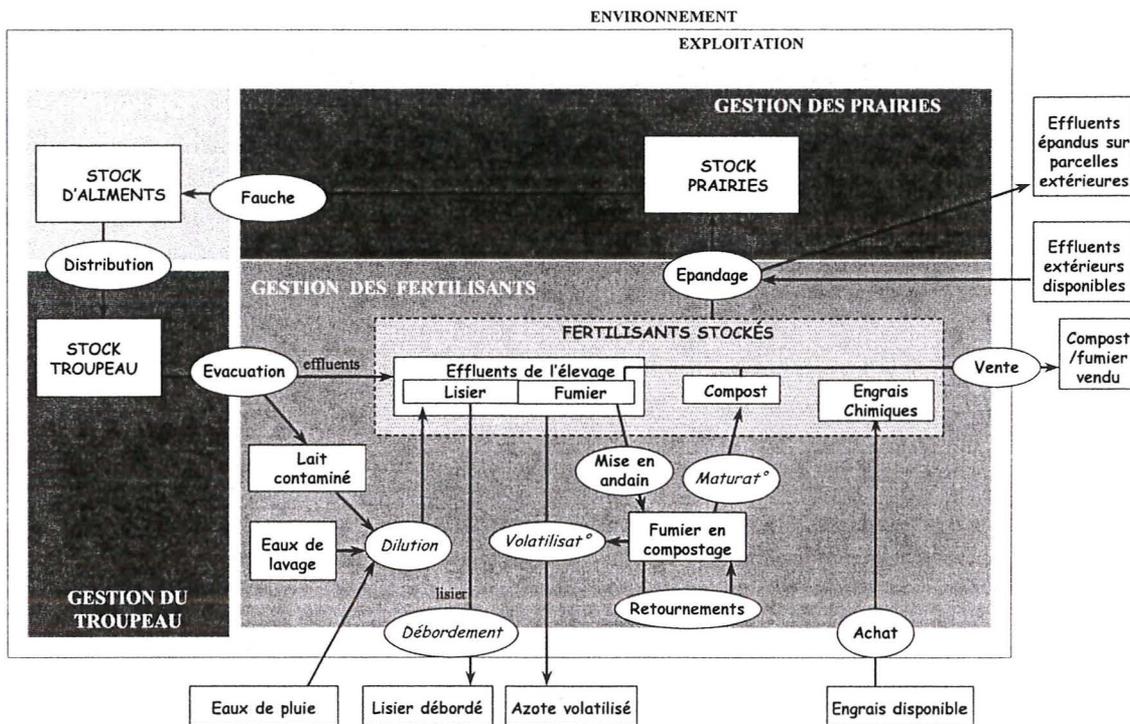


Figure 6. Diagramme de flux d'azote détaillant l'atelier gestion des fertilisants.

Tous les fertilisants sont épanchés sur les parcelles de l'exploitation ; parfois, du lisier et du fumier sont épanchés sur des parcelles extérieures. Seuls, les engrais de ferme solides (compost et fumier) peuvent être vendus. Il arrive que des effluents d'élevage provenant de l'extérieur soient épanchés sur les parcelles de l'exploitation, notamment dans le cadre de plans d'épandage plus ou moins formalisés avec des exploitations voisines. Ainsi, une exploitation laitière peut recevoir du lisier de porc ou de poules pondeuses (ainsi que des fientes). La plupart du temps, ces engrais sont directement épanchés sur les parcelles sans stockage sur l'exploitation et ne figurent donc pas comme stock dans la figure 6.

### III. MODELISATION DE LA CONDUITE DE L'ATELIER GESTION DES FERTILISANTS

Nous décrivons dans ce chapitre la représentation conceptuelle du système décisionnel relatif à l'atelier Gestion des fertilisants. Cette représentation constitue une spécialisation aux exploitations d'élevage bovin laitier du « modèle d'action » élaboré par AUBRY et al. (2001) qui traitait de la gestion des effluents d'élevage de façon générique, en prenant en compte tout type d'effluents produits et de culture réceptrices à la Réunion. On se limite donc ici aux élevages bovins laitiers et aux prairies, classées dans la catégorie des cultures semi-pérennes par AUBRY et al. (2001).

#### III.1 CARACTERISTIQUES DU MODELE D'ACTION

##### III.1.1 Terminologie

En nous basant sur le modèle d'action d'AUBRY et al. (2001) et l'ontologie des systèmes de production agricoles (MARTIN-CLOUAIRE et RELIER, 2003), nous définissons ici différents termes et concepts.

Le modèle d'action, qui explicite les stratégies de conduite de l'agriculteur, relève du sous-système décisionnel (cf. Figure 1). Il s'articule avec les deux autres composantes du système de production : le sous-système piloté et le sous-système opérant. On distingue trois types de variables :

- Les *paramètres structurels* représentent les éléments du système de production qui relèvent de décisions stratégiques de l'agriculteur, prises en amont et non exclusivement déterminées par les besoins de gestion des matières azotées : potentiel génétique du troupeau, bâtiments, équipements, surface et composition floristique des prairies, main d'œuvre, etc.

- Les *variables d'état* renseignent sur l'état du système de production qui varie en fonction d'influences extérieures (par exemple, parcelles impraticables à cause des précipitations) et des activités décidées par l'éleveur (matériel ou main d'œuvre temporairement indisponible, niveau des stocks de fertilisants) ; certaines peuvent être utilisées comme indicateur de déclenchement d'activités.
- Les *variables de contrôle* (ou variables décisionnelles) représentent les éléments sur lesquels l'agriculteur peut agir pour modifier l'état du système afin d'atteindre ses objectifs (piloter). C'est ce type de variables que nous avons cherché à identifier.

Des *règles de décision* permettent de manipuler ces variables ; parmi celles-ci mentionnons :

- Les règles d'ouverture ou de fermeture des *activités* qui portent sur des fenêtres temporelles ou la satisfaction de propriétés des variables d'état ; ces règles permettent de contrôler l'exécution des opérations.
- Les règles qui spécifient les conditions de faisabilité des *opérations* en fonction des variables d'état.
- Les règles qui contraignent l'utilisation des ressources et leur allocation aux activités.
- Les règles d'ajustement conditionnel qui permettent d'adapter le plan lors de l'occurrence d'aléas.

### III.1.2 Flux soumis à décision

Nous avons identifié 10 flux principaux dans l'atelier Gestion des fertilisants (Figure 6). Quatre de ces flux, correspondant à des processus biophysiques, sont relativement indépendants du système décisionnel : dilution du lisier, débordement des fosses à lisier, maturation du compost et volatilisation de l'azote. Ces flux, ne dépendant pas de règles de décision, ne seront donc pas décrits dans ce chapitre. Les six autres flux sont soumis au système décisionnel : évacuation d'effluents des bâtiments, achat d'engrais, mise en andains du fumier, retournement des andains, vente de matière organique et épandage des fertilisants sur les parcelles. Ils sont les effets d'activités décidées par l'éleveur. Leurs significations sont les suivantes :

1. Le flux *Evacuation* répartit la production d'effluents issue des bâtiments d'élevage (lisier de l'aire bétonnée, fumier de l'aire paillée) entre les stocks de fertilisants (fosse à lisier, tas de fumier).
2. Le flux *Achat* gouverne l'approvisionnement en engrais chimiques auprès de coopératives agricoles pour la fertilisation des prairies.
3. Le flux *Mise en andains* agence tout ou partie du stock de fumier sur une plate-forme, couverte ou non, bétonnée ou non, pour procéder à sa transformation comme « fumier en compostage ».
4. Le flux *Retournements* représente le transfert d'un andain de fumier en compostage à un andain à un stade de compostage plus avancé.
5. Le flux *Vente* exporte tout ou partie des stocks de compost et de fumier hors de l'exploitation.
6. Le flux *Epandage* représente la voie d'écoulement la plus importante des stocks de fertilisants. L'épandage est principalement effectué sur les parcelles de l'exploitation, mais peut aussi concerner des parcelles extérieures.

## III.2 ELEMENTS DE STRATEGIE DETERMINANT LA GESTION DES FERTILISANTS

Le modèle doit permettre l'évaluation de la stratégie de gestion d'un éleveur sur les performances techniques et environnementales de son exploitation. Il est donc intéressant de définir les stratégies que l'on peut observer actuellement chez les éleveurs et celles qui sont susceptibles d'apparaître dans un avenir proche, compte tenu de l'évolution prévisible des élevages. On peut, dans un premier temps, s'intéresser aux objectifs de conduite de l'exploitation, qui constituent des indicateurs synthétiques de ces stratégies (par exemple, l'objectif de sécurisation de l'alimentation du troupeau ou de valorisation des productions fourragères).

En matière de gestion des fertilisants, on peut distinguer trois objectifs principaux :

- Le *respect de la réglementation* : en pratique, une majorité d'éleveurs dépasse la norme qui fixe la quantité maximale d'azote épandable<sup>15</sup> sur prairies à 350 kgN/ha/an hors ZES<sup>16</sup> (cas de la Réunion) et 170 kgN/ha/an en ZES ; mais on peut supposer que les éleveurs soient un jour contraints de respecter cette norme, ce qui aura des conséquences significatives sur les règles de gestion de l'épandage.
- La *substitution des engrais chimiques par les fertilisants organiques* : les effluents d'élevage sont rarement considérés par les agriculteurs comme des substituts possibles aux engrais minéraux et les doses pratiquées ne prennent généralement pas en compte ces apports vis-à-vis des besoins des cultures ; la méconnaissance de la composition

<sup>15</sup> Loi n°76-663 du 16 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE).

<sup>16</sup> Zone d'excédent structurel.

des effluents et le manque de références techniques permettant de raisonner la fertilisation organique des cultures sont des facteurs expliquant cette pratique ; cependant, des enquêtes récentes ont montré que les éleveurs prennent progressivement conscience des économies réalisables par une fertilisation raisonnée à base d'effluents d'élevage ; on peut donc supposer, qu'à l'avenir, cet objectif sera adopté par de plus en plus d'éleveurs.

- *L'intensité cible d'exploitation des prairies* : il s'agit du nombre d'exploitations, par fauche ou pâture, prévu par l'éleveur chaque année selon l'autonomie souhaitée en matière d'alimentation du troupeau (DELATTRE, 1996) ; les choix extrêmes sont l'intensification fourragère pour réduire la dépendance vis-à-vis de l'extérieur ou, au contraire, l'approvisionnement en aliments (fourrage, paille, concentrés) permettant de limiter les charges de travail en période estivale.

Tableau 1. Intensité moyenne d'exploitation des prairies recherchée par l'éleveur (nombre d'exploitations par an) selon le secteur géographique.

Intensité d'exploitation des prairies	Faible	Intermédiaire	Elevée
Hauts de l'Ouest	2	3	4
Plaine des Cafres	3	4	5
Plaine des Palmistes et Hauts de Saint-Joseph	4	6	8

Le tableau 1 a été établi à partir des données de référence de l'UAFP (P. THOMAS). Ces valeurs mériteraient d'être détaillées selon des zones géographiques plus homogènes en tenant compte des peuplements prairiaux. De cette variable décisionnelle découle, en particulier, le mode de fertilisation des prairies. En effet, une fertilisation azotée est très souvent pratiquée après chaque cycle d'exploitation. Ainsi, une exploitation intensive des prairies (nombre de coupes ou de mises en pâture élevé) induit généralement une fertilisation fréquente et inversement. L'intensité cible d'exploitation varie d'une parcelle à l'autre, selon son accessibilité, son aptitude à la mécanisation, sa composition floristique (variable très corrélée aux deux précédentes) et, en conséquence, ses potentialités en quantité et qualité, qui sont sous la dépendance directe des conditions climatiques (rayonnement, température, pluie). Pour une même localité, ces intensités varient aussi selon les années. Les pratiques de fertilisation dépendent ainsi du contexte climatique local. Cependant, les règles génériques sous-jacentes sont difficiles à extraire. En conséquence, pour une conduite de prairie donnée a priori, les résultats de productivité et, donc, de risque pour l'environnement, pourront être représentés comme dépendant directement du climat.

### III.3 DESCRIPTION DES ACTIVITES DE L'ATELIER GESTION DES FERTILISANTS

Les activités relatives à l'atelier Gestion des fertilisants peuvent être classées en modules fonctionnels regroupant les flux qu'elles contrôlent (cf. Figure 6) :

- module d'approvisionnement des stocks, regroupant les flux *Evacuation* et *Achat* ;
- module d'utilisation des stocks, regroupant les flux *Epannage* et *Vente* ;
- module de transformation, regroupant les flux *Mise en andains* et *Retournements*.

Ces activités sont décrites ci-après, en indiquant pour chacune d'elles les règles de déclenchement, les paramètres structurels, les variables de contrôle et les règles de décision associés. Chaque fois qu'elles sont connues, nous donnons les valeurs et les modalités de ces variables. Dans un but d'homogénéité, nous exprimons en tonnes (t) les quantités de fertilisants quelle que soit leur nature.

#### III.3.1 Module d'approvisionnement des stocks de fertilisants

On distingue deux sources d'approvisionnement selon la nature du fertilisant : la matière organique est obtenue par l'évacuation des effluents produits dans les bâtiments d'élevage ; les engrais chimiques sont achetés aux coopératives agricoles ou aux négociants.

##### III.3.1.1 Activité d'évacuation des effluents

Le flux « Evacuation » est sous la dépendance de paramètres structurels :

- le type et la nature du sol des bâtiments d'élevage (aire bétonnée ou aire paillée),
- la capacité d'accueil en effluents des bâtiments et des dispositifs spécifiques de stockage (volume des fosses à lisier, surface des plates-formes, capacité de stockage au champ...),

et de variables d'état :

- les quantités d'effluents accumulées dans les bâtiments (cf. figure 5, le stock « Matières organiques bâtiment »).

La nature de l'effluent produit, liquide ou solide, conditionne également sa gestion. Ainsi, le lisier est raclé quotidiennement alors que le fumier n'est enlevé que deux fois par semaine voire à plusieurs semaines d'intervalle. Nous présentons donc les variables et les règles de ce module en distinguant la filière liquide de la filière solide.

#### *Cas du lisier sur aire bétonnée*

On observe deux types d'aires bétonnées : simples et avec logettes (paillées ou non). Dans tous les cas, l'effluent produit sur ces surfaces est du lisier, qui est plus épais dans le cas de logettes paillées. Pour ces effluents liquides et semi-liquides, l'évacuation se fait vers une unité de stockage caractérisée par son volume, la fosse à lisier.

On définit quatre variables de contrôle pour l'évacuation du lisier :

- Quantité de lisier raclé : elle correspond à la quantité produite entre deux raclages par les animaux présents, à laquelle il faut ajouter la litière apportée dans le cas de logettes paillées.
- Modalités de chantier : le chantier est réalisé manuellement, mécaniquement ou de façon mixte ; un chantier manuel se fait au rabot à main alors qu'un chantier mécanique se fait avec un rabot monté sur l'attelage 3-points du tracteur ou avec un rabot motorisé (cas peu rencontré à la Réunion) ; pour les stabulations avec logettes, l'évacuation est mixte : les bouses sont, dans un premier temps, raclées manuellement depuis les logettes vers l'aire bétonnée, puis le lisier est raclé avec le matériel (tracteur + rabot) utilisé pour les aires bétonnées simples ; pour ces différentes modalités, un seul opérateur est mobilisé.
- Fréquence de raclage : 1 fois par jour si le chantier est mécanisé ; 2 fois par jour s'il est manuel ou mixte (généralement aux heures de traites).
- Durée d'activité : elle dépend de la quantité d'effluent et de la modalité de chantier ; on peut estimer les vitesses de réalisation à 3 t/h si l'évacuation est manuelle, 5 t/h si l'évacuation est mixte et 6 t/h si l'évacuation est mécanique (au rabot ou au tracteur de façon indifférente) ; la durée d'opération est utile, en particulier, pour le calcul des coûts.

Seules les modalités de chantier sont sous la dépendance de règles de préférence. Si l'aire bétonnée est praticable et si le matériel (rabot motorisé ou tracteur + rabot) est présent sur l'exploitation, alors la modalité mécanique sera prioritaire par rapport à la modalité manuelle. L'utilisation d'un rabot motorisé sera privilégiée par rapport à la modalité qui mobilise un tracteur.

#### *Cas du fumier sur aire paillée*

A la Réunion, peu d'exploitations laitières produisent du fumier. Cette production devrait cependant se développer du fait de l'accroissement des capacités d'approvisionnement en paille de canne à sucre. Pour les exploitations optant pour une production de fumier, les bâtiments devront être modifiés en stabulations couvertes avec aire de couchage paillée. Le fumier n'est pas toujours stocké avant utilisation. Pour limiter les opérations de chargement et de déchargement, son épandage ou sa mise en andains pour compostage est parfois réalisée simultanément à son évacuation. Sur le plan réglementaire, ceci n'est possible que lorsqu'il s'agit d'un fumier produit sur litière accumulée de plus de 2 mois. Dans le cas contraire, les évacuations de fumier doivent être faites vers une fumière permettant son stockage pendant 2 mois au minimum avant utilisation. Par souci d'homogénéité, nous considérerons que le fumier transite toujours par un stock (fumière ou tas au champ) entre son évacuation et son utilisation.

Comme dans le cas du lisier, l'activité d'évacuation du fumier depuis les aires paillées fait intervenir quatre variables de contrôle :

- Quantité de fumier évacué : quantité produite par les animaux présents depuis la dernière évacuation.
- Modalité de chantier : elle dépend généralement du type de bâtiment ; le chantier est mécanique (tracteur + fourche hydraulique + remorque + 1 opérateur) pour les aires paillées (bétonnées ou sur terre battue) de capacité d'accueil importante<sup>17</sup> et manuelle pour les aires de moindre dimension (ce second cas devrait cependant être anecdotique<sup>18</sup>) ; pour les aires bétonnées paillées, aménagées pour un raclage fréquent, le chantier est mécanique, mais il ne mobilise pas de remorque puisqu'une fumière est prévue en bout de stabulation.
- Fréquence d'évacuation : dans le cas d'aires paillées bétonnées, la fréquence de raclage est prédéterminée (1 ou 2 fois par semaine) ; dans le cas d'aires paillées sur terre battue, l'évacuation est généralement déclenchée par l'atteinte d'un seuil fixé à une certaine fraction de la capacité maximum de stockage du bâtiment (environ 90%).
- Durée d'activité : elle dépend de la quantité de fumier à évacuer et de la modalité de chantier ; les vitesses de réalisation sont estimées 1,3 t/h si l'évacuation est manuelle et 50 t/h si elle est mécanisée (sur terre battue ou

---

<sup>17</sup> Les aires paillées de surface importante correspondent généralement à des bâtiments où un tracteur peut entrer et manœuvrer (au minimum 3,5 m de hauteur et 3 m de largeur).

<sup>18</sup> En effet, les bâtiments exigus sont généralement réservés aux veaux élevés sur caillebotis (donc non paillés).

sur aire bétonnée) ; les distances entre les bâtiments d'élevage et les dispositifs de stockage étant en général faibles et peu variables, elles ne sont pas individualisées dans le calcul du temps de réalisation de l'activité.

Un dispositif de stockage est en général associé à chaque bâtiment. Sinon, le choix du lieu de stockage relève de la règle de priorité suivante :

*(Fumière couverte) prioritaire sur (Fumière non couverte) prioritaire sur (Stockage au champ).*

Les capacités des fumières sont difficiles à définir car les hauteurs ne sont théoriquement pas limitées. Cependant, AUBRY et al. (2001) proposent une hauteur maximale de 3 m ; la capacité de stockage dépend alors de la surface de la fumière. Pour le stockage au champ, il n'y a aucune limite de surface fixée a priori. Cependant, réglementairement, le stockage de fumier sur une parcelle doit correspondre à la quantité épandable sur cette même parcelle.

### **III.3.1.2 Activité d'achat d'engrais minéraux**

Les paramètres structurels pris en compte sont :

- la distance du fournisseur à l'exploitation,
- la capacité de transport du véhicule utilisé (souvent camionnette pick-up).

Le déclenchement de cette activité dépend de la trésorerie de l'éleveur. Il achète généralement au fur et à mesure de l'année à une fréquence variable, que l'on peut considérer mensuelle<sup>19</sup>. La règle de déclenchement est la suivante : si la quantité en stock est inférieure aux besoins cumulés du mois en cours et du mois suivant, alors l'achat de la différence est déclenché.

Trois variables de contrôle sont associées à cette activité.

- Quantité achetée : c'est la différence positive entre les besoins estimés du mois suivant et la quantité en stock, déduction faite des quantités nécessaires au mois en cours ; la disponibilité en engrais auprès des fournisseurs est considérée non limitante.
- Modalité de chantier : si la quantité achetée est supérieure à 1 tonne, la livraison est réalisée par le fournisseur, sinon c'est l'éleveur qui se charge du transport avec son véhicule (conditionnement par sacs de 25 kg).
- Durée d'activité : elle n'est prise en compte que dans le cas où l'éleveur assure lui-même le transport, consommant ainsi des ressources de l'exploitation (véhicule, main d'œuvre) ; elle dépend du temps de chargement et déchargement (vitesse estimée à 1,5 t/h) et du temps nécessaire au transport, lui-même dépendant de la distance à parcourir, de la vitesse et du nombre de voyages à réaliser selon le véhicule utilisé.

### **III.3.2 Module d'utilisation des stocks de fertilisants**

L'utilisation des stocks de fertilisants correspond à trois flux : épandage, vente ou compostage. Le compostage n'est pas encore pratiqué en exploitation mais on fait l'hypothèse du développement de cette pratique dans un avenir proche. Du fait de leur spécificité, les activités liées au compostage sont regroupées dans un module séparé, décrit § III.3.3.

#### **III.3.2.1 Événements déclenchant l'utilisation des fertilisants**

On distingue deux types d'événements :

- Événements planifiés : l'activité est déclenchée lors de l'examen périodique du plan par l'éleveur (par exemple, épandages anticipant la nécessité de vider un stock avant une certaine date, épandages liés à un événement cultural faisant lui-même partie du plan) ;
- Événements non planifiés : l'activité est déclenchée en réaction à une alarme (par exemple, état d'un stock d'effluent liquide atteignant 90% de la capacité de stockage afin d'éviter un débordement), à la satisfaction d'une condition de ressource (par exemple, état d'un stock de fumier suffisant pour envisager un chantier de compostage) ou à un aléa extérieur (demande d'effluents ou besoin d'épandage non anticipés provenant d'une autre exploitation).

Les épandages « planifiés », découlant du premier type d'événements, répondent aux préconisations agronomiques (correspondant aux calendriers culturaux) et aux anticipations de difficultés d'épandage (périodes de concurrence entre activités pour l'attribution de ressources : tracteur, main d'œuvre,...). En pratique, de nombreuses situations se présentent comme en témoignent les enquêtes (PRECHEUR, 1999 ; GOUSSEFF et GRIMAUD, 2002). Cependant, pour simplifier, on peut considérer qu'après chaque activité d'exploitation d'une parcelle fourragère (fauche, pâture), un épandage « planifié » de fertilisant (lisier ou engrais) est réalisé, auquel peut venir se rajouter, occasionnellement, un unique épandage « non planifié » de lisier. Si l'épandage « planifié » suit immédiatement l'exploitation de la prairie, l'épandage « non planifié » peut bénéficier d'un délai de report, toutefois limité par la hauteur d'herbe et le temps restant avant la prochaine exploitation.

---

<sup>19</sup> La définition du rythme d'achat d'engrais minéraux selon la trésorerie de l'exploitation devra être précisée.

### III.3.2.2 Priorités entre les activités d'utilisation selon le type de fertilisant

Les engrais chimiques et le lisier ne peuvent être épandus que sur les prairies de l'exploitation.

Le fumier peut être épandu, vendu, ou composté. Si la substitution des engrais chimiques par les fertilisants organiques fait partie de la stratégie de l'éleveur, le fumier sera en priorité composté par rapport à sa vente. Sinon, la priorité est inversée : la vente est prioritaire sur le compostage. Dans les deux situations, l'épandage de fumier est un dernier recours, lorsque les ressources de l'exploitation (main d'œuvre, retourneur d'andain...) sont insuffisantes pour pratiquer le compostage et qu'il n'y a pas de demande extérieure.

Le compost peut être vendu ou épandu. De même que pour le fumier, si la substitution des engrais chimiques par les fertilisants organiques est un objectif de l'éleveur, l'épandage de compost est prioritaire sur sa vente et inversement. On part de l'hypothèse que les prix de vente du compost et du fumier sont incitatifs<sup>20</sup>.

### III.3.2.3. Activités d'épandage

Les activités d'épandage font intervenir les paramètres structurels suivants :

- caractéristiques des parcelles de l'exploitation (surface, accessibilité, possibilité de mécanisation),
- caractéristiques de parcelles extérieures disponibles pour l'épandage (même caractéristiques que ci-dessus mais avec des contraintes supplémentaires sur la nature de l'effluent et les périodes d'épandage),
- matériel disponible sur l'exploitation (tracteur, épandeur, tonne à lisier...),
- matériel utilisé en commun et matériel d'entreprises extérieures (avec calendrier de disponibilité).

#### Contraintes sur le déclenchement des épandages

Le plan constitue le cadre souhaité pour le positionnement temporel des épandages par rapport aux événements culturels déclencheurs ; ces événements culturels peuvent être déterminés par des modèles biophysiques simulant la croissance ou l'accumulation de biomasse par la prairie (CROS et al., 2003). Cependant, la réalisation effective de l'épandage est soumise à des aléas. L'aléa principal, en élevage laitier comme en agriculture en général, est le climat ; il faut donc que le plan soit assorti de règles d'adaptation, capables de donner une certaine flexibilité à son exécution (par exemple, conditions d'ouverture et de fermeture des activités prenant en compte, à la fois, l'état du système biophysique et les aléas). Par exemple, les éleveurs expriment des règles déterminant la faisabilité d'un épandage en fonction d'une appréciation qualitative de la portance du sol et de la pluviométrie. Certaines règles prennent en compte les modalités de chantier (nécessité ou non du passage d'un tracteur sur la parcelle). Elles sont du type : [Si pluie(j) > 5 mm et pluies(j-3, j-1) > 10 mm, alors attendre 2 jours]. Elles devront être précisées par enquête ou suivi d'exploitations dans les différents contextes pédoclimatiques. Une autre condition nécessaire pour qu'un épandage soit déclenché est que la quantité de fertilisant en stock soit suffisante pour réaliser l'épandage sur la totalité de la parcelle.

#### Principes régissant les épandages planifiés

Dans le cas d'épandages « planifiés », la nature du fertilisant utilisé varie selon la stratégie de l'éleveur :

- 1- Si l'éleveur cherche à substituer les engrais chimiques par des fertilisants organiques, les priorités d'utilisation sont par ordre décroissant : [lisier > compost > fumier > engrais chimique] ; les effluents doivent être épandus dans un délai de 15 jours suivant la dernière exploitation de la prairie (un épandage tardif rend le fourrage moins appétant).
- 2- Sinon, l'apport d'engrais minéral est systématiquement effectué ; l'éleveur ne connaissant pas la valeur fertilisante des effluents, il agit par sécurité : les épandages de matières organiques éventuellement effectués (par exemple, pour éviter les débordements de fosse à lisier) viennent en supplément de la fertilisation minérale ; les effluents solides sont réservés au compostage et à la vente.

Le stock source est le stock le plus plein lorsque la capacité de stockage est limitée (fosses à lisier, fumières).

Seules les parcelles fourragères et les prairies de l'exploitation seront réceptrices d'épandages planifiés (pas les friches, ni les aires de parcours).

La dose d'apport des fertilisants dépend de la stratégie de l'éleveur, plus précisément de l'intensité d'exploitation de la prairie, qui correspond à un niveau de production herbagère espéré. Nous proposons dans le tableau 2 une correspondance entre l'intensité d'exploitation des prairies visée par l'éleveur et la dose d'apport des fertilisants (calcul effectué sur la base des teneurs en azote des matières organiques données par BODET et al., 2001). Il s'agit de doses cibles, l'éleveur adaptant, en pratique, la dose appliquée pour ne faire que des déplacements à plein. Ainsi, la dose réellement appliquée est l'entier multiple de la capacité de transport le plus proche de la dose cible.

Tableau 2. Doses d'apport de fertilisants (t/ha/épandage) selon l'intensité d'exploitation visée pour les prairies.

<sup>20</sup> La grande majorité du compost actuellement proposé aux exploitations agricoles (maraîchers essentiellement) est importée depuis la France métropolitaine, ce qui induit des prix de vente élevés.

Fertilisant	Intensité d'exploitation des prairies		
	<i>faible</i>	<i>intermédiaire</i>	<i>élevé</i>
Compost	10	15	20
Fumier	15	25	35
Lisier	30	50	70
Engrais NPK (20-0-33)	0,15	0,25	0,35

Un autre élément de détermination des doses d'épandage est le respect ou non de la réglementation par l'éleveur. Dans le cas du respect de la norme, les quantités épandues sur prairies ne doivent pas excéder 350 kg d'azote/ha/an. La dose cible est alors déterminée en tenant compte de cette contrainte et, le cas échéant, l'épandage est annulé.

Le chantier d'épandage est en général mécanisé pour tous les types de fertilisants. Cependant, dans le cas des engrais chimiques uniquement, le chantier peut être réalisé manuellement lorsque la parcelle n'est pas mécanisable (forte pente, empierrement).

La vitesse de réalisation de l'épandage ( $V$  en t/h) dépend de la nature du fertilisant épandu et des modalités de chantier. Elle est aussi fonction de la distance  $d$  du lieu de stockage à la parcelle et de la charge utile  $c$  du matériel (épandeur ou tonne). Son calcul peut s'effectuer par la formule :  $V = c/(c/K + 2d/v)$  où  $K$  (t/h) est le débit de chargement et d'épandage (considéré constant) et  $v$  (km/h) est la vitesse moyenne de déplacement d'un attelage (on prendra  $v = 15$  km/h, quelles que soient la puissance du tracteur et l'état de la voirie). Les valeurs de  $K$  proposées dans le tableau 3 sont des moyennes estimées.

Tableau 3. Valeur du débit de chargement et d'épandage  $K$  pour les fertilisants utilisés en élevage bovin laitier.

Catégorie de fertilisant	Débit de chargement et d'épandage
Compost/Fumier	$K = 36$ t/h (épandeur mécanique + tracteur + 1 opérateur)
Lisier	$K = 12$ t/h (tonne + tracteur + 1 opérateur) <sup>21</sup>
Engrais minéral	$K = 0,4$ t/h (épandeur à engrais + tracteur + 1 opérateur)

### Principes régissant les épandages non planifiés

Dans le cas d'épandages déclenchés suite à une alarme ou à un événement extérieur, le fertilisant épandu peut être de trois types : surtout du lisier, parfois du fumier, exceptionnellement du compost. Le stock qui a créé l'événement déclencheur est le stock source (par exemple, une fosse à lisier prête à déborder). Une exploitation peut recevoir, de façon non planifiée, des effluents provenant d'exploitations voisines ; il s'agit, le plus souvent, de lisier de porc ou de poule, mais aussi de fientes ou de fumier de volaille, parfois épandus après le retournement des prairies.

Le choix des parcelles réceptrices d'épandages non planifiés est effectué de la façon suivante. S'il existe une demande provenant d'une exploitation extérieure, l'effluent en excédent sera en priorité épandu sur les parcelles du demandeur. Si ces surfaces sont insuffisantes pour résorber l'excédent, l'éleveur devra utiliser ses propres parcelles. Trois conditions doivent être remplies pour qu'une parcelle soit jugée apte à recevoir un épandage non planifié :

- si l'éleveur respecte la réglementation, les quantités épandues depuis le début de l'année (épandages planifiés et non planifiés) cumulées avec le nouvel apport doivent être inférieures à la norme calculée pour cette parcelle ;
- pour des raisons liées à la repousse de l'herbe, le délai écoulé depuis la dernière exploitation de la parcelle doit être inférieur à 2 semaines ;
- la parcelle doit avoir reçu, au plus, un apport de fertilisant depuis sa dernière exploitation et le temps écoulé depuis cet apport doit être supérieur à une semaine s'il s'agissait de lisier ou d'engrais minéral.

Une fois que toutes les parcelles candidates à l'épandage sont identifiées, elles sont classées par degré de besoin : l'indicateur retenu est le temps écoulé depuis le dernier apport reçu par la parcelle. Entre deux parcelles ayant le même degré de besoin, c'est la parcelle la plus proche des bâtiments d'élevage qui sera choisie. L'éleveur épandra sur autant

<sup>21</sup> Cette valeur est valable pour une tonne de 5000 l. La puissance de la pompe est proportionnelle à la capacité de la tonne, donc plus la tonne est de capacité importante plus  $K$  est élevé.

de parcelles que nécessaire, dans la limite du respect de l'ensemble des contraintes applicables, pour arriver à la vidange maximale de sa fosse<sup>22</sup>.

La définition de la quantité épandue n'est pas l'objet, ici, d'une planification ; elle résulte essentiellement des contraintes d'urgence de vidange des stocks. AUBRY et al. (2001) proposent une dose cible de 40 m<sup>3</sup> de lisier par ha de prairies, correspondant de fait à une intensité d'exploitation plutôt faible (cf. tableau 2). Mais si les surfaces des parcelles aptes à recevoir un épandage sont insuffisantes pour vidanger la totalité du stock, la dose peut être augmentée jusqu'à celle correspondant à une intensité d'exploitation intermédiaire, soit 50 m<sup>3</sup>/ha de lisier. Par ailleurs, la règle d'ajustement de la dose selon la capacité de transport du matériel utilisé (transport à plein) est aussi valable pour les épandages non planifiés.

On retrouve les mêmes modalités de chantier que dans le cas d'épandage planifié, auxquelles correspondent les vitesses de réalisation données dans le tableau 3.

### **III.3.2.4 Activité de vente**

Deux types de fertilisants peuvent, en principe, être vendus : le compost et le fumier. Les paramètres structurels pris en compte sont :

- la charge utile des remorques de l'exploitation ;
- la distance des exploitations demandeuses (pour simplifier on pourra prendre une distance moyenne).

Comme dit précédemment (§ III.3.2.1), la vente est déclenchée par la demande d'exploitations extérieures. On propose cependant de ne pas distinguer les exploitations demandeuses mais, plutôt, de caractériser la demande de façon globale. Les caractéristiques de la demande (nature, quantité, distance, prise en charge du transport) seront transmises à l'éleveur sous la forme d'un événement. La faisabilité de l'activité de vente dépend de la stratégie de l'éleveur. Les besoins en fertilisants organiques peuvent atteindre des niveaux importants si l'éleveur a pour objectif de substituer la matière organique à la fertilisation minérale et, encore plus, s'il vise une forte intensité d'exploitation des prairies.

L'éleveur a, par expérience, une idée de la quantité de fumier ou de compost produite par mois sur son exploitation et sait évaluer ses besoins de fertilisant sur un horizon de six mois. Ainsi, l'offre de fumier ou de compost d'une exploitation sera calculée par : *offre sur 6 mois = quantité en stock + production sur 6 mois – besoins sur 6 mois*.

Pour chaque type de fertilisant, on distinguera le cas où c'est le demandeur qui s'occupe du transport et celui où la livraison est assurée par l'offreur. Si le demandeur s'occupe du transport, la vente peut concerner de petites quantités<sup>23</sup> avec toutefois un minimum (environ 500 kg). Par contre, si c'est l'offreur qui prend en charge la livraison, la demande ne sera satisfaite que si elle est au moins égale à la charge utile de la remorque disponible ; chaque voyage étant effectué à plein, la quantité vendue au total sera donc un multiple entier de la charge utile de la remorque. Dans les deux cas, la quantité vendue sera au plus égale à la demande, ou à l'offre si celle-ci lui est inférieure.

Le chantier ne mobilise ni main d'œuvre, ni matériel de l'exploitation, si c'est le demandeur qui s'occupe du transport. Dans la situation inverse, le chantier est du type : tracteur + remorque + fourche + 1 opérateur. La vitesse de réalisation du chantier (en t/h) est calculée de la même façon que pour un épandage (cf. § III.3.2.3), avec un débit moyen de chargement/déchargement  $K = 50$  t/h et une vitesse de déplacement estimée  $v = 15$  km/h.

### **III.3.3 Module de compostage du fumier**

La gestion actuelle du lisier, qui est l'effluent produit par la grande majorité des élevages bovins laitiers à la Réunion, ne comprend pas de transformation. Stocké en fosse, il est en général directement épandu sur les prairies à la tonne. Si l'imprégnation-compostage de lisier sur support carboné a été envisagée par la filière porcine, ce procédé a été jusqu'à présent relativement ignoré des acteurs du développement de la filière lait, car il est d'un coût élevé et se heurtait, jusqu'à présent, au manque de disponibilité de support carboné. Dans la perspective réaliste d'une évolution des pratiques vers le paillage des bâtiments et la production de fumier (SICALAIT, 2002), la méthode de transformation envisagée est le compostage du fumier à la ferme.

Trois phases sont distinguées dans la conduite du compostage : (1) la mise en andains sur une plate-forme, (2) la phase thermophile (4 à 6 semaines), correspondant à la dégradation des matières organiques, accélérée par des retournements successifs (en principe 2 retournements suffisent pour obtenir une homogénéité garante de la qualité de l'épandage et de l'hygiénisation de la masse de fumier) et (3) la phase mésophile (4 à 12 semaines), correspondant à la maturation et la réorganisation des matières organiques en composés plus stables.

---

<sup>22</sup> Rappelons qu'un épandage sur une parcelle est déclenché si la quantité de fertilisant en stock est suffisante pour épandre la totalité de la parcelle.

<sup>23</sup> En effet, la demande peut provenir de particuliers pour leurs jardins et de petits pépiniéristes, qui viennent s'approvisionner avec des véhicules de faible capacité (camionnettes, pick-up divers...).

### III.3.3.1 Activité de mise en andains

La mise en andains du fumier est l'activité de mise en route du compostage. Elle est gouvernée par les paramètres structurels attachés à la plate-forme de compostage (surface, capacité d'accueil, nature bétonnée ou non). Elle est déclenchée par le niveau de fumier en stock, qui doit être suffisamment important pour que la mise en œuvre du chantier soit justifiée (immobilisation de main-d'œuvre et de matériel) ; on prendra comme seuil la quantité de fumier nécessaire à la confection d'un andain. On évaluera la quantité de compost produite par andain en appliquant, à cette quantité, un taux de pertes (eau, matière sèche) à renseigner pour chaque phase du compostage. Deux chantiers de compostage par an sont envisageables au maximum.

On distingue 5 variables de contrôle : la nature et l'état de la plate-forme réceptrice, la quantité mise en andains, la modalité de chantier et la vitesse de réalisation.

Si l'exploitation possède plusieurs plates-formes de compostage, le choix de la plate-forme réceptrice sera déterminé par les règles de priorité suivantes :

- 1- une plate-forme partiellement occupée est toujours prioritaire sur une plate-forme vide,
- 2- une plate-forme bétonnée est toujours prioritaire sur une plate-forme en terre battue,
- 3- plus la plate-forme est large, plus elle sera prioritaire.

La capacité de la plate-forme dépend de ses dimensions et de la modalité du chantier de retournement (cf. § III.3.3.2).

La quantité totale de fumier mise en andains est un multiple entier de la quantité mise dans un andain, dans la limite du stock de fumier disponible et de la capacité de la plate-forme. En effet, il est plus pratique de gérer le compostage d'andains entiers plutôt que de fractions d'andains à des stades différents. Généralement, les andains sont de la longueur de la plate-forme ( $L$ ). Pour des raisons d'économie de temps de travail, cette longueur doit être maximale. Plusieurs andains peuvent être réalisés simultanément. La largeur de la plate-forme conditionne le nombre d'andains mis en compostage ; celui-ci est égal à la largeur de la plate-forme divisée par la largeur moyenne mobilisée par un andain, compte tenu des espaces nécessaires aux retournements. Cependant, pour le compostage au champ, on peut supposer qu'un seul andain est réalisé ; il correspond à la quantité épandable sur la parcelle (réglementation). Le volume de chaque andain est le produit de sa section  $S$  par sa longueur  $L$ . La section est généralement de forme trapézoïdale :  $S = (l + l') \times H/2$  (avec  $l$  : grande base,  $l'$  : petite base,  $H$  : hauteur) ; en général on a  $l' = l/2$  et  $H = 0,4l$  d'où  $S = 0,3 \times l^2$  ( $l$  vaut de 2 à 4 m selon le matériel utilisé pour le retournement).

Le chantier de mise en andains est mécanisé (tracteur + fourche + remorque + 1 opérateur). Si une modalité de chantier manuelle a été observée dans certains types d'exploitations, comme le maraîchage (AUBRY et al., 2001), compte tenu de l'importance des quantités de fumier produites et de la manutention (mise en andains, retournements) cette modalité n'est pas envisageable en élevage bovin. La vitesse de réalisation correspond essentiellement au débit de chargement/déchargement, soit en chantier mécanisé :  $K = 36$  t/h. On pourra négliger, dans la plupart des cas de compostage à la ferme, le temps de transport proprement dit, les plates-formes de compostage étant situées généralement à proximité immédiate des bâtiments d'élevage ou des stocks de fumier. Par contre, dans le cas de compostage au champ, il faudra en tenir compte.

### III.3.3.2 Activité de retournement des andains

Le déclenchement des retournements est gouverné par le calendrier de conduite du compostage décrit par AUBRY et al. (2001) : deux semaines après la mise en andains, deux retournements espacés de 2 semaines sont préconisés. Les modalités de chantier de retournement (Figure 7) sont les suivantes :

- tracteur + retourneur + 1 opérateur,
- retourneur électrique automoteur + 1 opérateur,
- tracteur + fourche (ou godet) + 1 opérateur.

Compte tenu du type de fumier produit, la première modalité devrait être la plus répandue dans les élevages laitiers (un retourneur tracté a été acquis par l'Union des AFP). La vitesse de réalisation du retournement d'andains dépend de la modalité de chantier (Tableau 4).

Tableau 4. Vitesse de réalisation des retournements selon la modalité de chantier pratiquée.

	Modalité de chantier de retournement		
	Tracteur + retourneur	Retourneur électrique automoteur	Tracteur + fourche (ou godet)
Vitesse de réalisation (t/h)	200	40	30

La modalité de chantier de retournement influence directement sur la capacité de la plate-forme de compostage. Si le retournement s'effectue au tracteur avec un retourneur attelé, il faut compter environ une largeur d'andain perdue pour

le passage du tracteur tous les deux andains, soit 25% de surface morte (Figure 7). 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 libre équivalente à la surface de l'andain pour y déplacer le compost, la perte de surface correspondante dépend alors du nombre d'andains : elle sera, en pourcentage, de  $100 \times (n + 1)^{-1}$ , où  $n$  est le nombre d'andains (soit 50, 33, 25, 20%, pour 1, 2, 3 ou 4 andains, respectivement).

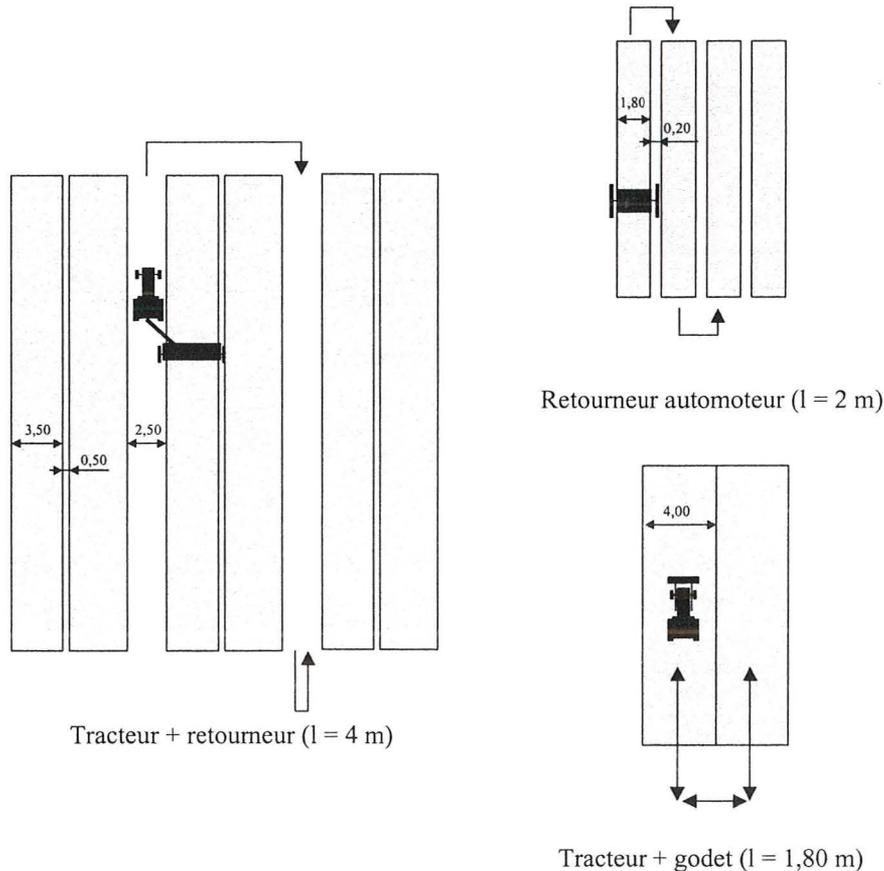


Figure 7. Modalités du chantier de retournement d'andains sur une plate-forme de compostage (d'après AUBRY et al., 2001).

### III.3.4 Exemple de formalisation d'un plan de gestion des fertilisants

Nous présentons ici la formalisation d'un plan simplifié structurant les activités de gestion des fertilisants dans une stratégie n'utilisant les engrais minéraux qu'en cas de nécessité. Ce plan permet d'illustrer quelques notions de l'ontologie des systèmes de production agricoles (MARTIN-CLOUAIRE et RELIER, 2003) brièvement présentées dans le § I.3.2.

Les activités « primitives » sont désignées par des termes en majuscules, parfois suivis de minuscules. Par exemple, EVACUATION désigne l'activité primitive d'évacuation des effluents des bâtiments d'élevage (l'objet opéré est omis ainsi que l'exécutant). Pour désigner une activité primitive d'épandage de compost sur la parcelle p1 (dont l'exécutant est omis), avec  $\{p1, \dots, pn\}$ , l'ensemble des parcelles de l'exploitation, on écrira : (p1 EPANDcompost). Le plan est le suivant :

```
(and (iterate (before (EVACUATION TRAITE PAILLAGE)))
      (iterate (before (or (p1 PATURAGE) (p1 FAUCHE))
                (or (p1 EPANDcompost) (p1 EPANDfumier)
                    (p1 EPANDlisier) (p1 EPANDengrais))))))
...
(iterate (before (or (pn PATURAGE) (pn FAUCHE))
          (or (pn EPANDcompost) (pn EPANDfumier)
              (pn EPANDlisier) (pn EPANDengrais))))))
(iterate (optional2 (ACHAT)))
```

(*iterate2* (*before* (MISE-EN-ANDAIN RETOURNEMENT RETOURNEMENT )))

(*iterate* ({p1 | ... | pn}<sup>S</sup> EPANDlisier))))

Ce plan comporte les spécifications des activités suivantes :

- l'évacuation des effluents des bâtiments, tenant compte des activités de traite et de paillage ; ces trois activités primitives doivent être réalisées séquentiellement et répétées selon des modalités (conditions d'ouverture et de fermeture) qui ne sont pas indiquées ici ;
- l'itinéraire technique de chaque parcelle, indiquant qu'il faut répéter une séquence de deux activités composées ; la première laisse le choix entre pâturage et fauche, la seconde donne les options possibles d'épandage de 4 types de fertilisants (la disponibilité des ressources, les règles de préférence, et les conditions rencontrées au moment de l'exécution permettront de trancher entre ces alternatives) ;
- l'achat d'engrais minéral ;
- le compostage ;
- l'épandage de lisier.

L'ensemble de ces spécifications est agrégé à l'aide de l'opérateur *and*.

L'opérateur *optional2*, indique que l'activité ACHAT peut être omise sans mettre le plan en échec, seulement si ses conditions de faisabilité ne sont pas satisfaites (e.g., stock d'engrais supérieur au seuil déclenchant un achat). Il y aura, par contre, échec, si les ressources ne sont pas disponibles. L'opérateur *optional*, non utilisé ici, indiquerait qu'une activité optionnelle peut ne pas être exécutée pour cause d'insuffisance de ressources sans que le plan ne soit déclaré en échec pour autant. L'opérateur *iterate2*, utilisé pour spécifier le compostage, indique que l'activité à répéter peut être rouverte avant que l'itération précédente ait été fermée, alors que l'opérateur *iterate* indique que l'activité à itérer ne doit être rouverte que quand la précédente a été fermée. La dernière activité, EPANDlisier, spécifie un épandage « forcé » qui doit être répété (*iterate*) chaque fois que le niveau de lisier dans la fosse le justifie (condition d'ouverture). La fosse, non indiquée ici, est la « source » de l'opération de transfert. La « destination » de l'opération est un ensemble de parcelles, classées par un opérateur *ad hoc* {}<sup>S</sup>. Le lisier sera d'abord épandu sur la première, puis sur la deuxième, etc.

Le plan ci-dessus devrait s'inscrire dans une stratégie comportant, en outre, des ajustements conditionnels permettant de faire face à des perturbations. Par exemple, si survient un événement de réception d'une demande extérieure de fertilisant, un mécanisme provoquera l'examen des ajustements conditionnels (activité primitive ALARME) ; l'un de ces ajustements déclenchera l'activité de VENTE dans le plan.

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce travail a permis :

1. de représenter sous la forme de diagrammes de flux physiques, les transferts de matières azotées entre les quatre ateliers (Gestion des prairies, Gestion des aliments, Gestion du troupeau, et Gestion des fertilisants) identifiés comme unités de gestion dans les exploitations d'élevage bovin laitier à la Réunion et leurs échanges avec l'environnement ;
2. d'identifier les activités contrôlant certains de ces flux ;
3. de distinguer les flux placés sous la dépendance directe des décisions de l'éleveur et les flux résultant de processus biophysiques plus autonomes ;
4. de formaliser les principales règles de décision appliquées par les éleveurs pour gérer les fertilisants minéraux et organiques dans leur exploitation.

Cette ébauche de modèle conceptuel de flux d'azote en exploitation d'élevage bovin laitier est certainement critiquable sous certains aspects. Il représente néanmoins un début de synthèse des connaissances détenues par les principaux experts de la filière à la Réunion (Sicalait, UAFP, chercheurs du Cirad). Ce travail de synthèse devra être poursuivi et affiné ; des enquêtes en exploitations seront sans doute à envisager, en tant que besoin, pour préciser certains aspects (notamment, les règles de décision des différentes catégories d'éleveurs pour chaque atelier). Ce rapport doit être vu comme un objet de discussion et de questionnement. Les commentaires qu'il suscitera seront d'ailleurs très utiles à la construction du futur modèle dont la perspective est de répondre, autant que possible, aux besoins de la filière lait et des éleveurs à la Réunion.

Ce travail a aussi montré que l'ontologie des systèmes de production agricoles, malgré un abord peu intuitif, peut apporter une aide méthodologique intéressante pour formaliser le processus de décision de l'éleveur. Elle oblige, en effet, à la description structurée des activités et des stratégies dans lesquelles elles s'insèrent (cf. Annexes). En particulier, il est intéressant de distinguer la préconisation de la spécification des activités. L'approche plus informelle, utilisée pour la description de l'atelier « Gestion des fertilisants » sous la forme de règles et de tableaux divers, est a priori

transposable dans son principe à la modélisation des autres ateliers de l'exploitation. La question reste cependant posée de l'adaptation de cette ontologie, dans son état actuel d'élaboration, pour formaliser ces représentations informelles et, généralement, pour représenter l'ensemble des stratégies de gestion relatives à ces ateliers. Par exemple, la notion d'objectif, qui nous a paru nécessaire pour caractériser les stratégies de gestion de façon synthétique, est absente de l'ontologie.

La poursuite du travail permettant d'avancer sur la voie de construction du modèle comporte les étapes suivantes :

- valider et compléter par le biais d'enquêtes en exploitations le modèle d'action de l'atelier « Gestion des fertilisants » présenté dans ce rapport ;
- réaliser les modèles d'action relatifs aux autres ateliers du système de production (Gestion des prairies, Gestion des aliments et Gestion du troupeau) ;
- décrire les processus biophysiques sous une forme permettant d'adapter, sans simplification abusive, la connaissance existante (à la fois précise dans ses résultats mais incomplète dans sa portée) aux objectifs de gestion globale du modèle ; cette description au niveau de l'ensemble de l'exploitation nécessite un travail original de synthèse et de généralisation ;
- en comparaison avec une approche de modélisation plus classique (basée sur l'intuition et l'empirisme), utiliser l'ontologie des systèmes de production pour formaliser complètement le modèle et le rendre simulable par les outils informatiques développés à cette fin (logiciels Dièse et Control Dièse).

## BIBLIOGRAPHIE

### DOCUMENTS CITES

ALARY V., 2001. Présentation de la typologie des systèmes d'exploitations laitières à la Réunion. Cirad-Emvt, rapport de mission, Montpellier, 26 p.

AUBRY C., PAILLAT J.-M., GUERRIN F., 2001. Modélisation conceptuelle de la gestion des effluents d'élevage à la Réunion. Rapport Cirad-Tera n°16/01, Saint-Denis, La Réunion, 58 p.

BODET J.-M., HACALA S., AUBERT C., TEXIER C., 2001. Fertiliser avec des engrais de ferme. Institut de l'élevage, Itavi, ITCF, ITP, 101 p.

CHOLLET S., 1998. Flux d'azote dans les exploitations laitières - Relations avec les pratiques et conséquences sur la gestion des effluents dans la filière laitière. Mémoire de DAA, Ecole nationale supérieure agronomique de Rennes, 54 p. + annexes.

CROS M.-J., DURU M., GARCIA F., MARTIN-CLOUAIRE R., 2003. A biophysical dairy farm model to evaluate rotational grazing management strategies. *Agronomie* n°23, p 105-122.

DELATTRE F., 1996. Analyse des pratiques et stratégies de gestion des stocks fourragers chez les éleveurs de bovins laitiers de la Réunion. Mémoire de DAA, Institut national agronomique Paris-Grignon, 54 p.

GOUSSEFF M., GRIMAUD P., 2002. Bilans et efficacités azotés. Résultats d'enquêtes. Cirad, Pôle Elevage, Saint-Pierre, La Réunion, 11 p.

GUERRIN F., 2001. Magma: A model to help manage animal wastes at the farm level. *Computers and Electronics in Agriculture*, 33(1), p 35-54.

GUERRIN F., PAILLAT J.-M. (Eds.), 2003. Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité - Cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de la Réunion. Restitution des travaux de l'ATP 99/60. Actes du séminaire, 19-20 juin 2002, Cirad, Montpellier, France, cédérom.

LECOMTE P., BOVAL M., GUERIN H., ICKOWICZ A., HUGUENIN J., LIMBOURG P., 2002. Carbone et élevage de ruminants. Coll. Int. IRD-CIRAD Influences de la gestion de la biomasse sur l'érosion et la séquestration du carbone, Montpellier, 23-28 septembre 2002.

MANDRET G., BLANFORT V., HASSOUN P., PAILLAT J.-M., TILLARD E., 2000. L'élevage bovin à la Réunion : synthèse de quinze ans de recherche. Cirad, Coll. Repères, Montpellier, 391 p.

MARTIN-CLOUAIRE R., RELIER J.-P., 2003. Fondements ontologiques des systèmes pilotés. Inra-UBIA, Toulouse, 95 p.

PRECHEUR H., 1999. Gestion des effluents d'élevages du sud de la Réunion - Constitution d'un modèle d'action. Mémoire de DAA, Ensa Rennes, 52 p.

SICALAIT, 2002. La canne et l'élevage bovin : un exemple de complémentarité insulaire. Rapport technique, Sicalait, Plaine-des-Cafres, La Réunion, 14 p.

TACHE C., 2000. Diagnostic des exploitations laitières de l'île de la Réunion. Mémoire, Istom, Cergy-Pontoise, 88 p.

### AUTRES DOCUMENTS CONSULTÉS

ALARY V., 2001. Suivi de l'opération : Modélisation des systèmes d'exploitation laitier et allaitant à la Réunion. Cirad-Emvt N°2001-59, rapport de mission, Montpellier, 35 p.

ALARY V., 2002. Appui à l'Opération : Modélisation économique des exploitations bovines à la Réunion. Cirad-Emvt N°2002-29, rapport de mission, Montpellier, 28 p.

BALENT G., ALARD D., BLANFORT V., GIBON A., 1998. Activités de pâturage, paysages et biodiversité. *Ann. Zootech.*, 47 : 419-429.

DELABY L., PEYRAUD J.L., FAVERDIN P., 2000. Développement d'un organisateur de pâturage assisté par ordinateur : Pâtur'IN. *Renc. Rech. Ruminants* n° 7, p 329-332.

GOUSSEFF M., GRIMAUD P., LECOMTE P., 2002. Approche de l'incidence environnementale des systèmes de production laitiers sur l'île de la Réunion. *Renc. Rech. Ruminants* n° 9, p 122.

GRIMAUD P., THOMAS P., 2002. Diversité des rations à base de graminées et gestion des prairies en élevage bovin sur l'île de la Réunion. Fourrages, 169, p 65-78.



## ANNEXES

*Annexe 1. Description des opérations et des ressources selon l'ontologie des systèmes de production agricoles (p. 31)*

*Annexe 2. Exemple de description d'opérations relatives à l'atelier Gestion des fertilisants (p. 33)*



## Annexe I. DESCRIPTION DES OPERATIONS ET DES RESSOURCES SELON L'ONTOLOGIE DES SYSTEMES DE PRODUCTION AGRICOLES

L'ontologie des systèmes de production agricoles (MARTIN-CLOUAIRE et RELIER, 2003) propose des éléments de description des opérations et des ressources que nous avons synthétisés dans cette annexe.

### 1. Attributs de description des opérations

Une opération est un attribut de spécification des activités. Chaque opération est décrite selon 9 attributs principaux dont les définitions simplifiées sont données ci-après.

L'intitulé d'une opération correspond au nom rappelé lors de la spécification de l'activité.

La classe-entité délimite le domaine dans lequel est spécifié l'objet opéré par l'activité (objet unique ou groupe d'objets). Par exemple, l'ensemble des parcelles clôturées de l'exploitation constitue la classe-entité de l'opération « mise en pâture », alors que la prairie clôturée n°3, appartenant à l'ensemble précédent, constitue l'objet opéré de l'activité « mise en pâture des vaches en production sur la prairie n°3 par le chef d'exploitation ».

Une opération requiert un ensemble de ressources spécifié dans l'attribut ressources requises. On les appelle les ressources support<sup>24</sup>. Par exemple, l'opération d'épandage du lisier requiert un système d'épandage (tracteur, tonne à lisier, x litres de gasoil/ha, ...) et, au moins, une fosse à lisier. Par ailleurs, d'autres sous-attributs attachés au couple [opération, ressource requise]<sup>25</sup> permettent de définir quelle ressource (et en quelle quantité) sera effectivement requise au moment de la spécification de l'activité.

Il s'agit de :

- ⇒ la règle de priorité de mobilisation des ressources,
- ⇒ le mode qui précise si le nombre (ou la quantité) de ressources support est proportionnel au nombre d'opérateurs spécifié au niveau de l'activité (dans notre exemple, le nombre de systèmes d'épandage est proportionnel, alors que le nombre de fosses ne l'est pas),
- ⇒ la consommation unitaire par pas de temps dans le cas de ressources consommables continues.

La procédure de transition d'état définit les changements d'état induits par l'opération sur certains composants du système piloté.

Le calcul de la durée de l'activité fait appel à trois attributs temporels : pas de temps, mode et vitesse de progression. Le pas de temps est le plus petit intervalle entre deux instants successifs auquel est attachée une modification d'état (du système piloté) présentant un intérêt pour les autres composants du système piloté. Le mode de progression revient à définir l'unité de vitesse de réalisation de l'activité. Trois modes de progression ont été retenus pour un système de production de tomates hors-sol. Ils sont décrits dans le tableau ci-après. Il serait intéressant d'envisager un quatrième mode de progression pour l'application de l'ontologie au système bovin laitier. Il s'agit du mode « massique » auquel correspond l'unité de vitesse « kg de l'objet opéré/pas de temps ».

*Descriptif de modes de progression proposés par l'ontologie des systèmes de production agricoles.*

Intitulé du Mode de progression	unité de vitesse correspondant
Mode surface	hectares de l'objet opéré/pas de temps
Mode unitaire	composants de l'objet opéré/pas de temps
Mode temporel	% de l'effet attendu sur l'objet opéré/pas de temps

<sup>24</sup> C'est au niveau de l'activité qu'on spécifie ce qu'on appelle les « ressources sujet ». Elle correspondent généralement à un travailleur unique, mais il existe des activités, telles que les chantiers d'enrubannage, qui mobilisent plusieurs opérateurs à la fois. La ressource est alors un agrégat de travailleurs. Pour calculer le temps de réalisation d'une activité, la notion de puissance est associée à la ressource unitaire. Dans le cas d'une opération réalisable par un seul opérateur, la puissance affectée à l'activité est, par exemple, 1. Alors que dans un chantier d'enrubannage mené par un groupe de  $n$  travailleurs, la puissance affectée sera  $n$ .

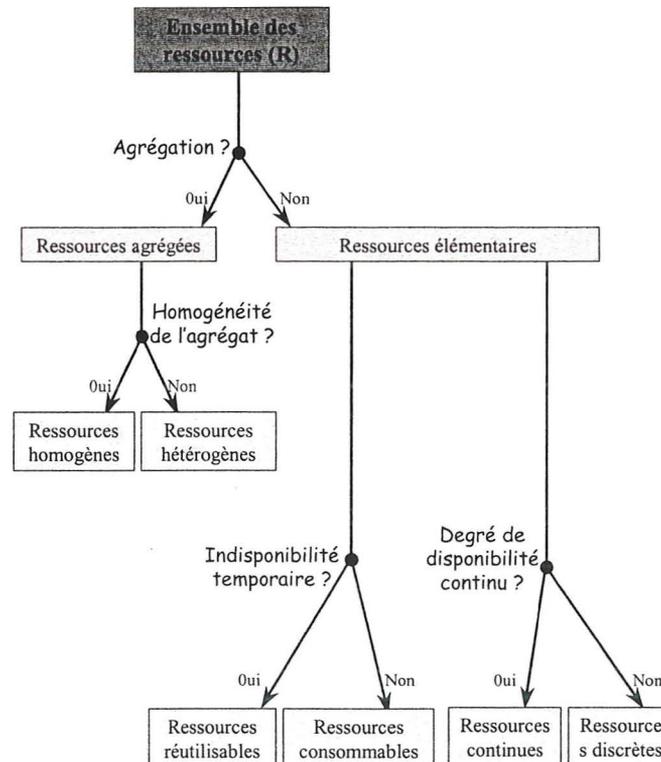
<sup>25</sup> Il sont regroupés dans la *Resource set specification*.

Le seuil de suspension de l'activité est un nombre compris entre 0 et 1 qui correspond à l'inverse du degré de priorité de reprise de l'activité en cas d'interruption. Un seuil de 0 signifie que l'activité sera automatiquement reprise si une interruption intervient.

Enfin, le dernier attribut décrivant une opération est l'ensemble des conditions de faisabilité.

## 2. Typologie des ressources

L'ontologie propose une typologie dichotomique des ressources, que nous avons synthétisée sous la forme du schéma présenté ci-dessous. Pour les ressources élémentaires, cette typologie est basée sur le mode de mise en état d'indisponibilité des ressources puisque c'est un élément déterminant de la mise en œuvre des activités par le système opérant. La disponibilité est une fonction booléenne de la valeur d'une variable d'état qualitative (ressources à état discret) ou continue (ressources à capacité).



*Typologie des ressources de l'ontologie des systèmes de production*

En dehors de cette typologie, on peut aussi différencier les ressources, une fois mobilisées, sur la base de leur fonction en distinguant si la ressource est sujet, objet, ou support de l'activité. Une activité de fauche sera réalisée par un ouvrier (= ressource sujet), sur une prairie (= ressource objet), à l'aide d'une faucheuse (= ressource support). Une même ressource peut être objet d'une activité et support d'une autre.

## 3. Attributs de description des ressources

Comme pour les opérations, nous donnons ici la définition des principaux attributs de description des ressources. Ils sont beaucoup moins nombreux que pour les opérations.

On trouve le type de la ressource (cf. typologie décrite ci-dessus) et les conditions de violation de partage de la ressource qui constituent des contraintes de réalisation des activités.

Chaque ressource possède en outre deux propriétés caractérisant son état à chaque instant. Il s'agit de sa disponibilité (Oui/Non) et de la liste des activités dans lesquelles elle est engagée.

**Annexe II. EXEMPLE DE DESCRIPTION D'OPERATIONS RELATIVES A L'ATELIER GESTION DES FERTILISANTS**

Atelier	Intitulé du flux	Opération	Classe-entité	Procédure-transition-état	Pas	Mode de progression	Vitesse	Conditions de faisabilité	Seuil suspension	Ressources requises			
										Ressource support	Ressource sujet	Puissance	
Gestion des fertilisants	Epannage	EpannageLisierDose <sub>a</sub> dont chargement, transport	Parcelle	Diminution Q <sub>lisier stocké</sub> (d T/ha) Augmentation Q <sub>lisier de la parcelle</sub> (d T/ha)	2h	area (ha/pas)	2	Exploitée depuis -15 j pluie (j) < 5 mm, (j-1 et j-2) < 20 mm Lisier stocké (Q <sub>lit</sub> > 2 doses)	0	Proportionnel : SCiterme Fosse à lisier	1 homme	1	
													EpannageFumierDose <sub>a</sub> dont chargement, transport
	EpannageCompostDose <sub>a</sub> dont chargement, transport	Parcelle	Diminution Q <sub>compost stocké</sub> (d T/ha) Augmentation compost en surface des parcelles (d T/ha)	2h	area (ha/pas)	2	Exploitée depuis -15 j pluie (j) < 5 mm, (j-1 et j-2) < 20 mm Compost stocké (Q <sub>lit</sub> > 2 doses)	0	Proportionnel : SEpandeur	1 homme	1		
												Import/Export	DemandeLivraison (livraison par la coop)
	Fertilisation minérale	EpannageEngraisDose <sub>a</sub>	Parcelle	Diminution Q <sub>Engrais du stock</sub> (d N/ha) Augmentation Q <sub>engrais de la parcelle</sub> (d N/ha)	2h	area (ha/pas)	2	Exploitée depuis -15 j pluie (j) < 5 mm, (j-1 et j-2) < 20 mm	0,5	Consommable : Gasoil (l/ha) Engrais à vendre	1 homme Proportionnel: 1 camionnette, 1 tracteur, 1 épandeur	1	1