



HAL
open science

Création d'un outil informatique d'aide à la décision pour l'optimisation du système de production et de la rentabilité des investissements d'un système d'élevage de bovins laitiers.

Ny Riana Solomalala Andriamarosoa Ratsimbazafy

► To cite this version:

Ny Riana Solomalala Andriamarosoa Ratsimbazafy. Création d'un outil informatique d'aide à la décision pour l'optimisation du système de production et de la rentabilité des investissements d'un système d'élevage de bovins laitiers.. Science des productions animales. Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques - Université d'Antananarivo, 2016. Français. <NNT : >. <tel-01724083>

HAL Id: tel-01724083

<https://hal.science/tel-01724083v1>

Submitted on 6 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC0 1.0 - Universal - International License



**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES**

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES

Mention Sciences Animales

Ecole Doctorale : Agriculture-Elevage-Environnement (A2E)

Présentée par

ANDRIAMAROSOA RATSIMBAZAFY Ny Riana Solomalala

CREATION D'UN OUTIL INFORMATIQUE D'AIDE A LA DECISION POUR L'OPTIMISATION DU SYSTEME DE PRODUCTION ET DE LA RENTABILITE DES INVESTISSEMENTS D'UN SYSTEME D'ELEVAGE DE BOVINS LAITIERS

Soutenue publiquement le 22 décembre 2016
Devant le jury composé de :

Mme. RABEHARISOA Lilia, Professeur Titulaire, Directeur de l'Ecole Doctorale A2E, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques - Université Antananarivo	Président
M. RAKOTOZANDRINY Jean de Neupomuscène, Professeur Titulaire, Mention Sciences Animales, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques - Université d'Antananarivo	Directeur de thèse
M. HILL David, Professeur Titulaire, Institut Supérieure d'Informatique, de Modélisation et de leurs Application (ISIMA) - Université Blaise Pascal/CNRS - Clermont-Ferrand	Rapporteur externe
M. RANDRIANARIVELOSEHENO Arsène, Docteur HDR, Chef de Mention Sciences Animales, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques - Université Antananarivo	Rapporteur interne
M. RAKOTOZANDRINDRAINY Raphael, Professeur Titulaire, Mention Sciences Animales, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques - Université d'Antananarivo	Examineur
M. RANDRIAMBOLOLONDRA TOMALALA Princy, Docteur HDR, Département des Mathématiques et Informatiques, Faculté des Sciences - Université Antananarivo	Examineur



Laboratoire d'Informatique de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes
LIMOS – UMR 6158 – Université Blaise Pascal / CNRS

Pr. David Hill
UMR CNRS 6158
ISIMA / Université BLAISE PASCAL
Campus des Cézeaux
BP. 10125. 63173 AUBIERE Cedex
Tel: (33) 04 73 40 50 19

Clermont-Fd, le 12/12/2016

Rapport sur la thèse de M. ANDRIAMAROSOA RATSIMBAZAFY Ny Riana Solomalala

Etabli par David Hill, Professeur à l'Université Blaise Pascal.

La thèse défendue par M. ANDRIAMAROSOA RATSIMBAZAFY Ny Riana Solomalala est intitulée : “Création d’un outil informatique d’aide à la décision pour l’optimisation du système de production et de rentabilité des investissements d’un système d’élevage de bovins laitiers ”. Le manuscrit écrit en français est soigné, il dispose d’environ 170 pages avec un complément d’annexes de qualité et concises même si leur volume s’étend sur plus de 40 pages.

Cette thèse est dans le champ disciplinaire de la modélisation pour les Sciences Agronomiques ; elle est issue de l’école doctorale Agriculture-Elevage-Environnement de l’Université d’Antananarivo sous la direction du Professeur RAKOTOZANDRINY Jean de Neupomuscène, avec la participation du Docteur Claude Mazel de l’Université Blaise Pascal. La thèse comporte 5 chapitres, la bibliographie étant répartie sur les différents chapitres. La problématique et les hypothèses testées sont clairement exprimées, nous sommes en présence d’un manuscrit présentant une réelle approche scientifique et se



**Laboratoire d'Informatique de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes
LIMOS – UMR 6158 – Université Blaise Pascal / CNRS**

posant la question de savoir comment appuyer les prises de décisions concernant le choix du système de production et d'élevages de bovins laitiers tout en permettant d'optimiser la rentabilité des investissements. Deux hypothèses sont testées, la première vise à savoir si les prises de décisions sur la recherche d'une organisation et d'un système de production plus rémunérateur nécessitent une modélisation informatique du système d'élevage de bovins laitiers. La deuxième hypothèse formule qu'un modèle informatique fondé sur les théories de « l'utilité espérée » et de la « rationalité limitée » permet de simuler la rentabilité optimale du système.

Le premier chapitre de cette thèse présente le contexte et les définitions clés du domaine. Il réalise un petit état de l'art et synthétise les connaissances bibliographiques applicables pour une modélisation systémique et informatique d'une exploitation de systèmes d'élevage et plus particulièrement du cas des systèmes d'élevage de bovins laitiers. A partir de ces connaissances, des éléments de réflexion conduisent à retenir une approche reposant sur une méthode de modélisation par objet capable d'intégrer des modèles analytiques et la programmation linéaire.

Dans le deuxième chapitre, nous trouvons une description du modèle du système d'alimentation qui sera utilisé par le modèle de simulation global. On trouve dans ce chapitre une modélisation objet simple avec une dizaine de classes décrites avec le langage de modélisation unifié avec les principales classes et les attributs essentiels à cette modélisation. Les équations pour les modèles d'ensilages sont fournies et les contraintes à prendre en compte pour la programmation linéaire sont aussi définies au nombre de 5. Elles prennent en compte l'occupation du sol, la disponibilité en main d'œuvre, en équipement agricole, en intrants (semences, engrais) et les besoins en eau de la plante.

Le troisième chapitre se concentre sur la modélisation du troupeau laitier dans le contexte de l'élevage bovin malgache. Après une justification du choix des terroirs, la démarche est présentée, listant toutes les méthodes utilisées : pour l'analyse et la modélisation de la gestion du troupeau, la modélisation de la production potentielle de lait,



**Laboratoire d'Informatique de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes
LIMOS – UMR 6158 – Université Blaise Pascal / CNRS**

des besoins nutritifs et de la capacité d'ingestion, de la dynamique de la population, des bâtiments d'élevage et de l'évolution de la Note d'Etat Corporel. Les éléments essentiels sont donnés avec l'ensemble des modèles UML simplifiés d'une part mais complets d'autre part en prenant en compte les besoins des vaches laitières ainsi que des bovins en croissance avec engrais. D'autres aspects économiques sont discutés que ce soit pour le besoin en bâtiment d'élevage ou encore comme pour l'aide à la décision en ce qui concerne les achats et les ventes.

Le quatrième chapitre, sensiblement plus court que le précédent, aborde la modélisation du système de pilotage et plus particulièrement l'implémentation informatique du modèle d-algo. Outre l'architecture interne des modèles, des résultats de simulations sont présentés ainsi qu'une analyse de sensibilité.

Le cinquième et dernier chapitre nous livre la validation conceptuelle du modèle à partir d'un exemple d'expérimentation informatique. Il s'en suit une discussion générale sur résultats obtenus et les limites de la solution proposée. Des pistes d'améliorations possibles sont envisagées pour le modèle informatique de simulation avec notamment sans être exhaustif : la prise en compte des risques aléatoires, la possibilité de pouvoir changer les itinéraires techniques en cours de simulation, de pouvoir prendre en compte les variabilités climatiques intra-annuelles ou encore de pouvoir réaliser une analyse de l'émission des composés à risque pour l'environnement.

Ce manuscrit montre des compétences variées faisant appel, non seulement à de solides compétences en agronomie accompagné d'un travail de terrain conséquent, mais aussi à des compétences en modélisations à l'interface avec le travail des informaticiens modélisateurs. Cette thèse, écrite de façon concise, présente des contributions significatives. Je ne trouve qu'une réserve mineure concernant l'utilisation ponctuelle du mot « méthodologie » à quelques endroits dans le manuscrit. N'ayant pas trouvé de citations pour les travaux de Popper, Kuhn, Lakatos, Feyerabend, Blaug ou Mäki, je doute que l'usage du mot méthodologie soit approprié, le terme méthode sera certainement plus



**Laboratoire d'Informatique de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes
LIMOS – UMR 6158 – Université Blaise Pascal / CNRS**

adapté à l'avenir et notamment pour des publications. La confusion est souvent entretenue dans bien des articles, mais aussi dans des manuscrits de thèse et même des rapports de thèse. C'est l'occasion de travailler ou de retravailler la terminologie liée à l'épistémologie des méthodes scientifiques.

Au final, je tiens à dire que cette thèse constitue à mon avis un travail considérable et significatif dans le domaine de modélisation des systèmes d'élevage de bovins laitiers à Madagascar. Outre l'aspect agronomique qui est au cœur de cette thèse, le travail de modélisation informatique est sérieux, de bonne facture et méritera d'être étoffé selon les limites et perspectives avancées. J'estime que le travail présenté est de très bon niveau et je me dois d'encourager M. ANDRIAMAROSOA RATSIMBAZAFY à publier ses contributions dans des journaux à impact pour laisser une trace pérenne de ces travaux. J'estime que ce travail de thèse mérite un avis très favorable pour passer en soutenance, en vue de l'obtention du grade de Docteur de l'Université d'Antananarivo.

Fait à Clermont-Ferrand, le 12/12/2016

Pr. David Hill

Ancien Vice Pdt. de L'Université Blaise Pascal



**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES**

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES

Mention Sciences Animales

Ecole Doctorale : Agriculture-Elevage-Environnement (A2E)

Présentée par

ANDRIAMAROSOA RATSIMBAZAFY Ny Riana Solomalala

CREATION D'UN OUTIL INFORMATIQUE D'AIDE A LA DECISION POUR L'OPTIMISATION DU SYSTEME DE PRODUCTION ET DE LA RENTABILITE DES INVESTISSEMENTS D'UN SYSTEME D'ELEVAGE DE BOVINS LAITIERS

Soutenue publiquement le 22 décembre 2016
Devant le jury composé de :

Mme. RABEHARISOA Lilia, Professeur Titulaire, Directeur de l'Ecole Doctorale A2E, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques - Université Antananarivo	Président
M. RAKOTOZANDRINY Jean de Neupomuscène, Professeur Titulaire, Mention Sciences Animales, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques - Université d'Antananarivo	Directeur de thèse
M. HILL David, Professeur Titulaire, Institut Supérieure d'Informatique, de Modélisation et de leurs Application (ISIMA) - Université Blaise Pascal/CNRS - Clermont-Ferrand	Rapporteur externe
M. RANDRIANARIVELOSEHENO Arsène, Docteur HDR, Chef de Mention Sciences Animales, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques - Université Antananarivo	Rapporteur interne
M. RAKOTOZANDRINDRAINY Raphael, Professeur Titulaire, Mention Sciences Animales, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques - Université d'Antananarivo	Examineur
M. RANDRIAMBOLOLONDRA TOMALALA Princy, Docteur HDR, Département des Mathématiques et Informatiques, Faculté des Sciences - Université Antananarivo	Examineur

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier le Grand Barbu au ciel qui m'a donné la force de continuer dans la voie de la recherche et d'aboutir à la présente thèse, car il n'a ni mépris ni dédain pour les peines du misérable ...mais il l'écoute quand il crie à lui. Heureux l'homme qui est persécuté au nom de la justice et à cause de son Nom. ...Et sa justice subsiste à jamais.

Toutes les personnes m'ayant permis de mener à bien ce travail sont assurées de ma profonde gratitude, en particulier :

Professeur RAKOTOZANDRINY Jean de Neupomuscène, mon Directeur de thèse, qui m'a consacré une grande partie de son temps tout au long de ces années malgré ses multiples occupations, pour son suivi et ses conseils. Il a eu foi en moi pour la réalisation de cette thèse et m'a permis de la terminer dans les meilleures conditions possibles en ouvrant la porte de certaines personnes très honorables dont les compétences ont été nécessaires pour combler les lacunes constatées au niveau de l'Université locale concernant le thème traité, notamment sur la modélisation et la simulation informatique des sciences de la vie. Parmi ces personnes, on peut citer le Docteur Claude MAZEL de l'ISIMA - Université Blaise-pascal (Clermont-Ferrand), qui, en plus de m'avoir consacré une grande partie de son temps pour les relectures et commentaires portant sur ce travail, m'a permis également de progresser par les nombreuses discussions et conseils d'experts. Le Professeur David HILL de l'ISIMA - Université Blaise-Pascal/CNRS (Clermont-Ferrand), qui, en plus d'avoir aimablement accepté de juger ce travail en tant que rapporteur externe, a donné son autorisation pour que le travail soit évalué au sein de son département avec Claude.

Ma gratitude aux membres du Jury, pour l'intérêt et le temps qu'ils ont bien voulu consacrer à ma thèse. Leurs critiques constructives et leurs commentaires pour améliorer le travail sont des gages de qualités pour garantir la scientificité de ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance et remercie particulièrement les Docteurs Philippe LECOMPTE, Krishna NAUDIN et Emmanuel TILLARD du pôle Elevage du CIRAD (Montpellier – Madagascar – île de La Réunion), sans qui, cette thèse n'aurait pas pu aboutir à son terme s'ils ne m'ont pas prodigué leurs conseils laborieux sur l'analyse du système d'élevage et sur la nutrition animale, et s'ils n'ont pas financé mon séjour et mes frais d'analyse au sein du laboratoire du pôle KAPPA, tout au long de mon séjour à l'île de La Réunion.

Mes remerciements à toute l'équipe du pôle Elevage du CIRAD à la Réunion, notamment Gisèle Morel et le Docteur Jery RANDRIANASOLO, qui ont été d'une aide inestimable dans la facilitation de mon séjour à l'île de La Réunion.

Je remercie également l'ensemble du personnel du projet BRL – Alaotra que j'ai pu côtoyer lors de mon séjour sur terrain à Ambatondrazaka. J'ai pu apprécier leur sens aigu du travail d'équipe.

Last but not least, j'ai une pensée toute particulière pour mon Père, à qui je dédie cette thèse. Son soutien constant, ses encouragements et sa confiance, ont été une source de motivation incommensurable pour moi depuis des années. Mes remerciements et mon affection à ma Mère, à ma sœur, pour leurs encouragements.

Liste des abréviations

ADF	Acid Detergent Fiber
ADL	Acid Detergent Lignin
API	Application Programming Interface
BRE	Balles Rondes Enrubannées
BRL	Bas – Rhône Languedoc
Ca	Calcium
CB	Cellulose brute de WEENDE
DEF _{Lait}	Densité Energétique du Fourrage Lait
DEF _{Viande}	Densité Energétique du Fourrage Viande
dMO	Digestibilité de la matière organique
EB	Energie Brute
EM	Energie Métabolisable
FIFAMANOR	« Fikambanana Fifanampiana MALagasy NORveziana » ou « Centre de développement rural et de recherche appliquée »
FOFIFA	« Foibe-pirenena momba ny Fikarohana ampiarina amin'ny Fampandrosoana ny Ambanivohitra » ou « Centre national de la recherche appliquée au développement rural »
GMQ	Gains Moyen Quotidien
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
MAD	Matières Azotées Digestibles
MAT	Matières Azotées Totales
MO	Matières Organiques
MS	Matière sèche
MVC	Modèle Vue Contrôleur
NDF	Neutral Detergent Fiber
NEC	Note d'Etat Corporel
NIRS	Near Infrared Reflectance Spectroscopy
NRC	National Research Council

P	Phosphore
PDI	Protéine Digestible dans l'Intestin
PDIE	Protéine Digestible dans l'Intestin permises par l'énergie
PDIN	Protéine Digestible dans l'Intestin permises par l'Azote
SAU	Surface Agricole Utile
SCV	Semis direct sur Couvertures Végétales
SIG	Système d'Information Géographique
SPIR	Spectrométrie dans le Proche Infrarouge
TRI	Taux de Rentabilité Interne
UEB	Unité d'Encombres Viande
UEL	Unité d'Encombres Lait
UF	Unité Fourragère
UFL	Unité Fourragère Lait
UFV	Unité Fourragère Viande
UGB	Unité Gros Bovin
VAN	Valeur Actuelle Nette

Résumé

Création d'un outil informatique d'aide à la décision pour l'optimisation du système de production et de la rentabilité des investissements d'un système d'élevage de bovins laitiers.

Les nombreuses crises politiques apparues ces quarante dernières années à Madagascar ont engendré de graves crises économiques et sociales. La filière lait fait partie des secteurs d'activité les plus touchés après la crise apparue en 2009. Pourtant les besoins locaux en lait et en différents produits laitiers sont loin d'être satisfaits. Les investissements publics et privés dans le domaine de l'agronomie sont peu nombreux étant donné que c'est un secteur hautement risqué (aléas climatiques, crises politiques et économiques, etc.). La relance de la filière lait devient plus que jamais nécessaire pour augmenter le revenu des éleveurs. L'objectif de cette recherche est de mettre à la disposition des différents acteurs de développement (ingénieurs, éleveurs, chercheurs, etc.) un outil informatique d'aide à la décision destiné à appuyer les différents agents de terrains (ingénieurs, zootechniciens, etc.) dans leur prise de décisions sur le choix du système de production et des investissements à entreprendre. Ceci, dans le but d'apporter des éléments de réflexion sur l'orientation (technique, socio-économique, politique et organisationnelle) à prendre dans le processus d'investissement dans cette filière à Madagascar. Dans ce contexte, un nouveau modèle biotechnique, bioéconomique et informatique d'aide à la décision nommé « D-Algo » a été créé. La recherche a été menée entre l'année 2009 et 2013 dans les Régions d'Alaotra-Mangoro (Communes Rurales d'Amparihitsokatra et d'Imerimandroso) et de Menabe (Commune Rurale de Bemanonga). Pour concevoir le modèle, deux approches différentes ont été combinées : la « modélisation analytique » et la « modélisation orientée objet ». Le modèle informatique simule les performances technico-économiques de stratégie de production et d'investissement dans le cadre d'une évaluation *ex-ante* d'un système d'élevage de bovins laitiers. On peut aussi l'utiliser directement en tant qu'outil de conseil en ferme dans le cadre d'une extension des activités ou d'un renouvellement des infrastructures et des outils de production pour les exploitations en régime de croisière. Le domaine d'utilisation est centré sur l'élevage de bovin laitier. L'horizon de planification est de dix ans. Le modèle génère d'abord une succession d'assolement permettant de produire les matières premières (fourrages, etc.) nécessaires à l'élevage du troupeau. L'assolement optimisé suit une évolution multi-périodique et récursive. Ensuite, il simule la recette nette de l'atelier bovin et la rentabilité des investissements. Il fournit également une analyse de sensibilité permettant d'analyser la stabilité des solutions obtenues après simulation. Quelques applications du modèle ont été effectuées, en comparant différents niveaux d'intensification du système fourrager et différents moyens de production pour entreprendre le projet. Les premières simulations montrent une forte interaction entre assolements, stratégies de rotation culturale, besoins du troupeau et dépenses d'investissement. En résumé, les résultats obtenus avec « D-Algo » montrent une bonne cohérence et une bonne interaction entre la représentation de la structure virtuelle de l'exploitation et les données utilisées d'entrée.

Discipline : système d'élevage, modélisation informatique.

Mots - clés : système d'élevage, système biotechnique, modélisation informatique, vache laitière, simulation.

Abstract

Creation of a decision making tool based on computer simulation for the optimization of the production system and of the investment profitability of a bovine dairy system.

The numerous political crises which appeared over the last forty years in Madagascar have produced very serious economical and social crises. The milk industry has been one of the most affected by the economical and political crises of 2009. Though, the local milk demand in the market is far from being satisfied. Public and private investments in the agronomy field are not sufficient, because this sector is highly risky (climatic hazards, political crises, etc.). Giving a boost to the milk industry is a necessity in order to increase farmer's gross-margins. The goal of this research is to provide different development actors (engineers, researchers, and so on) with a decision making tool based on computer simulation. This tool will help them to optimize the production system of a dairy. The aim is to give insight into the technical, socio-economical, political and organizational trends of the investment process in this sector in Madagascar. In this context, a new biotechnical and bio economical simulation model for decision making, named "D-Algo", was created. The research was carried out on two Regions of the island from 2009 and 2013: Alaotra-Mangoro and Menabe. To design the model, we combined two different approaches: "analytical modelling" and "object oriented modelling". The computer model simulates the technical and economical performances of some production and investment strategies within the framework of an *ex-ante* evaluation of a bovine dairy system. We can also use D-Algo as a farm advising-tool within the framework of an extension of the activities or of an infrastructure renewal for farms which have reached cruising speed. The field area for the use of the model is centered on the dairy cows breeding. The planning horizon is ten years. The model first generates a set of crops distribution which produces virtually the forage needed to feed the herd. The optimized crops distribution follows a recursive and multi-periodic evolution. Then, the model simulates the net income and the cost-effectiveness of the investments. It also provides a sensitivity analysis allowing the stability analysis of the solution proposed after simulation. Some applications of the model have been carried out by comparing different level of intensification of the forage system and different production tools. First results show us that there is a high interaction between crop rotations, cultural rotation strategies, herd needs and investment spending. To sum up, the results indicate that there is a good consistency and a good interaction between the virtual structure of the farm and the data used in input.

Discipline: livestock system, computer modelling.

Keywords: livestock system, biotechnical system, computer modelling, dairy cows, simulation.

Tables de matières

Introduction générale	2
Le contexte de l'élevage laitier à Madagascar	2
Problématique et hypothèses de travail	3
Principe générale du modèle informatique	5
Structure du document	5
CHAPITRE I: ETAT DE L'ART : DEMARCHE DE MODELISATION, METHODES ET OUTILS	6
<i>Synopsis</i>	7
Concilier les approches mathématiques de la décision et l'approche systémique pour créer un modèle informatique du système d'élevage de bovins laitiers, fondé sur les théories de l'« utilité espérée » et de la « rationalité limitée »	7
I – Introduction.....	9
II – Définitions et concepts généraux.....	9
II – 1 Définitions	9
II – 2 Concepts généraux : le système d'élevage	10
III – Démarche de modélisation	12
III - 1 La phase d'analyse	12
III – 1 – A La démarche de « Conception Orientée Objet »	13
III – 1 – B La démarche de formulation des problèmes d'optimisation en programmation linéaire ...	14
III - 2 La phase de modélisation	15
III – 3 La phase d'implémentation informatique	16
III – 4 La phase de simulation et de validation du modèle.....	16
IV – Méthodes et outils	18
IV – 1 La méthode de « Modélisation Orientée Objet »	18
IV – 2 Outils : Optimisation du système de production	19
IV – 2 – A Programmation linéaire	20
IV – 2 – B Programmation linéaire multi-périodique et récursive	21
IV – 2 – C Calculs intermédiaires	23
IV – 2 – D La rentabilité des investissements	23
IV – 2 – E Les contraintes d'optimisation	24
IV – 2 – F Le chargement	25
V – Conclusion.....	25

BIBLIOGRAPHIE	26
CHAPITRE II: L'ANALYSE ET LA MODÉLISATION DU SYSTÈME D'ALIMENTATION.....	28
Synopsis	29
Analyser et modéliser le système d'alimentation dans le contexte de l'élevage bovin malgache.....	31
I – Introduction.....	32
II – Méthodes	32
II – 1 Choix et justification des terroirs d'intervention	32
II – 2 Démarche méthodologique	32
II – 3 Méthodes d'analyse et de modélisation	33
II – 3 – A Choix des parcelles	33
II – 3 – B Les méthodes d'analyse et de modélisation	34
II – 3 – C Définition des contraintes	35
II – 3 – D La modélisation des ensilages	35
II – 3 – E La modélisation du silo à ensilage	36
III – Résultats	36
III – 1 Détermination de l'ensemble des activités.....	36
III – 2 Identification des objets et de leurs attributs.....	36
III – 2 – A L'espèce fourragère.....	36
III – 2 – B La durée de vie des fourrages.....	37
III – 2 – C Les modes et les périodes d'exploitation	37
III – 2 – D Les rendements en biomasse fourragère et les valeurs nutritives	37
III – 2 – E Le coût de production.....	38
III – 2 – F Le milieu physique	38
III – 3 Représentation UML simplifiée.....	38
III – 3 – A Hypothèses de travail.....	41
III – 3 – B Représentation UML simplifiée des ressources disponibles	42
III – 4 Définition des contraintes.....	42
III – 4 – A La saisonnalité des activités végétales	42
III – 4 – B Contraintes d'occupation du sol.....	44
III – 4 – C. Contraintes sur les autres facteurs de production	46
III – 4 – C – 1 La contrainte de main d'œuvre.....	47
III – 4 – C – 2 La contrainte en équipement agricole	48
III – 4 – C – 3 La contrainte en intrant agricole.....	49

III – 4 – C – 4 Les contraintes de besoin en eau de la plante.....	52
III - 5 La modélisation des ensilages.....	54
III – 5 – A Ensilage d’herbe	54
III – 5 – B Ensilage de maïs.....	54
III – 5 – C Ensilage d’herbe en balle ronde enrubannée.....	54
III – 6 Le silo à ensilage.....	54
IV - Conclusion.....	56
Bibliographie	57
Comparaisons de la productivité, de la valeur bromatologique et de la valeur nutritive entre des fourrages issus de système de cultures en Semis direct sur Couvertures Végétales (S.C.V) des hauts plateaux malgaches et ceux issus de pâturage naturel de l’Ouest de Madagascar	59
I – Introduction.....	60
II – Méthodes	61
II – 1 Choix et justification des terroirs d’intervention	61
II – 1 – A Les Communes Rurales d’Imerimandroso et d’Amparihitsokatra.....	61
II – 1 – B La Commune Rurale de Bemanonga	61
II – 2 Matériels et méthodes.....	62
II – 2 – A Le matériel végétal et les prélèvements	62
II – 2 – B Le traitement des résultats.....	65
II – 2 – C Appréciation de l’intérêt porté par les éleveurs bovins en milieu extensif aux innovations techniques.....	65
III – Résultats.....	66
III – 1 Le rendement en biomasse fourrager.....	66
III – 1 – A Communes Rurales d’Imerimandroso et d’Amparihitsokatra.....	66
III – 1 – B Commune Rurale de Bemanonga	70
III – 2 La valeur bromatologique des fourrages	71
III – 2 – A Communes Rurales d’Imerimandroso et d’Amparihitsokatra.....	71
III – 2 – B Commune Rurale de Bemanonga	76
III – 3 La valeur nutritive des fourrages	80
III – 3 – A Communes Rurales d’Imerimandroso et d’Amparihitsokatra.....	80
III – 3 – B Commune Rurale de Bemanonga	82
III – 4 L’intérêt porté par les éleveurs bovins en milieu extensif aux innovations techniques dans le domaine de l’élevage	83
IV – Discussions	84
IV – 1 Pour les fourrages cultivés.....	84

IV – 2 Pour les fourrages issus de pâturages naturels	86
V - Conclusions	88
Bibliographie	89
CHAPITRE III: L'ANALYSE ET LA MODÉLISATION DE LA GESTION DU TROUPEAU.....	91
Synopsis	92
Analyser et modéliser la gestion du troupeau laitier dans le contexte de l'élevage bovin malgache	94
I – Introduction.....	95
II – Méthodes	95
II – 1 Choix et justification des terroirs d'intervention	95
II – 2 Démarche méthodologique	96
II – 3 Méthodes d'analyse et de modélisation de la gestion du troupeau.....	96
II – 3 – A Les méthodes d'analyses et de modélisation de la gestion du troupeau	96
II – 3 – B Modélisation de la production potentielle de lait, des besoins nutritifs et de la capacité d'ingestion.....	96
II – 3 – C La modélisation de la dynamique de la population.....	98
II – 3 – D La modélisation des bâtiments d'élevage	99
II – 3 – E La modélisation de l'évolution de la Note d'Etat Corporel.....	99
III – Eléments de modélisation	100
III – 1 Les activités animales.....	100
III – 2 Identification des objets et de leurs attributs	101
III – 3 Représentation UML simplifiée.....	101
III – 4 Hypothèses de travail sur la modélisation du troupeau	103
III – 5 Les modèles utilisés pour simuler la production potentielle de lait, les besoins et la capacité d'ingestion du troupeau.....	104
III – 5 – A. Chez les vaches laitières	104
III – 5 – A – 1 La production potentielle de lait.....	104
III – 5 – A – 2 Les besoins énergétiques des vaches à haut potentiel.....	104
III – 5 – A – 3 Les besoins énergétiques des vaches à faible potentiel	105
III – 5 – A – 4 Les besoins azotés des vaches à haut potentiel	105
III – 5 – A – 5 Les besoins azotés des vaches à faible potentiel	106
III – 5 – A – 6 Les besoins en Calcium et Phosphore absorbables des vaches à haut potentiel	106
III – 5 – A – 7 Les besoins en Calcium et Phosphore des vaches à faible potentiel	107
III – 5 – A – 8 La capacité d'ingestion des vaches	107
III – 5 – A – 9 L'évolution de la Note d'Etat Corporel (NEC)	108

III – 5 – B Chez les bovins en croissance et à l’engrais	108
III – 5 – B – 1 Les besoins énergétiques des animaux en croissance issus d’une vache à haut potentiel	108
III – 5 – B – 2 Les besoins énergétiques des animaux en croissance issus d’une vache à faible potentiel	109
III – 5 – B – 3 Les besoins azotés des animaux en croissance issus d’une vache à haut potentiel	109
III – 5 – B – 4 Les besoins azotés des animaux en croissance issus d’une vache à faible potentiel	109
III – 5 – B – 5 Les besoins en calcium et phosphore absorbables des animaux en croissance issus d’une vache à haut potentiel.....	109
III – 5 – B – 6 Les besoins en calcium et phosphore des animaux en croissance issus d’une vache à faible potentiel	110
III – 5 – B – 7 La capacité d’ingestion des animaux en croissance.....	110
III – 6 Définition des contraintes d’alimentation	110
III – 7 La dynamique de la population.....	113
III – 7 – A Le partage du troupeau en lots	113
III – 7 – B Stratégie et processus de décision sur les achats et les ventes	115
III – 8 Les bâtiments d’élevage.....	117
III – 5 Conclusion	122
Bibliographie	122
CHAPITRE IV: LA MODELISATION DU SYSTEME DE PILOTAGE, IMPLEMENTATION INFORMATIQUE : LE MODELE D-ALGO	125
<i>Synopsis</i>	124
L’art de modéliser le système de pilotage et d’implémenter informatiquement un modèle biotechnique de système d’élevage de bovin laitier : D-Algo.....	127
I – Introduction.....	128
II – Méthodes	128
II – 1 Analyse et modélisation du système de pilotage (le pôle humain)	128
II – 2 Implémentation informatique : le modèle D-Algo	129
III – Résultats.....	129
III – 1 La modélisation du système de pilotage.....	129
III – 2 Implémentation informatique : le modèle « D-Algo »	133
III – 2 – A La simulation avec « D-Algo ».....	133
III – 2 – B Architecture interne de « D-Algo ».....	138
III – 2 – C Analyse de sensibilité	140
IV - Conclusions	141

Bibliographie	142
CHAPITRE V: VALIDATION CONCEPTUELLE DU MODELE D-ALGO, DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES D'AMELIORATION	143
I - Validation conceptuelle du modèle « D-ALGO »	144
I - 1 Introduction	144
I - 2 Expérimentation	144
I – 2 – A Le troupeau	145
I – 2 – B Alimentation	145
I – 2 – C Le parcellaire	147
I – 2 – D Le bâtiment d'élevage	147
I – 2 – E Les autres immobilisations	147
I – 2 – F Subvention et financement des immobilisations	147
I – 2 – G Les autres charges d'exploitation.....	147
I – 2 – H Analyse financière	148
I - 3 Résultats des simulations.....	148
I – 3 – A Optimisation de l'assolement.....	148
I – 3 – B Analyse de sensibilité	149
I – 3 – C La rentabilité des investissements.....	150
I – 3 – D Apport du modèle « D- Algo » dans le choix des investissements.....	151
II - Discussion générale.....	153
II – 1 Les approches théoriques du modèle D- Algo	153
II – 2 Apport du modèle au processus décisionnel	155
III - Limites et perspectives du modèle au niveau conceptuel	155
III - 1 La surestimation des solutions.....	155
III – 2 Prendre en compte les risques aléatoires.....	155
III – 3 Rendre plus réaliste le modèle de production laitière.....	157
III – 4 Pouvoir changer les itinéraires techniques en cours de simulation.....	157
III – 5 Choisir un pas de temps mensuel	158
III – 6 Prendre en compte les variabilités climatiques intra-annuelles	158
III – 7 Ajouter un module de gestion des effluents.....	158
III – 8 Faire une analyse de l'émission des composés à risque pour l'environnement.....	159
Bibliographie	159
Conclusion générale	162
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	164

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Valeurs de l' « Abondance-dominance » selon la méthode de BRAUN-BLANQUET.	65
Tableau 2 : Statistiques descriptives des rendements (T MS/ha) en biomasse fourragère.	68
Tableau 3 : Statistiques descriptives des rendements (T MS/ha) par ordre de coupe en fourrages pérennes. ...	69
Tableau 4: Productivité moyenne (en tonnes de MS par hectare) et taux de couverture (en pourcentage) de chaque espèce fourragère.	71
Tableau 5 : Matrice de corrélation entre les composants chimiques et énergétiques des fourrages.	72
Tableau 6 : Valeurs bromatologiques des fourrages pérennes.	73
Tableau 7 : Valeurs bromatologiques des fourrages annuels.	73
Tableau 8 : Matrice de corrélation entre les composants chimiques et énergétiques des fourrages.	77
Tableau 9 : Valeurs bromatologiques des fourrages pérennes.	78
Tableau 10 : Valeurs énergétiques et azotées des fourrages pérennes.	81
Tableau 11 : Valeurs énergétiques et azotées des fourrages annuels.	81
Tableau 12 : Valeurs énergétiques et azotées des graminées pérennes.	82
Tableau 13: Caractéristiques des bâtiments d'élevage pour les vaches.	119
Tableau 14: Caractéristiques des bâtiments d'élevage pour les animaux en croissance.	119
Tableau 15: Plan d'assolement simulé avec « D-Algo » pour une exploitation pour 40 vaches (SAU = 20 ha). .	148
Tableau 16: Exemple d'analyse de sensibilité (limites de la fonction objective) obtenue en première année de simulation avec « D-Algo », pour une exploitation pour 40 vaches (SAU = 20 ha).	149
Tableau 17: Rentabilité des investissements réalisés en première année de simulation.	150
Tableau 18 : Rentabilité des investissements par niveau d'intensification du système fourrager. Résultats obtenus avec « D-Algo ».	151
Tableau 19 : Contribution de chaque immobilisation dans l'investissement total (en Ariary) pour le scénario de simulation.	152

Liste des graphiques

Graphique 1 : Répartition des troupeaux bovins par catégorie (Commune Imerimandroso et Amparihitsokatra)	49
Graphique 2 : Boîtes à moustache de la moyenne du rendement annuel par culture (T MS/ha).....	67
Graphique 3 : Boîtes à moustache de la moyenne du rendement par ordre de coupe des cultures pérennes (T MS/ha).	67
Graphique 4 : Diagramme des composantes dans l'espace (axes F1-F2 : 90,87%).....	72
Graphique 5 : Projection des individus sur le plan P (axes F1-F2).....	72
Graphique 6 : Diagramme des composantes dans l'espace (axes F1-F2-F3 : 95,06%).....	77
Graphique 7 : Projection des individus sur le plan P (axes F1-F2).....	77
Graphique 8 : Valeurs UFL et UFV (/Kg MS) des fourrages	80
Graphique 9 : Valeurs PDIN, PDIE et MAD (g/Kg MS) des fourrages.....	80
Graphique 10 : Valeurs UFL et UFV (/Kg MS) des fourrages pérennes.	82
Graphique 11 : Valeurs PDIN, PDIE et MAD (g/Kg MS) des fourrages pérennes.....	82
Graphique 12 : Diagramme ombrique et courbe thermique du station d'Ambohitsilaozana (Alaotra-Mangoro).	84

Liste des figures

Figure 1: Schéma fonctionnel du système d'élevage (LHOSTE, 2001).	11
Figure 2 : La démarche de modélisation.	13
Figure 3: Démarche de Conception Orientée Objet (BOOCH, 1992).	14
Figure 4 : Démarche de formulation de la programmation linéaire (ARNALDI-MARTIN et LHERME, 2002).	15
Figure 5 : exemple de classe (Fourrage, Coût de production et Intrants agricoles) représenté avec UML.	18
Figure 6 : Analyse et modélisation du système d'alimentation.	34
Figure 7 : Diagramme de classes du système d'alimentation.	39
Figure 8 : Diagramme UML du système d'alimentation (fourrages pérennes non – stockés).	40
Figure 9 : Classe UML du système d'alimentation (concentrés).	41
Figure 10 : Représentation UML simplifiée des classes des ressources disponibles.	43
Figure 11 : Structure de décision sur la jachère.	45
Figure 12 : Densité de semis (espacement entre ligne et entre poquet).	63
Figure 13: Traitement des biomasses prélevées.	64
Figure 14 : La démarche d'analyse du troupeau.	97
Figure 15 : Diagramme de classes du modèle de troupeau.	102
Figure 16 : Le partage du troupeau en lots et la dynamique de la population, cas des vaches à haut potentiel (année 1 à 5 de simulation).	114
Figure 17 : Processus de décision sur les achats et les ventes de génisses gestantes.	116
Figure 18: Exemple de plan type d'une étable longitudinale à logettes (stabulation libre) – cas d'une étable pour 30 vaches.	120
Figure 19 : Classe UML et exemple d'affichage de la couche « présentation » de la classe « rotation culturale ».	130
Figure 20 : Classes supplémentaires du système de pilotage.	131
Figure 21 : Diagramme UML du pôle « système de pilotage ».	132
Figure 22 : La démarche de saisie des données d'entrée – pôle « Système fourrager ».	134
Figure 23 : La démarche de saisie des données d'entrée – pôle « Troupeaux ».	135
Figure 24 : La démarche de saisie des données d'entrée – « Immobilisations ».	135
Figure 25 : Démarche de simulation avec D-Algo.	136
Figure 26 : La démarche de simulation.	137
Figure 27 : Architecture interne du modèle « D-Algo ».	139

Annexes

Annexe 1 : Localisation géographique des terroirs d'intervention.	ii
Annexe 2 : Poids sec des balles rondes enrubannées en fonction de la teneur en matière sèche des fourrages.	iv
Annexe 3 : Diagramme UML du système d'alimentation (fourrages annuels non – stockés, ensilages de maïs, ensilages d'herbe, ensilages en balle ronde, foins en botte).....	iv
Annexe 4 : Tableau ANOVA de l'analyse de régression multiple de l'ensilage d'herbe.....	ix
Annexe 5 : Tableau ANOVA de l'analyse de régression multiple de l'ensilage de maïs.....	ix
Annexe 6 : Balles rondes enrubannées - récapitulatif du modèle et estimations des paramètres.	ix
Annexe 7 : Temps de travaux préconisés par opération culturale (homme-jour/ha).	ix
Annexe 8 : Temps de travaux réalisés par opérations culturales dans les Communes d'Imerimandroso et Amparihitsokatra (Homme-jour/ha).....	x
Annexe 9 : Test sur échantillon unique sur la disponibilité en mains d'œuvre pour les labours, préparations du sol autres que le labour, l'épandage de fumiers (en homme-jour/hectare).....	xi
Annexe 10 : Intrants préconisés par opérations culturales.	xiv
Annexe 11 : Niveaux d'intrants réalisés par opération culturale (Kg/ha).	xv
Annexe 12 : Test sur échantillons unique sur la disponibilité en intrant agricole.	xvi
Annexe 13 : Résultats complets de l'analyse factorielle en composantes principales de la composition chimique et énergétique de fourrages provenant des parcelles fourragères des Communes rurales d'Imerimandroso et d'Amparihitsokatra.	xix
Annexe 14 : Matrice de corrélation entre les composants chimiques et énergétiques de <i>Stylosanthes guianensis</i> – plante entière.....	xxi
Annexe 15 : Matrice de corrélation entre les composants chimiques et énergétiques de <i>Brachiaria brizantha</i> – plante entière.....	xxi
Annexe 16 : Résultats complets de l'analyse factorielle en composantes principales de la composition chimique et énergétique de fourrages provenant des pâturages naturels de la Commune rurale de Bemanonga - Morondava.....	xxii
Annexe 17 : Besoins énergétiques, azotés et en minéraux des zébus malgaches et des races améliorées rencontrées à Madagascar (CARRE, 1975).....	xxiv
Annexe 18 : Recensement de l'effectif bovin appartenant à 13 éleveurs enquêtés dans les Communes Imerimandroso et Amparihitsokatra en 2009.....	xxvii
Annexe 19 : Quantité de fumier et de fèces excrétée par une vache Holstein.	xxvii
Annexe 20 : Les composantes du logiciel « D-Algo »	xxvii
Annexe 21 : Données d'entrées utilisées pour la simulation avec D-Algo (SAU=20 ha ; 40 vaches laitières)....	xxxii

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le contexte de l'élevage laitier à Madagascar

L'ensemble des « activités agricoles » dans le domaine du monde rural tourne autour de l'intégration « agriculture-élevage ». Les productions animales ont toujours tenu une place prépondérante dans le milieu rural malgache. En effet, les activités liées à l'élevage, que ce soit de basse-cour ou de gros bétail, sont étroitement associées à l'agriculture pour au moins 72 % des ménages ruraux malgaches, dont 25% les pratiquent en tant que source de revenu (RALISON, 2003)¹. L'élevage de ruminants est pratiqué par 29% des exploitations agricoles à Madagascar, avec un sexe – ratio de 51,34% de femelles (MAEP, 2006)². Les vaches laitières de races améliorées représentent 36,34% des femelles laitières existantes (MAEP, 2006). Le reste est constitué de zébus de races locales.

L'élevage de bovins en extensif constitue un système traditionnel d'épargne pour les agro-éleveurs qui n'ont pas accès ou ne font pas confiance aux services des organismes bancaires. Il s'agit surtout d'élevage de bovins de races locales. On utilise ces animaux comme bœufs de traction dans les différents travaux de champs. Ce type d'élevage est miné par de nombreux problèmes tels que le surpâturage, la disponibilité en eau pendant les mois les plus chauds et secs de l'année, les mortalités dues aux maladies qui touchent au moins 10% du troupeau, la pauvreté des pâturages offerts aux animaux, etc.. La production laitière est réservée principalement à la consommation du veau.

Bien que l'élevage de bovins à vocation laitière soit très ancien à Madagascar, étant donné que l'introduction des premières races européennes se situe vers 1895 par Jean LABORDE (RABEMANAMBOLA, 2007³), seules quelques Régions de l'île le pratiquent, dont les plus importantes sont la Région Analamanga qui regroupe 32,72% du cheptel, Vakinankaratra avec 35,6%, l'Itasy avec 4,92%, la Haute-Matsiatra avec 8,32% et Amoron'i Mania, avec 6,64% (MAEP, 2006). Dans les autres Régions, cette proportion ne dépasse pas 3% et elle est même nulle dans certaines Régions comme l'Atsinanana, l'Atsimo-Atsinanana, le Boeny, la Sofia, le Betsiboka, le Melaky, le Vatovavy-Fitovinany ou encore le Menabe (MAEP, 2006). La production laitière est réservée à la vente et à la transformation. Actuellement, l'élevage de bovins laitiers en semi – intensif ou en intensif est concentré sur les hauts – plateaux, surtout dans la Région de Vakinankaratra. Cette Région produit environ 80% de la production nationale de lait (RABEMANAMBOLA, 2007). Le climat et le type de sol y sont favorables pour les cultures fourragères et l'élevage de bovins de races pures importées. Mais on y trouve aussi en abondance des races métissées à différents degrés de sangs, issues de croisement divers entre zébus de races locales et de races importées. Cette concentration s'explique également par la forte présence de nombreux acteurs de

¹ RALISON, 2003. Elevage et pauvreté - Conférence « Agriculture et pauvreté ». FOFIFA-CORNELL-PROGRAMME ILO. 6 pages.

² MAEP, 2006. Recensement de l'agriculture. Campagne agricole 2004-2005. Direction des Systèmes d'Information - Service des Statistiques Agricoles. 50 pages.

³ RABEMANAMBOLA M.F., 2007. Contribution à l'étude d'une filière alimentaire et de son inscription spatiale dans un pays en voie de développement. Thèse en vue de l'obtention du grade de Docteur en géographie. Université de Clermont Ferrand II. Clermont Ferrand. 332 pages + annexes.

développement intervenant dans la filière laitière comme le FOFIFA⁴, le FIFAMANOR⁵, IMVAVET⁶, AGRICO⁷, ROVA⁸, SABMA⁹, etc. et les deux principales industries laitières de l'île : TIKO Group et SOCOLAIT. Entre 2004 et 2007, la Région de Vakinankaratra produisait environ 28 à 36,5 millions de litres (RABEMANAMBOLA, 2007). La production par vache est très faible avec 2,485 l/vache/an. Mais cette production est loin de satisfaire les besoins locaux en lait et en différents produits laitiers.

Après les crises politiques de 2002 et l'élection de RAVALOMANANA Marc à la tête de l'Etat Malgache, l'entreprise TIKO Group, qui lui appartient, s'est imposée en position de quasi – monopole sur la collecte, la transformation et la commercialisation du lait et des produits laitiers. Seule une entreprise locale constituée de petites unités artisanales et l'entreprise SOCOLAIT ont pu faire face à la concurrence. Cette situation a brutalement changé en 2009 avec l'apparition d'une nouvelle crise politique qui a entraîné la chute du régime en place. Le pays est à nouveau confronté à une grave crise socio - économique sans précédent. La société TIKO Group, la plus grande industrie laitière de l'île était obligée de tourner au ralenti et était même obligée de supprimer certaines branches de son activité. Ce qui s'est fait ressentir lourdement au niveau de la filière. Certains paysans producteurs, qui livraient naguère leur lait à la société TIKO Group, étaient obligés de chercher de nouveaux débouchés ou vendaient eux – mêmes leurs produits au niveau des marchés locaux. De petites unités de transformations industrielles et/ou artisanales ont fait peu à peu leur apparition, sans pour le moment, avoir de réels impacts au niveau de l'économie du pays. La relance de la filière lait devient plus que jamais une nécessité dans le but d'augmenter le revenu des éleveurs. Pour cela, une restructuration du mode d'élevage et une réorganisation de la filière ruminant doivent être entreprises. Ceux-ci nécessitent l'intensification progressive du système d'élevage de bovins laitiers. Cette intensification implique la recherche d'une organisation et d'un système de production plus rémunérateur.

Problématique et hypothèses de travail

Les expériences du passé ont souvent montré qu'à Madagascar, la mise en œuvre de projets de développement allant dans le sens de la recherche d'une organisation et d'un système de production plus rémunérateur s'est souvent soldée par des échecs. Les nombreuses crises, le plus souvent politique, engendrent cycliquement ces quarante dernières années de graves crises économiques et sociales. Les investissements publics et privés dans le domaine de l'agronomie sont peu nombreux, étant donné que c'est un secteur hautement risqué (aléas climatiques, crises politiques et économiques, maladies des plantes et des animaux etc.), coûte cher et peu rémunérateur. Les décisions concernant l'organisation de l'exploitation et/ou le choix d'un système de production plus rentable sont souvent prises sans tenir compte de la recherche d'une « solution optimale », car les agro-éleveurs se fient plus à leurs intuitions, basées sur des connaissances empiriques. Malgré l'existence d'un nombre important de solveur informatique facilitant la recherche de solutions optimales, les agents de terrain (ingénieurs de développement, techniciens d'élevage, etc.) se contentent de maîtriser les

⁴ FOFIFA : la plus importante institution de recherche agricole à Madagascar.

⁵ FIFAMANOR : organisme de développement rural et de recherche appliquée, créé en 1972 par un accord bilatéral entre l'Etat malgache et l'Agence Norvégienne de Développement International (NORAD). A partir de 1992, le FIFAMANOR est placé sous tutelle de l'Etat malgache, sous l'égide du Ministère de l'Agriculture et prend un statut d'Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial (EPIC).

⁶ Distributeurs d'intrants vétérinaires

⁷ Distributeurs d'intrants vétérinaires

⁸ Producteurs et/ou distributeurs de provendes et d'aliments concentrés

⁹ Producteurs et/ou distributeurs de provendes et d'aliments concentrés

conditions techniques (alimentation, santé, etc.), sans vraiment chercher l'organisation optimale du système de production. En effet, les difficultés liées à la formulation des équations d'optimisation nécessitent l'intervention d'une personne qualifiée en la matière. Les modèles informatiques traitant de l'économie du système d'élevage sont encore peu accessibles aux ingénieurs de développement des régions chaudes, surtout à Madagascar. De plus, l'engouement provoqué ces dernières années par les mouvements écologistes, sur l'intérêt de la protection de l'environnement, a orienté peu à peu les recherches vers le développement de modèles basés sur l'aménagement, la conservation et la gestion collective des ressources naturelles renouvelables, et ceci au détriment des modèles économétriques.

L'objectif de cette recherche est de mettre à la disposition des différents acteurs de développement malgaches (ingénieurs, éleveurs, chercheurs, etc.) un outil d'aide à la décision permettant de faire le choix optimal sur la stratégie de production et sur la rentabilité des investissements dans l'élevage de bovins laitiers. Ceci, dans le but d'apporter des éléments de réflexion sur l'orientation technique, socio-économique, politique et organisationnelle dans le processus d'investissement dans ce secteur à Madagascar.

D'où notre problématique : comment appuyer les prises de décisions concernant le choix du système de production, permettant d'optimiser la rentabilité des investissements en système d'élevage de bovins laitiers?

Pour répondre à cette question, nous avançons les hypothèses de travail suivantes :

Hypothèse 1 : les prises de décisions sur la recherche d'une organisation et d'un système de production plus rémunérateur nécessitent une modélisation informatique du système d'élevage de bovins laitiers.

Pour matérialiser les prises de décision sur le choix d'un système de production, il faut posséder un modèle informatique représentant les processus qui caractérisent ce système. L'optimisation de plusieurs problèmes rencontrés dans le monde réel est trop complexe et nécessite beaucoup trop de temps et/ou d'argent pour pouvoir être expérimentée dans le système physique lui-même (HART et *al.*, 1998)¹⁰. Dans ces conditions, le recours à la simulation informatique est de plus en plus perçu comme une solution alternative pour prendre les bonnes décisions sur le choix du système de production.

Hypothèse 2 : un modèle informatique fondé sur les théories de « l'utilité espérée » et de la « rationalité limitée » permet de simuler la rentabilité optimale du système.

Toute logique économique ayant pour objectif l'optimisation (plus précisément la maximisation) de la rentabilité des investissements recherche toujours à minimiser les coûts de production et à maximiser les volumes de production et les profits pour des investissements fixés. Un outil d'aide à la décision ayant le même objectif devrait donc logiquement aboutir au même résultat. Ce qui oriente notre choix vers un modèle informatique fondé sur les théories de « l'utilité espérée » et de la « rationalité limitée ».

Le modèle informatique devrait être souple, facile à manipuler afin de tester différents scénarios dans la recherche de l'assemblage optimal des facteurs de production en jeu en fonction du degré d'intensification, des objectifs de l'éleveur, des activités et des contraintes existant à l'intérieur du système. La pratique d'élevage, les modes de conduite du troupeau et les stratégies des éleveurs dépendent de la recherche d'une adéquation entre ressources disponibles et besoins du troupeau, en fonction de contraintes multiples (disponibilité en surfaces cultivables, en intrants, en mains d'œuvre, etc.). La simulation informatique et les modèles d'optimisation ont le potentiel d'améliorer les pratiques d'élevage, sans avoir besoin de tester physiquement un nombre élevé de stratégies différentes (HART et *al.*, 1998).

¹⁰ HART R.P.S, LARCOMBE M.T., SHERLOCK R.A., SMITH L.A., 1998. *Optimization techniques for a computer simulation of a pastoral dairy farm*. University of Waikato-New Zealand, Maffra Herd Improvement Co-op-Australia, Dairying Research Corporation Limited-New Zealand. 23 pages.

Principe générale du modèle informatique

« D-Algo » est un modèle biotechnique, bioéconomique et informatique d'aide à la décision. La démarche de simulation avec D-Algo compte deux étapes bien distinctes. D'abord, il y a une étape de saisie et de configuration des données d'entrée et de simulation des besoins du troupeau. Ensuite, il y a une étape d'optimisation des assolements et de calculs de la rentabilité financière.

La première étape est d'abord une étape de saisie et de configuration de toutes les informations se rapportant aux ressources disponibles (parcellaire, etc.), aux ressources utilisées (espèces fourragères, etc.), au troupeau et aux immobilisations effectuées. En ce qui concerne le troupeau, ses besoins et la dynamique de la population sont simulés. La simulation des besoins du troupeau n'est qu'une étape intermédiaire qui va permettre à la deuxième étape de D-Algo de déterminer l'assolement optimal. L'optimisation de l'assolement assure la satisfaction de ces besoins tout en maximisant la rentabilité financière de l'exploitation agricole. Au cours de la première étape, les ressources disponibles et utilisées, les immobilisations et les besoins simulés du troupeau sont stockés dans une base de données pour être ensuite utilisés par un calcul d'optimisation linéaire lors de la deuxième étape.

La deuxième étape optimise les assolements et calcule le chargement à l'hectare, la recette nette d'exploitation et la rentabilité des investissements. L'utilisateur a le choix d'inclure ou non dans les contraintes d'optimisation la contrainte de rotation culturale, de mettre en jachère une partie du parcellaire, les contraintes sur les facteurs de production (la disponibilité en main d'œuvre, en équipements et en intrants agricoles, etc.) et les contraintes climatiques (besoins en eau de la plante). Il en est de même pour les contraintes d'alimentation du troupeau (le besoin énergétique, protéique, en minéraux et la capacité d'ingestion). En premier lieu, D-Algo inventorie les ressources disponibles enregistrées dans la base de données : le parcellaire (surface agricole utile, surface allouée aux cultures pérennes, jachère, etc.), les mains d'œuvre, les équipements agricoles et les engrais utilisés pour la production végétale. En second lieu, D-Algo inventorie les activités végétales planifiées par l'utilisateur en vérifiant si un ou des fourrages pérennes, annuels, stockés sous forme d'ensilage ou de foin, sont enregistrés dans la base de données. Il vérifie s'il y a des ventes de fourrages ou non. Puis il vérifie si les besoins du troupeau ont été simulés. En troisième lieu, il procède à l'écriture de la fonction objectif et des contraintes d'optimisation : l'occupation du sol, les contraintes relatives à la superficie allouée aux fourrages produits et intra-consommés et aux fourrages vendus (s'il y en a), la rotation culturale, les facteurs de production, les contraintes d'alimentation et les contraintes climatiques. En quatrième lieu, D-Algo détermine la combinaison optimale des activités. Autrement dit, c'est l'étape d'optimisation linéaire multi-périodique et récursive à proprement parler. Si une solution optimale est identifiée pour chaque année de simulation, D-Algo calcule le chargement en UGB par hectare. En fin de simulation, il calcule la dimension des silos-couloirs et leurs coûts si l'ensilage d'herbe ou de maïs est pris dans la solution. En dernier lieu, il calcule la recette nette d'exploitation, la valeur actuelle nette et le taux de rentabilité interne et pour finir le volume de productions total.

Structure du document

Le premier chapitre de cette thèse est consacré à la revue de l'état de l'art et à la synthèse bibliographique des connaissances existantes sur la modélisation systémique et informatique à l'échelle de l'exploitation des systèmes d'élevage en général et des systèmes d'élevage de bovins laitiers en particulier. A partir de ces connaissances, le premier chapitre apporte des discussions méthodologiques qui ont abouti à la formulation de la démarche méthodologique. Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation du système d'alimentation du modèle de simulation. Le troisième chapitre fait le point sur la modélisation du troupeau. Le quatrième chapitre est consacré à la modélisation du système de pilotage et aux résultats obtenus sur l'implémentation informatique. Le cinquième et dernier chapitre présente la validation conceptuelle du modèle à partir d'un exemple d'expérimentation informatique et la discussion générale des résultats obtenus ainsi que la limite et les améliorations possibles pour le modèle informatique de simulation.

CHAPITRE I
ETAT DE L'ART : DEMARCHE DE MODELISATION,
METHODES ET OUTILS

Concilier les approches mathématiques de la décision et l'approche systémique pour créer un modèle informatique du système d'élevage de bovins laitiers, fondé sur les théories de l'« utilité espérée » et de la « rationalité limitée »

Selon toute logique, le « système d'élevage » de bovins laitiers devrait être modélisé suivant une approche systémique. Or, la deuxième hypothèse de notre recherche recommande l'utilisation d'un modèle fondé sur les « théories de l'utilité espérée » et sur la « rationalité limitée ». Ceci nous oriente vers l'utilisation des approches mathématiques de la décision comme choix de la méthode à utiliser, donc d'une modélisation de type analytique. En tenant compte de ces observations, comment rallier les concepts de modélisation systémique et modélisation analytique pour satisfaire ou au moins tester notre deuxième hypothèse ? Cet article montre comment intégrer la composante mathématique de la décision dans la modélisation systémique-informatique du système d'élevage, avec une approche purement bibliographique.

Résumé

Dans les exploitations d'élevage laitier, l'objectif du système de pilotage est de faire le choix optimal sur la stratégie de production et sur les investissements à entreprendre pour maximiser le profit. La prise de décision est souvent effectuée par un acteur unique : le chef d'exploitation. Le chef d'exploitation génère un ou des comportements visant à modifier son mode de gestion pour satisfaire au mieux les différentes contraintes imposées par son environnement. Ce type de comportement est propre au système dite « fermé ». Les systèmes fermés se prêtent aux modèles analytiques. Les méthodes de la recherche opérationnelle sont utilisées pour comprendre le fonctionnement des exploitations et pour appuyer les décisions. Autrement dit, les modèles mathématiques-analytiques sont utilisés pour calculer les divers indicateurs (rentabilité des investissements, marge brute, etc.) à partir desquels le chef d'exploitation va prendre sa décision. L'intégration de cette dimension analytique dans la modélisation informatique du système d'élevage se fera à travers le paradigme de la « Conception Orientée Objet ». Ce concept n'offre qu'une représentation modulaire du système étudié. Le paradigme est suffisamment flexible pour intégrer un ou des modèles analytiques via ce que nous appelons les « propriétés de classes ». La démarche de la formulation des problèmes d'optimisation doit être entamée d'une manière séquentielle avec la démarche de Conception Orientée Objet. Les coefficients techniques nécessaires à la fonction objectif et à la définition des contraintes d'optimisation du modèle analytique sont liés aux propriétés de classe constituant le modèle orienté objet du système d'élevage.

Mots-clés : Système d'élevage, modélisation analytique, modélisation systémique, Conception Orientée Objet.

Reconciling mathematic approach of the decision with systemic approach for creating a Systemic-informatics model of a dairy livestock system, based on the theory of « Utility function » and the « limited rationality ».

With a logic approach, the dairy « livestock system » should be modeled with a systemic approach. However, our second hypothesis recommend the use of a model based on the « Utility function » and on the « limited rationality ». Which are suitable with the use of a mathematic approach of the decision, so an analytic model. By taking into account these observations, how to reconcile the concept of systemic modeling with the analytic modeling with the aim to test our second hypothesis? This article shows how to integrate the mathematic component of the decision with an informatics model of the dairy livestock system, with an approach purely bibliographic.

Abstract

In a dairy cow farm, the main goal is always to make an optimal choice with the production strategy and the investments to undertake, for maximizing the profit. This decision is often taken by a unique actor: the farmer. The farmer produces one or many compartments with the intention to modify his management mode, for responding as better as possible to the different constraints imposed by his environment. This type of compartment corresponds to a system called «closed». Closed systems fit to analytic model. Methods from operational research are used to understand the functioning of the farm and to take the right decisions. In other words, mathematic-analytic model is used to compute various indicators (profitability of the investment, gross-margin, etc.) from which the farmer will take his decision. The integration of the analytic dimension in the informatics model of the dairy livestock system will be made with the paradigm of « Object Oriented Conception ». This concept gives a modular representation of the livestock system. This paradigm is flexible enough to integrate one or many analytic model by using what we call the « class attribute ». The process of formulating the optimization problems should be start with a sequential manner with the approach of Object oriented conception. Technical coefficients, which are necessary to the objective function and to the optimization constraints of the analytic model, are linked to the class-properties of the object-oriented model of the dairy livestock-system.

Keywords: Livestock system, analytic model, systemic model, Object Oriented Conception.

I – Introduction

La première hypothèse de recherche est de créer un outil informatique d’aide à la décision permettant de faire le choix optimal sur la stratégie de production et sur les investissements à entreprendre dans l’élevage de bovins laitiers. La deuxième hypothèse de recherche recommande l’utilisation d’un modèle fondé sur les théories de « l’utilité espérée » et de la « rationalité limitée », donc d’une modélisation de type analytique. Or, selon toute logique, le « système d’élevage » devrait être modélisé informatiquement suivant une approche systémique. Le concept lié au système biotechnique de production suppose que les sous-composants qui le constituent interagissent entre eux par des échanges de flux. Chaque sous - composant est considéré comme une unité active (appelée « entité ») et autonome, mais liée à d’autres par des relations particulières et bien définies. Chaque entité possède des « propriétés » et des « méthodes ». Les « méthodes » sont utilisées par un agent économique pour apprécier les informations sur son environnement, sur la structure et le fonctionnement d’un système. Dans un système d’élevage, il peut exister un grand nombre de relations et d’objectifs économiques, techniques ou sociaux, et par conséquent autant d’actions réalisables et de solutions possibles pour résoudre les problèmes. Plusieurs problèmes peuvent être formulés à l’intérieur du système d’élevage, sans toutefois tous les découvrir à cause de la rationalité limitée des acteurs.

En tenant compte de ces observations, comment rallier le concept de modélisation systémique et de modélisation analytique pour tester les hypothèses de recherche ?

II – Définitions et concepts généraux

II – 1 Définitions

Avant d’aborder la démarche de modélisation proprement dite, considérons ces quelques définitions :

- La « décision » : est un acte par lequel quelqu’un décide (LAROUSSE, 2009);
- L’ « aide à la décision » : est « *l’activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions que se pose un acteur dans un processus de décision, éléments concourant à éclairer la décision et normalement à recommander, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l’évolution du processus d’une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels ces acteurs se trouvent placés d’autre part* » (ROY, 2000). Quand nous parlons d’« aide à la décision », le choix final sera laissé au décideur ;
- La « théorie de l’utilité espérée » : admettent « *la subjectivité de la notion d’utilité pour le décideur : il s’agit de ne pas renoncer à la modélisation de la décision sans pour autant la ramener à une objectivité que l’on sait illusoire. La décision est semi-normative* » (ROY, 1985 ; 1992 ; MONTMAIN et al., 2003). Ces théories reposent sur la recherche de solution optimale, tout en considérant que nous ne pourrions jamais atteindre l’« optimum parfait » dans le monde réel. En effet, elles considèrent que le décideur ne possède qu’une connaissance limitée de la situation. Les problèmes perçus par le décideur ne représentent que des versions simplifiées de la réalité, les actions possibles pour les résoudre ne sont que partielles et il ne pourrait pas toutes les découvrir. Il arrête la recherche de solution optimale quand les objectifs qu’il s’est fixé sont atteints. Ce type d’optimisation est aussi connu sous le nom d’ « optimisation limitée », défini par HORVITZ comme étant « *l’optimisation d’une utilité calculable étant donné un ensemble d’hypothèses sur des problèmes et des contraintes de ressources* » (HORVITZ, 1987);

- La « rationalité limitée » : est définie comme « *la capacité d’un agent économique à générer un comportement maximal en fonction des informations et des ressources disponibles pour le calcul* » (RUSSEL, 1999). Elle est issue à la fois de la rationalité limitée et procédurale héritées de SIMON en 1947 (SIMON, 1947) et de la rationalité adaptative de CYERT et MARCH en 1963 (CYERT & MARCH , 1963). La « rationalité limitée » repose sur l’idée que l’agent économique n’a qu’une connaissance limitée et imparfaite ou bornée de son environnement (SIMON, 1983);
- Un « système » : est « *un ensemble d’éléments identifiables, interdépendants, c’est-à-dire liés entre eux par des relations telles que, si l’une d’elles est modifiée, les autres le sont aussi et par conséquent tout l’ensemble du système est modifié, transformé. C’est également un ensemble borné dont on définit les limites en fonction des objectifs (propriétés, buts, projets, finalités) que l’on souhaite privilégier* » (BERTALANFFY, 1980);
- Le « système d’élevage » : est défini comme « *la combinaison des ressources, des espèces animales et des techniques et pratiques mises en œuvre par une communauté ou par un éleveur, pour satisfaire ses besoins en valorisant des ressources naturelles par des animaux* » (LHOSTE, 2001);
- La « modélisation systémique » : est « *basée sur une analyse dans laquelle on divise un système en un certain nombre de sous-composants distincts pouvant être reliés par des flux ou échanges de matière, d’énergie ou d’information. Elle cherche à comprendre les différentes classes de dynamiques possibles pour des valeurs différentes des paramètres et à prédire des valeurs de stocks dans le système à un état d’équilibre* » (PAROTT, 2006);
- La « modélisation analytique » : « *isole les éléments d’un ensemble, insiste sur leur nature, joue sur la modification d’une seule variable, n’intègre pas la durée et l’irréversibilité des phénomènes, valide les faits par expérimentation répétitive, adopte des modèles linéaires et détaillés, manifeste de l’efficacité lorsque les interactions sont linéaires et faibles, est plutôt fondée sur un enseignement mono disciplinaire, conduit à une action programmée dans son détail, procède d’une connaissance précise des détails et floue des objectifs* » (LUGAN, 2006). En général la modélisation analytique utilise des méthodes issues de modèles mathématiques d’analyse, dont les plus connues sont la recherche opérationnelle, la théorie du contrôle optimal, les mathématiques et statistiques de la décision, etc..

II – 2 Concepts généraux : le système d’élevage

Au point de vue biotechnique, la démarche de modélisation a été faite en considérant le schéma global du système d’élevage. Selon LHOSTE (2001), le schéma global du système d’élevage est composé de trois pôles principaux (cf. figure 1, p. 11) :

- L’acteur et sa famille, parfois une communauté plus large comme les ingénieurs, les techniciens, les chercheurs. C’est le “Pôle humain” qui pilote le système c’est-à-dire qui « décide » ;
- Les ressources qui sont utilisées par les animaux : le « Pôle territoire » ;
- Les animaux ou le troupeau : le “Pôle animal”.

Le système d’élevage peut être décomposé en deux sous-systèmes, définissant ainsi le schéma fonctionnel du système d’élevage (LHOSTE, 2001):

- Le système de gestion ou de pilotage : où se définissent les objectifs et les informations sur l’environnement et sur la structure et le fonctionnement du système. Il s’agit des formes et modalités d’organisation et de mobilisation des moyens de production et des décisions de gestion (mobilisation de la terre, du travail, du capital disponible) ;

- Le système biotechnique de production : où se définissent les processus d'élaboration de la production et des modes de conduite permettant de comprendre la finalité des pratiques et les stratégies des producteurs.

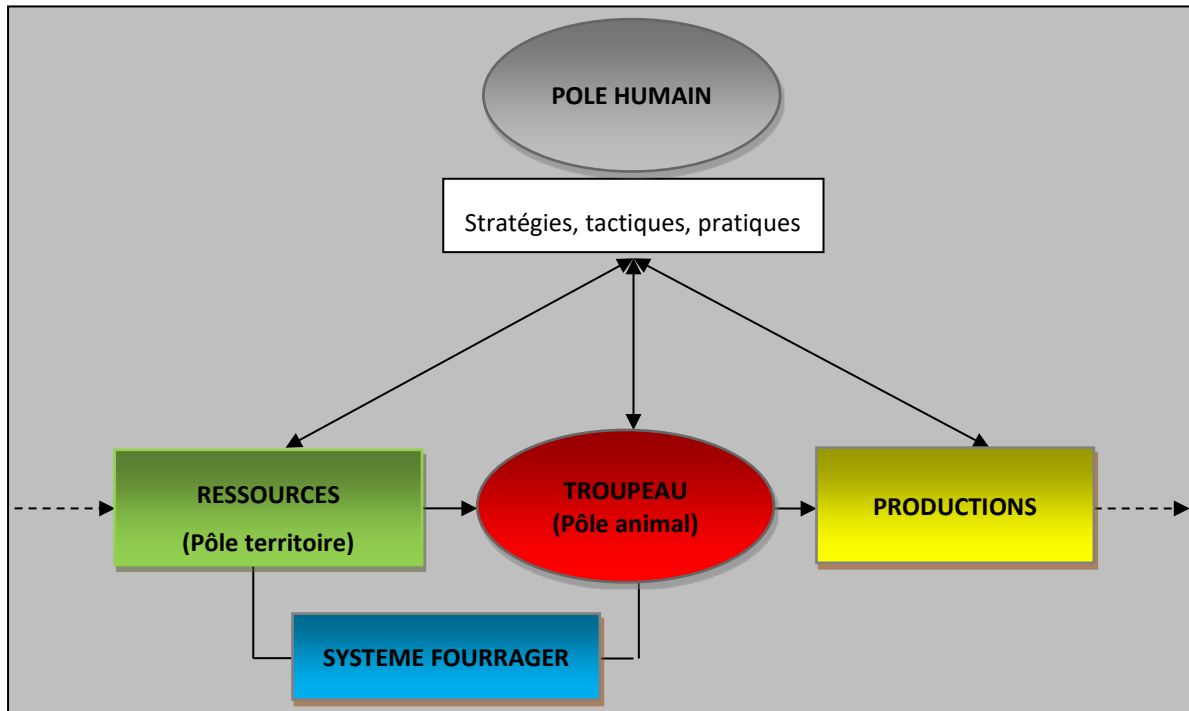


Figure 1: Schéma fonctionnel du système d'élevage (LHOSTE, 2001).

Dans les exploitations d'élevage laitier, l'objectif du système de pilotage est de faire le choix optimal sur la stratégie de production et sur les investissements à entreprendre pour maximiser le profit. En effet, avant de décider la réalisation d'un projet, l'exploitant recherche l'investissement le plus rentable en déterminant le système de production le plus intéressant (la meilleure répartition possible des moyens disponibles, l'organisation la plus bénéfique, etc.) et ceci dans le but de maximiser les volumes de production et les profits, ou de minimiser les coûts de production pour une mise donnée (terre, capital, travail, etc.). La prise de décision est souvent effectuée par un acteur unique : le chef d'exploitation. C'est ce que nous appelons une « situation décisionnelle structurée » (MONTMAIN, et al., 2003).

L'outil d'aide à la décision doit faciliter ce choix optimal du système de production, des investissements et du financement. Les performances économiques d'un élevage sont évaluées par une estimation de la valeur ajoutée au niveau de l'exploitation et/ou au niveau de l'atelier d'élevage envisagé (lait, embouche, traction) (LHOSTE & ALARY, 2002). La rentabilité d'un investissement est évaluée en utilisant des méthodes fondées sur l'actualisation des flux monétaires : la Valeur Actuelle Nette (VAN) et le Taux Interne de Rentabilité (TIR). Toutefois, l'évaluation et la comparaison des différentes valeurs du « coût de production » en fonction des différents scénarios analysés permettent également d'apprécier si le système de production choisi représente une solution optimale.

Ainsi, à partir de ces propres observations, le chef d'exploitation génère un ou des comportements visant à modifier son mode de gestion pour satisfaire au mieux les différentes contraintes imposées par son environnement. Ce type de comportement est propre au système dite « fermé » (cf. Encadré 1, p.12). Ainsi, le système d'élevage de bovin laitier est un système fermé. « *Les systèmes fermés, compliqués, mais pas complexes se prêtent mieux aux modèles analytique* » (LUGAN, 2006). Les méthodes de la recherche opérationnelle sont utilisées pour comprendre le fonctionnement des exploitations et pour appuyer les décisions. Autrement dit, les modèles mathématiques-analytiques sont utilisés pour calculer les divers indicateurs (rentabilité des investissements, marge brute, etc.) à partir desquels le chef d'exploitation va prendre sa décision.

Encadré 1 : Système fermé.

Un « système fermé » appelé également « système quasi-isolé » est un système dont le comportement est influencé par son environnement, au travers de relations d'interaction et de couplage. Un tel système possède les propriétés suivantes : il effectue des transactions avec l'environnement, mais seulement selon certains processus que l'on appelle « entrées » (ou stimuli ou afférences ou admissions ou inputs ou intrants), et sorties (ou réponses ou efférences ou émissions ou outputs ou extrants). Il fait subir aux entrées des modifications internes (transformation qualitative ou quantitative, commutation, stockage, ou transport) afin de produire les sorties. Lorsque ces conditions sont remplies, le système se détache nettement de son environnement et son comportement propre peut être étudié.

Source : LUGAN, 2006.

Toutefois, notre première hypothèse de travail préconise une modélisation informatique du système d'élevage de bovins laitiers, donc suivant une approche systémique. Dans ce cas, comment intégrer la composante mathématique-analytique de la décision dans le modèle-système ?

Au début des années 90, MEYER et BOOCH ont introduit un nouveau paradigme appelé la « Conception Orientée Objet » (MEYER, 1992 ; BOOCH, 1992).

La démarche de « Conception Orientée Objet » n'offre qu'une représentation modulaire du système étudié (pour notre cas, le système d'élevage). Elle est une étape nécessaire de la modélisation informatique mais elle est insuffisante pour résoudre le problème d'optimisation dans son ensemble, puisqu'elle ne met pas forcément en évidence la distinction entre variables de décisions et variables exogènes, la quantification des coefficients techniques ou encore la définition des contraintes d'optimisation. Toutefois, ce paradigme est suffisamment flexible pour intégrer un ou des modèles analytiques via ce que nous appelons les « propriétés de classes ». En effet, les coefficients techniques nécessaires à la fonction objectif et à la définition des contraintes d'optimisation du modèle mathématique-analytique sont forcement liés aux propriétés de classes constituant le modèle orienté objet du système d'élevage. La démarche complémentaire de la formulation des problèmes d'optimisation doit donc être entamée avec la démarche de Conception Orientée Objet. Ces deux démarches doivent être entreprises d'une manière séquentielle puisqu'elles sont complémentaires. Mais pour cela, il faudrait connaître avec précision la démarche de modélisation à adopter et la méthode d'optimisation à utiliser.

III – Démarche de modélisation

La démarche de modélisation comprend 4 phases (cf. figure 2, p.13) (LE BARS, 2003):

- ✓ L'analyse ;
- ✓ La modélisation ;
- ✓ L'implémentation informatique ;
- ✓ La simulation et la validation du modèle.

III - 1 La phase d'analyse

En analysant la démarche de formulation de la programmation linéaire et la démarche de Conception Orientée Objet, nous constatons qu'elles sont complémentaires et possèdent beaucoup de similitudes (cf. Figure 2, p.13). La démarche de Conception Orientée Objet nous permet de modéliser le système d'élevage dans un cadre générique (modélisation à travers la notion de classes), tandis que la démarche de formulation de la programmation linéaire consiste à la fois à modéliser les activités opérées au sein du système d'élevage et à recueillir des données qui vont servir d'entrée (INPUTS) à notre modèle mathématique de simulation, dans le but de le tester avec des problèmes concrets (cf. figure 2, p.13).

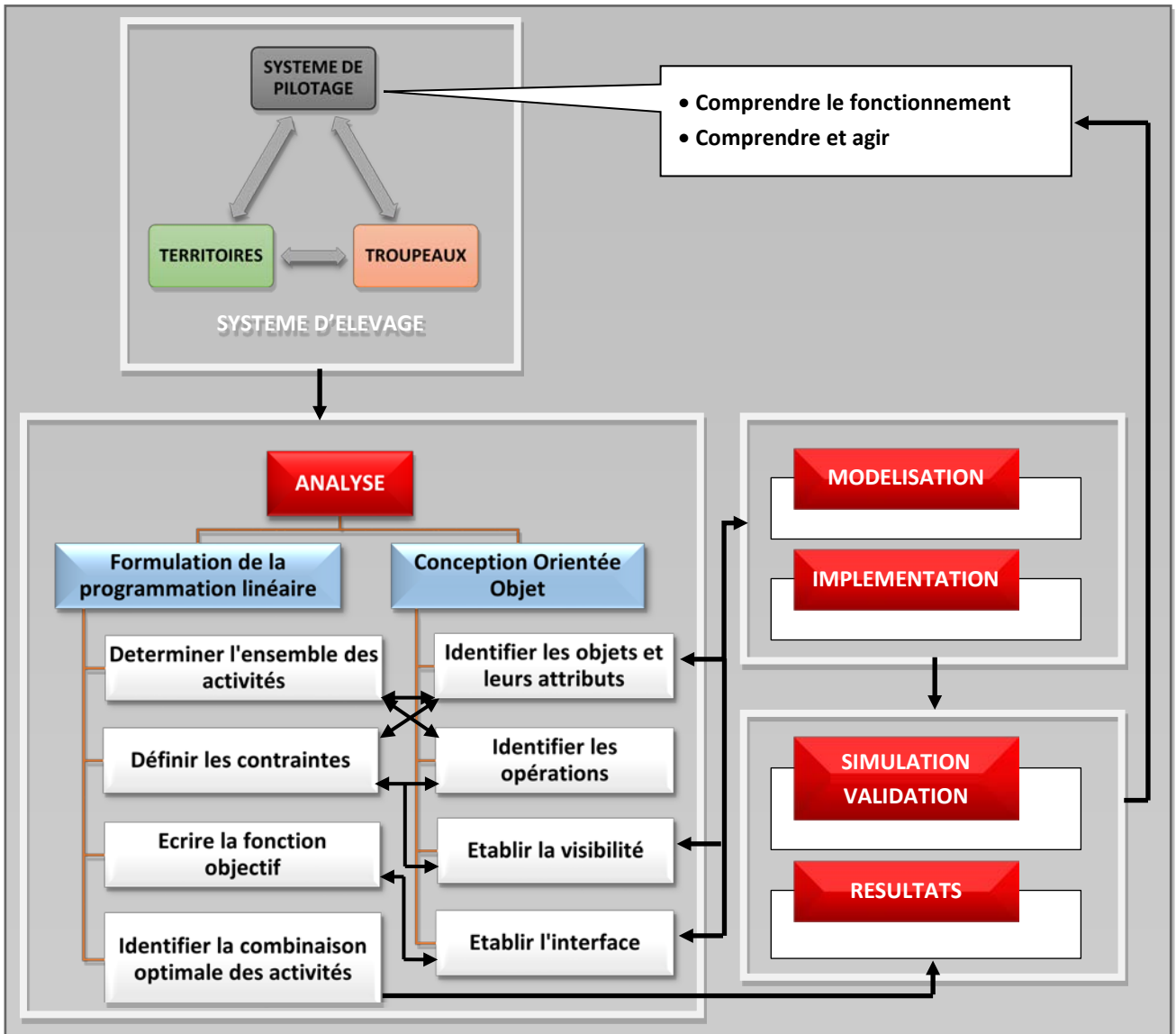


Figure 2 : La démarche de modélisation.

III – 1 – A La démarche de « Conception Orientée Objet »

Le paradigme de « Conception Orientée Objet » introduit la notion de « modularité » et de « Modélisation Orientée Objet » dont les principales caractéristiques sont (MEYER, 1992):

- ✓ Concept de modélisation à travers la notion de « classe » et d' « instanciation » de ces classes sous forme d'objets ;
- ✓ Concept d' « action » à travers la notion d'envoi de messages et de méthodes exécutées par les objets ;
- ✓ Concept de construction par « réutilisation et amélioration » grâce à l'utilisation de la notion d' « héritage ».

BOOCH (1992) propose 5 étapes dans la démarche de « Conception Orientée Objet » :

- ✓ Identifier les objets et leurs attributs ;
- ✓ Identifier les opérations ;

- ✓ Etablir la visibilité ;
- ✓ Etablir l’interface ;
- ✓ Implémenter les objets.

Chaque étape de la démarche de conception comprend des sous étapes qui définissent les actions à entreprendre (cf. Figure 3) :

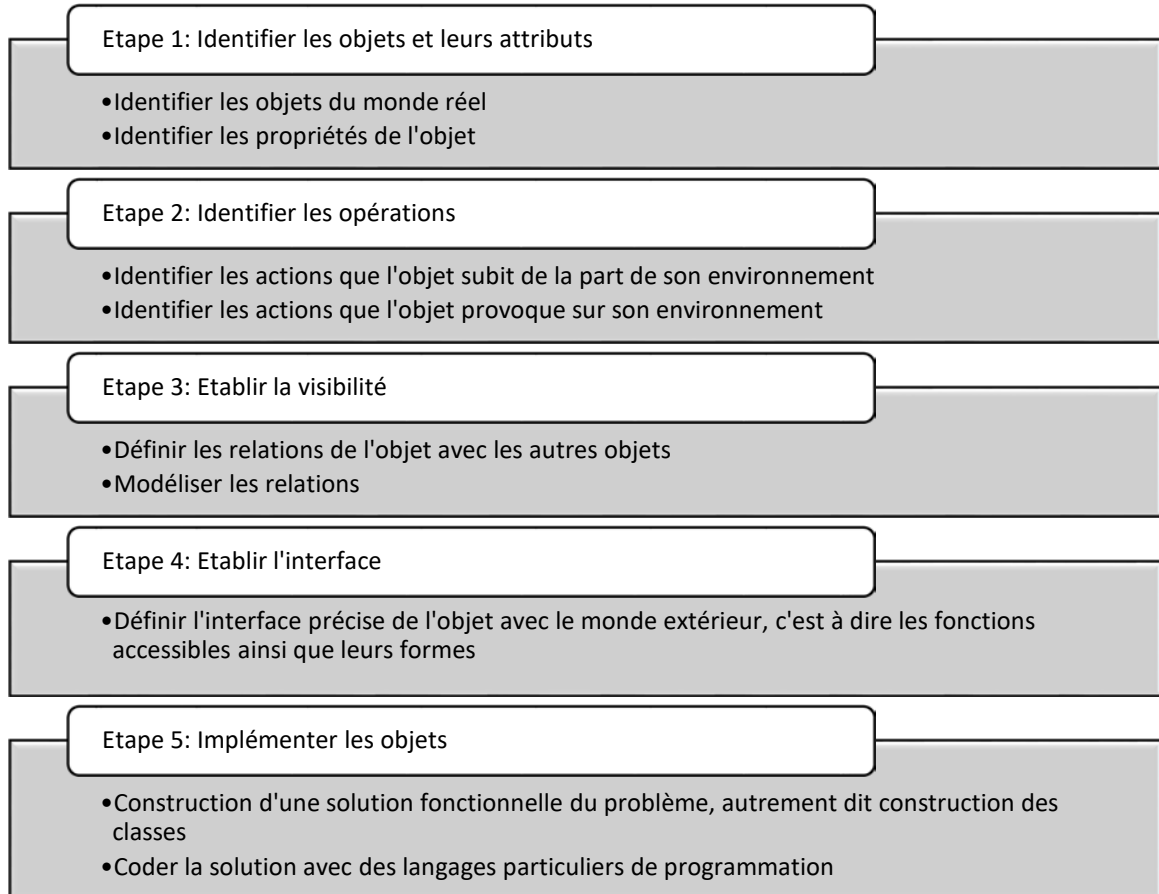


Figure 3: Démarche de Conception Orientée Objet (BOOCH, 1992).

Chaque sous-étape de chaque démarche devrait logiquement aboutir à la formulation de la méthode de « modélisation orientée objet » (cf. IV ; IV – 1, p.18).

III – 1 – B La démarche de formulation des problèmes d’optimisation en programmation linéaire

Comme nous l’avions vu précédemment (cf. Partie II-2, p.10), la démarche de formulation du problème d’optimisation doit être combinée à la démarche de Conception Orientée Objet. Un « problème d’optimisation » est défini par un espace d’état (ou espace de recherche de solutions), une ou plusieurs « fonctions objectif » (ou critères) et un ensemble de « contraintes » (ou conditions) (BERRO, 2001). Parmi les méthodes analytiques et mathématiques satisfaisant à cette définition, la plus connue et la plus utilisée est la programmation linéaire. Ainsi, notre choix s’est porté logiquement sur cette méthode comme choix de la méthode d’optimisation.

Concernant la formulation des problèmes d’optimisation proprement dite, la démarche suivante est adoptée (ARNALDI-MARTIN & LHERM, 2002):

- ✓ Déterminer l’ensemble des activités possibles susceptibles de participer au processus de production ;
- ✓ Définir les contraintes liées aux différentes activités ;

- ✓ Ecriture de la fonction objectif suivie par l’agent ;
- ✓ Identifier la combinaison optimale des activités.

Chaque étape de la démarche de formulation comprend des sous étapes qui définissent les actions à entreprendre (cf. Figure 4) :

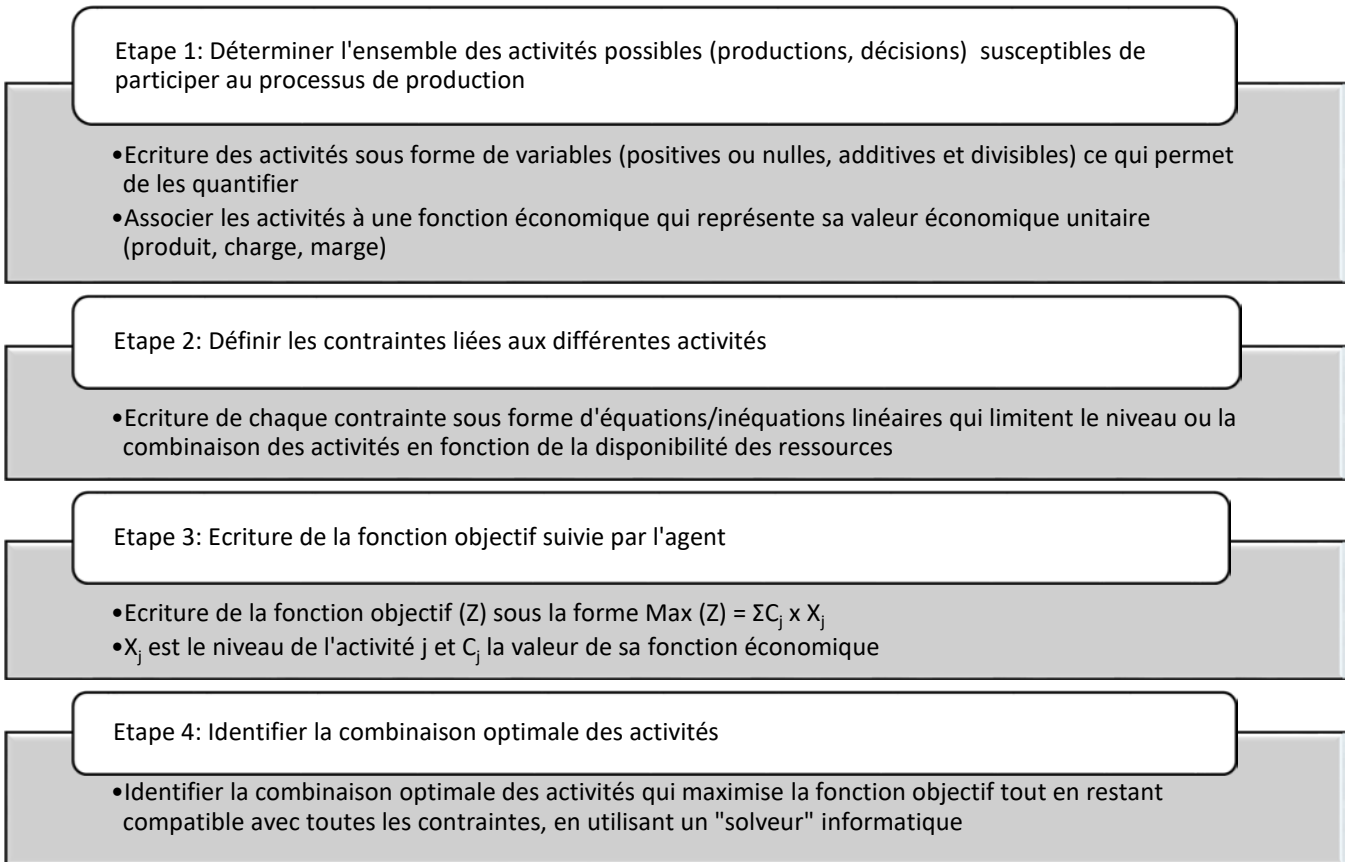


Figure 4 : Démarche de formulation de la programmation linéaire (ARNALDI-MARTIN et LHERME, 2002).

Chaque sous-étape de chaque démarche devrait logiquement aboutir à la formulation de la forme canonique de la programmation linéaire ainsi qu'à sa résolution (cf. IV ; IV – 2 ; IV – 2 – A, p.19).

III - 2 La phase de modélisation

La phase de modélisation correspond au processus de définition de la représentation structurée du modèle et des structures de décisions nécessaires à la manipulation de l’outil informatique. C’est le diagramme modulaire des objets identifiés par la démarche de « Conception Orientée Objet » du système étudié. La représentation structurée du modèle est créée en utilisant un langage graphique appelé « Unified Modelling Language » (UML) (BOOCH, RUMBAUGH, & JACOBSON, 1999) (cf. IV ; IV-1, p.18). La première étape dans la construction d’un modèle informatique de simulation consiste à représenter et organiser schématiquement les différents éléments et les différentes relations structurant le modèle. Autrement dit, avant de passer à la phase d’implémentation informatique proprement dite, il faut mettre en évidence les différents aspects du logiciel à réaliser. L’UML ou « Unified Modelling Language » est aujourd’hui le langage de modélisation universel utilisé pour la conception de la plupart des logiciels. Il permet de visualiser, grâce à des diagrammes, les différentes entités du modèle et leur hiérarchisation. Le diagramme de classes représente les classes et les relations entre celles-ci. Chaque classe ayant chacune leurs attributs et leurs méthodes. Quant aux structures de décisions, elles sont généralement présentées sous formes de diagrammes où la réponse aux questions posées est présentée sous forme de variables de types booléennes (Oui–Non). Au sens informatique du terme, les structures de

décisions sont souvent présentées sous forme des boucles de type « Si ... Alors ...Sinon » (If .. Then ..Else en anglais) ou encore « Sélection de cas » (Select case en anglais).

III – 3 La phase d’implémentation informatique

L’ « implémentation » est l’écriture des lignes de programmes pour mettre en œuvre une fonction ou un composant au sein d’un système (LAROUSSE, 2009). Autrement dit, c’est la codification du modèle sous forme de langage informatique de programmation. Cette phase correspond à la phase de « Programmation Orientée Objet ». Le langage de programmation utilisé est Visual Basic.NET (VB.NET) (langage orienté objet) sous l’environnement de développement Microsoft® Visual Studio Express 2008 – 2013. Les systèmes d’exploitation cibles pour l’utilisation du modèle sont les versions 64 bits de Microsoft® Windows 7 ; 8 ; 8.1 et 10.

Pour l’architecture du modèle, l’utilisation du patron « n-tier » est courante dans le développement d’application orientée objet (cf. Encadré 2, p.17 **Erreur ! Signet non défini.**). En pratique, il est préférable de répartir les différentes tâches (interaction avec l’utilisateur, actions propres à l’application, gestion des données) entre différentes classes (DI SCALA, 2004). Ce type d’architecture permet d’avoir une gestion décentralisée de l’interface et de la gestion des données ce qui convient à la modélisation du schéma fonctionnel du système d’élevage présenté par LHOSTE en 2001. En effet, il serait plus pragmatique de programmer les pôles « Ressources », « Système fourrager », « Troupeau » et « Système de pilotage » au niveau du tier « métier ». Les données d’entrées sont saisies au niveau du tier « présentation ». La réalisation des actions propres au modèle (simulation des besoins du troupeau, optimisation linéaire, etc.) est traitée au niveau du tier « métier » en tant que méthode de classe. Les résultats obtenus seront affichés au niveau du tier « présentation ». La sauvegarde des données d’entrées et de sorties s’effectuera à partir du tier « présentation » vers le tier « base de données ».

III – 4 La phase de simulation et de validation du modèle

La « simulation » est « *la construction et la manipulation d’un modèle représentant les processus qui caractérisent un système* » (LUGAN, 2006). Dans le cas d’un modèle informatique, cette manipulation est l’exécution du programme informatique obtenu par la phase d’implémentation. En prospective¹¹, « *les scénarios sont des simulations effectuées sur la base d’un certain nombre d’hypothèses ou de processus* » (LUGAN, 2006). Dans le cadre de la présente recherche, Nous avons procédé à la simulation de scénarii fictifs créés à partir de données recueillies au cours de la phase d’analyse. L’objectif est de s’assurer que le modèle reproduise bien la réalité ou au moins qu’il propose des solutions réalistes : c’est la phase de « validation conceptuelle ». La validation est une étape obligatoire dans la construction de modèles pour permettre une future utilisation de ceux-ci.

Il existe deux courants de pensée concernant le processus de validation des modèles intégrés. Le premier propose de comparer les résultats émanant du modèle à ceux réellement obtenus (HAZELL & NORTON, 1986 ; LOUHICHI, 2004). Le deuxième réfute le premier courant de pensée et considère que la validation de modèles issus d’une méthode analytique, surtout mathématique, n’est pas un choix judicieux parce que le modèle mathématique donne toujours de meilleurs résultats par rapport à la réalité (MORRISON et al., 1986). De plus, il est toujours délicat de certifier que le cas réel observé reflète bien ou résulte réellement d’un comportement optimal de l’éleveur, à cause de la rationalité limitée de l’agent. Selon LEVINS, « *un modèle mathématique n’est ni une hypothèse, ni une théorie. Contrairement à des hypothèses scientifiques, un modèle n’est pas vérifiable directement par des expériences. Les modèles sont à la fois vrais et faux...beaucoup sont oubliés et dans ce cas les modèles sont faux, incomplets ou inadéquats. Un modèle validé n’est pas un modèle*

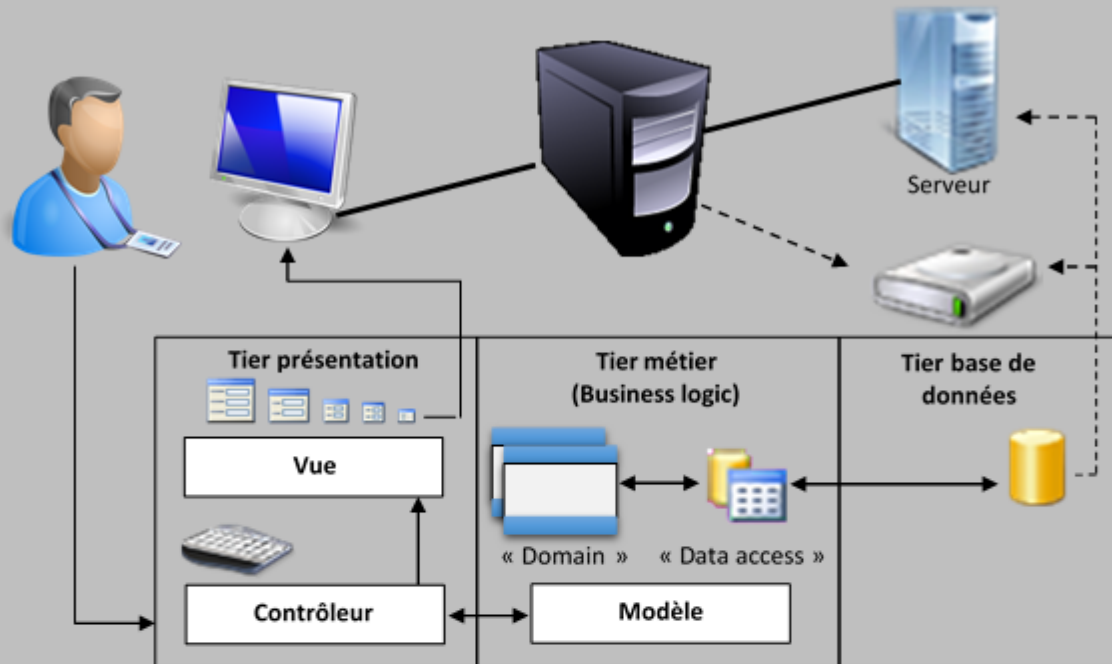
¹¹ Prospective : terme introduit par Gaston Berger (1896-1960) pour désigner l’ensemble des recherches ayant pour objet la construction de scénarios possibles pour l’avenir (LUGAN, 2006).

qui est “vrai” mais un modèle qui génère de bonnes hypothèses, que l’on puisse tester et qui soient en rapport avec des problèmes importants » (LEVINS, 1966).

Dans la pratique, nous pouvons dire que le meilleur processus de validation est celui qui satisfait au mieux ces deux courants de pensée.

Encadré 2: L’architecture « n-tier » et le patron de conception « Modèle – Vue – Contrôleur (MVC) ».

L’architecture n-tiers impose une séparation en 3 « couches » minimum (ou « tiers » en anglais): la couche présentation qui gère l’interface homme – machine, la couche métier qui gère les opérations effectuées par l’application et la couche base de données.



MVC est un patron de conception, ou *design pattern*, c’est-à-dire une solution standard pour la conception de logiciels. Dans MVC, le « **modèle** » représente l’application (c’est-à-dire les classes avec leurs attributs et leurs méthodes) et ses données. Les méthodes permettent de modifier les données par rapport aux requêtes de l’utilisateur. Dans l’architecture n-tiers, le modèle est localisé dans la « couche métier » ou « **domain** » ou « **business logic** ». Il contient la couche d’accès, d’interaction et de traitement de l’information avec le « **contrôleur** » d’une part et avec les bases de données d’autre part.

La « **vue** » représente l’interface utilisateur, ce avec quoi il interagit. Dans l’architecture n-tiers, la couche dans laquelle elle se trouve est la couche de présentation. Elle n’effectue aucun traitement et se contente d’afficher à l’écran les données que lui fournit le modèle et les données saisies par l’utilisateur.

Le « **contrôleur** » gère les interactions entre l’utilisateur et le modèle. Il va interpréter la requête du premier pour l’envoyer à la couche métier, puis il reçoit la réponse de cette dernière pour l’envoyer au premier avec la vue correspondante. Il effectue la synchronisation entre le modèle et les vues. Il se trouve également dans la couche de présentation.

Concernant la « **base de données** », elle peut être localisée soit localement à l’intérieur du disque dur du poste de travail ou tout autre support de stockage (clé USB, disque dur externe, DVD-Rom, etc.), soit extérieurement dans un serveur de base de données (cas des sociétés et des grandes firmes).

En général, il n’y a pas de règles ni de restrictions particulières sur le nombre de couche ou de niveau à appliquer. On peut ajouter des niveaux supplémentaires si nécessaire, d’où l’appellation de « **n – tier pattern architectural** » par les anglophones ou « **architecture n-tier** » en français. Le nombre de niveaux varie d’un projet à l’autre et dépend en général du type de projet à modéliser.

Source : DI SCALA, 2004 ; TAHE, 2005 ; MANEU, 2007 ; LASSERRE, 2009.

IV – Méthodes et outils

IV – 1 La méthode de « Modélisation Orientée Objet »

La « Conception Orientée Objet » peut être vue comme la formalisation des échanges d’information et des actions effectuées par des entités de base appelées « objets » (en systémique, nous les appelons des entités). Un « objet » est une entité qui contient des propriétés (ses « attributs ») qui définissent son état et des fonctions (ses « méthodes ») qui définissent ses actions et interactions. Un objet est créé selon un modèle que nous appelons une « classe ». En « Conception Orientée Objet », les classes d’objet sont représentés sous forme de langage graphique appelé « Unified Modelling Language » (UML).

A titre d’exemple, nous pouvons représenter la classe « fourrage », la classe « coût de production » qui représente les dépenses nécessaires pour le produire et la classe « Intrants », sous le diagramme UML suivante :

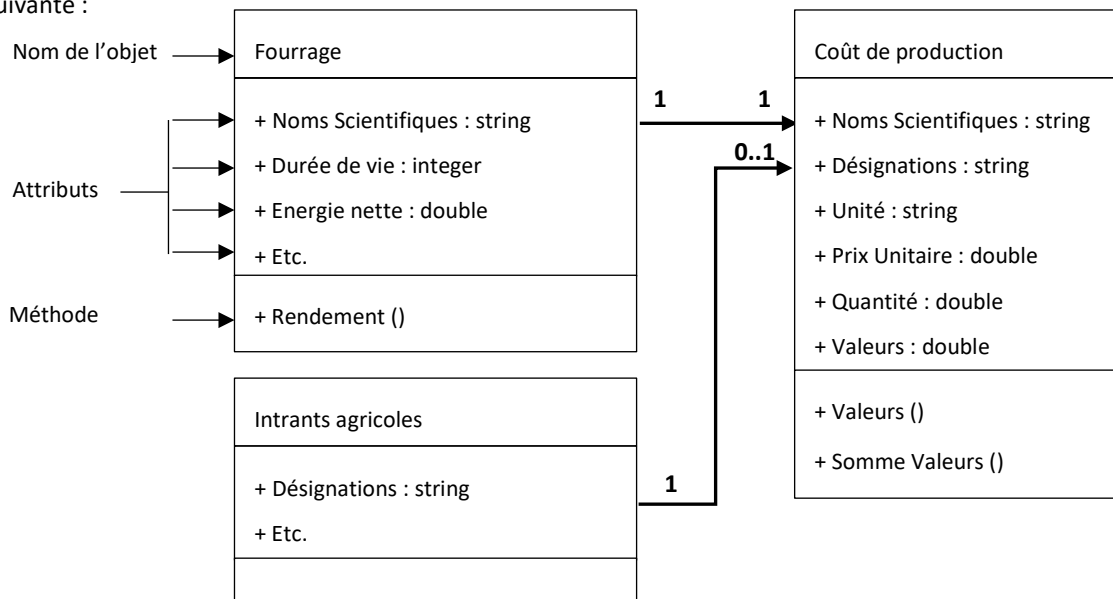


Figure 5 : exemple de classe (Fourrage, Coût de production et Intrants agricoles) représenté avec UML.

L’exemple ci-dessus montre une vue structurelle d’un diagramme de classe, mettant en jeu trois objets bien distincts : fourrage, coût de production et intrants agricoles, ainsi que les différentes formes de relation statiques qui les relient entre eux.

Les traits en gras reliant les différentes classes représentent des relations entre les objets. Ce sont les « associations ». Les associations représentent des relations entre objets, c’est-à-dire entre des instances de classes (SIGAUD, 2004). Dans notre exemple, il y a deux types de relations bien distincts : l’association « fourrage – coût de production » et « intrants agricoles – coût de production ». Dans l’association « fourrage - coût de production », l’objet source est la classe fourrage et la navigabilité va vers la droite. Ce qui indique que l’instanciation d’un fourrage quelconque implique l’existence d’un ou plusieurs coûts de production correspondants, y afférents. S’il n’y a pas de flèches sur les traits, nous disons que l’association est ambiguë. Les chiffres « 1 » sur l’objet source et l’objet cible indique ce que nous appelons la « multiplicité ». Elle indique le nombre d’objet d’une même classe participant à l’association (SIGAUD, 2004). Ainsi, dans l’association « fourrage – coût de production », pour chaque objet fourrage instancié correspond un (1) et un seul coût de production instancié. La multiplicité peut être de différentes sortes (SIGAUD, 2004):

- 1 : obligatoire (1 et 1 seul)
- 0..1 : optionnel (0 ou 1)
- 0..* ou * : quelconque

n.. *: au moins n
 n..m : entre n et m
 l,n,m : l,n ou m

Dans l’association « intrants agricoles – coût de production », nous avons une multiplicité de « 1 » à « 0..1 ». Ce qui signifie que chaque intrant agricole instancié n’est pas forcément utilisé dans le processus de production d’un fourrage x quelconque.

En programmation informatique, nous utilisons la « Modélisation Orientée Objet » pour implémenter les classes obtenues sous forme de diagramme UML à partir de la démarche de « Conception Orientée Objet ». Cette étape de programmation informatique s’appelle la « Programmation Orientée Objet ». La « Programmation Orientée Objet » utilise toujours un langage informatique dit « orienté objet ». A partir d’une classe informatique, nous pouvons créer plusieurs objets. Les classes décrivent la « structure » des objets, alors que ces derniers sont des « instances » exécutables de celles-ci. Chaque instance a le même ensemble d’attributs et de méthodes que les autres instances de la même classe, mais les valeurs de ses attributs lui sont propres. Dans la mesure où un objet est une instance d’une classe, l’action de créer un objet se nomme « instanciation ». Une classe est donc un moule ou une matrice à partir de laquelle sont construits des objets. Afin de mieux comprendre, considérons le cas du système biotechnique d’élevage de bovins, mais cette fois-ci en langage orienté objet. A l’intérieur du système biotechnique, nous trouvons une classe « fourrage ». La classe « fourrage » possède plusieurs attributs, comme le nom scientifique, le rendement ou encore les valeurs alimentaires (énergie nette, valeurs protéiques, etc.). La classe « fourrage » possède aussi des méthodes, comme le calcul de la productivité (rendement) de chaque espèce fourragère. Les objets de la classe « fourrage » interagissent avec des objets d’autres classes, comme ceux de la classe « vache » par exemple. Ceci crée des dépendances entre classes : les objets de la classe « fourrage » sont consommés par les objets de la classe « vache » suivant la relation définie : adéquation entre le besoin nutritif de la classe « vache » en fonction de l’unité nutritive disponible fournie par la classe « fourrage ».

Pour être plus pragmatique, prenons l’exemple suivant : l’espèce « *Brachiaria ruziziensis* » peut être modélisée par un objet qui est une « instance » de la classe « fourrage ». De même, la race Prim’Holstein peut être modélisée par un objet qui est une instance de la classe « vache » (le nom de la classe doit être compris dans le sens de « race de vache » dans la mesure où les instances de cette classe sont des races particulières, comme Prim’Holstein par exemple, et non des animaux individuels). L’objet qui modélise l’espèce *Brachiaria ruziziensis* possède les mêmes propriétés (attributs) que la classe-mère « fourrage » : nom scientifique, valeurs alimentaires, etc. Ces propriétés sont partagées par toutes les espèces de fourrage. En revanche, les attributs de cet objet ont des valeurs qui sont propres à l’espèce *Brachiaria ruziziensis*. En particulier, l’attribut « Nom scientifique » a logiquement comme valeur « *Brachiaria ruziziensis* », les valeurs alimentaires peuvent être les valeurs de l’énergie nette ou les valeurs protéiques, etc.. Il en est de même pour les méthodes de classe. Les méthodes de l’objet qui modélise l’espèce *Brachiaria ruziziensis* sont celles de la classe « fourrage ». Par exemple, le calcul de la productivité ou de la valeur nutritive des fourrages. En effet, les méthodes de calcul de la productivité ou de la valeur nutritive sont les mêmes quel que soit l’espèce fourragère considérée.

IV – 2 Outils : Optimisation du système de production

L’optimisation du système de production constitue le cœur et l’utilité du modèle informatique d’aide à la décision étant donné que la ou les méthodes représentées dans ce sous-chapitre concernent tous les aspects décisionnels qui s’opèrent au sein du système d’élevage. Nous avons vu que les objectifs et les informations sur l’environnement et sur la structure et le fonctionnement du système se définissent au niveau du système de pilotage (pôle humain), donc de l’ensemble du processus décisionnel. Ainsi, l’implémentation sous forme de « méthode de classe » de ces méthodes constitue la modélisation objet du « pôle humain ». Elles sont toutes issues de modèles analytiques et économétriques.

IV – 2 – A Programmation linéaire

La « programmation linéaire » est un modèle mathématique qui consiste à optimiser une fonction linéaire (dite fonction objectif) de plusieurs variables (dites variables de décisions), soumise à des contraintes également linéaires et liées entre elles par des relations d'égalités ou d'inégalités non strictes. Autrement dit, la résolution du programme linéaire consiste à déterminer les valeurs des variables de décisions qui optimisent la fonction objectif lorsque ces variables sont assujetties à certaines contraintes. Elle a été utilisée pour la première fois dans les années 40 pour le compte de l'armée américaine. Son application aux domaines civils date de 1950. L'un des premiers algorithmes de résolution de programme linéaire est l'« algorithme du simplexe ». Il est considéré comme simple, pratique à utiliser, robuste et efficace. Il a été développé par DANTZIG en 1947 à partir des travaux effectués par NEUMANN en 1928 (MONTMAIN et al., 2003 ; LOUHICHI, 2004). Les études pour son application au domaine agricole ont commencé dans les années 60 et consistaient à trouver la répartition la plus efficace de ressources limitées, en vue d'atteindre les objectifs de l'exploitant.

Mathématiquement, la programmation linéaire traite des problèmes du type suivant :

$$\text{Max } (Z) = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad \longleftrightarrow \quad \text{Max } (Z) = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n$$

Sous les contraintes :

$$\sum_{j=1}^n a_{i,j} x_j \leq b_i \quad (i = 1, \dots, m) \quad \longleftrightarrow \quad \begin{cases} a_{1,1}x_1 + a_{1,2}x_2 + \dots + a_{1,n}x_n \leq b_1 \\ a_{2,1}x_1 + a_{2,2}x_2 + \dots + a_{2,n}x_n \leq b_2 \\ \vdots \\ a_{m,1}x_1 + a_{m,2}x_2 + \dots + a_{m,n}x_n \leq b_m \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0 \end{cases}$$

Avec :

Z : fonction objectif ou fonction économique ;

c_j ($j = 1, \dots, n$) : coefficients objectifs ;

x_j ($j = 1, \dots, n$) : variables de décisions ;

$a_{i,j}$: coefficients de la matrice de contraintes ou coefficients de variables ;

b_i ($i = 1, \dots, m$) : variables auxiliaires.

Le principe général de l'algorithme du simplexe est basé sur un résultat mathématique qui montre que, lorsque ce type de problème a une solution, cette solution se trouve sur un des sommets d'un polyèdre d'un espace vectoriel de dimension n (un polyèdre est une partie de cet espace vectoriel délimitée par des hyperplans de celui-ci). Les sommets du polyèdre sont appelés des cas de base. S'il y a plusieurs solutions, alors il y en a une infinité et elles se trouvent sur une arête du polyèdre (qui contient donc aussi deux sommets, donc deux cas de base qui correspondent à une même valeur de la fonction objectif). Nous savons comment calculer les coordonnées de tous ces sommets, qui sont en nombre fini, si bien que le problème pourrait être de sélectionner le sommet qui donne à la fonction à maximiser sa plus grande valeur. Cependant, ce nombre fini de sommets est en général très grand et dépend souvent exponentiellement des dimensions du problème, si bien que cette approche ne pourrait être utilisée que pour résoudre des problèmes de petite dimension. L'algorithme du simplexe va rechercher une solution parmi les cas de base, mais en ne calculant la valeur de la fonction objectif que pour une infime partie d'entre eux. En plus des activités définies par les coefficients x_j (les activités fourragères), cet algorithme introduit des « slack activities » S_i dont la valeur correspond à la valeur de la quantité de la ressource b_i qui n'est pas utilisée dans le cas de base considéré. En prenant comme point de départ un cas de base particulier, sous forme d'un n-uplet, le principe de l'algorithme est d'itérer les actions suivantes :

1. Sélectionner l'activité dont l'ajout d'une unité augmenterait le plus possible la valeur de la fonction objectif ;
2. Déterminer la quantité à ajouter de l'activité sélectionnée en considérant la contrainte la plus sévère ;
3. Remplacer l'activité sélectionnée par l'activité dont la valeur se retrouve annulée du fait que le seuil fixé par la contrainte considérée au point 2. est atteint.

Lorsque l'application du point 1. ne permet plus de trouver une activité dont l'ajout d'une unité permettrait d'augmenter la valeur de la fonction objectif, l'algorithme est terminé et la solution optimale est le n-uplet de la dernière itération. L'algorithme du simplexe est très efficace en pratique et il est implémenté dans tous les solveurs d'optimisation linéaire. Cependant, un problème de programmation linéaire n'a pas toujours de solution. Dans certains cas, il n'existe tout simplement pas de solution optimale. Cette situation se produit quand un problème est « infaisable » ou « non – borné » (HAZELL & NORTON, 1986). Dans d'autres cas, cette solution unique et optimale existe mais la procédure du simplexe converge trop lentement ou ne converge pas du tout à cause d'un problème de « dégénérescence » (HAZELL & NORTON, 1986). Selon HAZELL et NORTON (1986), il y a trois cas de figures à considérer dans ces cas précis :

- L'« infaisabilité » : un problème de programmation linéaire est dit « infaisable » quand il n'existe pas de solution unique qui satisfasse toutes les contraintes. Dans la pratique, l'infaisabilité se produit à cause d'une erreur dans la préparation des données d'entrée. Pour les problèmes de grande taille, elle se produit également quand l'analyste n'arrive pas à prendre en compte toutes les relations logiques existant dans le modèle ;
- Le problème « non borné » : un problème de programmation linéaire est dit « non borné » quand une solution faisable existe, mais que pour cette solution, la fonction objectif prend une valeur infinie. Dans la pratique, nous tombons sur un problème « non-borné » à cause d'une erreur dans la préparation des données d'entrée ;
- La « dégénérescence » : normalement, la valeur de la fonction objectif s'accroît à chaque itération de la procédure du simplexe, jusqu'à ce que la solution optimale soit atteinte. Nous supposons également qu'il n'y a toujours qu'une seule activité qui est susceptible d'être sélectionnée dans le point 1. de l'algorithme du simplexe. Lorsque l'une de ces deux hypothèses n'est pas vérifiée, il y a « dégénérescence ». Quand il y a « dégénérescence », il n'est plus certain qu'il existe une unique série d'itérations qui permettra à la procédure du simplexe de converger vers une solution optimale. Cela ne remet pas en cause l'existence d'une solution unique, mais le nombre d'itérations nécessaires pour l'atteindre peut-être si grand que cela peut devenir impossible en pratique.

IV – 2 – B Programmation linéaire multi-périodique et récursive

L'élaboration du plan de renouvellement du cheptel doit considérer le devenir de l'exploitation à moyen et long terme (HAZELL & NORTON, 1986 ; LOUHICHI, 2004 ; ALARY et al., 2005). En effet, les investissements dans une exploitation agricole ont une période de gestation qui s'étend au-delà d'une simple année agricole. La majeure partie des coûts d'investissement s'opère au début de l'horizon de planification, tandis que les revenus qu'ils génèrent s'étendent sur plusieurs années (HAZELL & NORTON, 1986). La prise en compte de la rentabilité des investissements nécessite donc le recours à la programmation linéaire multi-périodique (HAZELL & NORTON, 1986). Les modèles multi-périodiques permettent d'intégrer les effets à long terme de divers déterminants économiques sur le comportement des producteurs et sur leurs choix stratégiques et d'investissement (sur la gestion des ressources, la conduite et l'évolution démographique du troupeau, etc.) (HAZELL & NORTON, 1986 ; LOUHICHI, 2004 ; ALARY et al., 2005).

Nous choisissons pour notre modèle un modèle dynamique de type « Programmation linéaire multi périodique récursive ». La dimension « multi-périodique » signifie « *qu'on part d'une situation initiale et qu'on choisit des plans de production pour les années à venir en tenant compte de toute l'information disponible sur le futur, à savoir les anticipations sur les prix et sur les rendements techniques* » (LOUHICHI et al., 2003). Selon LUGAN (2006), « *la récursivité caractérise ce qui est susceptible d'être indéfiniment réappliqué aux résultats de sa propre application* ». En programmation linéaire, la dimension « récursive » signifie que l'élaboration des plans de production d'une année quelconque (année t) est dépendante des résultats des années précédentes (t-1, t-2, etc.) (HAZELL & NORTON, 1986 ; LOUHICHI, 2004 ; ALARY et al., 2005). La récursivité est telle que les décisions

au temps t ne dépendent pas uniquement des anticipations sur les prix ou des résultats techniques mais aussi des décisions prises antérieurement (ALARY, et *al.*, 2005). L'aspect multi-périodique implique la considération d'au moins deux périodes dans la prise de décision (HAZELL & NORTON, 1986). Ce qui est logique puisque les méthodes fondées sur l'actualisation des flux monétaires (VAN, TRI) prennent en considération le temps pour déterminer si l'investissement est rentable. Généralement, une « période » est définie comme une « année », mais elle peut également être basée sur un intervalle de temps plus long ou plus court (HAZELL & NORTON, 1986). Il n'est pas nécessaire que toutes les périodes considérées aient une même durée (HAZELL & NORTON, 1986).

La recherche d'un choix optimal du système de production et des investissements à entreprendre implique la recherche d'un assemblage optimal des facteurs de production mis en jeu afin de rentabiliser au maximum les investissements. L'objectif principal retenu pour la fonction économique de notre modèle est la maximisation de la marge brute (Recettes – Dépenses) liée aux activités fourragères et aux troupeaux, et qui dépend directement aux contraintes en ressources disponibles (surfaces agricoles utiles, besoins nutritifs du troupeau, etc.). Cet assemblage optimal est recherché en maximisant la fonction objectif suivante :

$$\text{Max } (Z)_{ye} = \sum_{j=1}^n (V_{jye} - C_{jye} - A_{jye}) \cdot X_{jye} + \sum S_{ye} + \sum \text{Inv}_{ye} + \sum R_{ye} - \sum \text{Ct}_{ye} - \sum \text{Amt}_{ye}$$

Sous les contraintes :

$$\sum_{j=1}^n a_{i,jye} X_{jye} \leq b_{iye} \quad (i = 1, \dots, m) \quad \iff \begin{cases} a_{1,1ye} x_{1ye} + a_{1,2ye} x_{2ye} + \dots + a_{1,nye} x_{nye} \leq b_{1ye} \\ a_{2,1ye} x_{1ye} + a_{2,2ye} x_{2ye} + \dots + a_{2,nye} x_{nye} \leq b_{2ye} \\ \vdots \\ a_{m,1ye} x_{1ye} + a_{m,2ye} x_{2ye} + \dots + a_{m,nye} x_{nye} \leq b_{mye} \\ x_{1ye} \geq 0, x_{2ye} \geq 0, \dots, x_{nye} \geq 0 \end{cases}$$

Avec :

Z : fonction objectif ou fonction économique à maximiser ;

V_j ($j=1, \dots, n$) : Ventes de fourrages ;

C_j ($j = 1, \dots, n$) : Coûts fixes et variables des surfaces fourragères rattachés à l'atelier ;

A_j ($j=1, \dots, n$) : Achat et cessions internes de fourrages ;

X_j ($j = 1, \dots, n$) : activités fourragères ($j= 1, \dots, n$) ;

ye : année de simulation ;

S_{ye} : Subventions/Aides liées directement à l'élevage ;

Inv_{ye} : Variation d'inventaire de tous les animaux (ventes – achats d'animaux) ;

R_{ye} : Recettes diverses (ventes de laits, de fumiers, etc.) ;

Ct_{ye} : Charges liées à l'atelier bovin (entretien et réparation de matériels et équipements, produits vétérinaires, honoraires, frais d'élevage, produits de nettoyage, eau, énergie, etc.) ;

Amt_{ye} : Amortissements en fourrages pérennes, animaux reproducteurs (vaches laitières), infrastructures propres à l'activité d'élevage (bâtiments, silo-couloir, etc.), matériels spécifiques (équipement laitier, matériels de transport, etc.), etc. ;

$a_{i,j}$: coefficients de la matrice de contraintes ou coefficients de variables ;

b_i ($i = 1, \dots, m$) : variables auxiliaires.

En matière de résolutions de problèmes d'optimisation sous contraintes linéaires de grande dimension, il est courant d'utiliser des solveurs informatiques. Généralement, ces solveurs se présentent sous forme d'« API » ou « Application Programming Interface » c'est-à-dire que ce sont des bibliothèques de liens dynamiques sous forme de fichier « .dll » ou « Dynamic-Link Libraries¹² ». Les API contiennent des fonctions écrites généralement en langage C ou C++ et prêts à l'emploi.

¹² Dynamic-Link Libraries : ce sont des fichiers de bibliothèques partagés, pouvant être utilisés par plusieurs programmes installés sur l'ordinateur ou par différents systèmes d'exploitation prenant en charge le langage C.

Pour notre cas, nous avons utilisé l’API « Ip_solve ». C’est un API performant et un des plus connu. « Ip_solve » est produit à l’origine par BERKELAAR et DIRKS avec d’autres collaborateurs à l’Université de Technologie de Eindhoven (GOURVEST, 2009). Depuis 2004, il a été amélioré par EIKLAND et NOTEBAERT. L’API est téléchargeable gratuitement sur le site internet <http://sourceforge.net/projects/lpsolve/>. Il est par ailleurs régi par la licence « GNU Lesser General Public License » qui permet entre autres de le télécharger, de le distribuer gratuitement et de l’utiliser à condition de ne pas modifier le code source implémenté à l’intérieur et de citer les auteurs. La version de « Ip_solve » utilisée dans le cadre de ce travail est la version 5.5.0.5.

IV – 2 – C Calculs intermédiaires

Le plan d’assolement obtenu par programmation linéaire servira par la suite au calcul du résultat d’exploitation avant impôt (Re) et de la recette nette d’exploitation (ou flux net de trésorerie) (Ri). La recette nette d’exploitation servira au calcul de la rentabilité des investissements. Le résultat d’exploitation avant impôt est obtenu avec l’équation suivante (BISSON - VAIVRES & FICANO, 1998):

$$Re = Z_{ye} - \sum RemFP_{ye} - \sum RemMOE_{ye}$$

Avec :

Re : résultat d’exploitation avant impôt ;

Z_{ye} : Marge Brute annuelle ;

RemFP_{ye} : somme annuelle des rémunérations des facteurs de production dont l’exploitation n’est pas propriétaire (Fermage ou autre forme de rémunération du foncier emprunté, rémunération du capital comme les intérêts d’emprunts et la rémunération de location d’équipement, etc.) ;

RemMOE_{ye} : Coûts fixes et variables des surfaces fourragères rattachés à l’atelier bovin.

La recette nette d’exploitation est calculée à partir de (BISSON - VAIVRES & FICANO, 1998):

$$Ri = Re - IT + \sum Amt_{ye}$$

Avec :

Ri : recette nette d’exploitation ;

Re : résultat d’exploitation avant impôt ;

IT : impôts et taxes sur la production et les bénéfices ;

Amt_{ye} : Somme des amortissements.

IV – 2 – D La rentabilité des investissements

La rentabilité de l’investissement est évaluée en utilisant des méthodes fondées sur l’actualisation des flux monétaires : la « Valeur Actuelle Nette » (VAN) et le « Taux Interne de Rentabilité » (TIR). Selon FUMEY (2001), « L’actualisation permet la comparaison d’un revenu futur et d’un coût (revenu négatif) immédiat. Une somme d’argent courant a pour équivalent dans un an cette même somme augmentée théoriquement des intérêts de son placement au meilleur taux d’opportunité possible ».

La Valeur Actuelle Nette (VAN) appelée également « méthode du cash-flow actualisé », compare la dépense d’investissement à la valeur actuelle des recettes nettes attendues de l’investissement. C’est la somme du cumul des flux de trésorerie d’exploitation actualisés, calculés sur la durée de vie utile du bien investi, et le montant du capital investi (FUMEY, 2001).

$$VAN = -I + \sum_{p=1}^n Ri_p (1+i)^{-p} + V_n(1+i)^{-n}$$

Avec :

- I : dépenses d’investissement ;
- Ri : recette nette d’exploitation ou flux nets de trésorerie ;
- i : taux d’actualisation ou taux minimal de rentabilité ;
- V : Valeur résiduelle de l’investissement.

Le Taux Interne de Rentabilité (TIR) recherche le taux d’actualisation (i) pour lequel la valeur des bénéfices actualisés égalise celle des coûts actualisés.

$$-I + \sum_{p=1}^n Ri_p (1+i)^{-p} + V_n(1+i)^{-n} = 0$$

IV – 2 – E Les contraintes d’optimisation

Concernant la définition des contraintes liées aux différentes activités (fourragères, etc.), nous avons combiné la statistique descriptive (moyenne, variance, écart-type) avec la méthode statistique de « Test sur échantillon unique » (ou One Sample T – Test) (cf. Encadré 3). Nous avons déterminé un intervalle de confiance (au niveau de confiance de 95 %) pour la différence entre la valeur moyenne sur l’échantillon et une valeur-test. Les coefficients techniques préconisés par les fiches techniques d’agriculture et/ou d’élevage pour chaque activité identifiée ont été pris comme valeur-test. Toutefois, nous avons confirmé par enquêtes les résultats obtenus pour chaque contrainte identifiée. En effet, la nature de chaque contrainte peut être conditionnée, soit par la disponibilité des ressources sur le marché, soit par les trésoreries disponibles auprès des agro-éleveurs pour se procurer les ressources en question, soit les deux en même temps. Nous avons utilisé le logiciel S.P.S.S® 14.0 pour le calcul.

Encadré 3: Test sur échantillon unique ou One Sample T - Test.

C’est une méthode statistique qui permet de tester la différence entre la moyenne d’un échantillon et une constante connue ou une valeur hypothétique qu’on appelle « valeur du test ». Le niveau de confiance et la valeur du test sont spécifiés d’entrée. L’étape de calcul s’effectue de la manière suivante :

- Calcul de l’erreur standard moyenne : $S_{\bar{X}} = S_X / \sqrt{W}$
où $S_{\bar{X}}$: Erreur standard moyenne ; S_X : Ecart-type ; W : Nombre total d’observation.
- Calcul de la différence moyenne : $D = \bar{X} - v$
où D : différence moyenne ; \bar{X} : la moyenne de l’échantillon ; v : la valeur du test.
- Calcul de T : $T = D / S_{\bar{X}}$, distribué suivant une loi de Student avec (W-1) degré de liberté.
- Intervalle de confiance pour la différence moyenne :
[$D - t_{W-1, (p+1)/2} S_{\bar{X}}$; $D + t_{W-1, (p+1)/2} S_{\bar{X}}$]
Où p : niveau de confiance du test (95 %) ; $t_{W-1, 1-p/2}$: fractile d’ordre $1 - p/2$ de la distribution t de Student avec (W-1) degré de liberté.
- Le test bilatéral donne, dans l’hypothèse où la différence entre la moyenne de l’échantillon et la valeur de test ne serait due qu’à des fluctuations purement aléatoires, la probabilité (notée si.) pour que cette différence dépasse, en valeur absolue, la valeur absolue de t (valeur de T calculée pour l’échantillon testé).
- Interprétation des résultats : si les limites inférieure et supérieure de l’intervalle de confiance de la différence moyenne sont supérieures à 0 et sig. < 0,05, on rejette l’hypothèse nulle de conformité de la moyenne observée avec la valeur du test et on peut dire que la moyenne observée est significativement au-dessus de la valeur du test. Si elles sont en dessous de 0 et sig. < 0,05, on rejette également l’hypothèse nulle de conformité de la moyenne observée avec la valeur du test et on peut dire que la moyenne observée est significativement en dessous de la valeur du test. Si sig. > 0,05, on accepte l’hypothèse nulle et on peut dire que la moyenne observée est conforme à la valeur du test.

Source : SPSS®, 2005.

IV – 2 – F Le chargement

La charge animale prend en compte un effectif animal (charge d’exploitation en UGB), la taille et la nature des ressources (surface, etc.) à un moment donné (RANDRIANARIVELOSEHENO, 2002). Dans le cadre de notre recherche, l’appréciation de cet indicateur permet d’apprécier l’efficacité de l’optimisation de l’assolement obtenue avec le solveur Ip-Solve. En effet, le chargement aura des impacts importants sur le volume de production et les coûts de production. Le calcul de cet indicateur s’effectuera après la phase d’optimisation de l’assolement.

Le calcul de la charge animale s’effectue suivant la formule :

$$CA \left(\frac{\text{UGB}}{\text{ha}} \right) = \frac{N (\text{UGB})}{S (\text{ha})}$$

Avec :

CA : Charge animale en UBT par hectare ;

N : Nombre d’animaux en UGB. Le coefficient UGB est de 1 pour une vache laitière adulte, 0,3 pour les génisses de moins de 1 an, 0,6 pour les génisses de 1 à 2 ans et les taurillons de moins de 1 an, et 0,8 pour les génisses d’âge supérieur à 2 ans et les taurillons de plus de 1 an ;

S : Surface Fourragère en ha.

V – Conclusion

La démarche de « Conception Orientée Objet » du système d’élevage laitier permet de matérialiser un ou plusieurs objets réels par la création et la description de classe d’objet, ainsi que par la caractérisation de leur structure et de leur comportement (attributs, méthodes). La représentation structurée du modèle se fera en utilisant le langage « Unified Modelling Language » (UML). C’est l’étape de la « Modélisation Orienté Objet ». Ensuite, son implémentation informatique s’opérera à travers un langage informatique dite « orienté-objet ». La « Programmation Orienté Objet » permet de modéliser sur ordinateur les entités du système étudié, par la création et la description de classes informatiques : les classes, caractérisées par leur structure et leurs comportements, représentent des catégories d’entités du système et les objets informatiques quiinstancient ces classes modélisent ces entités. Il est plus facile de se représenter des domaines particuliers du monde réel avec la démarche de conception et de modélisation orienté objet, puisque nous pouvons tenir compte à la fois de toutes les entités existantes associées aux catégories du système modélisé en créant des classes et des objets instanciés. Il en est de même pour les méthodes associées aux actions de ces entités et aux relations existant entre elles. Tout ceci en utilisant pour les classes, pour les attributs, pour les méthodes, la terminologie désignant respectivement les catégories, les caractéristiques, les actions des entités du système réel, rendant ainsi le modèle et le programme de simulation qui en découle plus compréhensible et plus lisible aux experts du domaine.

L’intégration des modèles analytiques à l’intérieur du modèle orienté objet du système d’élevage se fera d’une manière séquentielle lors de la phase de modélisation et d’implémentation informatique. L’approche linéaire est plus facile à résoudre que les approches non-linéaires. Le principal inconvénient de la programmation linéaire demeure son incapacité à reproduire des solutions proches de la réalité. Toutefois, cette incapacité ne veut pas dire que les solutions proposées en termes d’organisation et d’allocation des ressources (mobilisation de la terre, du travail, du capital disponible, etc.) sont fausses, mais que les performances biotechniques et économiques (revenus, etc.) sont surestimées. Comme notre problématique se focalise sur le moyen d’appuyer, avec des bases scientifiques solides, des décisions sur le choix du système de production et des investissements à entreprendre, la programmation linéaire semble être la méthode la plus aboutie pour y répondre. En effet, elle ne souffre d’aucune lacune quant à sa modélisation et à son utilisation et permet de répondre directement à la problématique soulevée. De plus, c’est une méthode sûre et elle est éprouvée depuis des années.

BIBLIOGRAPHIE

- ALARY, V., MEKERSI, S., REDJEL, N., ZEGHIDA, A., BOUGUERA, A., & BENDAOU, M. (2005). *Les obstacles aux transferts technologiques dans les petites et moyennes exploitations agricoles des zones arides et semi arides du Maghreb*. Discussions sur les conditions d'amélioration de la productivité en Algérie, Maroc et Tunisie. Tunis: Femise Network 2 - CIRAD - EMVT/ICARDA . p.234.
- ARNALDI-MARTIN, N., & LHERM, M. (2002). *Impact de scénarios de modification de la PAC sur des élevages bovins allaitants en zone intermédiaire - cas de l'Indre*. Notes et Etudes Economiques N°17. pp.77 – 106.
- BERRO, A. (2001). *Optimisation multi - objectif et stratégies d'évolution en environnement dynamique*. Thèse en vue de l'obtention du doctorat en informatique - Université des Sciences Sociales Toulouse I. p.170.
- BERTALANFFY, L. (1980). *Théorie générale des systèmes*. . Paris: Dunod.
- BISSON - VAIVRES, S., & FICANO, C. (1998). *Outils mathématiques de gestion*. Edition Bréal - Rosny. pp.251 – 270.
- BOOCH, G. (1992). *Conception orientée objets et applications*. Paris: Addison Wesley.
- BOOCH, G., RUMBAUGH, J., & JACOBSON, I. (1999). *The Unified Modeling language user guide*. Addison – Wesley.
- CYERT, R., & MARCH, J. (1963). *A behavioural theory of the Firm*. New Jersey: Prentice - Hall.
- DI SCALA, R. (2004). *Java 2 - Les fondements du langage Java*. [On line] <http://www.Developpez.com/cours/> [consulté le 18 juin 2009]. p. 392.
- FUMEY, M. (2001). *Méthode d'évaluation des risques agrégés: application au choix des investissements de renouvellement d'installations*. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse - Spécialité systèmes industriels. p. 178.
- GOURVEST, H. (2009). *Ip_solve reference guide*. [On line] <http://www.progdigy.com> [consulté le 22 octobre 2010].
- HAZELL, P., & NORTON, R. (1986). *Mathematical programming for economic analysis in agriculture*. New York: MacMillan Publishing Company. p. 400.
- HORVITZ, E. (1987). *Reasoning about beliefs and actions under computational resource constraints*. Proceedings of the 1987 Workshop on Uncertainty in Artificial Intelligence.
- LAROUSSE. (2009). *Le petit Larousse*. Edition Larousse.
- LE BARS, M. (2003). *Un simulateur multi-agent pour l'Aide à la Décision d'un collectif: application à la gestion d'une ressource limitée Agro-environnementale*. Thèse de Doctorat ès-Sciences de l'Université Paris IX Dauphine - UFR Sciences des Organisations. p.234.
- LEVINS, R. (1966). *The strategy of model building in population biology*. American Sciences Vol.54. pp.421 – 431.
- LHOSTE, P. (2001). *L'étude et le diagnostic des systèmes d'élevage*. Atelier de formation des agronomes SCV Madagascar - CIRAD -MIPA. pp.1239 - 1266.
- LHOSTE, P., & ALARY, V. (2002). *Le diagnostic des systèmes d'élevage*. Mémento de l'agronome, CIRAD - GRET - CTA. p.32.
- LOUHICHI, K. (2004). *Application d'un modèle économique dynamique à l'analyse prospective des systèmes d'élevage laitiers à La Réunion*. CIRAD - ELEVAGE. p.111.
- LOUHICHI, K., FERTIL, G., ALARY, V., CHOISIS, J., & LEPETIT, J. (2003). *Apport de la modélisation économique à l'analyse prospective et l'aide au pilotage des systèmes d'élevage laitiers à La Réunion*. CIRAD-EMVT; INRA-SAD; SICALAIT. 4 pages.

- LUGAN, J. (2006). *Lexique de systématique et de prospectives*. Conseil économique et social Midi - Pyrénées - Section prospective. p.97.
- MEYER, B. (1992). *Introduction à la théorie des langages de programmation*. Paris: InterEdition.
- MONTMAIN, J., PENALVA, J., AKHARRAZ, A., CHAPURLAT, V., COUTURIER, P., & CRAMPES, M. (2003). *Choix publics stratégiques et systèmes sociaux - Etat de l'art sur les théories de la décision et méthodologies de l'approche système*. Commissariat à l'énergie atomique, Ecole des Mines d'Alès, Unité de Recherche sur la Complexité - Centre de Recherche LGI2P. p.244.
- MORRISON, D., KINGWELL, R., PANNELL, D., & EWING, M. (1986). *A mathematical programming model of a crop-livestock farm system*. *Agricultural Systems* 20. pp.243-268.
- PAROTT, L. (2006). *Modélisation systématique*. GEO3532 - Modélisation, Département de géographie, Université de Montréal. p.26.
- RANDRIANARIVELOSEHENO, A. (2002). *Système pastoral, PPN d'Ankarafantsika*. Mémoire de DEA – ESSA -forêts. 91 pages.
- ROY, B. (1985). *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Paris: Economica.
- ROY, B. (2000). *Réflexions sur le thème: quête de l'optimum et aide à la décision*. Cahier du Lamsade (167). p.21.
- RUSSEL, S. (1999). *Rationality and Intelligence Foundations of rational agency, applied logic series (Vol. 14)*. Wooldridge M. and Rao A., (Eds.), Kluwer Academics Publishers. pp.11-33.
- SIGAUD, O. (2004). *Introduction à la modélisation orientée objets avec UML*. Support de cours "Génie logiciel et programmation orientée objet" de l'ENSTAT.
- SIMON, H. (1947). *Administrative behavior*. New York: MacMillan.
- SIMON, H. (1983). *Administration et processus de décision (Traduction française de Administrative behavior, 1947)*. Paris: Economica.

CHAPITRE II
L'ANALYSE ET LA MODÉLISATION DU SYSTÈME
D'ALIMENTATION

Le système d'alimentation (ou système fourrager pour les herbivores) constitue un sous-système central dans le fonctionnement des systèmes d'élevage (LHOSTE, 2001). Le système d'alimentation est constitué par l'ensemble des ressources alimentaires disponibles, par les pratiques d'alimentation et par les connaissances et les stratégies que les acteurs du système d'élevage mettent en place pour couvrir les besoins alimentaires du troupeau (LECOMPTE, 2001). Comment analyser et modéliser le système d'alimentation dans le contexte de l'élevage bovin malgache?

Dans le contexte de l'élevage bovin malgache, l'élevage semi-intensif et intensif de bovins laitiers est concentré dans les hauts plateaux, notamment dans la Région du Vakinankaratra qui regroupe environ 35,6% du troupeau laitier et 80% de la production nationale de lait (RABEMANAMBOLA, 2007). Alors qu'il est inexistant dans d'autres Régions (Atsinanana, Atsimo-Atsinanana, Boeny, Sofia, Betsiboka, Melaky, Vatovavy-Fitovinany, Menabe) (MAEP, 2006). Cette situation met en évidence un certain contraste dans le mode d'élevage de bovins local et donc du système d'alimentation. En effet, dans les zones où l'élevage de vaches laitières de races importées est inexistant, l'élevage extensif de zébus malgaches est courant. Cette situation est due principalement aux conditions climatiques de ces zones.

D'une part, des températures en dessous ou au-dessus de la « zone neutre thermique »¹³ altèrent les activités métaboliques des ruminants, diminuent la capacité d'ingestion et la production laitière surtout chez les vaches laitières fortes productrices (INRA, 1978; INRA 1988; NRC, 2001). A titre d'exemple, chez des vaches Holstein au même stade de gestation et de lactation, et soumises à du stress thermique, la capacité d'ingestion des multipares diminue (plus de 22%) par rapport à celle des vaches primipares (9%) (NRC, 2001). Cette diminution est d'autant plus rapide quand l'air est chargé en humidité (INRA, 1978 ; NRC, 2001). Le stress thermique a aussi des répercussions sur la performance de reproduction à cause de la diminution de la concentration d'insuline, des métabolites associés et du glucose, due à la diminution de l'ingestion (TILLARD, 2007). Or, les conditions climatiques des zones citées précédemment sont caractérisées, soit par des climats chauds et humides, soit par des climats chauds et secs. La température moyenne annuelle varie considérablement d'une Région à l'autre, mais change également avec l'altitude. En général, elle se situe autour de 24 à 26°C, avec un maxima pouvant atteindre 33 à 36°C pour certaines Régions comme le Betsiboka, le Menabe ou l'Atsinanana (MAEP & UPDR, 2003). Pour la partie orientale de l'île, le climat est de type tropical chaud et humide à forte précipitation (supérieure à 1.500 mm/an). La pluviométrie moyenne annuelle se situe généralement entre 1.200 et 2.800 mm/an avec un maxima pouvant atteindre 3.000 mm pour certaines Régions comme l'Atsinanana (MAEP & UPDR, 2003). En général, la pluviométrie varie avec le relief et l'altitude de chaque Région (zone littoral, collines de basses et moyennes altitudes, falaise ombrophile, etc.). Pour la partie occidentale, le climat est de type tropical sec, chaud pendant 7 mois et humide pendant 5 mois (saison pluvieuse). La pluviométrie peut être élevée pour les zones montagneuses (entre 1.500 et 1.800 mm/an, cas de Boeny et Betsiboka), mais elle peut également être sèche et répartie irrégulièrement sur seulement 2 à 3 mois (784,6 mm/an pour le Menabe) (MAEP & UPDR, 2003). Il est évident qu'élever des vaches importées de races pures ou à haut de degré de sang (6/8, 7/8) dans de telles conditions est difficile. Toutefois, les efforts entrepris à Madagascar depuis les années 60 ont permis de diffuser dans divers endroits, avec plus ou moins de réussites, des races bovines améliorées issues de croisements divers entre races autochtones et races importées d'Europe (Pie Rouge Norvégienne, Frisonne Française Pie Noire, prim'Holstein, etc.). Ces animaux ont comme avantage de présenter de meilleures performances zootechniques, de meilleurs potentiels de production par rapport à la race locale (le zébu malgache) et de posséder plus de rusticité par rapport aux races pures européennes.

Ce chapitre détaille le processus d'analyse et de modélisation du système d'alimentation des élevages de bovins laitiers dans le contexte malgache. Cette démarche se fait en deux temps :

¹³ Chez les bovins laitiers, la « zone neutre thermique » se situe généralement entre 5° et 20°C mais peut varier selon les races (NRC, 2003). Selon l'INRA, la limite supérieure de la zone neutre thermique est entre 25° et 30°C pour les races européennes (INRA, 1978).

- i. Identifier à l'intérieur du système d'alimentation les objets et leurs attributs, identifier les différentes opérations qui en découlent et établir la visibilité sous forme de diagramme UML (démarche de conception et de modélisation orientée objet). Parallèlement, il s'agit aussi de déterminer l'ensemble des activités et de définir les différentes contraintes dans la démarche de formulation de la programmation linéaire. L'étape d'analyse et de modélisation a été faite avec une approche directe sur terrain soit par observation directe des pratiques d'exploitation, soit par enquête sous forme d'entretien ;
- ii. Estimation du rendement en biomasse, de la valeur bromatologique et nutritive des fourrages pour analyser la potentialité de ces plantes en tant qu'aliment pour les ruminants. La connaissance des caractéristiques physico-chimiques sera utile pour avoir une vision claire du potentiel de chaque plante et établir le plan de rationnement dans le montage des scénarii de simulation. Depuis des années, l'une des utilisations classiques de la programmation linéaire est l'optimisation de l'assolement des cultures fourragères pour assurer l'alimentation du troupeau. Les surfaces de cultures doivent être adéquates pour satisfaire les besoins d'entretien et de production des animaux : besoins en énergie, en matières azotées et en minéraux, si possible à moindre coût, même si ce n'est pas toujours le cas. Les besoins des animaux sont connus et peuvent être modélisés à partir de la littérature. En revanche, la valeur nutritive des fourrages doit être estimée à partir des méthodes d'analyse des aliments. Dans cette approche, nous avons également considéré le cas des fourrages provenant des pâturages naturels malgaches pour garantir la généralité du modèle obtenu.

Analyser et modéliser le système d'alimentation dans le contexte de l'élevage bovin malgache

Résumé

Dans la démarche d'analyse et de modélisation orientée objet et de formulation de la programmation linéaire, à partir des observations sur le terrain, trois activités principales ont été retenues. Elles sont basées uniquement sur les cultures fourragères : les fourrages produits et intra-consommés, les fourrages destinés à la vente et la jachère. L'« espèce fourragère » a été définie comme objet principal. A partir de l'analyse des caractéristiques de l'objet principal, nous avons créé 6 classes avec leurs propres attributs et méthodes : la classe « Fourrage pérenne », « Fourrage annuel », « Ensilages de maïs », « Ensilages d'herbe », « Ensilages en Balles rondes enrubannées » et « Foins en bottes ». Ensuite, nous avons défini et modélisé les relations qu'elles ont avec d'autres classes. Pour chacune des six classes citées précédemment, 3 classes supplémentaires qui regroupent les rubriques de coûts pour tous les fourrages ont été créées : la classe « Achats de fourrages », « Coûts de production avec contraintes des ressources » et « Coûts de production hors contraintes des ressources ». L'analyse des contraintes pour chaque activité végétale a permis d'identifier quatre contraintes principales : l'occupation du sol, les besoins en main d'œuvre, en équipement et en intrants agricoles. La contrainte d'occupation du sol regroupe en tout huit sous-contraintes : l'occupation du sol proprement dite, l'allocation des terres pour les fourrages pérennes et annuels, le maintien des parcelles en fourrages pérennes si la durée de vie n'est pas expirée, l'allocation minimale et maximale des terres pour la jachère, la rotation culturale entre fourrages et jachères, la rotation entre espèces fourragères et l'allocation des terres pour les fourrages intra-consommés et les fourrages vendus. Les contraintes de besoin en main d'œuvre et en équipement agricole ne comportent pas de sous-contraintes. Enfin, la contrainte de besoin en intrants agricoles regroupe quatre sous-contraintes : les disponibilités en semence, en engrais composés, en engrais simples et en engrais organiques. Deux types de silos à ensilage basés sur deux hauteurs différentes ont été modélisés.

Mots-clés : système d'alimentation, modélisation, fourrages, ensilages, contraintes, activités, optimisation.

Abstract

With the process of analyzing and modelling the cropping-system and formulating the linear programming problems, from data acquired on field, three main activities are adopted. They are based on forage growing: forages produced and inner-consumed, forages sold and field-fallow. Forage species is defined as main object. From the characteristics analyzed of this main-object, we have created six classes with their own attributes and methods: « Perennial forage », « Annual forage », « Maize silage », « Grass silage », « Round ball silage » and « Hay ». Then, we have defined and modeled different relationships that they have with other classes. For each of the six classes cited before, we have generated three supplementary classes which regroup the costs heading for all the forages: « Forage bought », « Production costs with resources constraints », « Production costs without resources constraints ». We have identified four main constraints for each crop activity: land-use, labors need, crop-equipment and crop-inputs need. Land allocation constraint regroup eight sub-constraints: real land allocation, land allocation for perennial and annual crop, land transfer for perennial crop if the lifespan is not expired, minimal and maximal land allocation for fallows, crop rotation between forages and fallows, land allocation for forages produced and inner-consumed and for the forages sold and rotation constraint between forage species. There are no sub-constraints for labors and crop-equipment. Last, constraint for crop-inputs regroups four sub-constraints: seed availability, composed-fertilizers, simple-fertilizers and manures availability. We have also constructed two types of silage-silos based on two different heights.

Keywords: cropping system, modelling, forages, silages, constraints, activities, optimization.

I – Introduction

L'intensification de l'élevage passe en premier lieu par celle du système d'alimentation (LECOMPTE, 2001). Toutefois, ce système est rarement optimisé alors que c'est l'une des clés de l'amélioration globale du système d'élevage. Lorsque les problèmes sanitaires sont contrôlés, on constate souvent que la principale contrainte à l'amélioration des élevages d'herbivores réside dans l'amélioration du système fourrager. Cette amélioration remet en cause un certain nombre de techniques, pratiques, modes d'organisation, règles de fonctionnement, d'habitudes, etc. (LHOSTE, 2001). Ainsi, la majorité des modèles évaluant les performances technico-économiques des exploitations laitières est basée principalement sur l'optimisation du système d'alimentation, notamment sur l'optimisation de l'assolement des cultures fourragères et du rationnement du troupeau (HAZELL & NORTON, 1986 ; HART *et al.*, 1998 ; THORNTON, 1998 ; YANG *et al.*, 2000 ; THORNTON & HERRERO, 2001 ; ARNALDI-MARTIN & LHERM, 2002 ; LOUHICHI, 2004, LOUHICHI *et al.*, 2005 ; FLICHMAN *et al.*, 2006 ; ALARY *et al.*, 2005 ; NIDUMOLU, 2007).

II – Méthodes

II – 1 Choix et justification des terroirs d'intervention

Le choix des terroirs d'intervention a été fait selon les critères suivants :

- Les terroirs sont les plus représentatifs possibles des systèmes étudiés et des modes d'élevage de ruminants existants à Madagascar, de façon à pouvoir mener une bonne analyse du système d'alimentation en vue de sa modélisation ;
- Les terroirs sont basés sur un système semi-intensif ou intensif (autrement dit, les agro-éleveurs y pratiquent des cultures fourragères) ;
- Les terroirs doivent permettre de recueillir des données (cultures fourragères, etc.) qui vont servir d'entrées à notre modèle de simulation dans le but de le tester et de le valider.

En se basant sur les critères énoncés ci-dessus, nous avons choisi les terroirs suivants :

- La Commune Rurale d'Imerimandroso : le Chef-lieu se trouve à une longitude de 48°35'44" Est, à une Latitude de 17°25'41" Sud et à une altitude de 800 mètres. La Commune se trouve sur la rive Est du Lac Alaotra, à environ 50 Km au Nord de la ville d'Ambatondrazaka (chef-lieu de la Région Alaotra – Mangoro). Elle est délimitée à l'Ouest par le lac Alaotra, au Nord par les Communes Rurales de Vohitsara et Andromba, à l'Est par la Commune de Antanandava et au Sud par la Commune d'Amparihitsokatra (cf. Annexe n°1, p.ii).
- La Commune Rurale d'Amparihitsokatra : le chef-lieu se trouve à une longitude de 48°34'12" Est, à une latitude de 17°31'41" Sud et à une altitude variant de 800 à 900 mètres. Se situant sur la rive Est du Lac Alaotra, la bifurcation vers le chef-lieu de la Commune se trouve à environ 38 km au Nord de la ville d'Ambatondrazaka et 11,5 km au Sud de la ville d'Imerimandroso. Elle est délimitée à l'Ouest par le lac Alaotra, au Nord par la Commune d'Imerimandroso, à l'Est par les Communes de Sahatavy et Antanandava et au Sud par la Commune d'Ambatosoratra (cf. Annexe n°1, p.ii).

II – 2 Démarche méthodologique

Pour l'analyse du système fourrager, nous nous sommes associés aux techniciens du projet « BRL » (Bas-Rhône - Languedoc) travaillant dans ces deux Communes. Le BRL est un projet de développement rural, un des maîtres d'œuvre du projet « Mise en valeur et Protection des Bassins Versants du Lac Alaotra » ou « BV LAC »,

rattaché au Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage. Son activité consiste entre autres à diffuser les techniques de Semis direct sur Couverture Végétale (S.C.V) auprès des paysans proches des bassins versants du Lac Alaotra. Le choix de cette démarche a été surtout motivé par la longue expérience acquise depuis plus de dix ans par les techniciens en matière de cultures fourragères.

Le choix des systèmes de cultures analysés a été fait selon le type de culture pouvant servir d'aliment de base pour les ruminants. Pour cela, nous avons retenu :

- ✓ Un système à base de *Stylosanthes guianensis* ;
- ✓ Un système à base de *Brachiaria brizantha cv. Marandu* ;
- ✓ Un système à base de riz pluvial (*Oryza sativa*) ;
- ✓ Un système à base de maïs (*Zea mays*) cultivé en association avec des légumineuses volubiles (*Vigna unguiculata, Dolicos lablab sp.*).

Dans le cadre de cette recherche, nous nous sommes intéressés à l'analyse de l'itinéraire technique préconisé par les techniciens de BRL. Ces analyses ont servi à la modélisation du système d'alimentation et à la construction de scénarios de simulation pour tester et valider le modèle biotechnique.

La démarche méthodologique comprend deux volets entrepris d'une manière séquentielle :

- ✓ Formulation de la programmation linéaire ;
- ✓ Conception Orientée Objet ;

Chaque démarche a sa propre méthode d'analyse.

II – 3 Méthodes d'analyse et de modélisation

II – 3 – A Choix des parcelles

Pour le choix des parcelles suivies, les critères suivants ont été posés :

- ✓ Les agro – éleveurs, propriétaires des terrains, doivent avoir un bon niveau de technicité et d'expérience (3 ans minimum) sur les cultures fourragères ;
- ✓ Les personnes enquêtées représentent la diversité des profils des agriculteurs de la région. Pour cela, la possession de troupeaux de bovins a été posée comme critère de choix étant donné que ces agro-éleveurs ont une bonne pratique et une bonne connaissance sur l'affouragement et les cultures fourragères ;
- ✓ Que les agro-éleveurs aient un minimum de niveau d'éducation pour pouvoir répondre à certaines questions se rapportant à leur pratique d'exploitation (pour cela l'hypothèse de travail posée est qu'ils aient effectué des études primaires) ;
- ✓ Que les parcelles choisies soit les plus représentatives possible des profils édaphiques des faciès de la région (plateau sommital de collines, flancs de collines, bas de pentes, baiboho, etc.).

Le nombre total de parcelles choisies était fixé à 48. Ces 48 parcelles appartenaient à 32 agro-éleveurs qui satisfaisaient aux critères sus mentionnés pour les deux communes étudiées.

II – 3 – B Les méthodes d'analyse et de modélisation

L'étape d'analyse a été effectuée avec les agro-éleveurs directement sur le terrain, soit par observation directe, soit sous forme d'enquête, au fur et à mesure de l'avancée de l'itinéraire technique préconisé par les techniciens (cf. figure 6).

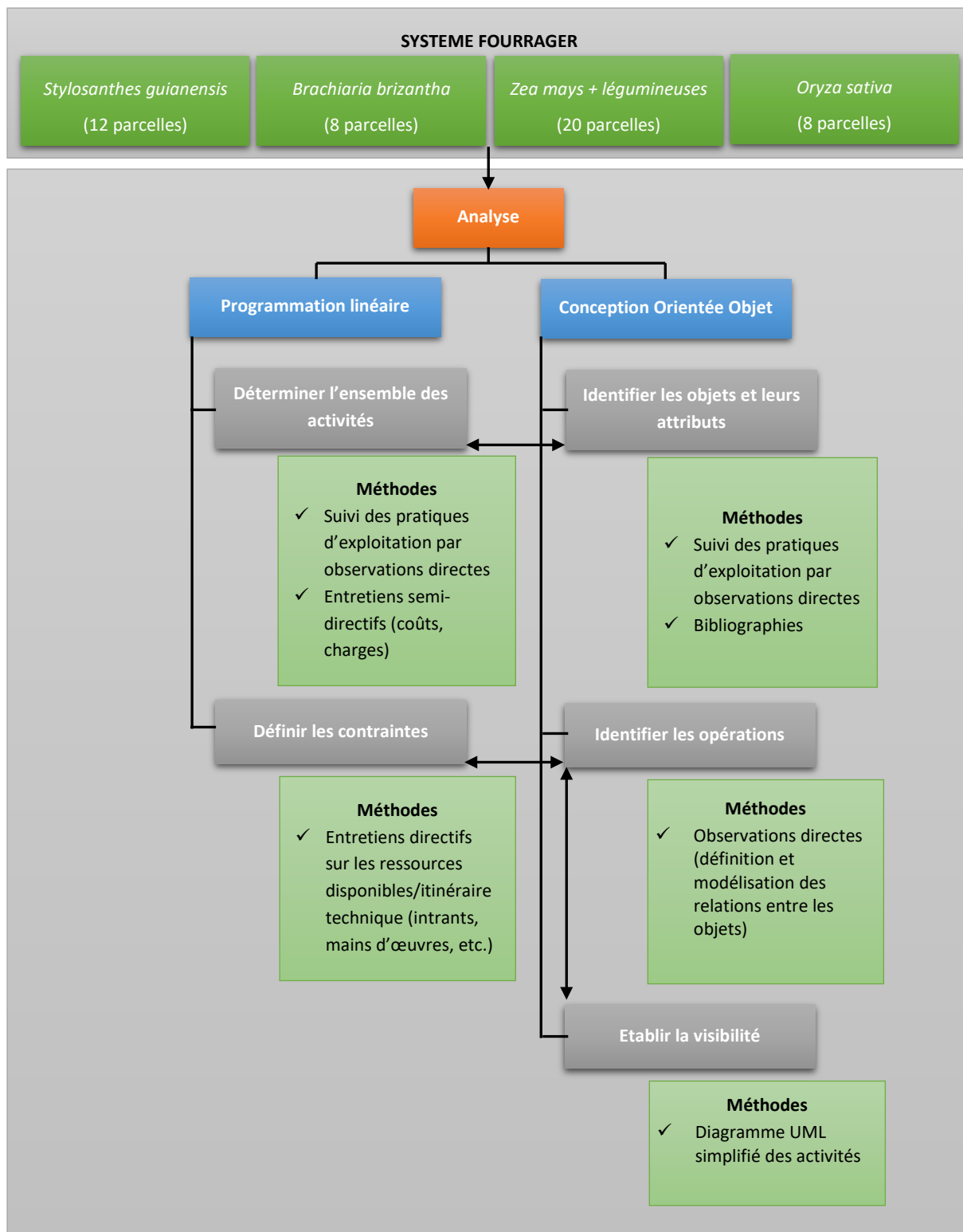


Figure 6 : Analyse et modélisation du système d'alimentation.

II – 3 – C Définition des contraintes

Pour la définition des contraintes liées aux différentes activités fourragères, nous avons combiné la statistique descriptive (moyenne, variance, écart-type) avec la méthode statistique de « Test sur échantillon unique » (ou One Sample T – Test). Un intervalle de confiance (au niveau de confiance de 95 %) a été fixé pour la différence entre la valeur moyenne sur l'échantillon et une valeur-test. Les coefficients techniques préconisés par les techniciens de BRL, pour chaque activité identifiée, ont été pris comme valeur-test.

II – 3 – D La modélisation des ensilages

Trois types d'ensilage ont été considérés pour la modélisation : l'ensilage de maïs, l'ensilage d'herbe (espèces autres que le maïs) et l'ensilage d'herbe (espèces autres que le maïs) en balles rondes enrubannées. Les deux premiers sont conservés dans des silos – couloirs enterrés tandis que le dernier utilise des balles rondes enrubannées (BRE).

Pour le calcul de la densité des ensilages d'herbe, nous avons utilisé l'outil informatique sur tableur Microsoft® Excel disponible sur le site internet de l'Institut de l'Élevage (INSTITUT DE L'ELEVAGE, 2009). Cet outil permet de calculer la densité des ensilages en précisant la hauteur (en mètre) des silos-couloirs et la teneur en matière sèche (en pourcent) de l'espèce fourragère utilisée. Pour notre modèle, le calcul a été fait pour deux hauteurs de silos différents : 1 et 2 mètres, en faisant varier la teneur en matière sèche de 1 à 100%. La fonction « régression linéaire multiple » du logiciel S.P.S.S® 14.0 a été choisie pour trouver l'équation de régression permettant d'exprimer la valeur de la Densité (exprimée en Kg MS/m³) en fonction de la teneur en matière sèche (exprimée en %) et de la hauteur du silo (en mètre).

Pour l'ensilage de maïs, un paramètre supplémentaire a été spécifié avec l'outil de l'Institut de l'Élevage pour calculer la densité : le taux d'amidon (en pourcent de la matière sèche de la plante entière). Même si la teneur en amidon du maïs plante entière varie en général de 16 à 30% de la matière sèche selon le stade de végétation (INRA, 1988), pour des raisons de commodité sur l'utilisation du modèle, les mêmes procédures que précédemment ont été appliquées, mais cette fois-ci en faisant varier la teneur en matière sèche et le taux d'amidon de 1 à 100%. La fonction « régression linéaire multiple » du logiciel S.P.S.S® 14.0 a été utilisée pour trouver l'équation de régression permettant d'exprimer la valeur de la Densité (exprimée en Kg MS/m³) en fonction de la teneur en matière sèche (exprimée en %), de la teneur en amidon (en % de la matière sèche) et de la hauteur du silo (en mètre).

Pour les ensilages d'herbe en balles rondes enrubannées, il s'agit de trouver une équation de régression permettant de prédire le poids sec par balle ronde (exprimé en Kg MS/BRE) en fonction de la teneur en matière sèche (exprimée en %). Les résultats obtenus à l'île de la Réunion ont été pris comme référence étant donné que cette technique n'est pas encore utilisée à Madagascar (cf. Annexe n°2, p.iv). L'estimation de l'équation de régression a été faite avec le logiciel S.P.S.S® 14.0 en utilisant la fonction « Curve estimation » suivant quatre modèles (linéaire, quadratique, logarithmique et exponentiel) et nous avons choisi celle qui a le coefficient de détermination le plus élevé. Toutefois, si plusieurs équations ont ce coefficient de détermination maximal, le modèle le plus simple a été choisi. Ainsi, le modèle linéaire est priorisé sur le modèle quadratique et le modèle quadratique sur les modèles logarithmique et exponentiel. Le niveau de confiance pour la prédiction a été fixé à 95%.

II – 3 – E La modélisation du silo à ensilage

Le silo à ensilage fait partie intégrante du système biotechnique de production. Pour la modélisation du silo à ensilage, nous nous sommes inspirés des recommandations et des données techniques du « Guide pratique de construction de bâtiments d'élevage de bovins » élaboré par la Chambre d'agriculture d'Auvergne, en France (LAGRANGE, et *al.*, 2006). Pour la modélisation proprement dite, deux logiciels informatiques ont été utilisés :

- ✓ Le logiciel Autodesk® Robot® Structural Analysis Professional 2010 - 2015 pour le calcul de la structure en béton armé des silos à ensilage enterrés.
- ✓ Le logiciel Autodesk® AutoCAD® 2004 - 2007 pour la modélisation du plan en 3D du silo.

Le silo-type modélisé a été ensuite intégré dans notre modèle informatique pour faciliter le calcul des coûts du silo à partir des prix des différents matériaux de construction.

III – Résultats

III – 1 Détermination de l'ensemble des activités

Les activités végétales sont constituées principalement par les cultures fourragères. La destination de la production est de deux sortes : l'affouragement du troupeau de ruminants et/ou le paillage du sol pour les cultures en SCV. Sur certains systèmes de production, les fourrages servent de couvertures vives pour des cultures vivrières comme le manioc, le riz ou le maïs. Dans le contexte malgache, les fourrages sont rarement vendus. Il n'y a pas d'agriculteur ou d'agro-éleveur spécialisé dans la production et la vente de fourrages. Toutefois, dans les zones d'élevage de bovins des hauts-plateaux malgaches (Vakinankaratra, Analamanga), l'achat de fourrages est une pratique courante pour les exploitations de tailles moyennes (KASPRZYK, 2008). Dans la zone de notre recherche, l'achat ou la vente de bottes de paille est une pratique que l'on retrouve de temps en temps pour les cultures pluviales en SCV.

Ainsi, dans le cadre de notre modélisation, trois activités principales ont été retenues :

- ✓ Les fourrages produits et intra-consommés ;
- ✓ Les fourrages vendus ;
- ✓ La mise en jachère des terres, qui constitue également une activité car elle fait partie intégrante de l'assolement et influe sur le mode d'occupation du sol et sur la rotation culturale.

III – 2 Identification des objets et de leurs attributs

Comme les activités concernent les espèces fourragères, nous pouvons en déduire que chaque espèce fourragère constitue un objet. Les six attributs principaux retenus sont :

III – 2 – A L'espèce fourragère

Le choix d'une espèce fourragère varie avec l'objectif de l'exploitant (paillage pour les cultures en SCV, fourrage pour le troupeau, etc.), l'importance de la culture par rapport aux cultures vivrières, les conditions du milieu (types de sol, climat, etc.) et les ressources disponibles (humaines, matérielles, pécuniaires, foncières, etc.).

III – 2 – B La durée de vie des fourrages

Une espèce fourragère peut être pérenne ou annuelle. Dans la zone de notre recherche, *Stylosanthes guianensis* et *Brachiaria brizantha* sont les seuls fourrages pérennes cultivés. Les parcelles sont laissées en jachère pendant 3 ans, ensuite les fourrages sont tués avec de l'herbicide (glyphosate) et vont constituer une couverture morte, soit pour la culture de riz pluvial, soit pour la culture de l'association maïs – légumineuses volubiles. Pour les agro-éleveurs, les parcelles sont pâturées par les bovins pendant cette période de jachère. Il faut noter que cette durée de 3 ans est liée à la pratique du semis direct sur couvertures végétales. En réalité, la durée de vie des parcelles cultivées avec du fourrage pérenne dépend aussi des stratégies de l'éleveur, des variétés implantées, du degré d'entretien et du mode d'exploitation ou de récoltes des parcelles. Pour l'exploitation des parcelles en tant que pâturage pour les bovins, cette durée peut aller de 5 à 7 ans, voire plus, selon le degré d'entretien (FIFAMANOR, et al., 2007). Des fourrages comme le *Brachiaria spp.* peuvent se multiplier par resemis naturel par graines (HUSSON, et al., 2008) et peuvent durer plusieurs années.

Le coût d'implantation ou de renouvellement d'une parcelle de fourrage pérenne est considéré comme un investissement car il affecte la structure de production de l'exploitation pendant quelques années et est amortissable selon la durée de vie des parcelles. En revanche, le coût d'implantation de fourrage annuel et les dépenses d'entretien engagées par les parcelles de fourrages pérennes pendant leur exploitation en tant que pâturage sont considérés comme de simples charges d'exploitation et ne sont pas amortissables.

III – 2 – C Les modes et les périodes d'exploitation

Les récoltes et les périodes d'utilisation diffèrent d'un endroit à l'autre et suivant la saison. Les pâturages peuvent être pâturés ou fauchés plusieurs fois pendant l'année. Ainsi, les fourrages (pérennes ou annuels) peuvent être exploités en verts ou sous forme conservés. Les modes de conservation peuvent se faire soit par voie sèche (foin, paille), soit par voie humide (ensilage). Nous pouvons donc classer les fourrages en deux catégories en fonction du mode d'exploitation :

- Les fourrages verts ;
- Les fourrages conservés ou stockés.

Le mode d'exploitation et les périodes d'utilisation sont considérés comme des attributs puisqu'ils nous renseignent sur les aliments disponibles à chaque période de l'année.

III – 2 – D Les rendements en biomasse fourragère et les valeurs nutritives

Les rendements fourragers varient suivant les périodes de récolte. Il en est de même pour la valeur nutritive des fourrages. Pourtant, la connaissance de ces deux paramètres est primordiale afin de garantir une ration alimentaire optimale pour satisfaire les besoins du troupeau. Le rendement et la valeur nutritive des fourrages offerts doivent être mis en adéquation avec les besoins nutritifs et la capacité d'ingestion du troupeau. Compte tenu de ces objectifs, les attributs les plus importants à considérer sont :

- Les rendements en matière sèche (kg MS/ha) ;
- Le taux de matière sèche (en pourcent, %) ;
- Les valeurs énergétiques (UFL, UFV) ;
- Les valeurs azotées (PDIN, PDIE, MAD) ;
- Les valeurs d'encombrements (VEL, VEB) ;

- Les valeurs minérales (Calcium, Phosphore).

III – 2 – E Le coût de production

Concernant le coût de production, nous nous sommes focalisés principalement sur l'aspect économique des productions fourragères. Le coût de l'alimentation des bovins est basé principalement sur le coût d'achat et de production de fourrages. Ces rubriques de coûts intéressent aussi bien les fourrages exploités en verts que les fourrages conservés.

III – 2 – F Le milieu physique

Les contraintes du milieu influencent la croissance et le développement des plantes et conditionnent leur adaptabilité. Il faudrait connaître l'écologie et les besoins de chaque plante. Pour cela, le besoin en pluviosité annuelle minimale et maximale (mm/an) et le coefficient cultural de la plante qui caractérise le besoin en eau de la plante en tenant compte de l'évapotranspiration spécifique de la culture (ETPc) par rapport à l'évapotranspiration potentielle de référence (ETPo), ont été retenus comme attributs.

III – 3 Représentation UML simplifiée

Six (6) classes de fourrages ont été créées : la classe « Fourrage pérenne », « Fourrage annuel », « Ensilages de maïs », « Ensilages d'herbe », « Ensilages d'herbe en Balles Rondes Enrubannées (BRE) », « Foins en bottes ». Toutes ces classes sont instanciées à partir d'une classe principale « Fourrages » (cf. Figure 7, p.39). Les deux premières classes regroupent les fourrages pâturés ou fauchés en verts et non – stockés, tandis que les quatre autres regroupent les fourrages conservés. Pour chacune des six classes sus mentionnées, nous avons associé 3 classes supplémentaires qui regroupent les rubriques de coûts pour tous les fourrages. Nous distinguons : la classe « Achats », « CoûtsP » et « CoûtsA » (cf. Figure 7, p.39). La classe « CoûtsP » regroupe les rubriques de coûts pour les fourrages pérennes et « CoûtsA » pour celles des fourrages annuels. Ces trois classes sont instanciées pour chaque type de fourrages (pérennes, etc.). La classe « Achats de fourrages » regroupe tous les achats de fourrages (en verts ou conservés). Pour chacune des classes « CoûtsP » et « CoûtsA », nous avons instancié deux classes filles supplémentaires : « Coûts de production avec contraintes de ressources », « Coûts de production hors contraintes de ressources » (cf. Figure 8, p.40). La classe « Coûts avec contraintes de ressources » regroupe toutes les rubriques de coûts de production dont les ressources disponibles sont limitées, c'est-à-dire assujetties à certaines contraintes comme la disponibilité en mains d'œuvre ou encore la disponibilité en engrais. La classe « Coûts de production hors contraintes de ressources » rassemble les autres coûts de production (herbicides, etc.). La figure 8 (cf. p.40) représente la classe « Fourrage pérenne » avec les classes supplémentaires qui y sont associées. La représentation des cinq autres classes est reportée en annexe (cf. Annexe n°3, p.iv). Pour les classes instanciées à partir de « CoûtsA », les attributs « Quantité » et « valeurs » sont de taille unique parce qu'en tant que plante annuelle, les rubriques de coûts sont les mêmes quel que soit l'année de simulation. Pour les autres fourrages conservés, l'espèce utilisée peut être annuelle ou pérenne, alors ces attributs sont des tableaux de dimension 10 (pour une durée de simulation de dix ans). Une classe supplémentaire a été créée pour les aliments concentrés (cf. figure 9, p.41). Pour notre modèle informatique, nous supposons que les aliments concentrés sont systématiquement achetés à l'extérieur de l'exploitation et que la quantité achetée annuellement par type de concentré est fixe tout au long de la durée de la simulation.

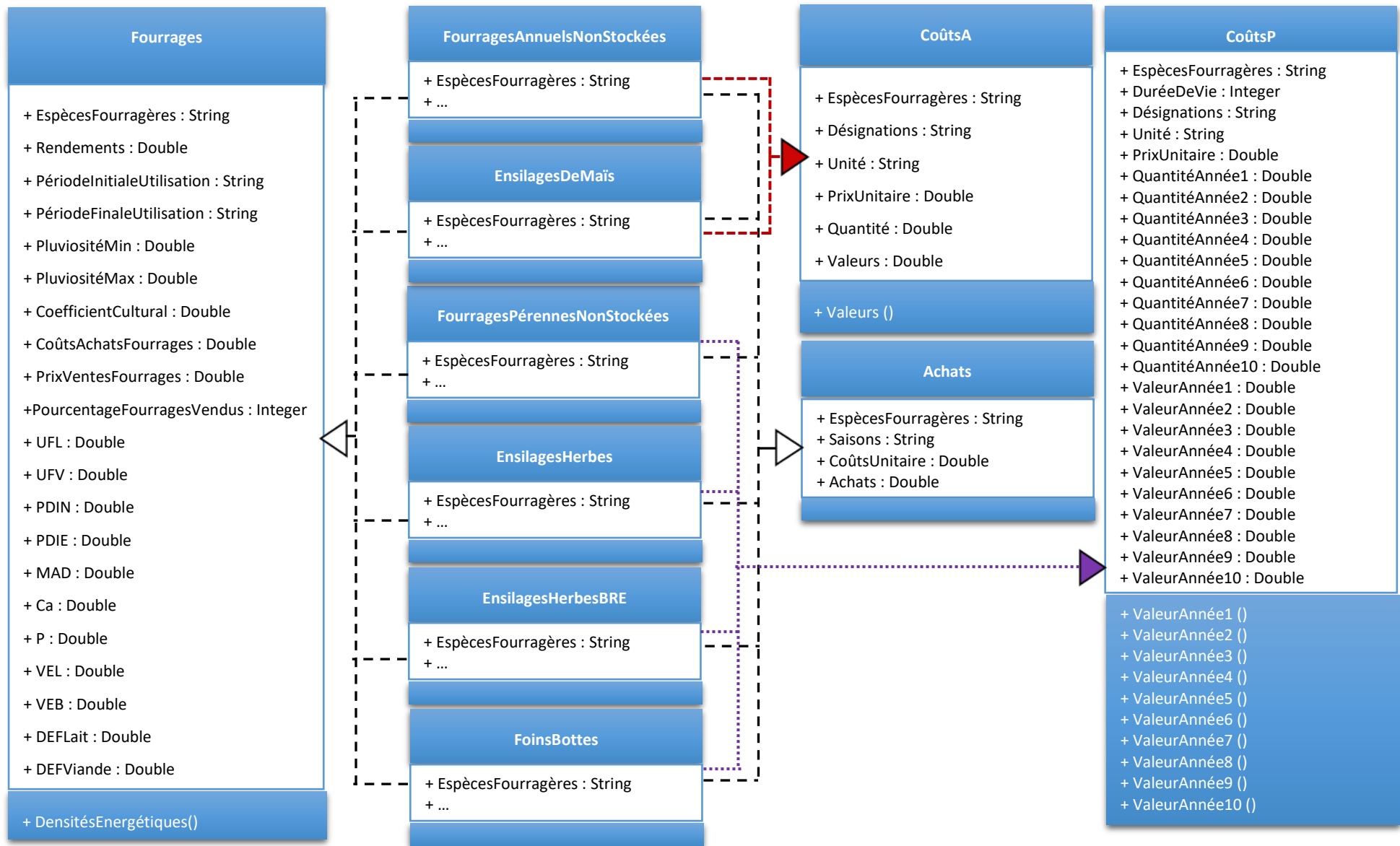


Figure 7 : Diagramme de classes du système d'alimentation.

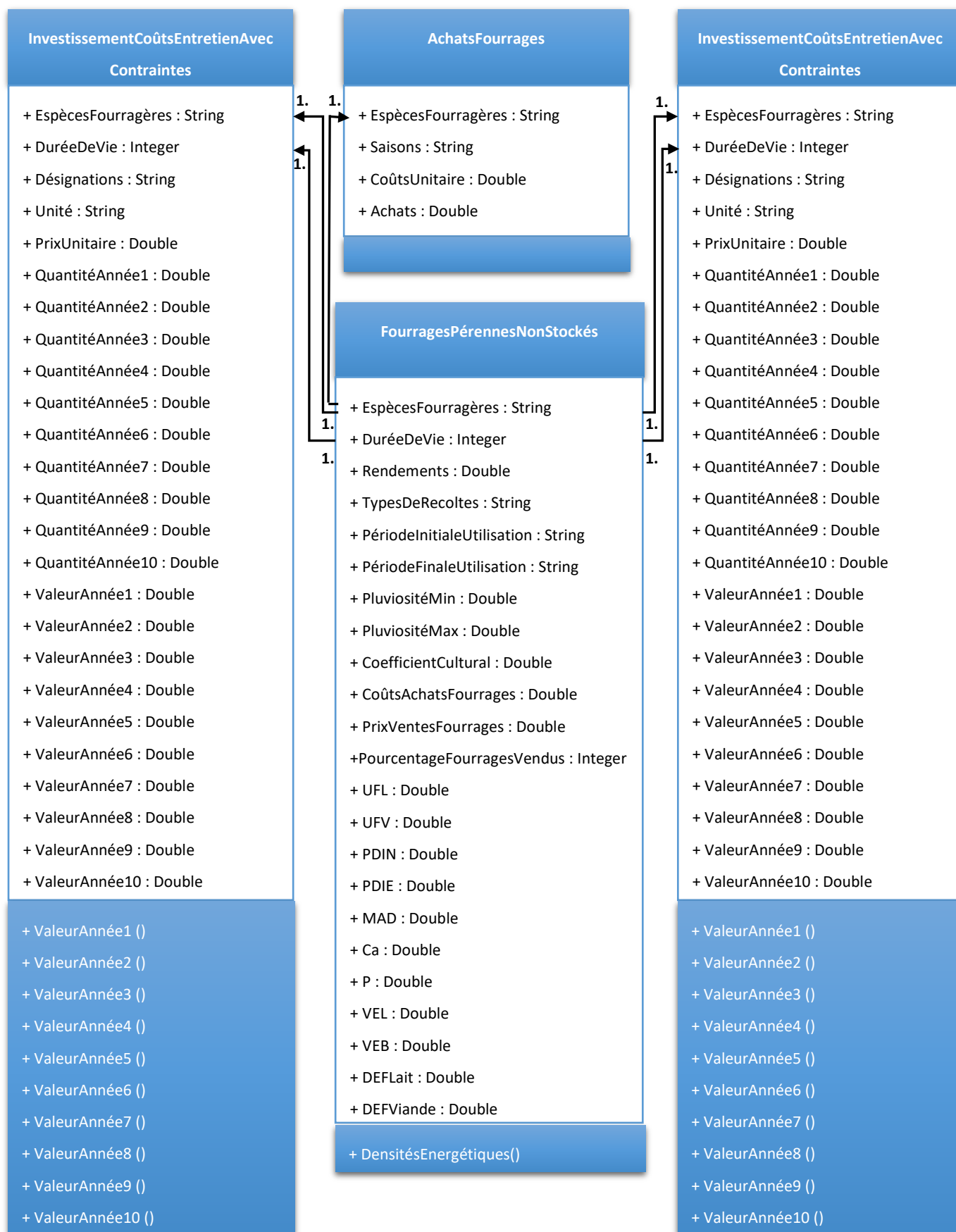


Figure 8 : Diagramme UML du système d'alimentation (fourrages pérennes non – stockés).

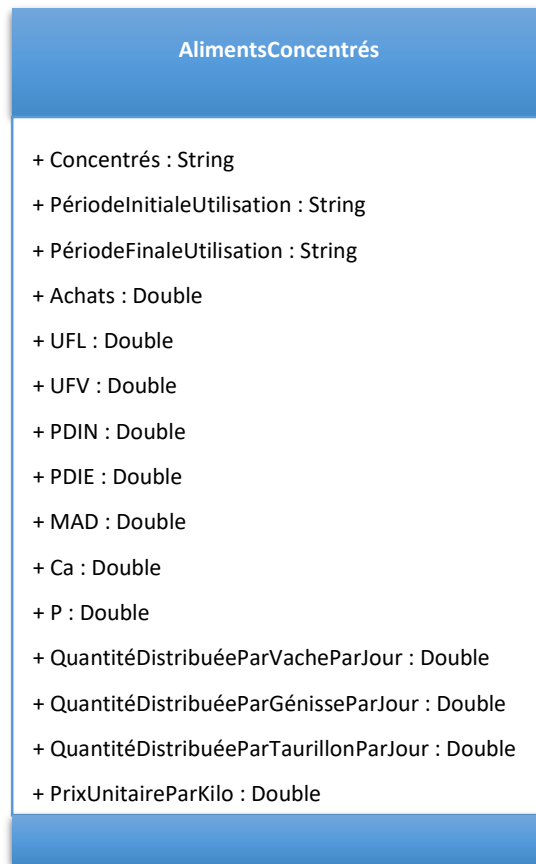


Figure 9 : Classe UML du système d'alimentation (concentrés).

III – 3 – A Hypothèses de travail

Les hypothèses de travail suivantes ont été posées sur le modèle du système d'alimentation :

- Pour les fourrages conservés (ensilages d'herbes, en BRE et foins), les fourrages utilisés peuvent être annuels ou pérennes.
- Dans les entrées du modèle, les fourrages pérennes sont ceux qui ont une durée de vie supérieure à 1 an. Cette durée sera toujours égale à 1 pour les fourrages annuels.
- Nous ne prenons pas en compte l'inflation et nous supposons que les coûts et les bénéfices resteront dans les mêmes proportions tout au long de la simulation. Les prix sont également constants tout au long de la simulation.
- La durée de la simulation des coûts de production (avec ou sans contraintes de ressources) est de 10 ans.
- Les quantités de fourrages (verts et/ou conservés) achetées annuellement sont constantes tout au long de la durée de simulation (s'il y a eu lieu).
- La période d'utilisation de chaque espèce fourragère coïncide avec la période de vente de celle-ci, autrement dit nous supposons que si une partie des fourrages produits est vendue, cette vente s'effectuera durant la même période que celle au cours de laquelle on les exploite comme aliments des bétails au sein de l'exploitation.

III – 3 – B Représentation UML simplifiée des ressources disponibles

Les ressources sujettes à des contraintes de disponibilité constituent les variables auxiliaires des problèmes d'optimisation linéaire classiques de recherche opérationnelle. En tenant compte des analyses statistiques réalisées à partir des données obtenues sur terrain, nous réalisons que ces ressources constituent également des objets car elles sont étroitement liées à toutes les activités végétales et ceci quelques soient les contraintes considérées. Autrement dit, ces ressources disponibles concernent tous les facteurs de production effectivement liés au système fourrager. Parmi ceux-ci, nous avons la classe (cf. Figure 10, p.43) :

- ✓ « Saisonnalité » : permet d'instancier le nombre de périodes et la durée de chaque période au cours d'une année d'exercice ;
- ✓ « Espèces_Fourrages » : c'est la classe mère à partir de laquelle toutes les espèces fourragères (la classe « Fourrages ») utilisées dans la simulation seront instanciées (cf. Figure 7, p.39). Nous avons une multiplicité de « 1 » à « 0..1 » qui signifie que chaque espèce fourragère instanciée n'est pas forcément utilisée dans la simulation. Par contre, pour chaque espèce fourragère utilisée correspond une et une seule semence et au moins un (1) échantillon de l'espèce fourragère considérée ;
- ✓ « Echantillons » : cette classe instancie les valeurs bromatologiques et nutritives des espèces fourragères disponibles pour le projet ;
- ✓ « Semences » : permet d'instancier la quantité de semences disponibles par espèces fourragères, par période et par an ;
- ✓ « Parcellaire » : permet d'indiquer les superficies disponibles en propriété ;
- ✓ « Allocation » : est instanciée en deux classes de superficies : en « Fermage » et « Location » ;
- ✓ « Pluviosité » : permet d'instancier la pluviosité minimale et maximale disponible du milieu.
- ✓ « Évapotranspiration » : permet d'instancier l'évapotranspiration minimale, maximale et potentielle (ETo) disponible du milieu ;
- ✓ Les classes « Mains d'œuvre » et « Equipements » permettent d'instancier le nombre d'heure de mains d'œuvre et d'équipements (traction, etc.) disponible par période et par an ;
- ✓ « Fertilisations » : renseignent sur la quantité d'engrais (organiques, simples et binaires, chaux, composés, etc.) disponibles par période et par an ;

Les ressources disponibles doivent être considérées avant la définition des contraintes d'optimisation car les informations concernant ces dernières seront placées dans le côté main droite lors de l'écriture des contraintes d'optimisation. D'où, la nécessité de les modéliser préalablement en tant qu'objets UML.

III – 4 Définition des contraintes

III – 4 – A La saisonnalité des activités végétales

Les activités végétales sont saisonnières et sont confinées à des périodes de l'année où la température et la pluviométrie sont optimales pour la croissance des plantes (HAZELL & NORTON, 1986). La disponibilité des ressources (main d'œuvre, intrants agricoles, etc.) varie donc avec les saisons. Le modèle de système d'alimentation prend en compte cette saisonnalité des activités végétales. Généralement, une période est assimilée à une année. Pour notre cas, le concept de « période » est associé aux saisons. Le nombre de périodes et la durée de chaque période au cours d'une année d'exercice est défini d'entrée du modèle par l'utilisateur. Au maximum, nous pouvons spécifier 12 périodes correspondant à 12 mois, soit une année.

CHAPITRE II – L'ANALYSE ET LA MODELISATION DU SYSTEME D'ALIMENTATION

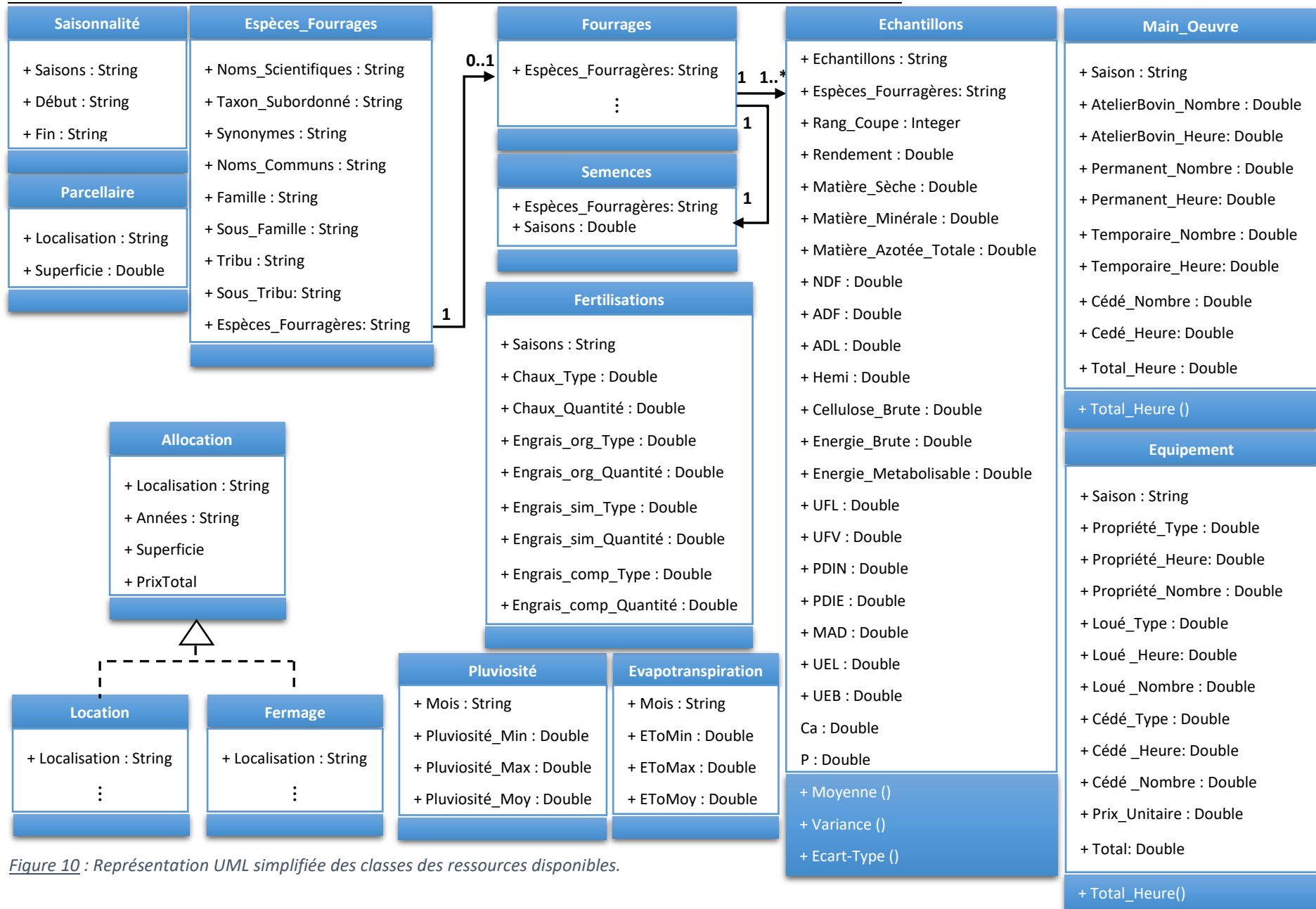


Figure 10 : Représentation UML simplifiée des classes des ressources disponibles.

Mais nous pouvons également cumuler plusieurs mois dans une seule période. Il n'est pas obligatoire que toutes les périodes aient des durées égales. A titre d'exemple, nous pouvons spécifier pour chaque année d'exercice deux périodes de 8 mois pour l'une et de 4 mois pour l'autre ou encore de 6 mois chacune. Le mois de début de la période initiale doit correspondre au mois de début de la date de simulation, qui sera également définie d'entrée du modèle par l'utilisateur.

En revanche, la période d'utilisation des fourrages en tant qu'aliment pour le troupeau ne correspond pas forcément à cette saisonnalité des activités végétales. Une espèce fourragère peut être exploitée pendant plusieurs mois, et donc parfois pendant plusieurs périodes. Le modèle prend en compte cette éventualité. Ainsi, pour chaque espèce fourragère, le modèle calcule le nombre de jours d'utilisation à partir du mois de début de période et du mois de fin de période, qui sont définis d'entrée. Si le mois de fin de période est postérieur au mois de début de période, le modèle considère que la période est incluse dans une même année calendaire. En revanche, si le mois de fin est antérieur au mois de début, le modèle considère que la période s'étend sur deux années consécutives.

Les contraintes rendent compte des limites techniques, financières, économiques, politiques et environnementales au niveau des différentes activités végétales. En termes de production fourragère, les contraintes concernent généralement les différents facteurs de production tels que le facteur terre, le facteur travail (main d'œuvre et équipements), et les intrants (semences, fertilisations, etc.).

III – 4 – B Contraintes d'occupation du sol

La surface emblavée au niveau de chaque exploitation dépend entièrement de la disponibilité en terre cultivable (en fonction du relief, de la nature du sol, du mode d'irrigation, etc.) et de la capacité financière des agro-éleveurs à acheter ou louer des superficies supplémentaires. L'enquête auprès des agro-éleveurs a montré que 91,7% des terres sont en propriétés, souvent obtenues en héritage, et 8,3% en fermage ou en métayage. Les terres sont rarement cédées en location et la durée de la location dépasse rarement 1 an par crainte de conflits fonciers. Si l'utilisateur du modèle décide d'inclure la jachère dans l'assolement fourrager, elle sera considérée en tant qu'activité (cf. Figure 11, p.45).

La disponibilité totale annuelle en terre cultivable est définie par :

$$S_{TOTALE_{ye}} = S_{PROPRIETE_{ye}} + S_{FERMAGE_{ye}} - S_{LOUEE_{ye}} \quad (\text{Equation 1})$$

Avec :

ye : année ;

S_{TOTALE} : Surface totale disponible annuellement (en hectare) ;

$S_{PROPRIETE}$: Surface disponible en propriété (en hectare) ;

$S_{FERMAGE}$: Surface prise en fermage, annuellement (en hectare) ;

S_{LOUEE} : Surface cédée en location, annuellement (en hectare).

La surface disponible en propriété, la surface prise en fermage et la surface cédée en location sont définies d'entrée du modèle par l'utilisateur. Pour la contrainte d'occupation du sol, la somme des superficies consacrées à la production fourragère, majorée de la jachère, doit être inférieure ou égale à la disponibilité totale annuelle en superficie cultivable :

$$\sum_{sp,f \in \{fp,fa\}} Xi_{sp,f, ye} + \sum_{sp,f \in \{fp,fa\}} Xv_{sp,f, ye} + J_{ye} \leq S_{TOTALE_{ye}} \quad (\text{Equation 2})$$

Avec :

sp : espèces fourragères ;

fp : fourrages pérennes ;

fa : fourrages annuels ;
 ye : année ;
 Xi : les activités végétales (en hectare) produites et intra-consommées ;
 Xv : les activités végétales (en hectare) produites et vendues ;
 J : la jachère (en hectare) si elle est pratiquée.
 S_{TOTALE} : Surface totale disponible annuellement (en hectare) ;

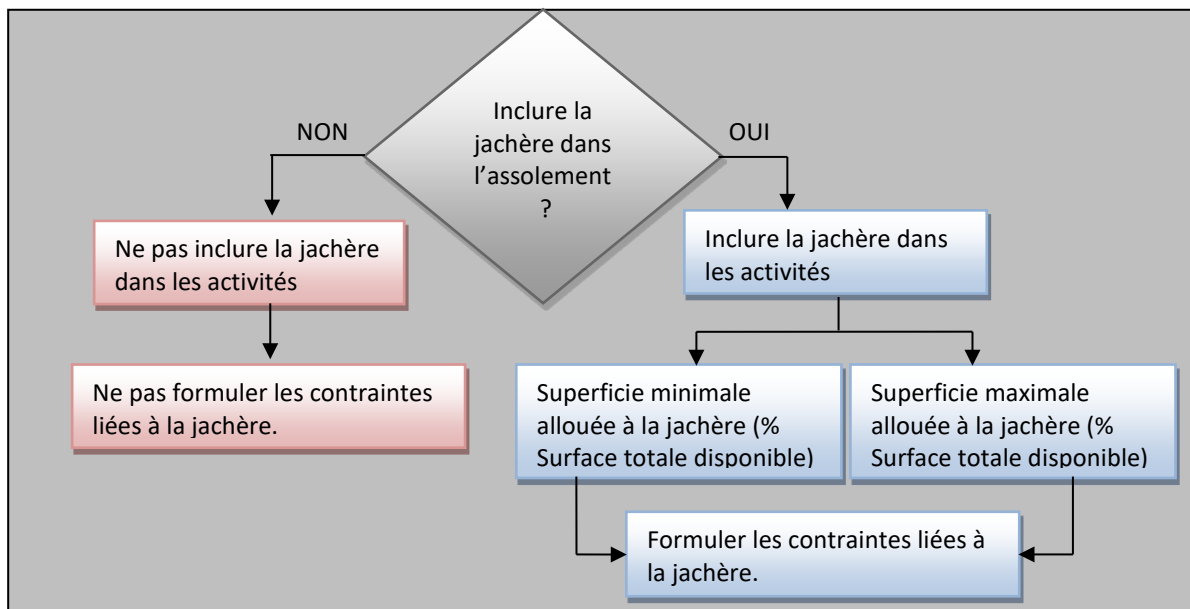


Figure 11 : Structure de décision sur la jachère.

La durée de vie des fourrages influe également sur l'occupation du sol. Les parcelles de fourrages pérennes sont occupées pendant quelques années et ne reviennent dans la rotation culturale qu'une fois que la durée est expirée. Il en est de même avec les jachères. La contrainte d'occupation du sol en fourrage pérenne et annuel est définie par l'inéquation :

$$\sum_{sp,f \in \{fp\}} \%fa. Xi_{sp,fp,ye} + \sum_{sp,f \in \{fp\}} \%fa. Xv_{sp,fp,ye} - \sum_{sp,f \in \{fa\}} \%fp. Xi_{sp,fa,ye} - \sum_{sp,f \in \{fa\}} \%fp. Xv_{sp,fa,ye} - \%fp.J_{ye} \geq 0 \quad (\text{Equation 3})$$

Avec :

%fp : superficie allouée à la culture pérenne (% Surface totale) ;
 %fa : superficie allouée à la culture annuelle (% Surface totale) (%fa = 1 - %fp) ;
 sp : espèces fourragères ;
 fp : fourrages pérennes ;
 fa : fourrages annuels ;
 ye : année ;
 Xi : les activités végétales (en hectare) produites et intra-consommées ;
 Xv : les activités végétales (en hectare) produites et vendues ;
 J : la jachère (en hectare) si elle est pratiquée.

Si la durée de vie des fourrages pérennes à l'année suivante (ye+1) n'est pas dépassée, on maintient la superficie allouée à la culture pérenne de l'année précédente (ye) :

$$\sum_{sp,f \in \{fp\}} Xi_{sp,fp,ye+1} + \sum_{sp,f \in \{fp\}} Xv_{sp,fp,ye+1} = \sum_{sp,f \in \{fp\}} Xi_{sp,fp,ye} + \sum_{sp,f \in \{fp\}} Xv_{sp,fp,ye} \quad (\text{Equation 4})$$

Les superficies minimale et maximale allouées annuellement à la jachère sont saisies d'entrée du modèle par l'utilisateur. La contrainte d'allouer une partie de la superficie totale à la jachère est déterminée par les 2 inéquations suivantes :

$$- \sum_{sp,f \in \{fp,fa\}} \%J_{min} \cdot Xi_{sp,f, ye} - \sum_{sp,f \in \{fp,fa\}} \%J_{min} \cdot Xv_{sp,f, ye} + (1 - \%J_{min}) \cdot J_{ye} \geq 0 \quad (\text{Equation 5})$$

$$- \sum_{sp,f \in \{fp,fa\}} \%J_{max} \cdot Xi_{sp,f, ye} - \sum_{sp,f \in \{fp,fa\}} \%J_{max} \cdot Xv_{sp,f, ye} + (1 - \%J_{max}) \cdot J_{ye} \leq 0 \quad (\text{Equation 6})$$

Avec :

$\%J_{min}$ et $\%J_{max}$: superficie minimale et maximale allouée à la jachère (% Surface totale) ($\%J_{max} = 1 - \%J_{min}$) ;

sp : espèces fourragères ;

fp : fourrages pérennes ;

fa : fourrages annuels ;

ye : année ;

Xi : les activités végétales (en hectare) produites et intra-consommées ;

Xv : les activités végétales (en hectare) produites et vendues ;

J : la jachère (en hectare) si elle est pratiquée.

Les parcelles mises en jachère entrent en rotation avec les cultures fourragères. La contrainte de rotation entre cultures fourragères et jachères est :

$$- \sum_{sp,f \in \{fp,fa\}} Xi_{sp,f, ye} - \sum_{sp,f \in \{fp,fa\}} Xv_{sp,f, ye} + J_{ye} \leq 0 \quad (\text{Equation 7})$$

La quantité de fourrages produits et vendus par espèce fourragère est définie d'entrée du modèle par l'utilisateur (exprimée en pourcentage de la quantité totale produite). La superficie allouée aux fourrages produits et intra-consommés par espèce fourragère est définie par :

$$\sum_{sp,f \in \{fp,fa\}} \%fv \cdot Xi_{sp,f, ye} - \sum_{sp,f \in \{fp,fa\}} \%fpi \cdot Xv_{sp,f, ye} = 0 \quad (\text{Equation 8})$$

Avec :

$\%fv$: fourrages produits et vendus (% quantité totale produite) ;

$\%fpi$: fourrages produits et intra-consommés (% quantité totale produite) ($\%fpi = 1 - \%fv$).

Les espèces fourragères en rotation culturale sont précisées d'entrée du modèle par l'utilisateur. Pour la contrainte de rotation, la culture précédente fournit de la surface à la culture suivante par la relation (Equation 9) :

$$\sum_{sp2,f \in \{fp,fa\}} d1 \cdot Xi_{sp2,f, ye} - \sum_{sp1,f \in \{fp,fa\}} d2 \cdot Xi_{sp1,f, ye} + \sum_{sp2,f \in \{fp,fa\}} d1 \cdot Xv_{sp2,fp,fa, ye} - \sum_{sp1,f \in \{fp,fa\}} d2 \cdot Xv_{sp1,fp,fa, ye} = 0$$

Avec :

sp1 : espèces fourragères de la culture précédente ;

sp2 : espèces fourragères de la culture suivante ;

d1 : durée de vie de la culture précédente ;

d2 : durée de vie de la culture suivante.

III – 4 – C. Contraintes sur les autres facteurs de production

L'analyse des contraintes sur les facteurs de production conduit à identifier les goulets d'étranglement sur leur utilisation et à analyser leur disponibilité à chaque période de l'année. Toutefois, les périodes

d'utilisation se réduisent à quelques mois de l'année seulement et sont relativement courtes pour certains itinéraires techniques, comme le semis (dans le but d'avoir des cultures homogènes sur l'ensemble des parcelles).

III – 4 – C – 1 La contrainte de main d'œuvre

Les besoins en main d'œuvre varient en fonction des itinéraires techniques adoptés pour chaque culture (cf. annexe n°7, p.ix). En conséquence, la disponibilité en main d'œuvre varie suivant les saisons. La concurrence en main d'œuvre est constatée pendant les saisons où plusieurs cultures nécessitent l'intervention simultanée de plusieurs types de main d'œuvre et où les conditions climatiques (température, pluviométrie) favorisent les activités agricoles. Nous avons groupé l'analyse par type de cultures et par opérations culturales. Les opérations culturales ayant des coefficients techniques semblables ont été groupées et analysées ensemble. Ces coefficients techniques sont les temps de travail préconisés par les techniciens de BRL pour chaque activité identifiée et ils sont appelés valeurs-test parce qu'ils sont utilisés comme valeur de référence pour l'hypothèse nulle des tests.

Ainsi, l'analyse de la disponibilité en main d'œuvre pour le labour et les préparations du sol autres que le labour a été effectuée simultanément pour *Stylosanthes guianensis*, *Brachiaria brizantha*, le riz et l'association maïs-légumineuses (cf. annexe n°7, p.ix et n°9, p.xi). Le labour est pratiqué en ouverture que ce soit pour les futures parcelles en SCV ou pour les systèmes traditionnels. Les préparations du sol, autres que le labour, consistent en un décapage du sol à l'angady ou en un émottage et un planage du sol à la herse. Elles comprennent également l'épandage de fumures (fumiers de ferme, NPK 11-22-16). Pour les parcelles de cultures en SCV de plus d'un an, il n'est plus nécessaire de pratiquer le labour. Même si l'utilisation d'herbicide pour le désherbage des parcelles fait partie des options proposées par les techniciens pour la préparation du sol, seul le décapage du sol à l'angady a été pratiqué pour les parcelles en SCV observées dans le cadre de cette étude.

Les résultats obtenus par l'analyse statistique montrent clairement le principal avantage de la pratique des cultures en SCV. En effet, pour les labours, l'intervalle de confiance sur la différence moyenne montre clairement que la quantité moyenne de main d'œuvre disponible est significativement ($p < 0,05$) inférieure à la valeur-test (50 hommes-jour/ha) quels que soient les types de cultures (cf. annexe n°9 ; 9 – 1 – 2, p.xi). Alors que pour les préparations du sol autres que le labour, la disponibilité en main d'œuvre est significativement ($p < 0,05$) supérieure à la valeur-test (15 hommes-jour/ha), sauf pour le riz pluvial où elle est en dessous (cf. annexe n°9 ; 9 – 2 – 2, p.xi). Ces observations s'expliquent par le fait que, dans la zone de l'étude, quel que soit le type de culture, le labour commence avant l'arrivée de la pluie (vers le début du mois d'octobre) et mobilise un nombre élevé de travailleurs. Les parcelles en SCV ne nécessitent pas beaucoup de temps de préparation et ne mobilisent pas beaucoup de main d'œuvre. Leurs préparations commencent tardivement (vers la fin du mois d'octobre - début novembre) par rapport aux labours sauf pour le riz pluvial. La culture du riz est l'activité principale de la Région Alaotra et occupe environ 84,5% des surfaces cultivables (MAEP & UPDR, 2003). L'activité de préparation du sol pour le riz (pluvial, irrigué) est toujours priorisée avant les autres cultures. Elle mobilise donc plus de main d'œuvre par rapport aux autres cultures.

Pour le semis, la moyenne en main d'œuvre disponible est plus ou moins conforme ($p > 0,05$) à la valeur-test pour *Stylosanthes guianensis*, *Brachiaria brizantha* et le riz (cf. annexe n°9 ; 9 – 3 – 2 ; 9 – 3 – 3, p.xii). Pour l'association maïs-légumineuses, elle est significativement ($p < 0,05$) inférieure à la valeur – test (40 hommes-jour/ha) (cf. annexe n°9 ; 9 – 3 – 4, p.xii). La période de semis pour l'association maïs-légumineuses est en concurrence avec celle du riz (mois de décembre).

Les paysans effectuent en général deux sarclages entre le mois de janvier et le mois de mars. Les besoins en main d'œuvre pour le premier sarclage sont plus ou moins conformes par rapport aux valeurs préconisées pour les quatre systèmes de culture (cf. annexe n°9 ; 9 – 4 – 2 ; 9 – 4 – 3 ; 9 – 4 – 4, p.xiii). Pour le deuxième sarclage en revanche, nous constatons que les valeurs observées sont significativement ($p < 0,05$) inférieure à la valeur-test pour *Brachiaria brizantha* et l'association maïs – légumineuses (respectivement de 25 et 30 hommes-jour/ha). Les besoins en main d'œuvre pour le sarclage de ces deux cultures entrent en compétition avec ceux du riz. La riziculture est toujours la priorité des paysans locaux pendant cette période

(entre février et mars). De la main d'œuvre est également mobilisée pour l'épandage de fumures d'entretien (urée) pour le riz pendant cette période.

Pour la récolte, nous nous sommes intéressés uniquement au cas du riz et de l'association maïs – légumineuses étant donné que ce sont ces deux cultures qui mobilisent le plus de main d'œuvre. L'intervalle de confiance sur la différence moyenne pour les récoltes montre que la disponibilité moyenne en main d'œuvre est significativement ($p < 0,05$) inférieure à la valeur du test (respectivement de 27 et 30 hommes-jour/ha) pour le riz et l'association maïs-légumineuses (cf. annexe n°9 ; 9 – 5 – 2 ; 9 – 5 – 3, p.xiv).

A partir de ces observations, nous pouvons dire que les besoins et la disponibilité en main d'œuvre varient énormément en fonction des opérations culturales et de la période pendant laquelle on les effectue. L'introduction des contraintes en main d'œuvre doit donc tenir compte de la saisonnalité des activités. La somme des besoins en heure de main d'œuvre de chaque activité, par période et par an ne doit pas dépasser le nombre d'heure de main d'œuvre total disponible par période et par an :

$$\sum_{sp,f \in \{fp,fa\}} MOi_{sp,f,p,ye} \cdot Xi_{sp,f,p,ye} + \sum_{sp,f \in \{fp,fa\}} MOv_{sp,f,p,ye} \cdot Xv_{sp,f,p,ye} \leq MO_{DISPONIBLE_{p,ye}} \quad (\text{Equation 10})$$

Avec :

MOi : besoins en heures de main d'œuvre par culture produite et intra-consommée, par période et par an ;

MOv : besoins en heures de main d'œuvre par culture produite et vendue, par période et par an ;

MO_{DISPONIBLE} : heure de main d'œuvre totale disponible par période et par an

sp : espèces fourragères ;

fp : fourrages pérennes ;

fa : fourrages annuels ;

p : période ;

ye : année ;

Xi : les activités végétales (en hectare) produites et intra-consommées ;

Xv : les activités végétales (en hectare) produites et vendues.

Le nombre total d'heures de main d'œuvre disponible par période et par an est la somme de la disponibilité en heures de main d'œuvre salariée permanente et de main d'œuvre saisonnière (si besoin) à laquelle il faut retrancher la main d'œuvre cédée à l'extérieur et la main d'œuvre affectée directement à l'atelier bovin :

$$MO_{DISPONIBLE_{p,ye}} = MO_{PERMANENTE_{p,ye}} + MO_{TEMPORAIRE_{p,ye}} - MO_{CEDEE_{p,ye}} - MO_{UGB_{p,ye}} \quad (\text{Equation 11})$$

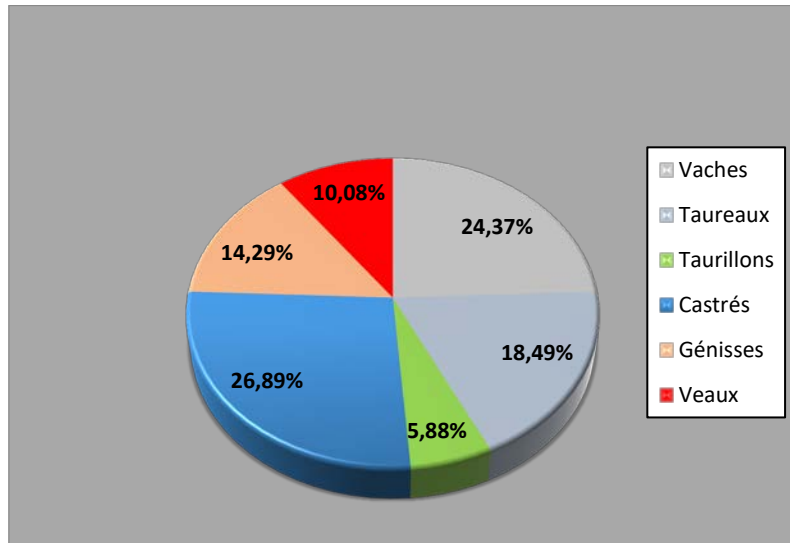
III – 4 – C – 2 La contrainte en équipement agricole

Nous entendons ici par équipement agricole tous les matériels de traction utilisés en culture attelée et/ou motorisée. L'utilisation de la traction animale et/ou mécanique permet de réduire considérablement les temps de travaux agricoles et les besoins en main d'œuvre en culture manuelle.

Sur les 32 personnes enquêtées, seulement 14, soit 43,75%, élèvent des zébus. C'est un élevage à vocation naisseur – production de viande. Le cheptel est dominé par une forte proportion de castrés (26,89%) et de taureaux (18,49%) (cf. Graphique 1, p.49).

Dans la zone d'étude, la traction animale est la plus utilisée pour les travaux agricoles. Sur les 14 éleveurs possédant des zébus, 9 possèdent une charrette, un (1) seul en possède 2 et 4 n'en possède pas. Tous les éleveurs possèdent au moins une charrue et une herse. Sur les 32 personnes enquêtées, un seul possède un motoculteur et notons que c'est la même personne qui possède les 2 charrettes. Les paysans qui ne possèdent pas d'équipements de traction (attelés, motorisés) sont obligés de travailler la terre manuellement, et/ou emprunter gratuitement ou quelques fois louer à ceux qui en possèdent. La traction animale est utilisée surtout pour la préparation du sol (labour, affinage du lit de semences, etc.) et pour le transport d'intrant (fumiers, etc.) et des produits agricoles. En moyenne, le temps des travaux de préparation du sol pour une paire de bœufs

tractant une charrue varie entre 30 à 40 heures par hectare (selon le type de sol et l'accessibilité des parcelles). Pour le seul motoculteur appartenant à une personne de l'échantillon enquêté, nous avons estimé à environ 880 heures par an son temps d'utilisation. Généralement, le propriétaire l'utilise pour la préparation des sols en riziculture inondée (labours, hersage) et pour le transport d'intrants et de produits agricoles.



Graphique 1 : Répartition des troupeaux bovins par catégorie (Commune Imerimandroso et Amparihitsokatra)

De la même manière que les besoins en main d'œuvre, la somme des besoins en heure d'équipement de traction (attelé, motorisé) de chaque activité par période et par an ne doit pas dépasser le nombre d'heure d'équipement total disponible par période et par an :

$$\sum_{sp,f \in \{fp,fa\}} EQi_{sp,f,p,ye} \cdot Xi_{sp,f,p,ye} + \sum_{sp,f \in \{fp,fa\}} EQv_{sp,f,p,ye} \cdot Xv_{sp,f,p,ye} \leq EQ_{DISPONIBLE_{p,ye}} \quad (\text{Equation 12})$$

Avec :

EQi : besoins en heure d'équipement par culture produite et intra-consommée, par période et par an ;

EQv : besoins en heure d'équipement par culture produite et vendue, par période et par an ;

EQ_{DISPONIBLE} : heure d'équipement de traction totale disponible par période et par an ;

sp : espèces fourragères ;

fp : fourrages pérennes ;

fa : fourrages annuels ;

p : période ;

ye : année ;

Xi : les activités végétales (en hectare) produites et intra-consommées ;

Xv : les activités végétales (en hectare) produites et vendues.

Le nombre d'heure d'équipement de traction totale disponible par période et par an est la somme de la disponibilité en heure de traction des équipements en propriété et de la disponibilité en heure de traction des équipements loués, à laquelle il faut retrancher le nombre d'heure de traction des équipements cédés en location :

$$EQ_{DISPONIBLE_{p,ye}} = EQ_{PROPRIETE_{p,ye}} + EQ_{LOUE_{p,ye}} - EQ_{CEDE_{p,ye}} \quad (\text{Equation 13})$$

III – 4 – C – 3 La contrainte en intrant agricole

Comme la contrainte en main d'œuvre et en équipement, la contrainte en intrant agricole est saisonnière et varie avec les opérations culturales pour chaque culture. Pour les parcelles observées dans le cadre

de cette étude, l'utilisation d'engrais composés (NPK 11 – 22 – 16) concerne principalement les cultures vivrières (riz pluvial, association maïs – légumineuses, etc.) mais aussi *Stylosanthes guianensis* et *Brachiaria brizantha* s'ils sont plantés en association avec du riz, du maïs ou du manioc. Un des avantages de *Stylosanthes guianensis* et *Brachiaria brizantha* est leur capacité à s'adapter aux sols acides et peu fertiles et qu'ils ne nécessitent généralement pas d'apport d'engrais (HUSSON, et al., 2008). Toutefois, des restitutions par apport de fumure d'entretien sont recommandées à partir de la deuxième année pour *Brachiaria brizantha*. L'utilisation de fumiers est préconisée pour toutes les cultures. L'urée est utilisée en tant que fumure d'entretien pour le riz. L'utilisation d'herbicide (2-4. D) pour l'entretien des cultures est principalement recommandée pour le riz. En revanche, l'utilisation d'insecticide (cyperméthrine) est préconisée pour l'association maïs-légumineuses (cf. annexe n°10, p.xiv).

Les résultats de l'analyse statistique sur échantillon unique montrent que la moyenne des semences disponibles est plus ou moins conforme ($p > 0,05$) à la valeur préconisée par les techniciens quel que soit le type de cultures (cf. annexe n°12 ; 12 – 1 – 2 ; 12 – 1 – 3 ; 12 – 1 – 4, p.xvi). Pour les légumineuses volubiles, elle est même significativement au-dessus ($p < 0,05$) de la valeur du test (12Kg semences/ha). Sous cet angle, nous pouvons dire qu'il n'y a pas de contraintes majeures sur la disponibilité en semence pendant la période de semis. Toutefois, en analysant l'origine des semences utilisées pour le maïs par exemple, nous avons constaté que l'accès des paysans à des semences améliorées reste limité. En effet, 80% des semences de maïs utilisées par les paysans sont de type IRAT 200, une variété rustique achetée sur le marché local, alors que les semences améliorées (CIRAD 412, OC 202)¹⁴ représentent seulement 20%. Ainsi, le choix d'introduire ou non la contrainte sur la disponibilité en semence par espèce doit donc appartenir à l'utilisateur du modèle. Si l'on prend en compte la contrainte en semence, la somme des besoins en semence de chaque espèce végétale, par période et par an ne doit pas dépasser la quantité de semence disponible par période et par an :

$$\sum_{sp,f \in \{fp,fa\}} Semi_{sp,f,p,ye} \cdot Xi_{sp,f,p,ye} + \sum_{sp,f \in \{fp,fa\}} Semv_{sp,f,p,ye} \cdot Xv_{sp,f,p,ye} \leq Sem_{DISPONIBLE_{p,ye}} \cdot S_{TOTALE_{ye}} \text{ (Equation 14)}$$

Avec :

Semi : besoins en semence (en kg/ha) par espèce produite et intra-consommée, par période et par an ;

Sem : besoins en semence (en kg/ha) par espèce produite et vendue, par période et par an ;

Sem_{DISPONIBLE} : Semence totale (en kg/ha) disponible par espèce végétale, par période et par an ;

S_{TOTALE} : Surface totale disponible annuellement (en hectare) ;

sp : espèces fourragères ;

fp : fourrages pérennes ;

fa : fourrages annuels ;

p : période ;

ye : année ;

Xi : les activités végétales (en hectare) produites et intra-consommées ;

Xv : les activités végétales (en hectare) produites et vendues.

L'intervalle de confiance sur la différence moyenne pour les engrais composés (NPK 11-22-16) montre que la moyenne des engrais NPK disponibles est significativement ($p < 0,001$) inférieure à la valeur du test (150 kg/ha) quel que soit le type de cultures (cf. annexe n°12 ; 12 – 2 – 2, p.xvii). En ce qui concerne le besoin en NPK, l'association maïs-légumineuses est en concurrence avec le riz étant donné que la période d'épandage est la même. Toutefois, nous pouvons dire que la disponibilité en engrais NPK est inférieure aux valeurs préconisées pour chaque culture et ceci quel que soit le niveau de vie des paysans. Pour *Stylosanthes guianensis* et *Brachiaria brizantha*, il n'y a eu aucun apport d'engrais NPK. Cette situation s'explique par le fait que, d'une part, les ressources pécuniaires disponibles auprès des agro-éleveurs sont limitées pendant cette période et que, d'autre

¹⁴ CIRAD 412 et OC 202 sont des variétés de maïs résistantes à la sécheresse et adaptées aux climats semi-arides.

part, l'éloignement du marché d'intrant (le chef-lieu des communes) par rapport aux sites du projet ainsi que le mauvais état des voies de communications pendant la saison de pluie engage des frais de transport onéreux pour les agriculteurs. Ainsi, seuls les plus riches peuvent satisfaire l'itinéraire préconisé. Sur les 32 personnes enquêtées, une seule a pu atteindre la valeur-test (avec une quantité de NPK de 166 Kg/ha environ). La somme des besoins en engrais composés pour chaque espèce végétale, par période et par an ne doit pas dépasser la quantité d'engrais composés disponible par période et par an :

$$\sum_{sp,f \in \{fp,fa\}} ECi_{sp,f,p,ye} \cdot Xi_{sp,f,p,ye} + \sum_{sp,f \in \{fp,fa\}} ECv_{sp,f,p,ye} \cdot Xv_{sp,f,p,ye} \leq EC_{DISPONIBLE_{p,ye}} \cdot S_{TOTALE_{ye}} \quad (\text{Equation 15})$$

Avec :

ECi : besoins en engrais composés (en kg/ha) par espèce produite et intra-consommée, par période et par an ;

ECv : besoins en engrais composés (en kg/ha) par espèce produite et vendue, par période et par an ;

EC_{DISPONIBLE} : Engrais composés totale disponible (en kg/ha), par période et par an.

sp : espèces fourragères ;

fp : fourrages pérennes ;

fa : fourrages annuels ;

p : période ;

ye : année ;

Xi : les activités végétales (en hectare) produites et intra-consommées ;

Xv : les activités végétales (en hectare) produites et vendues.

Les mêmes observations ont été constatées pour l'utilisation de l'urée (cf. annexe n°12 ; 12 – 4 – 2, p.xviii). La somme des besoins en engrais simples de chaque espèce végétale, par période et par an ne doit pas dépasser la quantité d'engrais simples disponibles par période et par an :

$$\sum_{sp,f \in \{fp,fa\}} ESi_{sp,f,p,ye} \cdot Xi_{sp,f,p,ye} + \sum_{sp,f \in \{fp,fa\}} ESv_{sp,f,p,ye} \cdot Xv_{sp,f,p,ye} \leq ES_{DISPONIBLE_{p,ye}} \cdot S_{TOTALE_{ye}} \quad (\text{Equation 16})$$

Avec :

ESi : besoins en engrais simples (en kg/ha) par espèce produite et intra-consommée, par période et par an ;

ESv : besoins en engrais simples (en kg/ha) par espèce produite et vendue, par période et par an ;

ES_{DISPONIBLE} : Engrais simples totale disponible (en kg/ha) par période et par an ;

S_{TOTALE} : Surface totale disponible annuellement (en hectare).

L'intervalle de confiance sur la différence moyenne pour les fumiers de ferme montre que la moyenne des fumiers est significativement ($p < 0,01$) inférieure à la valeur du test (5.000 kg/ha) quel que soit le type de cultures (cf. annexe n°12 ; 12 – 3 – 2, p.xvii). Nous pouvons dire que la quantité de fumier produit localement n'est pas suffisante pour satisfaire les besoins locaux en engrais organique. Pour les 14 éleveurs possédant des zébus, le fumier utilisé provient essentiellement de l'exploitation. Quelquefois, ils en achètent ou ils en vendent selon le cas, c'est-à-dire si l'opportunité de l'offre ou de la demande se présente et si la trésorerie de chaque exploitant permet de faire l'achat. Notons que, les agriculteurs qui ne possèdent pas de zébus achètent toujours du fumier auprès de ceux qui en ont, même si l'offre existante est très limitée. La somme des besoins en engrais organique pour chaque espèce végétale, par période et par an ne doit pas dépasser la quantité d'engrais organique disponible par période et par an :

$$\sum_{sp,f \in \{fp,fa\}} EOi_{sp,f,p,ye} \cdot Xi_{sp,f,p,ye} + \sum_{sp,f \in \{fp,fa\}} EOv_{sp,f,p,ye} \cdot Xv_{sp,f,p,ye} \leq EO_{DISPONIBLE_{p,ye}} \cdot S_{TOTALE_{ye}} \quad (\text{Equation 17})$$

Avec :

EO_i : besoins en engrais organique (en kg/ha) par espèce produite et intra-consommée, par période et par an ;

EO_v : besoins en engrais organique (en kg/ha) par espèce produite et vendue, par période et par an ;

EO_{DISPONIBLE} : Engrais organique totale disponible (kg/ha) par période et par an ;

S_{TOTALE} : Surface totale disponible annuellement (en hectare).

La quantité d'engrais organique totale disponible par période et par an est la somme de la quantité d'engrais organique total produit au sein de l'exploitation par période et par an et de la quantité d'engrais organique achetée à l'extérieur de l'exploitation par période et par an à laquelle il faut retrancher la quantité d'engrais organique vendue par période et par an :

$$EO_{DISPONIBLE_{p, ye}} = EOT_{PRODUITS_{p, ye}} + EO_{ACHETES_{p, ye}} - EO_{VENDUS_{p, ye}} \quad (\text{Equation 18})$$

Pour l'épandage d'insecticide (maïs-légumineuses) et d'herbicide (riz pluvial), les valeurs préconisées dans l'itinéraire techniques ont été respectées (cf. annexe n°10, p.xiv ; 11, p.xv ; 12-5, p.xviii). Il n'y a pas de contraintes sur la disponibilité en insecticide et herbicide pendant l'entretien des cultures. Cette situation s'explique par le fait que ce sont les techniciens de BRL qui fournissent ces intrants au niveau local.

III – 4 – C – 4 Les contraintes de besoin en eau de la plante

L'alimentation hydrique des cultures est le premier facteur conditionnant son rendement car elle conditionne la photosynthèse. Selon AFFHOLDER et al. (2002), s'il s'agit d' « évaluer grossièrement pour une culture donnée la contrainte hydrique dans une région, le bilan hydrique climatique dans lequel sont négligés tous les flux sauf les pluies et l'évapotranspiration, prise alors à son niveau potentiel, permet une première approximation parfois suffisante ». Ces deux flux influencent la croissance et le développement de la plante et donc le rendement en biomasse. Toutefois, le choix final quant à l'introduction de ces paramètres en tant que contraintes d'optimisation appartient à l'utilisateur du modèle. En pratique, ce choix est fait en fonction des données disponibles. Les autres paramètres climatiques comme le rayonnement, la vitesse du vent, l'humidité de l'air et la température de l'air entrent généralement dans le calcul de l'évapotranspiration et ne sont pas considérés dans le présent travail. Ce calcul devra se faire d'une manière exogène. Dans notre modèle, on peut choisir d'utiliser soit des contraintes de besoins minimaux et maximaux en pluviosité, soit la contrainte de besoin moyen en pluviosité. Dans le processus de formulation des contraintes d'optimisation, nous avons choisi comme unité de la pluviosité et de l'évapotranspiration la hauteur d'eau (en mm/an), puis la conversion en un volume d'eau par unité de surface est calculée suivant la règle : 1mm de hauteur d'eau équivaut à 1 litre/m² ou à 10 m³/ha (AFFHOLDER et al., 2002).

La contrainte en pluviosité : on ne connaît pas de limites supérieures de l'échelle de pluviosité (ROBERGE, et al., 1999). On prend généralement en compte la limite inférieure des besoins en eau des plantes fourragères. Toutefois, pour avoir plus de souplesses sur l'utilisation du modèle, ce choix devrait aussi revenir à l'utilisateur du modèle. Les besoins minimaux et maximaux de chaque espèce fourragère sont saisis d'entrée par l'utilisateur du modèle. Pour les besoins minimaux en pluviosité de chaque activité végétale, la somme des besoins minimaux en eau de pluie de chaque activité végétale par an doit être supérieure ou égale à la pluviosité minimale disponible par an :

$$\sum_{sp, f \in \{fp, fa\}} Pmin.i_{sp, f, ye} \cdot Xi_{sp, f, ye} + \sum_{sp, f \in \{fp, fa\}} Pmin.v_{sp, f, ye} \cdot Xv_{sp, f, ye} \geq PPmin.DISPONIBLE_{ye} \cdot S_{TOTALE_{ye}} \quad (\text{Equation 19})$$

Avec :

Pmin.i : besoin minimal en eau pluvial (en m³/ha) par espèce produite et intra-consommée par an ;

Pmin.v : besoin minimal en eau pluvial (en m³/ha) par espèce produite et vendue par an ;

PPmin.DISPONIBLE : Pluviosité minimale totale disponible par an (en m³/ha). ;

S_{TOTALE} : Surface totale disponible annuellement (en hectare).

sp : espèces fourragères ;

fp : fourrages pérennes ;

fa : fourrages annuels ;

ye : année ;

Xi : les activités végétales (en hectare) produites et intra-consommées ;

Xv : les activités végétales (en hectare) produites et vendues.

Pour les besoins maximaux en pluviosité de chaque activité végétale, la somme des besoins maximaux en eau de pluie de chaque activité végétale par an doit être inférieure ou égale à la pluviosité maximale disponible par an :

$$\sum_{sp,f \in \{fp,fa\}} P_{max.i,sp,f,ye} \cdot X_{i,sp,f,ye} + \sum_{sp,f \in \{fp,fa\}} P_{max.v,sp,f,ye} \cdot X_{v,sp,f,ye} \leq PP_{max.DISPONIBLE, ye} \cdot S_{TOTALE, ye} \quad (\text{Equation 20})$$

Avec :

P_{max.i} : besoin maximal en eau pluvial (en m³/ha) par espèce produite et intra-consommée par an ;

P_{max.v} : besoin maximal en eau pluvial (en m³/ha) par espèce produite et vendue par an ;

PP_{max.DISPONIBLE} : Pluviosité maximale totale disponible par an (en m³/ha) ;

S_{TOTALE} : Surface totale disponible annuellement (en hectare) ;

sp : espèces fourragères ;

fp : fourrages pérennes ;

fa : fourrages annuels ;

ye : année ;

Xi : les activités végétales (en hectare) produites et intra-consommées ;

Xv : les activités végétales (en hectare) produites et vendues.

La contrainte de besoin en eau : le besoin en eau des espèces fourragères varie d'un type de climat à l'autre et de la plante cultivée. Le paramètre qui caractérise le mieux les besoins en eau de la plante est l'évapotranspiration potentielle spécifique d'une culture (ETPc), car elle tient compte des échanges d'eau sol-plante-atmosphère. L'ETPc prend en considération l'eau qui s'évapore du sol et celle qui est utilisée par la plante pour la transpiration (ARNAUD & GAY, 1994). Cependant, pour pouvoir déterminer l'évapotranspiration potentielle de chaque culture, il faut tenir compte de la demande atmosphérique en eau évaluée par le biais de l'évapotranspiration potentielle de référence (ETo) (AFFHOLDER et al., 2002). Le rapport entre ETPc et ETo varie au cours du cycle de la culture et de l'indice de la surface foliaire (rapport de la surface des feuilles à la surface occupée au sol par la culture). Ainsi, pour adapter l'ETo à chaque culture, il faut la corriger avec un coefficient appelé « coefficient cultural » (Kc) qui est le rapport entre l'évapotranspiration maximale de la culture considérée et l'évapotranspiration potentielle de référence. Le besoin en eau de la plante est finalement donné par l'équation suivante (ARNAUD & GAY, 1994) :

$$\text{Besoin en Eau (mm)} = Kc \cdot ETo \text{ (mm)} \cdot \text{Surface cultivée (m}^2\text{)} \quad (\text{Equation 21})$$

En convertissant les unités de surface en hectare et l'unité de la hauteur d'eau en mètre cube par hectare (1mm de hauteur d'eau correspondant à 10 m³/ha), la contrainte de besoin en eau est obtenue par l'équilibre entre le besoin en eau de la plante et l'offre moyenne en eau de pluie. Le coefficient cultural et l'évapotranspiration potentielle sont définis d'entrée de modèle. Ainsi, la somme des besoins en eau de chaque activité végétale par an doit être inférieure ou égale à la pluviosité moyenne disponible par an.

$$\sum_{sp,f \in \{fp,fa\}} 10 \cdot ETo \cdot Kc_{sp,f} \cdot X_{i,sp,f, ye} + \sum_{sp,f \in \{fp,fa\}} 10 \cdot ETo \cdot Kc_{sp,f} \cdot X_{v,sp,f, ye} \leq PP_{moy.DISPONIBLE, ye} \cdot S_{TOTALE, ye} \quad (\text{Equation 22})$$

Avec :

10 : conversion de 1mm de hauteur d'eau en m³/ha.

Kc : coefficient cultural de chaque espèce végétale cultivée ;

ETo : l'évapotranspiration potentielle de référence (en mm) ;

PP_{moy.DISPONIBLE} = (PP_{max.} + PP_{min.}) / 2 : Pluviosité moyenne disponible par an (en m³/ha) ;

S_{TOTALE} : Surface totale disponible annuellement (en hectare).

III - 5 La modélisation des ensilages

III – 5 – A Ensilage d'herbe

Pour l'ensilage d'herbe (espèces fourragères autres que le maïs), l'analyse de régression montre une très bonne corrélation entre la teneur en matière sèche (MS), la hauteur du silo (H) et la densité de l'ensilage (D) ($r = 1$). La valeur de la statistique F ($1,5 \cdot 10^{17}$), ainsi que le résidu des sommes des carrés ($3,9 \cdot 10^6$) montrent de manière significative ($p < 0,001$) que la variation expliquée par le modèle de régression n'est pas due au hasard (cf. Annexe n°4, p.ix).

L'équation de régression obtenue pour la prévision de la densité en ensilage d'herbe (espèces autres que le maïs) est :

$$D(\text{Kg MS/m}^3) = 5 \text{ MS}(\%) + 16 \text{ H(m)} + 34 \quad (r = 1) \quad (\text{Equation 23})$$

III – 5 – B Ensilage de maïs

Pour l'ensilage de maïs, l'analyse de régression montre une très bonne corrélation entre la teneur en matière sèche (MS), la hauteur du silo (H), la teneur en amidon (Am) et la densité de l'ensilage (D) ($r = 0,908$). La valeur de la statistique F ($2,0 \cdot 10^4$), ainsi que le résidu des sommes des carrés ($3,8 \cdot 10^7$) montrent de manière significative ($p < 0,001$) que la variation expliquée par le modèle de régression n'est pas due au hasard (cf. Annexe n°5, p.ix).

L'équation de régression obtenue pour la prévision de la densité en ensilage de maïs est :

$$D(\text{Kg MS/m}^3) = 5,575 \text{ MS}(\%) + 11,226 \text{ H(m)} + 1,961 \text{ Am}(\%) - 51,832 \quad (r = 0,908) \quad (\text{Equation 24})$$

III – 5 – C Ensilage d'herbe en balle ronde enrubannée

L'analyse de régression pour l'équation quadratique montre un très bon coefficient de détermination entre la teneur en matière sèche et le poids sec des balles rondes ($r^2=1$) (cf. Annexe n°6, p.ix). Les valeurs de la statistique F sont significatives ($p < 0,01$), démontrant que la variation expliquée par le modèle de régression n'est pas due au hasard.

L'équation quadratique de prévision du poids sec des balles rondes en fonction de la teneur en matière sèche du fourrage ensilé est :

$$P(\text{Kg MS/BRE}) = - 0,052 \text{ MS}^2(\%) + 8,61 \text{ MS}(\%) - 23,513 \quad (r^2 = 1) \quad (\text{Equation 25})$$

III – 6 Le silo à ensilage

Le type de silo modélisé est le silo – couloir enterré. On peut très bien modéliser ce type de structure avec le logiciel Autodesk® Robot® Structural Analysis, en utilisant l'outil « Expert » et en assimilant les parois du silo à un mur de soutènement, étant donné que les silos sont enterrés. Pour le calcul, une charge de 50 kN/m^2 (environ 5 T/m^2) est fixée comme charge permanente s'exerçant sur la paroi du silo à partir de la poussée du sol. Cette charge est assimilée au poids des terres exerçant une poussée sur la paroi du sol et majoré d'un essieu d'un tracteur à remorque qui s'arrête au niveau des silos pendant la phase d'ensilage et de désilage des silos. Soulignons que la même hypothèse a été utilisée pour la modélisation des fosses à fumier.

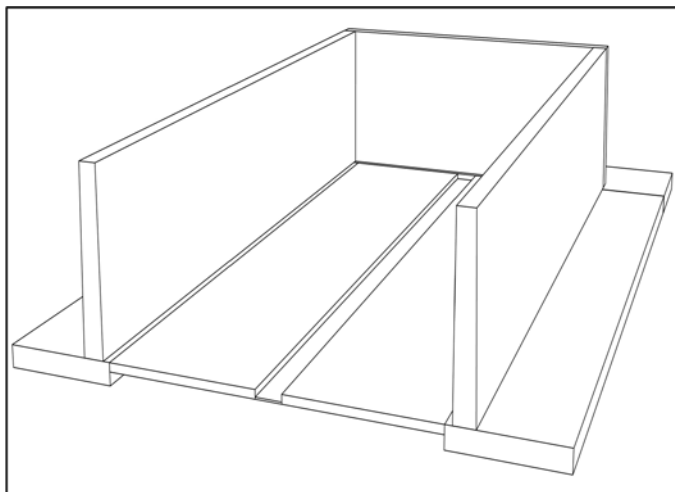


Photo n°1 : vue en perspective de la coupe d'un silo – couloir de 2 mètres de hauteur.

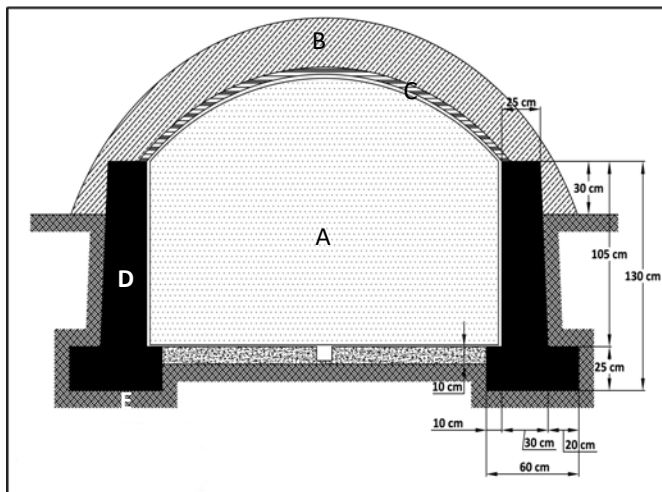


Photo n°2 : Coupe d'un silo – couloir rempli, de 1 mètre de hauteur (A : ensilage ; B : remblai de terre ; C : bâche en plastique ; D : parois en béton ; E : sol).

La forme du silo est rectangulaire avec un canal d'évacuation du jus au milieu (cf. photos n°1 et 2). Deux hauteurs de silos ont été modélisées : 1 et 2 mètres. Etant donné que l'exploitant aura à investir une somme importante pour sa construction, le modèle informatique devrait permettre d'optimiser ou non la taille du silo à ensilage suivant 5 choix différents : ne pas optimiser la taille du silo, imposer une dimension fixe du silo, imposer une dimension minimale du silo, imposer une dimension maximale du silo et imposer une dimension minimale et maximale du silo.

S'il s'agit d'imposer une dimension fixe du silo, les informations sur la taille du silo (longueur, largeur et hauteur en mètre) doivent être fixées d'entrée par l'utilisateur. Puis le logiciel calcule via la méthode de classe de l'ensilage de maïs la superficie nécessaire (en hectare) qui doit être cultivée pour remplir le silo.

La superficie nécessaire (S_{Silo}) pour remplir le silo est obtenue en calculant :

- ✓ La densité de l'ensilage selon les équations de régression obtenues (cf. p.54) ;
- ✓ La quantité totale d'ensilage stockée : $Q \text{ (T MS)} = \text{VolumeSilo (m}^3) * \text{Densité (Kg MS/m}^3) = (\text{Longueur (m)} * \text{Largeur(m)} * \text{Hauteur(m)}) * \text{Densité (Kg MS/m}^3)$;
- ✓ La surface nécessaire : $S_{Silo} \text{ (ha)} = Q \text{ (T MS)} / \text{Rendement (TMS/ha)}$.

La contrainte d'optimisation pour le deuxième choix pour chaque année (ye) de simulation est :

$$\sum_{f \in \{sp,fp,fa\}} Xei_{f,ye} + \sum_{f \in \{sp,fp,fa\}} Xev_{f,ye} = S_{Silo,ye} \quad \text{(Equation 26)}$$

Avec :

Xei : superficie allouée à l'ensilage de maïs ou d'herbe (en hectares) produit et intra-consommé ;

Xev : superficie allouée à l'ensilage de maïs ou d'herbe (en hectare) produit et vendu ;

S_{Silo} : superficie nécessaire pour remplir le silo (en hectare).

sp : espèces fourragères ;

fp : fourrages pérennes ;

fa : fourrages annuels ;

ye : année ;

S'il s'agit d'imposer une dimension minimale du silo, la contrainte d'optimisation est :

$$\sum_{f \in \{sp,fp,fa\}} Xei_{f,ye} + \sum_{f \in \{sp,fp,fa\}} Xev_{f,ye} \geq S_{min,Silo,ye} \quad \text{(Equation 27)}$$

Avec :

$S_{minSilo}$: superficie minimale pour remplir le silo (en hectare).

Pour imposer une dimension maximale du silo, la contrainte d'optimisation est :

$$\sum_{f \in \{sp,fp,fa\}} Xei_{f,ye} + \sum_{f \in \{sp,fp,fa\}} Xev_{f,ye} \leq S_{maxSilo,ye} \quad (\text{Equation 28})$$

Avec :

$S_{maxSilo}$: superficie maximale pour remplir le silo (en hectare).

Pour le cinquième choix, les équations 27 et 28 sont considérées en même temps. Les superficies minimale et maximale (en hectare) pour remplir le silo sont précisées d'entrée par l'utilisateur.

La dimension du silo (longueur et largeur) est variable et est calculée automatiquement en fonction de la surface allouée à l'ensilage (maïs, herbe) après l'optimisation des assolements. Le calcul de la dimension du silo se fait de la manière suivante :

- ✓ Après la phase d'optimisation, le logiciel compare les surfaces maximales allouées à l'ensilage pour chaque année de simulation et choisit la valeur maximale obtenue sur l'ensemble des 10 années de simulation (S_{max}) ;
- ✓ Calcul de la quantité totale d'ensilage stockée : $Q \text{ (T MS)} = S_{max} * \text{Rendement (T MS)}$;
- ✓ Calcul du volume du silo : $\text{VolumeSilo (m}^3\text{)} = (Q \text{ (T MS)} * 1000) / \text{Densité (Kg MS/m}^3\text{)}$;
- ✓ La largeur minimale du silo (en mètre) est définie d'entrée par l'utilisateur (LargeurMin(m)) ;
- ✓ Calcul de la longueur du silo : $\text{LongueurSilo(m)} = \text{VolumeSilo (m}^3\text{)} / (\text{LargeurMin(m)} * \text{HauteurSilo(m)})$;

IV - Conclusion

La démarche de formulation de la programmation linéaire a permis de retenir trois activités principales : les fourrages produits et intra-consommés, les fourrages vendus et la jachère. La démarche de conception orientée objet a retenu six attributs principaux : l'espèce fourragère, la durée de vie des fourrages, les modes et les périodes d'exploitation des fourrages, les rendements en biomasse et les valeurs nutritives, le coût de production fourragère et les besoins en eau des plantes. A partir de ces attributs, six classes de fourrages à partir desquelles on pourrait instancier toutes les activités fourragères du système d'alimentation de l'élevage bovin malgache ont été identifiées : la classe « Fourrage pérenne », « Fourrage annuel », « Ensilages de maïs », « Ensilages d'herbe », « Ensilages d'herbe en Balles Rondes Enrubannées (BRE) », « Foins en bottes ». Notons tout de même que l'« Ensilage d'herbe en Balles Rondes Enrubannées (BRE) » n'est pas encore pratiqué dans le contexte malgache, toutefois, le potentiel de l'île pour son exploitation est envisageable dans les hauts plateaux malgaches. Pour chacune des six classes sus mentionnées, nous avons associé 3 classes supplémentaires qui regroupent les rubriques de coûts : la classe « Achats de fourrages », « Coûts de production avec contraintes de ressources », « Coûts de production hors contraintes de ressources ». Le modèle de système d'alimentation prend en compte cette saisonnalité des activités végétales. Concernant la définition des contraintes d'optimisation, 5 contraintes d'optimisation ont été définies : l'occupation du sol, la disponibilité en main d'œuvre, en équipement agricole, en intrant (semences, engrais) et les besoins en eau de la plante. En tout, ces cinq contraintes rassemblent 21 équations de contraintes d'optimisation.

Bibliographie

- AFFHOLDER, F., FOREST, F., LIDON, B., & VALONY, M. (2002). *La gestion de l'eau*. Memento de l'agronome, CIRAD - GRET - CTA. pp.643 - 662.
- ALARY, V., MEKERSI, S., REDJEL, N., ZEGHIDA, A., BOUGUERA, A., & BENDAOU, M. (2005). *Les obstacles aux transferts technologiques dans les petites et moyennes exploitations agricoles des zones arides et semi arides du Maghreb*. Discussions sur les conditions d'amélioration de la productivité en Algérie, Maroc et Tunisie. Tunis: Femise Network 2 - CIRAD - EMVT/ICARDA . p.234.
- ARNALDI-MARTIN, N., & LHERM, M. (2002). *Impact de scénarios de modification de la PAC sur des élevages bovins allaitants en zone intermédiaire - cas de l'Indre*. Notes et Etudes Economiques N°17. pp.77 – 106.
- ARNAUD, L., & GAY, B. (1994). *De l'eau pour le maraîchage - Expériences et procédés*. GRET - Centre Technique de Coopération Agricole et Rurale. p.126.
- FIFAMANOR, TAFA, GSDM, MAEP, CIRAD, ARP, & et al. (2007). *Conduite des systèmes de culture sur couverts végétaux et affouragement des vaches laitières - Guide pour les hautes terres de Madagascar*. FIFAMANOR - GSDM - TAFA - CIRAD - ARP - SICALait. p.90.
- FLICHMAN, G., DONATELLI, M., LOUHICHI, K., ROMSTAD, E., HECKELEI, T., & AUCLAIR, D. (2006). *Quantitative models of SEAMLESS-IF and procedures for up-and downscaling*. System for Environmental and Agricultural Modelling Linking European Science and Society -Report N°17. IAMM, CRA, UMB, UBONN, INRA, NUI, WU, ALTERRA. p.112.
- HART, R., LARCOMBE, M., SHERLOCK, R., & SMITH, L. (1998). *Optimization techniques for a computer simulation of a pastoral dairy farm*. University of Waikato - New Zealand, Maffra Herd Improvement Co-op-Australia, Dairying Research Corporation Limited-New Zealand. p.23.
- HAZELL, P., & NORTON, R. (1986). *Mathematical programming for economic analysis in agriculture*. New York: MacMillan Publishing Company. p. 400.
- HUSSON, O., CHARPENTIER, H., RAZANAMPARANY, C., MOUSSA, N., MICHELLON, R., & NAUDIN, K. (2008). *Fiches techniques plantes de couverture: Graminées pérennes: Brachiaria sp. - B. ruziziensis, B. brizantha, B. decumbens, B. humidicola*. CIRAD - TAFA - GSDM - AFD - MAEP. p.20.
- INRA. (1978). *Alimentation des ruminants*. Institut National de la Recherche Agronomique.
- INRA. (1988). *Alimentation des bovins, ovins et caprins*. INRA (Institut National de la Recherche Agronomique). p.471.
- INSTITUT DE L'ELEVAGE. (2009). *Bilan fourrager rapide*. [On line] www.inst-elevage.asso.fr [consulté le 24 août 2010].
- KASPRZYK, M. (2008). *Diversité des systèmes d'alimentation des troupeaux bovins laitiers à Betafo - Région du Vakinankaratra - Madagascar*. Mémoires de fin d'études pour l'obtention du Diplôme d'Agronomie Approfondie - SupAgro Montpellier - CIRAD. p.96.
- LAGRANGE, G., LAPENDRIE, Y., BELARD, D., SALLARD, L., NICOLAS, J., & CABAL, J. (2006). *Construire un bâtiment en élevage bovin*. Services Bâtiments des Chambres Départementales d'Agriculture - Chambre Régionale d'Agriculture d'Auvergne. p.23.
- LECOMPTE, P. (2001). *Diagnostic des systèmes d'alimentation. Programmes Productions Animales*. CIRAD-EMVT.
- LHOSTE, P. (2001). *L'étude et le diagnostic des systèmes d'élevage*. Atelier de formation des agronomes SCV Madagascar - CIRAD -MIPA. pp.1239 - 1266.

- LOUHICHI, K. (2004). *Application d'un modèle économique dynamique à l'analyse prospective des systèmes d'élevage laitiers à La Réunion*. CIRAD - ELEVAGE. p.111.
- LOUHICHI, K., FONSECA, B., FLICHTMAN, G., JANSSEN, S., & HENGSDIJK, H. (2005). *A generic template for FSSIM. System for Environmental and Agricultural Modelling Linking European Science and Society -Report N°4*. Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier - Wageningen University - Sixth Framework Programme. p.39.
- MAEP. (2006). *Recensement de l'agriculture. Campagne agricole 2004-2005*. Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche - Direction des Systèmes d'Information - Service des Statistiques Agricoles. p.50.
- MAEP, & UPDR. (2003). *Monographies régionales des 18 D.(I).R.D.R*. Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche - Unité de Politique de Développement Rural - Madagascar.
- NIDUMOLU, U. (2007). *Regional bio-economic modelling of dairy sector in a unique island setting: a case of ile de La Réunion*. Report of the project MODLAIT - Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) - Département Elevage et Médecine Vétérinaire - Pôle Elevage St Pierre La Réunion. p.97.
- NRC. (2001). *Nutrient Requirements of dairy cattle. Seventh revised edition 2001*. National Research Council - National Academy Press - Washington, D.C. p.363.
- RABEMANAMBOLA, M. (2007). *Contribution à l'étude d'une filière alimentaire et de son inscription spatiale dans un pays en voie de développement*. Clermont Ferrand: Thèse en vue de l'obtention du grade de Docteur en Géographie. Université de Clermont Ferrand II. p.332 + Annexes.
- ROBERGE, G., TOUTAIN, B., HAINNAUX, G., DAUDET, A., GUERIN, H., MANDRET, G., & NOIROT, M. (1999). *Manuel de cultures fourragères*. Maisons Alfort, France, IEMVT, pp.147-184.
- THORNTON, P. (1998). *Crop - Livestock Interactions: a review of opportunities for developing integrated models*. Stirling Thorne Associates. p.68.
- THORNTON, P., & HERRERO, M. (2001). *Integrated crop-livestock simulation models for scenario analysis and impact assessment*. Agricultural Systems 70. pp.581 - 602.
- TILLARD, E. (2007). *Approche globale des facteurs associés à l'infertilité et l'infécondité chez la vache laitière: importance relative des facteurs nutritionnels et des troubles sanitaires dans les élevages de l'île de La Réunion*. Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Montpellier II. p.305 + Annexes.
- YANG, X., DARRELL, J., NORDBERG, T., & WOLFE, M. (2000). *Phosphorus-Based Nutrient Management Planning on Dairy/Poultry Farms: Implications for Economic and Environmental Risks*. Tampa, Florida: American Agricultural Economics Association. p.24.

Comparaisons de la productivité, de la valeur bromatologique et de la valeur nutritive entre des fourrages issus de système de cultures en Semis direct sur Couvertures Végétales (S.C.V) des hauts plateaux malgaches et ceux issus de pâturage naturel de l'Ouest de Madagascar

Résumé

La productivité des fourrages pérennes cultivés avec le système SCV est faible en début de saison de pluie à cause de facteurs divers (arrivée tardive de la pluie, etc.). Toutefois, les fourrages pérennes peuvent constituer l'aliment de base des ruminants tout au long de la saison de pluie en bénéficiant l'effet cumulatif de la pluie. Le report et la constitution de stocks fourragers (ensilages, foin) en début de saison sèche sont primordiaux pour tenir jusqu'à la fin de l'année. Les légumineuses fourragères annuelles sont les plus productives et les plus nutritives. Elles tiennent un rôle important dans le planning d'alimentation en tant qu'aliment de transition entre saison humide et saison sèche. Les fourrages annuels (graminées, légumineuses) sont plus productifs et plus riches en valeurs nutritives par rapport aux fourrages pérennes. Les espèces annuelles, riches en sucres comme le maïs peuvent être valorisées en vert pour assurer l'alimentation des ruminants en fin de saison de pluie et sont exploitées pour la fabrication d'ensilage en début de saison sèche. La rotation légumineuse - graminée est fortement recommandée pour bénéficier d'une restauration de la fertilité du sol par recyclage des éléments nutritifs.

Mots-clés : culture fourragère, fourrage pérenne, fourrage annuel, productivité, valeur nutritive.

Abstract

At the beginning of the rainy season, the productivity of perennial forage, grown with SCV-system, is weak because of many factors (late arrival of the rain, and so on). However, perennial forage could be make up as a basic foodstuff for ruminant all along the wet season by profiting from the cumulative effect of the rain. Forage stock constitution in the beginning of the dry season is essential for lasting till the end of the year. Annual leguminosæ forage is the most yielded and the most nutritional. It has a very important role in the food planning as food transition between wet and dry season. Annual forage (gramineæ, leguminosæ) are more productive and more nutritional compared with perennial forages. Annual species, rich in sugar like maize, could be valued in green state to ensure the ruminant diet during the end of the rainy season and could be used for silage-process in the beginning of the dry season. Leguminosæ and gramineæ rotational is strongly recommended with the aim of benefiting from soil nutrient-recycle.

Keywords: fodder crop, perennial forage, annual forage, productivity, nutrient value.

I – Introduction

Dans le contexte malgache, la modélisation du système d'alimentation soulève quelques points importants qui nécessitent d'être abordés. D'abord, les hauts plateaux malgaches (Analamanga, Vakinankaratra, Haute Matsiatra et Amoron'i Mania) ont toujours été une zone de prédilection pour l'élevage laitier à cause de leur climat. Ces Régions bénéficient d'un climat tropical d'altitude (entre 600 et 1.700m d'altitude), caractérisé par des températures modérées pouvant varier entre 1 et 20°C, favorables aux cultures fourragères (espèces tempérées et tropicales) et à l'élevage de bovins laitiers. Ces Régions concentrent à peine 13,33 % des vaches laitières (toutes races confondues) au niveau national et 83,29% des races importées (MAEP, 2006). De plus, la superficie cultivable y est limitée (31% pour Analamanga, 20% pour Vakinankaratra, 5,56% pour la Haute-Matsiatra, 6,24% pour Amoron'i Mania) à cause de la nature accidentée du relief, de la nature du sol (sols ferrallitiques lessivés) et de l'urbanisation (MAEP & UPDR, 2003). En revanche, les Régions de moyennes et basses altitudes (inférieur à 800 m) bénéficient de vastes superficies cultivables. Les climats sont favorables aux différentes cultures même dans les Régions où les climats sont secs une bonne partie de l'année (Menabe, Atsimo-Andrefana), etc.) (MAEP & UPDR, 2003). Les pâturages naturels de savanes sont surpâturés surtout pendant la saison sèche (ANDRIAMAROSOA, 2007). Toutefois, les problèmes de surpâturage et d'insuffisance d'eau peuvent toujours être résolus par la création de points d'eaux et le report de stocks de fourrages (ANDRIAMAROSOA, 2007). La diffusion de l'élevage de vaches laitières demeure possible par l'introduction de vaches métissées (cas des Régions comme Diana, Bongolava, Androy, etc.) (MAEP, 2006). La grande majorité des essais et des expérimentations de cultures fourragères (espèces importées ou locales), pratiqués par les différentes institutions de recherches (FOFIFA, FIFAMANOR, etc.) dans les différentes régions de l'île, ont été des succès techniques (RASAMBAINARIVO & RANAIVOARIVELO, 2003). Toutefois, ces essais n'ont pas forcément permis de déterminer le potentiel nutritif et de production de ces fourrages en milieu paysanne étant donné que les conditions et les moyens disponibles (humain, matériel, financier) ne sont pas les mêmes.

Le présent article donne une meilleure connaissance des caractéristiques physico-chimiques de quelques espèces fourragères rencontrées à Madagascar, contribuant ainsi à avoir une vision claire du potentiel de chaque plante en tant qu'aliment pour les ruminants et, dans le cas de la présente étude, d'établir un plan de rationnement - type dans le montage des scénarios de simulation. Cet article nous donne une estimation du rendement en biomasse, de la valeur bromatologique et nutritive des fourrages. Dans cette approche, le cas des fourrages provenant de pâturage naturel malgache a également été considéré. Dans le contexte d'une intensification, leur utilisation n'a pas d'importance particulière car ces fourrages sont connus pour être pauvres en éléments nutritifs et riches en fibres. Toutefois, dans les zones semi-arides malgaches, il serait intéressant d'apprécier leur potentiel en mettant à profit les vastes superficies disponibles. Ils pourraient être valorisés en tant que foin pour affourager les bétails pendant l'hiver à condition d'apporter des améliorations techniques (gestion de la fertilité du sol, etc.).

Du point de vue des ressources existantes, le potentiel de l'île en matière de développement de l'élevage laitier est énorme. Mais les facteurs humains et socio-économiques demeurent la principale obstruction à l'intégration des autres régions dans ce processus. Pendant longtemps, la conscience collective a pensé que les éleveurs des zones d'élevage extensif de zébus ne sont pas réceptifs aux améliorations techniques et à de nouvelles pratiques d'élevage plus rentables. En réalité, les recherches ne se sont jamais intéressées à l'intérêt réel porté par ces éleveurs aux innovations techniques dans le domaine de l'élevage et à l'analyse de leur perception par rapport à ces nouvelles techniques. Cet article tente également d'apporter quelques éléments de réflexion sur la perception des paysans de ces zones sur les innovations techniques en matière d'élevage.

II – Méthodes

II – 1 Choix et justification des terroirs d'intervention

Le choix des terroirs d'intervention a été fait selon les critères suivants :

- Les terroirs sont les plus représentatifs possibles des systèmes étudiés et des modes d'élevage de ruminants existants à Madagascar. Ceci, de façon à pouvoir mener une bonne analyse du système d'alimentation en vue de sa modélisation ;
- Les terroirs sont basés sur un système semi-intensif ou intensif, (autrement dit, les agro-éleveurs y pratiquent des cultures fourragères) ;
- L'un au moins des terroirs est basé sur un système extensif afin d'analyser les perceptions et les préférences des éleveurs locaux vis-à-vis de la diffusion de techniques d'élevages innovatrices et de savoir si leurs diffusions à grande échelle dans le futur restent du domaine du possible ;
- Les terroirs doivent permettre de recueillir des données (cultures fourragères, etc.) qui vont servir d'entrées à notre modèle de simulation dans le but de le tester et de le valider.

En se basant sur les critères énoncés ci-dessus, les terroirs suivants ont été retenus :

II – 1 – A Les Communes Rurales d'Imerimandroso et d'Amparihitsokatra

Le Chef-lieu de la Commune Rurale d'Imerimandroso se trouve à une longitude de 48°35'44" Est, à une Latitude de 17°25'41" Sud et à une altitude de 800 mètres. La Commune se trouve sur la rive Est du Lac Alaotra, à environ 50 Km au Nord de la ville d'Ambatondrazaka (chef-lieu de la Région Alaotra – Mangoro). Elle est délimitée à l'Ouest par le lac Alaotra, au Nord par les Communes Rurales de Vohitsara et Andromba, à l'Est par la Commune de Antanandava et au Sud par la Commune d'Amparihitsokatra (cf. Annexe 1, pii).

Le chef-lieu de la Commune Rurale d'Amparihitsokatra se trouve à une longitude de 48°34'12" Est, à une latitude de 17°31'41" Sud et à une altitude variant de 800 à 900 mètres. Se situant sur la rive Est du Lac Alaotra, la bifurcation vers le chef-lieu de la Commune se trouve à environ 38 km au Nord de la ville d'Ambatondrazaka et 11,5 km au Sud de la ville d'Imerimandroso. Elle est délimitée à l'Ouest par le lac Alaotra, au Nord par la Commune d'Imerimandroso, à l'Est par les Communes de Sahatavy et Antanandava et au Sud par la Commune d'Ambatosoratra (cf. Annexe 1, pii).

II – 1 – B La Commune Rurale de Bemanonga

Le chef-lieu de la Commune Rurale de Bemanonga se trouve à une longitude de 44°21'16" Est, à une latitude de 20°17'34" Sud, à une altitude compris entre 0 et 50 mètres. Elle se trouve à environ 8 km à l'Est de la ville de Morondava (chef-lieu de la Région Menabe). Les villages étudiés sont ceux d'Ampataka (20° 04' 28,42" S ; 44° 28' 41,00" E), d'Ankoraobato (20° 09' 05,55" S ; 44°37' 35,41" E). Ces villages se trouvent sur la route nationale 8-A menant vers Belo-sur-Tsiribihina (cf. Annexe 1, p.iii).

II – 2 Matériels et méthodes

II – 2 – A Le matériel végétal et les prélèvements

➤ Communes d'Imerimandroso et Amparihitsokatra

Six espèces fourragères ont été prélevées à savoir : *Stylosanthes guianensis* (Aubl.) Sw., *Brachiaria brizantha* (A. Rich.) Stapf cv. *marandu*, *Zea mays* (L.), *Dolichos lablab* (L.), *Vigna unguiculata* (L.) Walp. et le *Oryza sativa* (riz). *Zea mays* est cultivé en association, soit avec du *Dolichos lablab* (dolique), soit du *Vigna unguiculata* (niébé).

A l'exception de *Brachiaria brizantha* et *Stylosanthes guianensis*, la densité de semis diffère d'une culture à l'autre et n'a pas permis d'appliquer la même méthode d'échantillonnage. Pour l'association maïs-légumineuses, le dispositif de prélèvement utilisé est différent. En effet, alors que l'analyse quantitative de la phytomasse se fait souvent dans des quadrants de 1 mètre carré, les lignes de maïs sont espacées de 1 mètre et les poquets de 0,5 mètre (cf. Figure 12, p. 63). Les légumineuses sont semées entre deux lignes de maïs (à 0,5 mètre) et les poquets sont espacés de 0,4 mètre (cf. Figure 12, p. 63). Collecter dans un quadrant de 1 mètre carré ne permet d'obtenir que 2 plantes entières de maïs pour 2 ou 3 plantes entières de dolique ou de niébé. Aussi, il a fallu augmenter la surface des quadrants pour l'association maïs – légumineuse afin d'avoir une meilleure appréciation de la productivité et des valeurs bromatologiques et nutritives.

Les fourrages annuels sont composés par l'association maïs – légumineuses (dolique, niébé) et le riz. La culture de riz pluvial se succède à l'association maïs – légumineuse et vice-versa. Pour le riz, nous nous sommes intéressés à la valorisation de la paille. Les grains sont conservés pour l'alimentation humaine. En revanche, pour l'association maïs – légumineuse, nous nous sommes focalisés sur la valorisation de la plante entière en tant que fourrage. Les échantillons ont été coupés à une hauteur de 10 cm au-dessus du sol, pesés, hachés en petits morceaux et séchés au soleil afin d'éviter leur fermentation et de faciliter leur conservation. Les opérations de prélèvements ont été effectuées après 10 heures du matin, après évaporation de la rosée matinale.

Brachiaria brizantha et *Stylosanthes guianensis* sont des fourrages pérennes. Les échantillons de *Stylosanthes guianensis* et *Brachiaria brizantha* ont été prélevés sur des parcelles de 2 ans d'âge. La surface moyenne des parcelles de collecte est de 15,67 ares (avec un écart-type de 10,57 ares) pour le *Stylosanthes guianensis* (n=12) et 22 ares (avec un écart-type de 13,65 ares) pour *Brachiaria brizantha* (n=8). En tout, 3 coupes ont été effectuées pour ces deux espèces durant la saison de pluie. La première coupe a été faite au mois de décembre 2008 au stade pâturage pour les graminées et début de bourgeonnement pour les légumineuses. La deuxième coupe a été effectuée 80 jours après la première coupe, au stade de début de floraison pour les graminées et les légumineuses. La troisième coupe a été réalisée 55 jours après la deuxième coupe au stade de fin de floraison pour les graminées et de fructification pour les légumineuses. La venue tardive de la pluie au mois de janvier 2009 n'a pas permis de faire des coupes à intervalle réguliers, au risque de tuer les plantes. Le choix du prélèvement a été basé sur la hauteur de repousse (supérieure à 15 cm au-dessus du sol).

Pour le riz, la surface moyenne des parcelles est de 17,63 ares (avec un écart-type de 11,52 ares) (n = 8). La coupe a été effectuée au mois d'avril pendant la récolte du riz. Pour le *Stylosanthes guianensis*, le riz et *Brachiaria brizantha*, le dispositif de collecte utilisé est le même. Pour chaque parcelle, cinq quadrants de un mètre carré ont été mis en place, quatre sur les côtés et un au milieu de la parcelle (cf. Figure 12, p.63). Pour l'association maïs – légumineuses, cinq quadrants de 2,5 m sur 1 m espacés d'une manière équitable ont été placés en diagonale suivant 5 lignes de maïs. La surface moyenne des parcelles est de 43,8 ares (avec un écart-type de 50,08 ares) (n = 20), parmi lesquelles 9 sont des parcelles d'association maïs – dolique et 11 des associations maïs – niébé. La coupe a été effectuée au stade vitreux pour le maïs et au stade de début de floraison pour les légumineuses.

La quantification de la Matière sèche (MS) a été effectuée au laboratoire de nutrition animale du Département Elevage – ESSA (cf. Figure 13, p.64). L'analyse bromatologique et l'estimation des valeurs nutritives ont été effectuées à l'aide de la Spectroscopie dans le Proche Infrarouge (SPIR) ou Near Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS) dans le laboratoire du CIRAD (pôle Kappa) à l'île de la Réunion (cf. Figure 13, p.64).

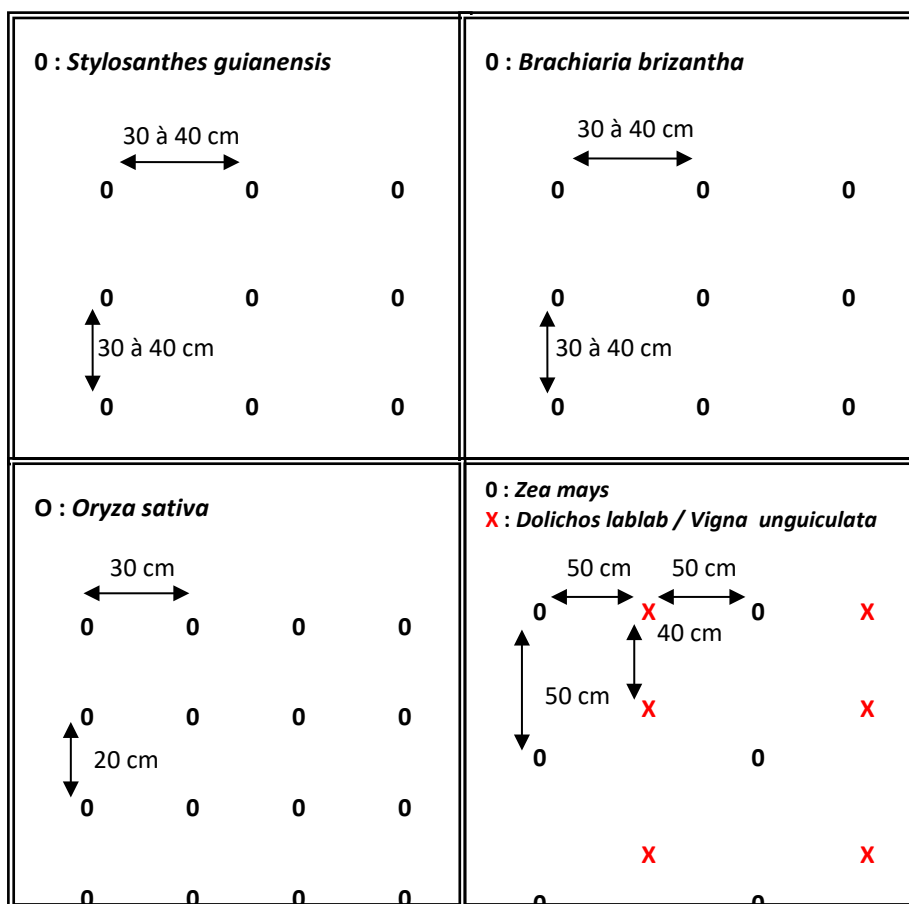


Figure 12 : Densité de semis (espacement entre ligne et entre poquet).

➤ **Commune de Bemanonga**

Six espèces fourragères provenant des pâturages naturels des terroirs d'Ampataka et d'Ankoraobato – Commune de Bemanonga ont été prélevées, à savoir *Brachiaria nana*, *Cynodon dactylon*, *Heteropogon contortus*, *Hyparrhenia rufa*, *Panicum voeltzkowii* et *Sporobolus festivus*. Ces fourrages ont été récoltés à l'intérieur de quadrants d'un mètre carré et coupés à une hauteur de 5 cm du sol, en fin de saison de pluies (avril-mai) où la production végétale est optimale (GOUNOT, 1969). Au total, 60 quadrants ont été placés pour l'ensemble des deux terroirs (30 par terroir). La phytomasse verte est pesée puis séchée au soleil afin d'éviter sa fermentation et faciliter sa conservation. L'analyse quantitative de la phytomasse sèche a été effectuée au laboratoire de nutrition animale du Département Elevage – ESSA, par la mesure de la différence de pesée de l'échantillon vert après deux séchages à 70°C et à 103°C ± 1 pendant 4 heures dans l'étuve.

La prédiction des valeurs bromatologiques et nutritives a été effectuée à l'aide d'un Spectroscopie dans le Proche Infrarouge (SPIR) ou Near Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS) dans le laboratoire du CIRAD (pôle Kappa) à l'île de la Réunion. En tout, 10 échantillons par espèces fourragères (5 par terroirs) ont été constitués à partir des 60 échantillons prélevés pour le dosage de la matière sèche, en prenant soin de bien homogénéiser les échantillons prélevés.

Pour les pâturages naturels, une étude floristique des pâturages a été effectuée en se basant sur le taux de recouvrement et l'abondance - dominance. Le taux de recouvrement est la projection des parties aériennes de la végétation sur la surface plane du sol (cf. Tableau 1, p.65).

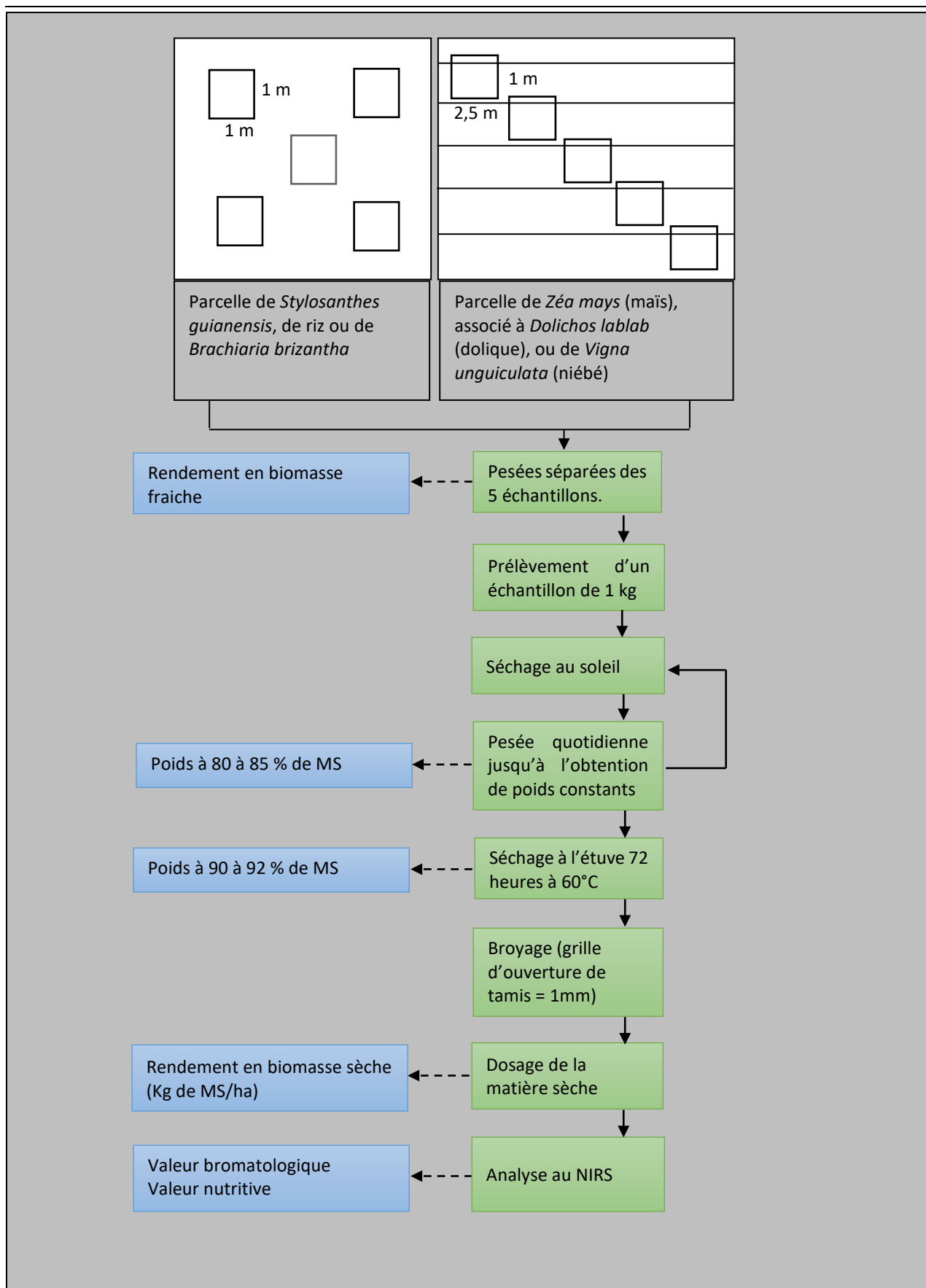


Figure 13: Traitement des biomasses prélevées.

L'abondance - dominance est déterminée selon la méthode zuricho - montpelliéraine de BRAUN-BLANQUET, citée par GOUNOT (1969), BOUDET (1975a) et RANDRIANARIVELOSEHENO (2002). Les observations sont effectuées dans 30 quadrants aléatoires d'un (1) mètre carré, en attribuant les valeurs de dominance suivantes pour chaque espèce identifiée :

Tableau 1 : Valeurs de l' « Abondance-dominance » selon la méthode de BRAUN-BLANQUET.

Echelle de dominance	Signification	Abondance
5	espèce couvrant plus de 75% de la totalité de l'aire	espèce très abondante
4	espèce couvrant entre 50 à 75%	espèce abondante
3	espèce couvrant entre 25 à 50%	espèce peu abondante
2	espèce couvrant entre 10 à 25%	espèce rare
1	espèce couvrant 5 à 10%	espèce très rare
+	espèce couvrant moins de 5% de surface	médiocre

II – 2 – B Le traitement des résultats

La quantification des valeurs bromatologiques et nutritives des fourrages avec le NIRS permet de déterminer plusieurs paramètres dont les plus importants sont : Matières minérales totales (MM), Protéines brutes totales (PBT) ou matières azotées totales (MAT), Neutral Detergent Fiber (NDF) ou parois cellulaire, Acid Detergent Fiber (ADF) ou lignocellulose, Acid Detergent Lignin (ADL) ou lignine, Cellulose brute de WEENDE (CB), Digestibilité de la matière organique (dMO), Unité fourragère lait et Unité de fourrage viande (UFL, UFV), Energie brute (EB), Energie métabolisable (EM), Valeurs d'encombrements lait et Valeurs d'encombrements viande (VEL, VEB), Matière azotée digestible (MAD), Protéines digestibles dans l'intestin d'origine alimentaire (PDIA), Protéines digestibles calculées sur l'azote (PDIN), Protéines digestibles calculées sur l'énergie (PDIE).

Les résultats des rendements en biomasse et des valeurs bromatologiques obtenus ont été traités statistiquement dans le but de sélectionner un sous-groupe de paramètres représentatifs de la variabilité des fourrages étudiés et d'analyser la structure des données obtenues. Pour cela, la statistique descriptive (moyenne, variance, écart – type) est associée avec la méthode de l'« Analyse en Composantes Principales » (ACP). Pour l'analyse de la variabilité de la composition chimique des fourrages, dix variables ont été sélectionnées et analysées avec l'ACP à savoir la teneur en MS, MM, MAT, NDF, ADF, ADL, hémicellulose, CB, EB et EM. Le logiciel S.P.S.S® 14.0 est utilisé pour tous les calculs.

II – 2 – C Appréciation de l'intérêt porté par les éleveurs bovins en milieu extensif aux innovations techniques

L'analyse des perceptions et des préférences des éleveurs bovins en milieu extensif aux techniques d'élevage innovatrices a été effectuée dans la Commune de Bemanonga – Morondava. Les villages de l'enquête sont ceux mentionnés dans la section II – 1 ; II – 1 – B (p.61). Pour cela, un exercice de « scoring » – affectation de scores portant sur six techniques d'élevage bovins (variables -tests) a été réalisé en groupe dans chacun des six villages. Les nouvelles techniques suivantes ont été proposées :

- ✓ Arrêter les feux de brousse par la mise en place de mesures préventives contre les feux (pare-feu, mise en place de comités locaux de surveillance, etc.) ;

- ✓ Cultiver du foin ;
- ✓ Améliorer les pâturages par la culture fourragère ;
- ✓ Valoriser la fumure animale par l'amélioration du système de parcase dans le but de récupérer la fumure animale et de la restituer dans les prairies pour reconstituer la fertilité organique du sol. Divers types de système de parcase ont été proposés comme le parc de nuit mobile, la pseudo-stabulation, le parc de nuit amélioré et la stabulation permanente ;
- ✓ Maîtriser la pression des troupeaux en régulant et en ajustant la charge animale en fonction de la capacité de charge de chaque parcelle. Autrement dit, fixer les lieux de pâtures pour chaque propriétaire de bovins pour équilibrer l'offre fourragère en fonction des besoins du troupeau ;
- ✓ Faire une rotation des lieux de pâtures. Une parcelle est pâturée et les autres sont au repos. La pâture de chaque parcelle se fait à des périodes différentes dans l'année afin de favoriser la régénération des espèces des parcelles au repos.
- ✓ Autres techniques (non-spécifié).

Dans chaque village, l'exercice a été fait séparément à deux reprises, une fois avec un groupe d'hommes et une fois avec un groupe de femmes. Les groupes se composaient d'une dizaine de personnes pour la plupart précédemment sélectionnées selon leur âge, leur ethnie et leur richesse, le but étant de travailler avec un groupe représentatif du village. Au total, 12 groupes de dix personnes ont été choisis. Cent jetons ont été distribués également entre les participants. Une question était ensuite posée à tout le groupe. Les participants avaient le droit de discuter entre eux pour échanger leurs points de vue mais chacun devait répondre à la question individuellement en posant un ou plusieurs jetons dans l'une ou plusieurs des cases-réponses, selon l'importance accordée à la case-réponse. Une case « autres » était également à disposition. Les différences statistiques entre les pourcentages attribués aux trois techniques les plus appréciées et ceux attribués aux autres techniques ont été calculées au moyen du test U de Mann-Whitney (ANDRIAMAROSOA et al., 2010 ; DIRAC, 2010).

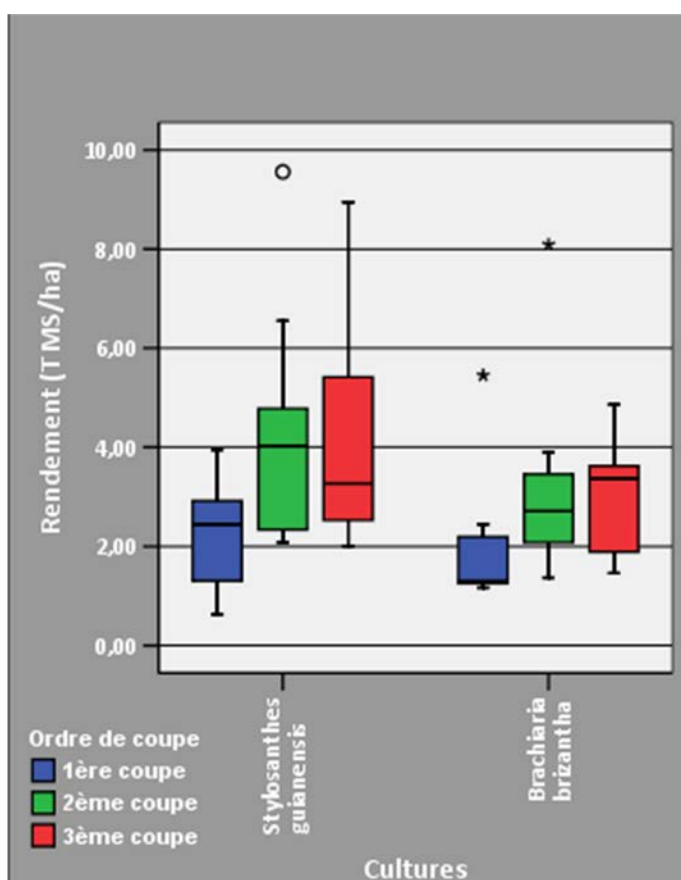
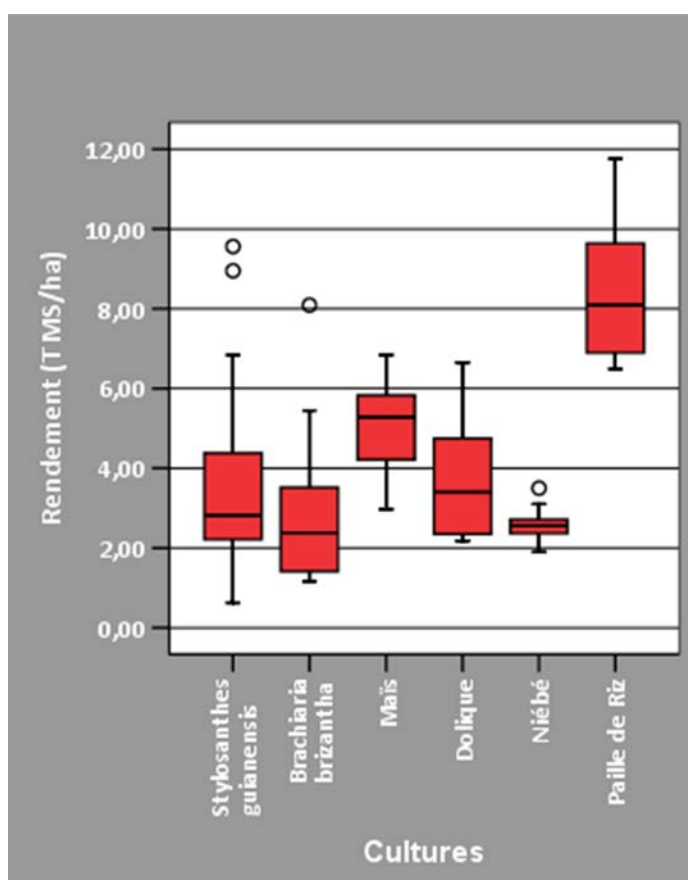
III – Résultats

III – 1 Le rendement en biomasse fourragère

III – 1 – A Communes Rurales d'Imerimandroso et d'Amparihitsokatra

La production fourragère varie avec l'espèce, la durée de vie et les périodes de récoltes. Les fourrages les plus productifs sont les fourrages annuels : le riz avec $8,44 \pm 1,83$ T MS/ha de pailles produites ($n = 8$; NC = 95%), le maïs avec $5,05 \pm 1,13$ T MS/ha ($n = 20$; NC = 95%) et la dolique avec $3,82 \pm 1,60$ T MS/ha ($n = 9$; NC = 95%) (cf. Tableau 2, p.68). Le fourrage annuel le moins productif est le niébé avec $2,58 \pm 0,44$ T MS/ha ($n = 11$; NC = 95%). Les rendements en dolique et niébé sont inférieurs aux valeurs citées dans la littérature, qui sont respectivement de l'ordre de 5 à 8 T MS/ha et de 4 à 5 T MS/ha (ROBERGE & GODET, 2002). Le *Stylosanthes guianensis* est le plus productif des fourrages pérennes avec $3,53 \pm 2,06$ T MS/ha ($n = 35$; NC=95%) (cf. Tableau 2, p.68). Le rendement moyen pour *Brachiaria brizantha* est $2,76 \pm 1,65$ T MS/ha ($n = 24$; NC=95%) (cf. Tableau 2, p.68). Ces moyennes sont très faibles par rapport aux fourrages annuels. Même s'il n'y a pas eu d'apport en engrais NPK pour ces deux cultures et même si l'apport en engrais organique est très limité au niveau local, la considération de ces deux paramètres n'est pas suffisante pour expliquer les résultats de rendements obtenus. Le rendement moyen en *Stylosanthes guianensis* varie généralement entre 10 et 20 T MS/ha en système fertilisé et entre 8 à 10 T MS/ha en système non-fertilisé (ROBERGE & GODET, 2002 ; FIFAMANOR et al., 2007; HUSSON et al., 2008b). Pour *Brachiaria brizantha*, le rendement varie entre 8 à 20 T MS/ha en système fertilisé ou non

(ROBERGE *et al.*, 2002b ; FIFAMANOR *et al.*, 2007 ; HUSSON *et al.*, 2008a). Autrement dit, les rendements obtenus sont largement en dessous des valeurs citées dans la littérature. L'analyse de la distribution des rendements des cultures montre une asymétrie positive (queue de distribution vers la droite) par rapport à la moyenne, sauf pour le maïs (cf. Graphique 2). Pour le maïs, une asymétrie négative (queue de distribution vers la gauche) est observée. Pour le niébé, la moyenne, la moyenne tronquée à 5% et la médiane sont presque égales et le coefficient d'asymétrie et le coefficient d'aplatissement sont proches de 0 (cf. Tableau 2, p.68), caractéristiques d'une population distribuée normalement. En général, si l'asymétrie et l'excès d'aplatissement sont compris entre -2 et +2, les données suivent dans une limite raisonnable une loi normale même si l'asymétrie est près d'être statistiquement significative (STATPOINT, 2006). Nous observons que le coefficient d'asymétrie et l'excès d'aplatissement des fourrages annuels sont compris entre -1 et 1 tandis que pour les fourrages pérennes, ils sont supérieurs à 1 (cf. Tableau 2, p.68). Nous pouvons donc dire que la distribution des fourrages annuels obtenus est plus proche de la loi Gaussienne que celle des fourrages pérennes. Parmi les fourrages annuels, le niébé est l'espèce dont le rendement en biomasse fourragère est le plus normalement distribué.



Graphique 2 : Boîtes à moustache de la moyenne du rendement annuel par culture (T MS/ha).

Graphique 3 : Boîtes à moustache de la moyenne du rendement par ordre de coupe des cultures pérennes (T MS/ha).

Tableau 2 : Statistiques descriptives des rendements (T MS/ha) en biomasse fourragère.

Rendements (T MS/ha)		Cultures					
		<i>Stylosanthes guianensis</i>	<i>Brachiaria brizantha</i>	Maïs	Dolique	Niébé	Paille de Riz
Moyenne	Statistique	3,53	2,76	5,05	3,82	2,58	8,44
	Erreur standard	0,35	0,34	0,25	0,53	0,13	0,65
Intervalle de confiance à 95% pour la moyenne	Borne inférieure	2,83	2,06	4,53	2,59	2,29	6,91
	Borne supérieure	4,24	3,45	5,58	5,05	2,88	9,97
Moyenne tronquée à 5%	Statistique	3,36	2,57	5,07	3,75	2,57	8,36
Médiane	Statistique	2,82	2,39	5,28	3,40	2,55	8,10
Variance	Statistique	4,23	2,71	1,27	2,57	0,19	3,34
Ecart-type	Statistique	2,06	1,65	1,13	1,60	0,44	1,83
Minimum	Statistique	0,63	1,17	2,97	2,18	1,90	6,49
Maximum	Statistique	9,56	8,09	6,84	6,65	3,50	11,76
Intervalle	Statistique	8,93	6,92	3,87	4,47	1,60	5,27
Intervalle interquartile	Statistique	2,17	2,17	1,71	2,95	0,50	2,93
Asymétrie	Statistique	1,34	1,69	-0,37	0,80	0,70	0,75
	Erreur standard	0,40	0,47	0,51	0,72	0,66	0,75
Aplatissement	Statistique	1,85	3,65	-0,83	-0,58	0,90	-0,13
	Erreur standard	0,78	0,92	0,99	1,40	1,28	1,48

Tableau 3 : Statistiques descriptives des rendements (T MS/ha) par ordre de coupe en fourrages pérennes.

Rendements (T MS/ha)			Cultures					
			Stylosanthes guianensis			Brachiaria brizantha		
			Ordre de coupe			Ordre de coupe		
			1ère coupe	2ème coupe	3ème coupe	1ère coupe	2ème coupe	3ème coupe
Moyenne	Statistique		2,29	4,13	4,23	2,01	3,25	3,01
	Erreur standard		0,31	0,64	0,67	0,52	0,74	0,42
Intervalle de confiance à 95% pour la moyenne	Borne inférieure	Statistique	1,60	2,73	2,74	0,79	1,49	2,03
	Borne supérieure	Statistique	2,98	5,54	5,72	3,23	5,00	4,00
Moyenne tronquée à 5%	Statistique		2,29	3,95	4,09	1,87	3,08	3,00
Médiane	Statistique		2,44	4,03	3,27	1,30	2,71	3,38
Variance	Statistique		1,18	4,88	4,89	2,13	4,40	1,39
Ecart-type	Statistique		1,09	2,21	2,21	1,46	2,10	1,18
Minimum	Statistique		0,63	2,08	2,01	1,17	1,37	1,46
Maximum	Statistique		3,95	9,56	8,95	5,45	8,09	4,86
Intervalle	Statistique		3,32	7,48	6,94	4,28	6,72	3,40
Intervalle interquartile	Statistique		1,78	2,70	3,31	1,08	1,62	1,96
Asymétrie	Statistique		0,07	1,45	1,07	2,36	2,15	-0,11
	Erreur standard		0,64	0,64	0,66	0,75	0,75	0,75
Excès d'aplatissement	Statistique		-0,89	2,32	0,51	5,78	5,16	-0,68
	Erreur standard		1,23	1,23	1,28	1,48	1,48	1,48

Les rendements en fourrages pérennes augmentent avec le rang de coupe avec un pic constaté en deuxième et/ou en troisième coupe et un minima enregistré en première coupe (cf. Tableau 3, p.69 ; Graphique 3, p.67).

Pour *Brachiaria brizantha*, l'excès d'aplatissement est de 3,65, démontrant une distribution plus pointue que la loi normale. Le coefficient d'asymétrie est inférieur à 2. La propagation est aussi matérialisée par la présence de deux points extrêmes en première et deuxième coupe (en astérisque sur le graphique). Nous constatons que le coefficient d'asymétrie et l'excès d'aplatissement sont supérieurs à 2 en première et deuxième coupe (cf. Tableau 3, p.69).

Pour *Stylosanthes guianensis*, la présence d'un point éloigné (cf. Graphique 3, p.67) démontre que la différence marquée entre fourrage pérenne et annuel est due principalement à la variabilité importante constatée au niveau des rendements obtenus par ordre de coupes (3 coupes au total). Ce point correspond au maximum enregistré en deuxième coupe (9,56 T MS/ha) (cf. Tableau 3, p.69). Nous remarquons un excès d'aplatissement supérieur à 2 en deuxième coupe.

Pour ces deux fourrages, la distribution des rendements montre également la présence de points éloignés (outliers) correspondant à leur valeur maximum respective (cf. Graphique 3, p.67). L'analyse de la distribution des rendements par ordre de coupe montre une asymétrie positive sauf pour *Brachiaria brizantha* où nous constatons une asymétrie négative (queue de distribution vers la gauche) en troisième coupe (cf. Tableau 3, p.69; Graphique 3, p.67).

Ces observations s'expliquent par le fait que les rendements dévient nettement de la valeur normale théorique (c'est-à-dire de la valeur espérée quand les données sont normalement distribuées) au fur et à mesure que les rendements augmentent au-delà de 6 T MS/ha pour *Stylosanthes guianensis*, et de 4 T MS/ha pour *Brachiaria brizantha*, ou quand les rendements se situent en dessous de 2 T MS pour les deux fourrages.

III – 1 – B Commune Rurale de Bemanonga¹⁵

Les résultats obtenus ont montré que la productivité moyenne des pâturages est faible (2,53 ± 1,42 T de MS/ha pour Ampataka et 2,15 ± 0,95 T de MS/ha pour Ankoraobato) (ANDRIAMAROSOA, 2007 ; ANDRIAMAROSOA et al., 2010). La considération de l'aire pastorale amène à constater que la surface de pâture est dominée par des espèces à faible production fourragère (cf. Tableau 4, p.71). Les espèces produisant une biomasse fourragère supérieure à 3 tonnes par hectare occupent moins de 10 % de l'aire pastorale. L'enrichissement sélectif des parcours pastoraux s'est effectué au profit des espèces pyrophytes (*Brachiaria nana*, *Panicum voeltzkowii*).

¹⁵ Une partie de ce sous - chapitre est basée sur :

ANDRIAMAROSOA R.N.R.S., DIRAC R.C., SORG J.P., BUTTLER A., 2010. *Optimisation socio-économique et écologique des systèmes d'élevage (Menabe central, Madagascar)*. Science et changements planétaires « Sécheresse » 21(3) – John Libbey Eurotext. Pp. 211 – 218.

DIRAC R.C., 2010. *Stratégies villageoises dans la gestion des paysages forestiers, Menabe Central Madagascar*. Thèse de Doctorat soutenue à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 119 pages + annexes.

Tableau 4: Productivité moyenne (en tonnes de MS par hectare) et taux de couverture (en pourcentage) de chaque espèce fourragère.

Terroir	Espèce	Taux de couverture	Production fourragère moyenne (T de MS/ha)	
			Moyenne	Ecart type
Ampataka (3.689 ha)	<i>Cynodon dactylon</i>	8,18%	3,85	1,6
	<i>Heteropogon contortus</i>	29,68%	2,69	1,54
	<i>Panicum voeltzkowii</i>	48,72%	1,90	0,67
	<i>Sporobolus festivus</i>	5%	1,39	0,17
Ankoraobato (4.636 ha)	<i>Brachiaria nana</i>	81,35%	1,88	0,64
	<i>Cynodon dactylon</i>	3,92%	3,27	0,82
	<i>Heteropogon contortus</i>	13,62%	1,88	1
	<i>Hyparrhenia rufa</i>	1,11%	3,33	1,12

III – 2 La valeur bromatologique des fourrages

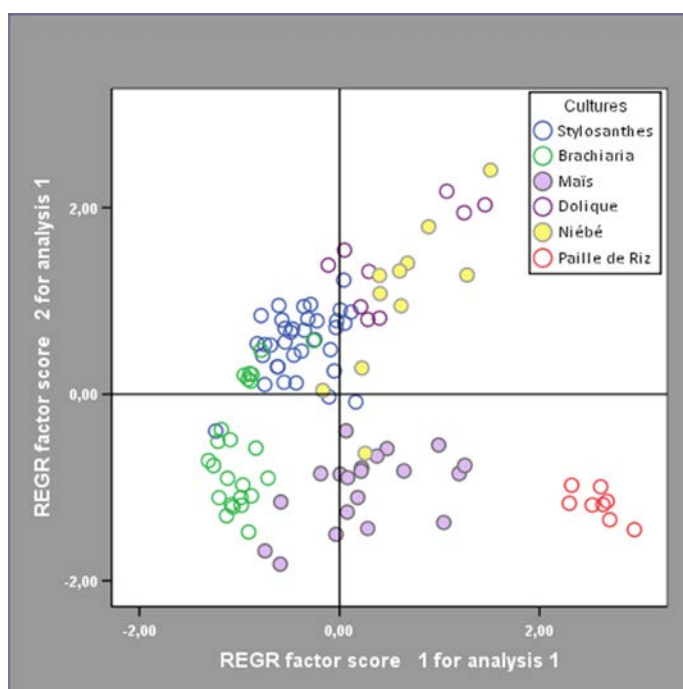
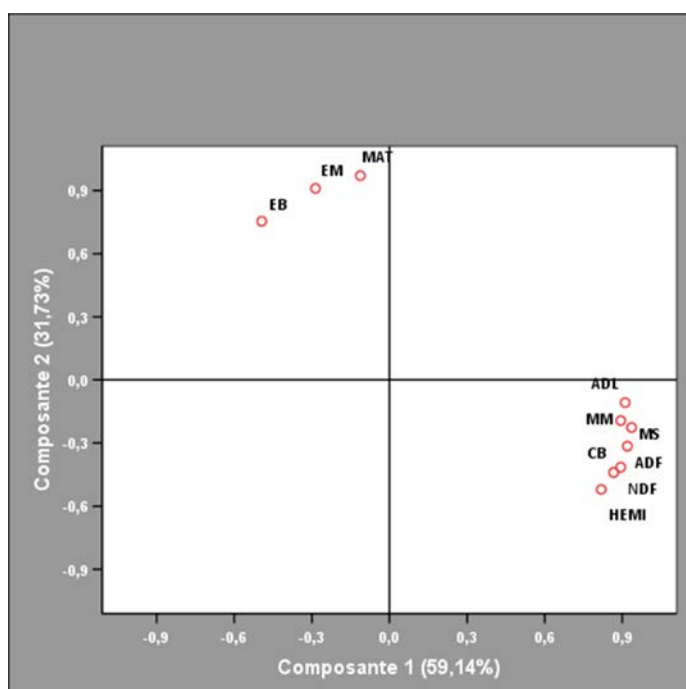
III – 2 – A Communes Rurales d'Imerimandroso et d'Amparihitsokatra

La qualité de représentation des variables sélectionnées avec l'analyse en composantes principales montre des variances élevées dans chaque variable (proche de 1) (cf. Annexe 13 ; 13-1, p.xix), indiquant que les composantes extraites donnent une bonne représentation de ces variables. Au total, l'analyse en composantes principales a permis d'extraire deux facteurs ou composantes qui expliquent environ 90,87% de la variabilité constatée au niveau des dix variables originelles (cf. Annexe 13 ; 13-3, p.xix). L'utilisation des deux composantes extraites permet donc de réduire la complexité des données analysées avec seulement 9,13% de pertes d'information.

- **La première composante** : est fortement corrélée avec les variables ADF, NDF, MS, MM, ADL, hémicellulose, et CB (cf. Tableau 5, p.72; Graphique 4, p.72). La teneur en matière sèche (MS) et la lignocellulose (ADF) sont les meilleures représentantes de ce facteur. Cette première composante regroupe les fourrages riches en fibres et en lignines mais pauvres en matières azotées totales et en énergie (brute et métabolisable), caractéristiques des graminées fourragères (cf. Graphique 5, p.72). Pour tous les fourrages, la teneur en matière sèche (MS), en matière minérale (MM) et en constituants pariétaux est en corrélation négative avec la teneur en énergie brute (EB), en énergie métabolisable (EM) et la teneur en matière azotée totale (MAT) (cf. Tableau 5, p.72). Nous remarquons en revanche qu'ils sont fortement en corrélation positive entre eux.
- **La deuxième composante** : est fortement corrélée avec la MAT et EM, et est moyennement corrélée avec EB (cf. Tableau 5, p.72; Graphique 4, p.72). La matière azotée totale (MAT) et l'énergie métabolisable (EM) sont les meilleures représentantes de ce facteur. Cette deuxième composante regroupe les fourrages riches en matières azotées et en énergie, donc en constituants intracellulaires, mais pauvres en fibres et en lignines, caractéristiques des légumineuses fourragères (cf. Graphique 5, p.72). La teneur en matière azotée totale (MAT) possède une meilleure corrélation avec l'énergie métabolisable (EM) qu'avec l'énergie brute (EB) (cf. Tableau 5, p.72). Elle est en corrélation négative avec la paroi cellulaire (NDF), l'hémicellulose (HEMI) et la cellulose brute (CB) et est faiblement corrélée négativement avec le reste des constituants pariétaux, la teneur en matière sèche et en matière minérale.

Tableau 5 : Matrice de corrélation entre les composants chimiques et énergétiques des fourrages.

	MS	MM	MAT	NDF	ADF	ADL	HEMI	CB	EB	EM
MS	1,000									
MM	0,913	1,000								
MAT	-0,337	-0,244	1,000							
NDF	0,907	0,831	-0,511	1,000						
ADF	0,898	0,799	-0,431	0,983	1,000					
ADL	0,805	0,742	-0,228	0,879	0,938	1,000				
HEMI	0,875	0,831	-0,588	0,973	0,914	0,762	1,000			
CB	0,948	0,832	-0,543	0,949	0,936	0,822	0,919	1,000		
EB	-0,648	-0,743	0,741	-0,718	-0,621	-0,438	-0,805	-0,714	1,000	
EM	-0,445	-0,388	0,895	-0,637	-0,576	-0,435	-0,682	-0,654	0,755	1,000



Graphique 4 : Diagramme des composantes dans l'espace Graphique 5 : Projection des individus sur le plan P (axes F1-F2) (axes F1-F2 : 90,87%)

La projection des fourrages sur le plan des axes des deux composantes principales dévoile que les légumineuses annuelles (dolique, niébé) sont les fourrages les plus riches en matières azotées totales, en énergie brute et métabolisable (cf. Graphique 5). Tandis que les céréales plantes entières (maïs, riz) sont les plus riches en fibres et en lignines. La projection montre également que la légumineuse pérenne a des compositions chimiques et énergétiques inférieures à celles des légumineuses annuelles et ceci quelles que soient les composantes considérées. En effet, nous remarquons que le *Stylosanthes guianensis* est pauvre en constituants pariétaux, en matières azotées totales et en énergie (brute et digestible) par rapport à la dolique et le niébé. Il n'en est pas de même pour la graminée pérenne. Le *Brachiaria brizantha* est pauvre en constituants pariétaux mais riche en matières azotées totales et en énergie (brute et digestible) par rapport au maïs et à la paille de riz. La comparaison entre fourrages pérennes indique également que *Stylosanthes guianensis* est plus riche en matière azotée et en énergie, et même en constituants pariétaux, que *Brachiaria brizantha*.

Tableau 6 : Valeurs bromatologiques des fourrages pérennes.

		Cultures							
		Stylosanthes guianensis				Brachiaria brizantha			
		Ordre de coupe				Ordre de coupe			
		1ère coupe	2ème coupe	3ème coupe	Moyenne	1ère coupe	2ème coupe	3ème coupe	Moyenne
MS (g/Kg MV)	Moyenne	308,34	286,8	308,36	301,1	290,33	424,01	273,84	329,39
	Ecart type	65,25	65,7	43,64	58,52	100,12	51,93	11,32	92,89
MM (g/Kg MS)	Moyenne	24,01	22,46	24,95	23,77	27,13	37,89	25,04	30,02
	Ecart type	3,67	6,80	4,03	5,01	5,21	7,93	2,99	7,95
MAT (g/Kg MS)	Moyenne	213,47	206,33	229,20	216,33	111,78	183,88	213,47	169,71
	Ecart type	27,86	42,22	13,16	27,74	56,05	40,23	27,86	41,38
NDF (g/Kg MS)	Moyenne	170,69	148,44	164,60	161,15	135,21	131,46	120,14	128,94
	Ecart type	41,47	32,76	27,79	34,98	7,44	7,51	5,56	9,28
ADF (g/Kg MS)	Moyenne	125,12	109,02	122,23	118,69	74,97	76,14	65,41	72,17
	Ecart type	35,71	25,60	22,54	28,73	10,40	5,74	3,09	8,36
ADL (g/Kg MS)	Moyenne	35,04	29,19	32,21	32,15	11,26	11,24	7,86	10,12
	Ecart type	10,87	7,67	7,01	8,82	1,78	1,76	0,90	2,20
HEMI (g/Kg MS)	Moyenne	45,57	39,42	42,37	42,46	60,24	55,32	54,73	56,76
	Ecart type	7,91	8,53	7,36	8,15	3,95	2,83	3,01	4,04
CB (g/Kg MS)	Moyenne	108,85	95,22	107,49	103,75	102,23	146,15	87,51	111,97
	Ecart type	30,28	22,77	20,37	25,02	46,64	13,07	3,68	36,96
EB (Kcal/Kg MS)	Moyenne	4421,93	4417,77	4432,71	4423,89	4199,83	4231,98	4315,88	4249,23
	Ecart type	47,12	46,83	38,75	43,70	33,40	39,05	26,11	59,23
EM (Kcal/Kg MS)	Moyenne	1900,36	2027,93	1999,69	1975,32	1758,18	1762,23	2043,57	1854,66
	Ecart type	151,99	105,02	103,55	131,71	137,79	136,73	107,32	183,29

Tableau 7 : Valeurs bromatologiques des fourrages annuels.

	Cultures							
	Maïs		Dolique		Niébé		Paille de riz	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
MS (g/Kg MV)	506,38	98,68	493,8	114,39	516,67	88,18	893,75	22,16
MM (g/Kg MS)	44,92	13,20	54,90	16,57	55,34	13,11	129,31	33,90
MAT (g/Kg MS)	79,10	23,29	282,09	57,73	237,00	68,21	61,66	13,34
NDF (g/Kg MS)	360,93	72,35	217,20	47,25	246,01	43,23	652,62	18,34
ADF (g/Kg MS)	219,46	45,91	146,53	28,80	177,53	22,92	372,50	14,74
ADL (g/Kg MS)	41,68	9,08	34,48	7,08	40,29	5,98	75,95	5,67
HEMI (g/Kg MS)	141,48	27,91	70,67	21,44	68,48	25,98	280,12	9,11
CB (g/Kg MS)	184,36	37,64	132,18	26,22	154,56	21,30	330,77	20,99
EB (Kcal/Kg MS)	4194,59	60,47	4381,51	67,35	4335,10	92,83	3912,49	156,03
EM (Kcal/Kg MS)	1598,18	158,23	2214,14	71,95	2108,49	163,65	1405,94	45,10

➤ **La matière sèche :**

La matière sèche (MS) est corrélée positivement et fortement avec la cellulose brute (CB) ($r = 0,948$), la matière minérale (MM) ($r = 0,913$), la paroi cellulaire (NDF) ($r = 0,907$) et les autres constituants pariétaux ($r > 0,8$), et est corrélée négativement avec la matière azotée totale (MAT), l'énergie brute (EB) et l'énergie métabolisable (EM) (cf. Tableau 5, p.72).

Pour les fourrages pérennes, l'évolution de la teneur en matière sèche par cycle de repousse diffère d'une espèce à l'autre. Pour *Stylosanthes guianensis* par exemple, la teneur en matière sèche diminue en 2^{ème} coupe puis reprend sa valeur initiale en 3^{ème} coupe (cf. Tableau 6, p.73). Ainsi, un accroissement du rendement en biomasse fourragère (de l'ordre de 80%) entre la première et la deuxième coupe entraîne une diminution de la teneur en matière sèche (de 31% à 29%) (cf. Tableau 3, p.69 ; Tableau 6, p.73). Les valeurs du rendement et de la teneur en matière sèche obtenues entre la deuxième et la troisième coupe montrent respectivement un accroissement (de 4,13 à 4,23 T MS/ha et de 29% à 31%). L'augmentation de la quantité d'eau disponible accroît la croissance des plantes et donc le rendement. Toutefois, la disponibilité en eau ne produit aucun effet sur les constituants en fibres des fourrages tropicaux (HIEP, 2009). En réalité, chez les fourrages tropicaux, l'accroissement de la température et l'intensité élevée de la lumière solaire pendant la saison humide entraînent une diminution des constituants en fibres (HIEP, 2009). Nous pouvons aussi considérer comme facteur climatique affectant la teneur en fibre la durée d'exposition prolongée des fourrages à la lumière du jour. Selon la base de données de la FAO, la température moyenne oscille entre 25,7 °C et 26,7°C et la durée moyenne de la lumière du jour entre 12,1 heures et 13,05 heures entre le mois de décembre et le mois de mars dans la zone d'étude (FAO & DWD, 2006). Ces données sont les plus élevées de l'année. L'augmentation de la teneur en matière sèche constatée en troisième coupe est liée au renforcement de la paroi cellulaire en fibres et en lignine. La troisième coupe a été effectuée en début de saison sèche (avril – mai) où la durée de la lumière du jour est plus courte (11,41 heures en moyenne) et où la température est plus fraîche (24,3°C en moyenne) (FAO & DWD, 2006). Pour *Brachiaria brizantha*, la teneur en matière sèche augmente puis diminue à une valeur plus faible que celle de la première coupe, alors que le rendement de la 3^{ème} coupe est plus important que celui de la 1^{ère} (cf. Tableau 3, p.69 ; Tableau 6, p.73). *Brachiaria brizantha* est une espèce qui se développe en touffes. La proportion de tiges augmente rapidement par rapport à celle des limbes quand les conditions (pluviométrie, radiation solaire, etc.) pour la photosynthèse sont favorables. Toutefois, la proportion de limbes augmente au fur et à mesure avec le numéro de la repousse et diminue moins vite en fin de saison de pluie. La diminution de la teneur en matière sèche en troisième coupe est due au déficit hydrique pendant cette période (fin de saison de pluie) entraînant une baisse de l'activité photosynthétique.

Les teneurs les plus élevées en matière sèche sont trouvées chez les céréales plantes entières et les plus faibles chez les fourrages pérennes (cf. Tableau 6 et 7, p.73). La paille de riz est la plus riche en matière sèche étant donné que c'est la plus lignifiée et la plus pauvre en constituants intracellulaires, notamment en matière azotée totale après le maïs (cf. Tableau 7, p.73). Nous notons également une teneur en matière sèche assez élevée chez le maïs, le niébé, la dolique et le *Brachiaria brizantha* en deuxième coupe (au stade début de floraison). La teneur en matière sèche la plus faible est remarquée chez *Brachiaria brizantha* en troisième coupe (au stade de fin de floraison).

Nous pouvons dire que la croissance des légumineuses tropicales est influencée principalement par la température et la radiation solaire élevée et ceci par rapport aux graminées. En revanche, pour les graminées tropicales, il s'agit du régime hydrique. Les variations de la teneur en matière sèche des fourrages pérennes par rang de coupe sont principalement dues à l'accroissement rapide (ou à la diminution) de la teneur en cellulose brute et en parois cellulaires des tiges plutôt qu'à l'accroissement (ou à la diminution) des rendements en biomasse fourragère ou en constituants intracellulaires des feuilles ou des limbes. Mais ce raisonnement est également valable pour celles des fourrages annuels.

➤ La matière minérale :

Nous observons que pour l'ensemble des fourrages analysés, la teneur en matière minérale (MM) est corrélée positivement et fortement avec la matière sèche ($r = 0,913$), la cellulose brute ($r = 0,832$), l'hémicellulose et la paroi cellulaire (NDF) ($r = 0,831$), les autres constituants pariétaux ($r > 0,7$), et négativement avec la matière azotée totale (MAT), l'énergie brute (EB) et métabolisable (EM) (cf. Tableau 5, p.72). Ce résultat semble être inhabituel et même en contradiction avec ceux mentionnés dans la littérature. Généralement la teneur en matière minérale montre une opposition avec les teneurs en constituants pariétaux et montre une corrélation plus ou moins élevée avec la teneur en matière azotée totale (INRA, 1988 ; RAKOTOARISON, 1993 ;

RAKOTONIRINA, 1996). D'autres travaux de recherche ont montré toutefois que la fertilisation accroît la teneur en NDF et ne produit aucun effet sur la teneur en ADF de quelques espèces autochtones (*Paspalum notatum*, *Cynodon dactylon*, *Cynodon nlemfuensis*) (HIEP, 2009). Les minéraux et les matières azotées se trouvent généralement en fortes proportions dans les feuilles de légumineuses et les limbes des graminées (INRA, 1988). Ce qui n'est pas le cas ici, car les résultats semblent montrer que les minéraux sont localisés en majorité dans les tiges plutôt que dans les feuilles et les limbes. Nous pouvons supposer que ce résultat est peut-être dû au fait que les fourrages annuels et pérennes récoltés ne sont pas suffisamment feuillus à cause du niveau de fertilisation très bas lors de la plantation de chaque culture. De plus, les paysans n'apportent ni engrais de fond pendant la création des parcelles de fourrages pérennes, ni fumures d'entretien pendant l'exploitation des fourrages. Pour les fourrages annuels, il n'y a pas d'apport d'engrais azoté (urée 46-0-0) d'entretien sauf pour le riz. Mais soulignons que l'hypothèse avancée ici nécessite encore d'être corroborée avec des essais sur terrain.

➤ **Les constituants pariétaux :**

Les constituants pariétaux sont fortement corrélés positivement entre eux ($r > 0,8$), avec la matière sèche et la cellulose brute, sauf pour la lignine (ADL) où nous notons une corrélation moyenne avec l'hémicellulose ($r = 0,76$) (cf. Tableau 5, p.72). La teneur en constituants pariétaux augmente généralement avec l'âge de la plante. Les fourrages les plus riches en parois cellulaires (NDF) et en lignocellulose (ADF) sont les céréales plantes entières (la paille de riz et le maïs) (cf. Tableau 6 et 7, p.73). Elles contiennent également le taux le plus élevé en lignine (ADL), c'est-à-dire que ce sont les plantes les moins digestibles parmi les 6 espèces. Le *Brachiaria brizantha* est l'espèce la plus pauvre en lignine. Pour *Brachiaria brizantha*, la teneur en constituants pariétaux diminue avec le numéro de repousse, démontrant une diminution de la teneur en fibres et en lignines et une augmentation de la digestibilité de l'azote et de l'énergie. Il en est de même pour *Stylosanthes guianensis*. Une baisse concomitante des teneurs en fibres et en matière sèche est constatée en deuxième coupe. Ce qui confirme bien l'hypothèse de la diminution de la teneur en fibre des fourrages pérennes tropicaux au fur et à mesure que la température, le régime hydrique et l'intensité de la radiation solaire augmentent pendant la saison humide. Nous remarquons également que les fourrages annuels sont plus riches en fibres et en lignine que les fourrages pérennes.

➤ **La matière azotée totale :**

Pour les fourrages pérennes, nous constatons en général que la teneur en matière azotée totale (MAT) augmente avec le numéro de la repousse (cf. Tableau 6, p.73), même si nous remarquons une légère flexion en deuxième coupe (stade début de floraison) pour *Stylosanthes guianensis*. Cette légère baisse s'explique par le fait que les feuilles et les tiges évoluent à peu près dans les mêmes proportions au cours des cycles successifs de repousse. L'analyse de la corrélation entre la teneur en matière azotée totale, en matière sèche, en cellulose brute et en constituants pariétaux montre un coefficient de corrélation négatif (cf. annexe n°14 et 15, p.xxi). *Brachiaria brizantha* et *Stylosanthes guianensis* sont de plus en plus feuillus et plus riches en azote au cours des cycles successifs de repousse. Comme susmentionné, nous constatons en même temps une diminution de la teneur en fibres (NDF et ADF). La teneur optimale en matière azotée totale est enregistrée en troisième coupe, au stade de fin de floraison pour les graminées et de fructification pour les légumineuses.

Les résultats obtenus avec la statistique descriptive confirment bien ceux obtenus précédemment avec l'analyse en composantes principales. Les fourrages les plus riches en matière azotée totale sont les légumineuses annuelles à savoir la dolique et le niébé avec respectivement 282,09 g/Kg MS et 237 g/Kg MS (cf. Tableau 7, p.73), tandis que ceux qui en sont les plus pauvres sont le *Brachiaria brizantha* en première coupe (au stade pâturage), la paille de riz et le maïs au stade vitreux (avec une teneur en matière sèche de 50,63%) (cf. Tableau 7, p.73). Les légumineuses fourragères (pérennes et annuelles) sont les plus riches en azote tandis que les céréales plantes entières (riz, maïs) en sont les plus pauvres.

➤ **L'énergie brute et l'énergie métabolisable :**

La teneur en énergie brute (EB) par cycle de repousse varie peu pour *Stylosanthes guianensis*, tandis qu'elle augmente pour *Brachiaria brizantha* (cf. Tableau 6, p.73). La teneur en énergie métabolisable (EM)

augmente au fur et à mesure des cycles de repousse pour les deux fourrages pérennes, mais cette observation est surtout palpable chez *Brachiaria brizantha*. La digestibilité azotée et énergétique augmente chez cette dernière à cause de l'accroissement de la proportion de limbes par cycles de repousse et de la diminution de la teneur en fibres et en lignine. Toutefois, *Stylosanthes guianensis* est plus riche en énergie brute et en énergie métabolisable que *Brachiaria brizantha* pour tous les stades de végétation, sauf au stade de fin de floraison où nous trouvons une teneur supérieure en énergie métabolisable (de 2,04 Kcal/Kg MS) pour *Brachiaria brizantha* (cf. Tableau 6, p.73).

Pour l'ensemble des fourrages analysés, les légumineuses annuelles (dolique, niébé) transforment mieux l'énergie brute que les graminées (annuelles et pérennes) et présentent ainsi des teneurs en énergie métabolisable élevées (2,21 Kcal/g MS pour la dolique et 2,11 Kcal/g MS pour le niébé) (cf. Tableau 7, p.73). Bien entendu, la paille de riz est la plus pauvre en énergie (brute et métabolisable) étant donné que c'est la moins digestible de tous. Dans tous les cas, nous notons une supériorité des légumineuses par rapport aux graminées en matière de teneur en énergie (brute et métabolisable).

III – 2 – B Commune Rurale de Bemanonga

La qualité de représentation des variables sélectionnées montre des variances élevées dans chaque variable (cf. Annexe n°16 ; 16-1, p.xxii). Au total, l'analyse en composantes principales a permis d'extraire trois composantes qui expliquent environ 95,06% de la variabilité constatée au niveau des dix variables originelles (cf. Annexe n°16 ; 16-3, p.xxii). L'utilisation des trois composantes extraites permet de réduire la complexité des données avec seulement 4,94% de pertes d'informations. La première composante permet à elle seule d'expliquer près de 60% de la variabilité constatée au niveau des variables de départ, tandis que la deuxième, près de 25% (cf. Annexe n°16 ; 16-3, p.xxii).

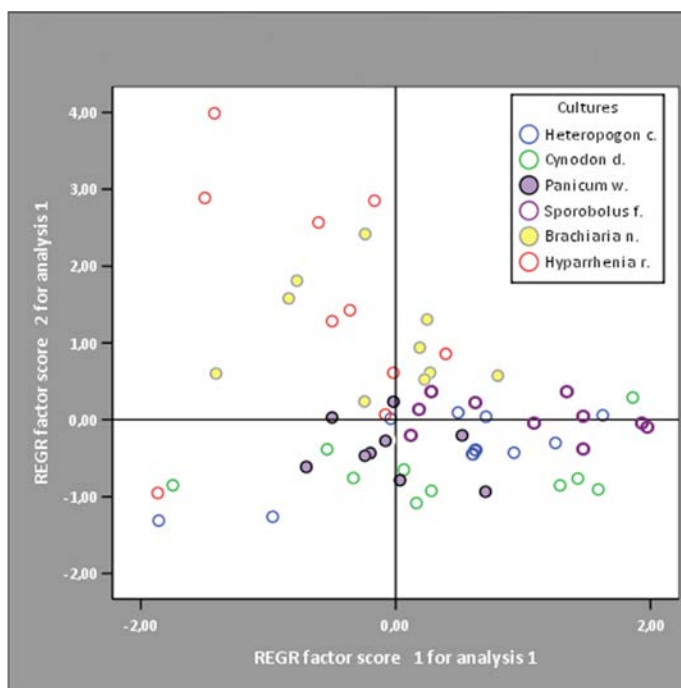
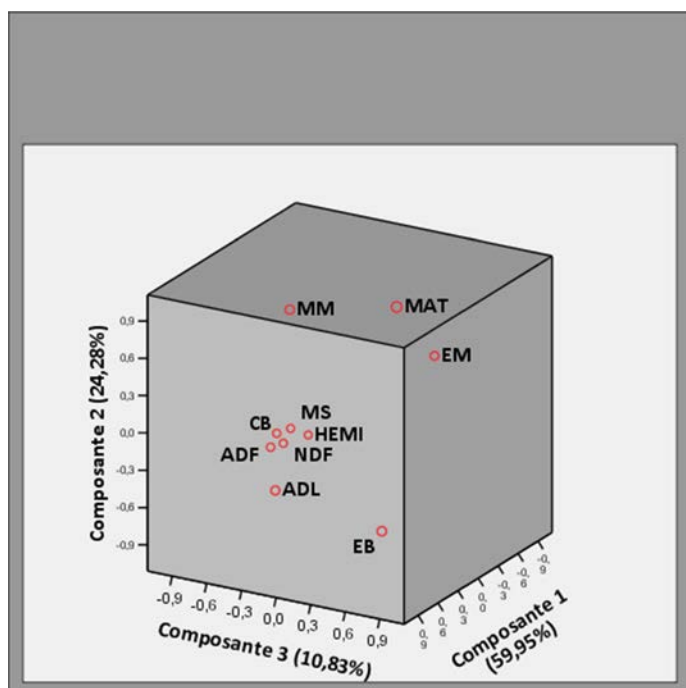
- **La première composante** : est fortement corrélée avec les variables NDF, ADF, MS, CB, hémicellulose et ADL (cf. Tableau 8, p.77; Graphique 6, p.77). La paroi cellulaire (NDF) et la lignocellulose sont les meilleures représentantes de cette composante. Nous constatons que ces variables sont en corrélations négatives avec la matière azotée totale (MAT), faiblement corrélées positivement ou négativement avec les teneurs en matière minérale (MM), en énergies brutes (EB) et en énergies métabolisables (EM). Elles sont fortement en corrélation positive entre elles (cf. Tableau 8, p.77). Cette première composante regroupe les graminées riches en fibres et en lignines. La teneur en matière azotée diminue quand l'âge de la plante ou de la repousse augmente, c'est-à-dire quand la teneur en fibres et en lignines augmente.
- **La deuxième composante** : est fortement corrélée avec la MAT et MM, moyennement corrélée avec EM, et corrélée négativement avec ADL et EB (cf. Tableau 8, p.77; Graphique 6, p.77). La matière azotée totale (MAT) et la teneur en matière minérale (MM) sont les meilleures représentantes de cette composante. Nous constatons que la matière azotée totale (MAT) est en corrélation négative avec les constituants pariétaux, la cellulose brute (CB), l'hémicellulose (HEMI) et l'énergie brute (EB) (cf. Tableau 8, p.77). La teneur en matière minérale (MM) est en corrélation négative avec l'énergie brute (EB) (cf. Tableau 8, p.77). Quand la teneur en minéraux est élevée, la teneur en énergie brute est faible. Il en est de même entre la teneur en matière azotée totale et les constituants pariétaux. Cette deuxième composante regroupe donc les fourrages riches en constituants intracellulaires et pauvres en fibres et en lignines.
- **La troisième composante** : est corrélée très moyennement ($r = 0,758$) avec la teneur en énergie métabolisable (EM) et est corrélée négativement avec CB, NDF, ADF, ADL et MM (cf. Tableau 8, p.77; Graphique 6, p.77). Elle représente à peine 10,83% de la variabilité constatée au niveau des variables originelles (cf. Tableau 8, p.77). Toutefois, sa connaissance permet de distinguer nettement les graminées les plus digestibles en termes d'énergie parmi les six espèces herbacées. La teneur en

énergie métabolisable (EM) est en corrélation négative avec la lignocellulose (ADF), la teneur en lignine (ADL) et l'énergie brute (EB) (cf. Tableau 8). La lignocellulose (ADF) et la lignine (ADL) étant les principaux facteurs qui entravent la digestion des constituants intracellulaires dont les glucides.

La projection des fourrages sur un plan des axes des deux premières composantes dévoile que les fourrages les plus riches en cellulose brute, en matière sèche et en constituants pariétaux sont le *Sporobolus festivus*, l'*Heteropogon contortus* et le *Cynodon dactylon* (cf. Graphique 7). *Sporobolus festivus* a une moyenne supérieure aux deux autres espèces. Les fourrages les plus riches en matière azotée et en matière minérale sont l'*Hypparrhenia rufa* et le *Brachiaria nana*. *Panicum voeltzkowii* a une composition chimique et énergétique moyenne par rapport aux cinq espèces susmentionnées. Toutefois, *Panicum voeltzkowii* est pauvre en constituants pariétaux, en énergie métabolisable et en matière azotée par rapport à *Sporobolus festivus*.

Tableau 8 : Matrice de corrélation entre les composants chimiques et énergétiques des fourrages.

	MS	MM	MAT	NDF	ADF	ADL	HEMI	CB	EB	EM
MS	1,000									
MM	0,482	1,000								
MAT	-0,261	0,427	1,000							
NDF	0,988	0,394	-0,355	1,000						
ADF	0,960	0,374	-0,395	0,984	1,000					
ADL	0,759	0,001	-0,543	0,828	0,865	1,000				
HEMI	0,967	0,400	-0,267	0,959	0,894	0,715	1,000			
CB	0,974	0,454	-0,320	0,983	0,987	0,782	0,912	1,000		
EB	0,318	-0,650	-0,561	0,388	0,365	0,591	0,399	0,295	1,000	
EM	0,213	0,314	0,488	0,090	-0,032	-0,326	0,282	0,081	-0,029	1,000



Graphique 6 : Diagramme des composantes dans l'espace Graphique 7 : Projection des individus sur le plan P (axes F1-F2) (axes F1-F2-F3 : 95,06%)

Tableau 9 : Valeurs bromatologiques des fourrages pérennes.

		Cultures					
		<i>Heteropogon contortus</i>	<i>Cynodon dactylon</i>	<i>Panicum woeltzkowii</i>	<i>Sporobolus festivus</i>	<i>Brachiaria nana</i>	<i>Hyparrhenia rufa</i>
MS (g/Kg MV)	Moyenne	470,05	457,15	439,02	503,6	460,72	407,02
	Ecart type	153,0	174,3	45,4	35,4	109,5	127,4
MM (g/Kg MS)	Moyenne	37,22	30,88	33,28	42,33	42,82	45,47
	Ecart type	11,37	10,80	3,60	5,66	8,48	22,60
MAT (g/Kg MS)	Moyenne	41,78	54,03	55,77	59,77	70,99	72,43
	Ecart type	11,13	10,61	12,70	15,2	21,40	26,97
NDF (g/Kg MS)	Moyenne	360,19	341,61	334,67	364,77	335,84	288,79
	Ecart type	118,17	128,18	39,80	25,8	77,58	90,86
ADF (g/Kg MS)	Moyenne	225,46	214,33	213,13	224,57	199,74	166,50
	Ecart type	72,06	86,36	25,65	35,4	45,64	44,52
ADL (g/Kg MS)	Moyenne	39,65	44,80	38,52	36,30	33,27	23,19
	Ecart type	12,08	19,53	6,68	14,7	4,99	15,49
HEMI (g/Kg MS)	Moyenne	134,74	127,28	121,54	140,20	136,11	122,28
	Ecart type	46,34	42,49	17,67	40,7	32,11	48,49
CB (g/Kg MS)	Moyenne	196,08	183,18	184,32	197,60	176,20	154,54
	Ecart type	64,70	72,02	22,12	33,2	43,84	42,04
EB (Kcal/Kg MS)	Moyenne	4169,31	4247,28	4212,59	4183,24	4149,43	4051,85
	Ecart type	62,05	41,90	46,65	41,7	70,06	249,59
EM (Kcal/Kg MS)	Moyenne	1446,54	1500,47	1475,81	1579,02	1614,69	1582,88
	Ecart type	53,06	97,35	82,61	75,8	52,39	216,07

➤ **La matière sèche :**

La teneur en matière sèche (MS) est corrélée fortement avec la paroi cellulaire (NDF) ($r = 0,99$), la cellulose brute (CB) ($r = 0,97$), l'hémicellulose (HEMI) ($r = 0,97$) et la lignocellulose (ADF) ($r = 0,96$), et est corrélée négativement mais très faiblement avec la matière azoté totale (MAT) (cf. Tableau 8, p.77). Le *Sporobolus festivus* possède la teneur en matière sèche la plus élevée, suivie par *Heteropogon contortus* et *Brachiaria nana* (cf. Tableau 9). La teneur la plus faible est chez *Hyparrhenia rufa*. Nous remarquons que le fourrage le moins productif en termes de biomasses (1,39 T MS/ha) possède la teneur en matière sèche la plus élevée avec 503,6 g/Kg MV (cf. Tableau 4, p.71; Tableau 9). Toutefois, la comparaison s'arrête juste à ce point car la hiérarchie sur le rapport entre le rendement en biomasse fourragère et la teneur en matière sèche n'est plus respectée. Comme l'*Heteropogon contortus* possède la teneur en matière sèche la plus élevée après le *Sporobolus festivus*, elle aurait dû être l'une des moins productives du lot. Pourtant, nous constatons qu'elle est parmi les plus productives avec des rendements variant entre 1,88 et 2,69 T MS/ha (cf. Tableau 4, p.71). Ces remarques sont également valables pour le cas des autres fourrages comme le *Cynodon dactylon* ou le *Panicum woeltzkowii*. La variabilité par espèce constatée est donc probablement liée à d'autres facteurs non pris en compte dans ce travail, comme les caractéristiques morphologiques et physiologiques des plantes, le stade de développement, etc..

➤ **Les constituants pariétaux :**

Les constituants pariétaux sont fortement corrélés positivement entre eux, ainsi qu'avec la matière sèche et la cellulose brute (cf. Tableau 9). Même si les teneurs en constituants pariétaux sont fortement corrélées avec la teneur en matière sèche, nous remarquons que la hiérarchie obtenue sur la teneur en matière sèche est quelque peu modifiée selon le type de composants chimiques considéré. Si nous considérons par exemple la teneur en parois cellulaires (NDF), nous trouvons que *Sporobolus festivus* est toujours l'espèce qui en est la plus riche, suivie par *Heteropogon contortus*, mais en troisième position, nous avons le *Cynodon dactylon* au lieu de

Brachiaria nana (cf. Tableau 9, p.78). Pour la lignocellulose, la teneur la plus élevée est repérée chez *Heteropogon contortus*, suivie par *Sporobolus festinus*, tandis qu'elle est à peu près similaire pour *Cynodon dactylon* et *Panicum voeltzkowii* (cf. Tableau 9, p.78). Pour la lignine en revanche, nous trouvons la teneur la plus élevée chez *Cynodon dactylon*, *Heteropogon contortus* et *Panicum voeltzkowii*. Sans aucun doute, ces trois espèces sont donc les moins digestibles des six espèces analysées. Quels que soient les constituants considérés, la teneur la plus faible est chez *Hyparrhenia rufa*. Nous pouvons dire que *Hyparrhenia rufa* présente de meilleures qualités en termes de digestibilité étant donné qu'elle est pauvre en lignocellulose et en lignine, les principaux facteurs qui entravent la digestion des constituants intracellulaires. *Cynodon dactylon* et *Heteropogon contortus* sont les plus médiocres en termes de qualité, étant donné que ce sont les plus lignifiés parmi les échantillons analysés.

➤ **La matière minérale et la matière azotée totale :**

Ces deux paramètres sont les représentants de la deuxième composante de l'analyse en composantes principales. Pourtant, nous remarquons qu'ils sont faiblement corrélés positivement entre eux ($r = 0,43$) (cf. Tableau 8, p.77). Nous remarquons aussi que la matière azotée totale (MAT) est en corrélation négative mais à un niveau faible ($|r| < 0,55$) avec les constituants pariétaux, la cellulose brute (CB), l'hémicellulose (HEMI) et l'énergie brute (EB) (cf. Tableau 8, p.77). Il n'y a pas de lien particulier entre l'évolution de la teneur en matière azotée et de la teneur en constituants pariétaux. La matière minérale en revanche est en corrélation positive mais également à un niveau très faible ($r < 0,5$) avec les constituants pariétaux, la cellulose brute (CB) et l'hémicellulose (HEMI) (cf. Tableau 8, p.77). Ces observations s'expliquent par le fait que la proportion de ces deux paramètres dans les différentes parties de la plante (tiges, limbes, etc.) et dans les constituants intracellulaires n'est pas la même. La proportion de matière minérale présente dans les tiges et les gaines des graminées est peut-être supérieure à celle de la matière azotée (d'où la corrélation positive). La matière azotée est localisée essentiellement dans les limbes (d'où la corrélation négative).

Hyparrhenia rufa et *Brachiaria nana* sont les plus riches en matière azotée totale et en matière minérale (cf. Tableau 9, p.78). *Heteropogon contortus* est la plus pauvre en matière azotée et *Cynodon dactylon* et *Panicum voeltzkowii* sont les moins fournies en matière minérale (cf. Tableau 9, p.78). Ces différences sont dues à la morphologie et à la composition chimique des plantes.

Concernant la morphologie, même si des différences sont constatées entre *Hyparrhenia rufa* et *Brachiaria nana* par rapport à certains critères comme la taille par exemple, elles possèdent comme caractère commun d'être des graminées feuillues (BOUDET, 1975a) et pauvres en constituants pariétaux et en cellulose (cf. Tableau 9, p.78). *Heteropogon contortus* est une espèce à maturité précoce (dès février), remontante, héliophile et capable d'atteindre une hauteur de 20 à 75 cm (BOSSER, 1969). Son cycle végétatif est court par rapport à d'autres graminées pérennes comme *Hyparrhenia rufa* et il se lignifie très vite. *Cynodon dactylon* est une espèce pérenne, stolonifère et rampante à feuilles fines (BOSSER, 1969). *Panicum voeltzkowii* est une graminée herbacée de petite taille dépassant rarement 50 cm de hauteur. Toutefois, il possède une meilleure proportion de limbes par rapport à *Cynodon dactylon* et *Heteropogon contortus* quand les conditions sont favorables (pluviométrie, etc.).

Concernant la composition chimique, nous remarquons que les trois graminées avec une forte teneur en lignocellulose et en lignine sont les moins riches en matière azotée totale et en matière minérale, et vice versa.

➤ **L'énergie brute et l'énergie métabolisable :**

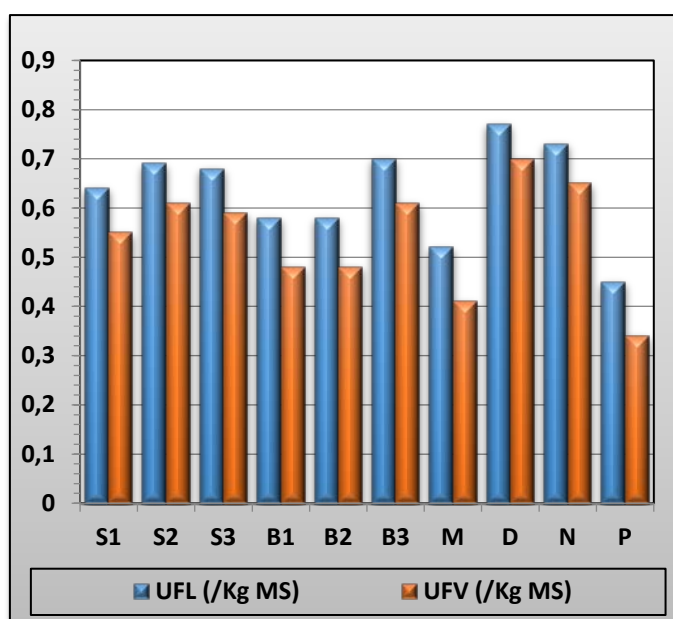
Comme les six espèces sont toutes des graminées, leur teneur en énergie brute (EB) varie peu et se situe entre 4051,85 Kcal/Kg MS et 4247,28 Kcal/Kg MS (cf. Tableau 9, p.78). Ce résultat est semblable à ceux cités par STOBBS et MINSON : la valeur énergétique brute des fourrages coupés au stade de maturité est relativement constante d'une espèce à l'autre (STOBBS & MINSON, 1980). La transformation de l'énergie brute en énergie métabolisable est élevée chez *Hyparrhenia rufa*, *Sporobolus festinus* et *Brachiaria nana* (cf. Tableau 9, p.78). *Brachiaria nana* présente la valeur énergétique métabolisable la plus élevée avec 1,61 Kcal/g MS et la valeur la plus faible est trouvée chez *Heteropogon contortus* avec 1,45 Kcal/g MS. Pour *Hyparrhenia rufa*, la teneur en

énergie brute et métabolisable est moins élevée par rapport à celle de *Brachiaria nana* car il contient plus de matière minérale qui ne fournit pas d'énergie.

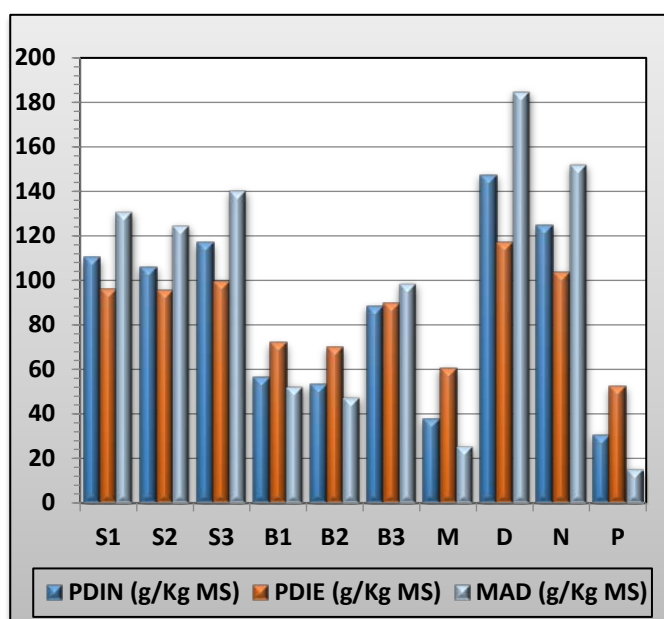
III – 3 La valeur nutritive des fourrages

III – 3 – A Communes Rurales d'Imerimandroso et d'Amparihitsokatra

Le rendement d'utilisation de l'énergie métabolisable (EM) et de la matière azotée totale (MAT) est plus élevé chez les légumineuses annuelles (dolioque, niébé) que chez les autres fourrages. La supériorité des légumineuses sur les graminées est également maintenue que ce soit en termes d'énergie nette ou en termes de protéines/matières azotées digestibles.



Graphique 8 : Valeurs UFL et UFV (/Kg MS) des fourrages



Graphique 9 : Valeurs PDIN, PDIE et MAD (g/Kg MS) des fourrages

S1 : *Stylosanthes g.* (1^{ère} coupe) ; S2 : *Stylosanthes g.* (2^{ème} coupe) ; S3 : *Stylosanthes g.* (3^{ème} coupe) ; B1 : *Brachiaria b.* (1^{ère} coupe) ; B2 : *Brachiaria b.* (2^{ème} coupe) ; B3 : *Brachiaria b.* (3^{ème} coupe) ; M : Maïs ; D : Dolioque ; N : Niébé ; P : Paille de riz.

En ce qui concerne les valeurs énergétiques et pour l'ensemble des fourrages analysés, il n'y a pas de changements majeurs constatés pour l'efficacité d'utilisation de l'énergie métabolisable en énergie nette. Les légumineuses annuelles (dolioque, niébé) sont les plus riches en énergie nette (cf. Tableau 10 et Tableau 11, p.81). Les graminées annuelles (paille de riz, maïs) possèdent des valeurs énergétiques médiocres, tandis que les fourrages pérennes ont des valeurs énergétiques intermédiaires (cf. Tableau 10 et Tableau 11, p.81). En particulier, la valeur moyenne (sur les trois coupes) d'UFL est comprise entre 0,6 et 0,7 et celle d'UFV entre 0,5 et 0,6. Le *Stylosanthes guianensis* est plus riche en énergie que *Brachiaria brizantha* pour tous les stades de végétation à l'exception du stade de fin de floraison où l'on trouve une valeur UFL supérieure pour *Brachiaria brizantha* (cf. Tableau 10, p.81).

Pour les valeurs azotées et pour l'ensemble des fourrages analysés (à l'exception de *Brachiaria brizantha* au stade de début de floraison), la teneur en matière azotée totale et son efficacité d'utilisation sous forme de matières azotées digestibles suivent à peu près les mêmes progressions. En revanche, pour *Brachiaria brizantha* au stade de début de floraison, alors que la teneur en matière azotée totale augmente avec le cycle de

repousse (cf. Tableau 10), nous constatons une légère baisse de la teneur en matières azotées digestibles (PDIN, PDIE et MAD) en deuxième coupe (cf. Tableau 10). Cette baisse est probablement due à l'augmentation de la teneur en matière sèche et en constituants pariétaux pendant cette période. Les légumineuses annuelles sont les plus riches en protéines digestibles (PDIN, PDIE et MAD) et les graminées annuelles en sont les plus pauvres. Les légumineuses fourragères (pérennes et annuelles) sont plus riches en protéines digestibles que les graminées (pérennes et annuelles). Parmi les graminées, les céréales plantes entières (maïs, paille de riz) ont des valeurs protéiques moins élevées que *Brachiaria brizantha*.

Tableau 10 : Valeurs énergétiques et azotées des fourrages pérennes.

		Cultures							
		<i>Stylosanthes guianensis</i>				<i>Brachiaria brizantha</i>			
		Ordre de coupe				Ordre de coupe			
		1ère coupe	2ème coupe	3ème coupe	Moyenne	1ère coupe	2ème coupe	3ème coupe	Moyenne
UFL (/Kg MS)	Moyenne	0,64	0,69	0,68	0,67	0,58	0,58	0,70	0,62
	Ecart type	0,06	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,04	0,07
UFV (/Kg MS)	Moyenne	0,55	0,61	0,59	0,58	0,48	0,48	0,61	0,53
	Ecart type	0,07	0,05	0,05	0,06	0,07	0,07	0,05	0,09
PDIA (g/Kg MS)	Moyenne	47,98	46,38	51,52	48,54	27,22	25,13	41,33	31,23
	Ecart type	6,26	9,49	2,96	7	10,34	12,60	9,04	12,64
PDIN (g/Kg MS)	Moyenne	110,23	106,04	116,91	110,89	56,54	53,14	88,32	66
	Ecart type	14,45	20,88	5,94	15,47	24,29	27,59	20,24	28,24
PDIE (g/Kg MS)	Moyenne	95,93	95,41	99,84	96,98	72,00	70,01	89,51	77,17
	Ecart type	8,88	12,50	4,30	9,24	13,10	14,61	9,86	15,06
MAD (g/Kg MS)	Moyenne	130,73	124,63	140,32	131,65	52,63	47,79	98,61	66,35
	Ecart type	20,94	30,19	8,57	22,37	35,20	39,88	29,27	40,86
UEL (/Kg MS)	Moyenne	1,09	1,08	1,08	1,08	1,15	1,16	1,08	1,13
	Ecart type	0,03	0,04	0,02	0,03	0,07	0,06	0,04	0,07
UEB (/Kg MS)	Moyenne	1,17	1,15	1,14	1,15	1,30	1,32	1,14	1,26
	Ecart type	0,07	0,08	0,04	0,07	0,16	0,12	0,07	1,14

Tableau 11 : Valeurs énergétiques et azotées des fourrages annuels.

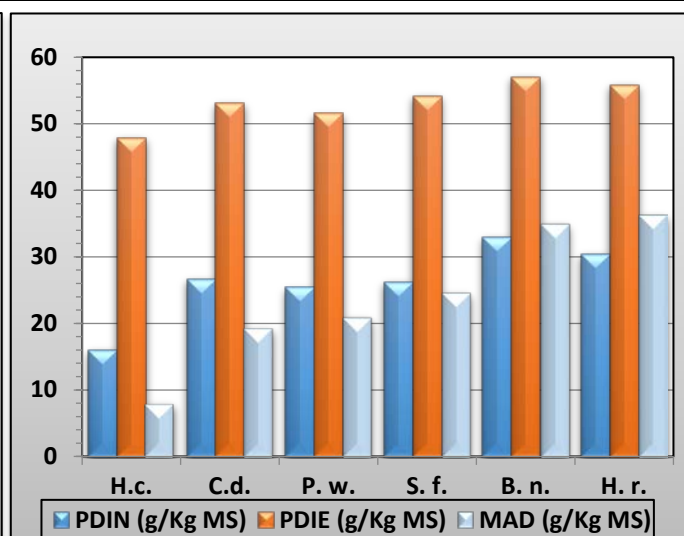
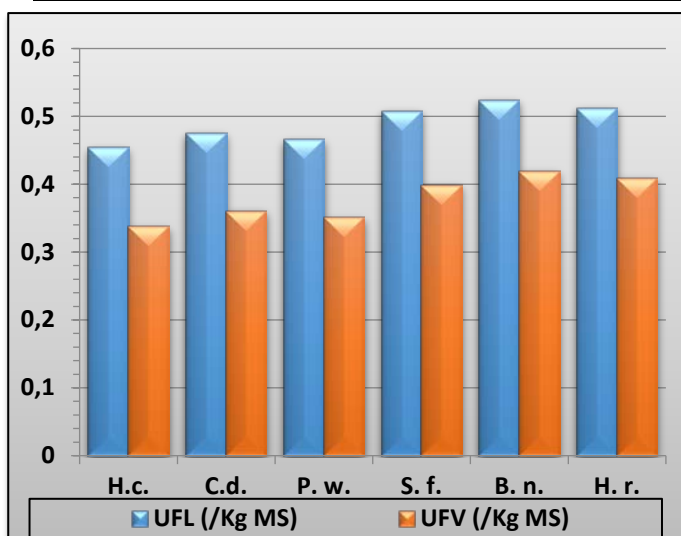
	Cultures							
	Maïs		Dolique		Niébé		Paille de riz	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
UFL (/Kg MS)	0,52	0,06	0,77	0,03	0,73	0,07	0,45	0,01
UFV (/Kg MS)	0,41	0,07	0,70	0,03	0,65	0,08	0,34	0,01
PDIA (g/Kg MS)	17,78	5,23	63,41	12,98	53,27	15,33	13,86	3,00
PDIN (g/Kg MS)	37,83	12,32	147,32	27,96	124,80	35,81	30,63	6,06
PDIE (g/Kg MS)	60,69	7,56	117,08	15,04	103,76	19,21	52,38	3,48
MAD (g/Kg MS)	25,71	17,85	184,55	40,38	151,98	51,90	15,39	8,74
UEL (/Kg MS)	1,21	0,06	1,02	0,02	1,05	0,04	1,24	0,03
UEB (/Kg MS)	1,44	0,14	1,04	0,03	1,10	0,08	1,50	0,07

III – 3 – B Commune Rurale de Bemanonga

Les espèces avec une teneur élevée en énergie métabolisable (EM) et en matière azotée totale (MAT) sont les plus riches en énergie nette (UFL, UFV) et en matière azotée digestible (PDIN, PDIE, MAD), à savoir *Hyparrhenia rufa*, *Sporobolus festivus* et *Brachiaria nana* (cf. Tableau 12 ; Graphique 10 et 11). *Heteropogon contortus* est la moins pourvue en énergie nette et en matière azotée digestible. Nous constatons toutefois que même si la teneur en matière azotée totale de *Cynodon dactylon* est inférieure à celle de *Panicum voeltzkowii*, sa teneur en PDIN et PDIE est supérieure. Autrement dit, l'efficacité d'utilisation de la matière azotée totale en protéines digestibles est plus élevée chez *Cynodon dactylon* que chez *Panicum voeltzkowii*. Basés sur la qualité de leur valeur énergétique et azotée, ces deux fourrages sont moins intéressants en tant qu'aliment pour les ruminants que les trois premiers.

Tableau 12 : Valeurs énergétiques et azotées des graminées pérennes.

		Cultures					
		<i>Heteropogon contortus</i>	<i>Cynodon dactylon</i>	<i>Panicum voeltzkowii</i>	<i>Sporobolus festivus</i>	<i>Brachiaria nana</i>	<i>Hyparrhenia rufa</i>
UFL (/Kg MS)	Moyenne	0,45	0,48	0,47	0,51	0,52	0,51
	Ecart type	0,02	0,04	0,03	0,02	0,02	0,09
UFV (/Kg MS)	Moyenne	0,34	0,36	0,35	0,40	0,42	0,41
	Ecart type	0,02	0,04	0,04	0,01	0,02	0,10
PDIA (g/Kg MS)	Moyenne	9,39	12,14	12,54	13,44	15,96	16,28
	Ecart type	2,50	2,39	2,85	1,83	4,81	6,06
PDIN (g/Kg MS)	Moyenne	15,98	26,59	25,35	26,24	32,94	30,38
	Ecart type	4,85	4,39	7,19	7,24	11,29	10,09
PDIE (g/Kg MS)	Moyenne	47,90	53,07	51,53	54,14	57,02	55,82
	Ecart type	3,37	3,03	4,00	1,54	5,24	3,36
MAD (g/Kg MS)	Moyenne	7,97	19,25	20,86	24,55	34,88	36,21
	Ecart type	10,25	9,78	11,69	11,76	19,71	24,84
UEL (/Kg MS)	Moyenne	1,31	1,27	1,29	1,25	1,23	1,23
	Ecart type	0,02	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04
UEB (/Kg MS)	Moyenne	1,70	1,58	1,62	1,54	1,47	1,49
	Ecart type	0,07	0,08	0,11	0,01	0,08	0,11



Graphique 10 : Valeurs UFL et UFV (/Kg MS) des fourrages pérennes.

Graphique 11 : Valeurs PDIN, PDIE et MAD (g/Kg MS) des fourrages pérennes.

H.c. : *Heteropogon contortus* ; C.d. : *Cynodon dactylon* ; P.w. : *Panicum voeltzkowii* ; S.f. : *Sporobolus festivus* ; B.n. : *Brachiaria nana* ; H.r. : *Hyparrhenia rufa*.

III – 4 L'intérêt porté par les éleveurs bovins en milieu extensif aux innovations techniques dans le domaine de l'élevage¹⁶

Par ordre d'importance, le scoring sur les attentes locales vis-à-vis des innovations techniques montre que les techniques qui ont significativement ($p < 0,01$) le plus intéressé les éleveurs sont :

1. La fixation des lieux de pâtures pour chaque propriétaire de bovins pour équilibrer l'offre fourragère en fonction des besoins du troupeau ;
2. La valorisation de la fumure animale par l'amélioration du système de parage dans le but de récupérer la fumure animale et de la restituer dans les prairies pour reconstituer la fertilité organique du sol ;
3. L'arrêt des feux de brousse par la mise en place de mesures préventives contre les feux (pare-feu, mise en place de comités locaux de surveillance, etc.) ;
4. La culture du foin ;
5. L'amélioration des pâturages par la culture fourragère ;
6. La rotation des lieux de pâtures.
7. Autres techniques (non-spécifiés).

En réalité, toutes ces techniques sont complémentaires si nous nous plaçons dans le contexte et la logique d'une intensification du système d'élevage. Toutefois, l'approche adoptée ici permet d'apprécier les perceptions des éleveurs locaux face aux problèmes de leur environnement. A titre d'exemple, les éleveurs ont choisi en première position (28,8 % des jetons, cf. II – 2 ; II – 2 – C, p.65) la fixation des lieux de pâtures pour chaque propriétaire de bovins pour équilibrer l'offre fourragère en fonction des besoins du troupeau. Les éleveurs sont conscients de l'existence de surpâturage dans certaines parcelles à une période donnée de l'année. Logiquement, cette technique devrait être utilisée conjointement avec la rotation des lieux de pâture. Mais cette dernière technique n'a été choisie qu'en sixième position. Ceci reflète une difficulté des éleveurs locaux à respecter les règles de jeu si on crée d'un commun accord entre les usagers et les propriétaires fonciers un pâturage communautaire régi par des règles de gestion collective de l'exploitation de l'espace. Ceci s'explique par le fait que, généralement, les gardiens de troupeaux sont souvent des enfants incapables de comprendre et de respecter convenablement les règles éventuelles établies. Pour éviter les conflits qui pourraient en resurgir, les éleveurs préféreraient ainsi délimiter l'espace pour chaque propriétaire bovin et gérer individuellement les parcelles qui leurs seraient attribuées. En deuxième position (22,8 % des jetons), ils ont choisi la valorisation de la fumure animale par l'amélioration du système de parage dans le but de récupérer le fumier et de le restituer dans les prairies pour reconstituer la fertilité organique du sol. Ils sont donc plus que conscients de la nécessité d'améliorer la productivité des prairies naturelles et la qualité nutritionnelle des fourrages. Le choix, en troisième position (22,7 % des jetons) d'arrêter les feux de brousse confirme bien ces observations. Ils sont conscients de l'action néfaste de ces feux sur la qualité de l'herbe offerte aux animaux. En quatrième position (11,3 % des jetons), ils ont choisi la culture de foin et en cinquième (6,9 % des jetons) la culture fourragère. En réalité, ces deux techniques reviennent au même mis à part le fait que la première consiste à stocker le fourrage et la deuxième à l'exploiter en vert. Cependant, certains éleveurs ont préféré la culture de foin en quatrième position (11,3% des jetons) à celle de fourrage vert. Ceux-ci sont conscients de la nécessité de faire des reports de stocks ou de cultiver des fourrages pour enrichir l'alimentation des ruminants pendant la saison sèche, alors que ceux

¹⁶ Une partie de ce sous - chapitre est basée sur :

ANDRIAMAROSOA R.N.R.S., DIRAC R.C., SORG J.P., BUTTLER A., 2010. *Optimisation socio-économique et écologique des systèmes d'élevage (Menabe central, Madagascar)*. Science et changements planétaires « Sécheresse » 21(3) – John Libbey Eurotext. Pp. 211 – 218.

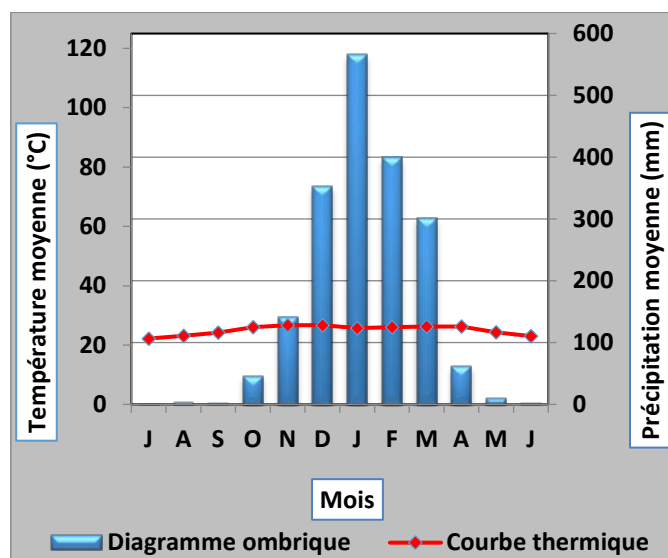
DIRAC R.C., 2010. *Stratégies villageoises dans la gestion des paysages forestiers, Menabe Central Madagascar*. Thèse de Doctorat soutenue à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 119 pages + annexes.

qui opteraient plutôt pour la culture de fourrage vert (en cinquième position : 6,9% des jetons) sont conscients de la nécessité d'améliorer la qualité de l'alimentation par la complémentation des graminées issues de prairies naturelles avec d'autres fourrages cultivés et de meilleure qualité. Seul le foin a été cité comme technique de conservation étant donné que c'est la seule technique de stockage de fourrage connue par les éleveurs locaux. Même si la fréquence des éleveurs qui ont préféré ces deux techniques n'est pas énorme (18,2%) comparé à ceux qui ont choisis les trois premières techniques sélectionnées (74,3%), ceci démontre que l'introduction des innovations techniques comme la culture fourragère dans les zones d'élevage extensif demeure possible. Mais pour cela, cette minorité d'éleveur doit être en mesure de prouver la justesse de leurs perceptions. La meilleure stratégie consiste donc à initier certains éleveurs à la culture fourragère et à diverses techniques d'intensification (fabrication d'ensilages, etc.) et ils pourront éventuellement servir à leur tour de leaders d'opinion en favorisant l'approche paysan – paysan dans le but de sensibiliser le reste des éleveurs à pratiquer ces techniques.

IV – Discussions

IV – 1 Pour les fourrages cultivés

Concernant le rendement en biomasse fourragère, les résultats obtenus avec les fourrages annuels semblent montrer qu'en une seule coupe effectuée vers la fin de la saison de pluie (mars-avril), ces espèces ont pu bénéficier des effets cumulés de la pluie et présentent une population plus homogène. Pour les fourrages pérennes, le pic de rendement enregistré en deuxième coupe est peut-être dû au fait que les mois de janvier et de février (mois de l'échantillonnage de la deuxième coupe) sont les mois les plus arrosés de l'année (566 – 399 mm) alors que la température moyenne oscille à peine entre 25 et 26°C (FAO & DWD, 2006)(cf. Graphique 12). En comparant ces résultats avec ceux d'autres études réalisées dans les littératures, il semble que certaines différences constatées sont dues essentiellement au climat et au relief.



Graphique 12 : Diagramme ombrique et courbe thermique du station d'Ambohitsilaozana (Alaotra-Mangoro).

En effet, selon ROBERGE et al. (1999), « l'intérêt d'une culture de plantes fourragères sans irrigation est limité par l'aridité du climat ». « Les qualités et les contraintes du sol, du climat et du relief sont déterminantes pour la réussite des cultures fourragères » (ROBERGE et al., 1999). Les rendements en fourrages sont fortement dépendants des effets cumulatifs du climat (précipitation, température), du sol et du relief (altitude). A Madagascar, la nature du sol de « tanety » est dominée par des sols ferralitiques rouges ou jaunes sur rouges

appauvris à pH plutôt acide ($\text{pH} \approx 5$), qui constituent environ 40% de la surface de l'île et par des sols ferrugineux tropicaux qui constituent 27,5% de la surface de l'île (D'HOORE, 1964). En général, les contraintes du sol ne posent pas de problèmes majeurs en termes de productions fourragères car la majorité des espèces utilisées sont adaptées à un large spectre de textures de sol et répondent bien aux apports d'éléments fertilisants (azote, phosphore) et au chaulage (à l'exception de quelques espèces comme les *Brachiaria spp.*).

Nous constatons une augmentation de 80% environ du rendement entre la première et la deuxième coupe pour *Stylosanthes guianensis*. Pour *Brachiaria brizantha*, cette augmentation est environ de 62%. Des études similaires effectuées à l'île de La Réunion sur deux fourrages pérennes tropicaux, le *Chloris gayana* et le *Pennisetum clandestinum* ont montré une augmentation respective du rendement de 30% et 52% (HIEP, 2009) pendant les mêmes périodes. Les fourrages pérennes sont donc fortement tributaires de la pluviosité. Nous notons aussi que *Brachiaria brizantha* est plus sensible à la carence en eau que *Stylosanthes guianensis*. La diminution de rendement en *Brachiaria brizantha* en troisième coupe, effectuée au mois d'avril de l'année d'échantillonnage (c'est-à-dire en fin de saison de pluie), est palpable avec un rendement moyen concentré entre le 25^{ème} et 50^{ème} percentile et une asymétrie négative de la distribution (cf. Tableau 3, p.69 ; Graphique 3, p.67). Entre le mois de mars et avril, la précipitation moyenne passe de 302 à 62 mm (FAO & DWD, 2006)(cf. Graphique 12, p.84).

Cette diminution peut s'expliquer aussi par un processus de lignification plus rapide chez les graminées. En effet, quand la plante est riche en fibre et en lignine, la teneur en énergie brute et métabolisable diminue. Ce qui est tout à fait logique car la digestibilité de la matière organique des fourrages, notamment de la valeur énergétique et azotée, diminue quand la teneur en parois cellulaires et le degré de lignification de la plante augmente. Ce qui confirme les résultats obtenus dans les littératures. Quand la plante vieillit, elle se charge en parois cellulaires et en tissus lignifiés et s'appauvrit en constituants intracellulaires (INRA, 1988). La teneur en matière azotée totale constitue un bon critère de digestibilité des aliments et montre une meilleure corrélation avec l'énergie métabolisable. La forte teneur en constituants pariétaux, surtout en lignine, indique des aliments de plus en plus indigestes au fur et à mesure que la plante vieillit. En général, les tiges sont beaucoup plus riches en parois cellulaires qu'en constituants intracellulaires, tandis que c'est le contraire pour les feuilles de légumineuses et les limbes de graminées (INRA, 1988). Nous constatons toutefois dans notre résultat que même si la teneur en matière azotée est en corrélation négative avec les variables de la première composante, la valeur absolue des coefficients de corrélation obtenue est plus ou moins faible ($|r| < 0,6$) (cf. Tableau 5, p.72). Autrement dit, l'évolution de la teneur en matière azotée totale n'est pas corrélée directement avec celle des autres composants chimiques. Les corrélations négatives traduisent tout simplement le fait que les fourrages sont moins chargés en fibres et en lignines et deviennent plus digestibles quand la teneur en matière azotée est élevée.

Nous pouvons classer les fourrages sur la base de leur productivité, de leur valeur bromatologique et de leur valeur nutritive.

En premier lieu, les fourrages les plus productifs en termes de biomasses fourragères sont les plus riches en fibres et en lignines, mais également les plus pauvres en énergie et en azote. Ce sont généralement les céréales plantes entières (maïs, paille de riz) c'est-à-dire les graminées annuelles. Du point de vue de la qualité nutritionnelle, ces fourrages présentent peu d'intérêt à cause de leur valeur énergétique et azotée très basse. Toutefois, ils peuvent jouer un rôle non négligeable dans le processus de stimulation de l'activité microbienne du rumen en tant qu'aliment de lest. Par leur productivité élevée, ces fourrages peuvent également jouer un rôle prépondérant dans l'alimentation des ruminants pendant la longue saison sèche à Madagascar. Mais, pour cela, il faudrait améliorer leur valeur nutritive. Pour le maïs, compte-tenu des contraintes entre exploiter ces plantes en tant que fourrage vert ou l'utiliser pour l'alimentation humaine, la coupe a été réalisée assez tardivement (au stade vitreux, avec une teneur en matière sèche de 50,63%), autrement dit à un stade où la lignification est très avancée. Pour une meilleure utilisation de cette espèce en tant que fourrage vert ou en tant qu'ensilage, il est recommandé de faire la coupe au stade laiteux-pâteux quand sa teneur en matière sèche est comprise entre 30 et 35%. L'apport d'engrais azoté comme l'urée, est fortement recommandé pour favoriser un bon tallage de la

plante et accroître ainsi la teneur en constituants intracellulaires notamment en matières azotées et en glucides. La paille de riz est généralement distribuée en tant que complément d'une ration à base de graminées ou de légumineuses, riches en valeurs nutritives mais pauvre en fibres. Pour améliorer sa valeur nutritive et son ingestibilité, il est conseillé de le traiter en rehaussant sa teneur en azote avec de l'urée. Des essais réalisés à Madagascar ont permis par exemple de déterminer que le traitement des pailles de riz à l'urée permet d'augmenter leur teneur en protéines brutes de 25 à 49%, de dissoudre partiellement de 22 à 27% les hémicelluloses, de fixer 11 à 29% d'azote et d'améliorer la quantité ingérée par les vaches laitières de 1,3 à 1,9 fois plus que celle de la paille non-traitée (HARINIAINA, 1990).

Nous avons ensuite les fourrages à productivité, à composition chimique et à valeur nutritive intermédiaire. Les fourrages pérennes (*Stylosanthes guianensis*, *Brachiaria brizantha*) sont les meilleurs représentants de cette catégorie. Ces fourrages sont fortement tributaires de la disponibilité en eau et en éléments fertilisants, qui ont une influence significative sur leur productivité, leur teneur en matière sèche et leur teneur en constituants pariétaux. La période optimale de coupe, basée sur le compromis entre productivité en biomasse et valeur nutritive se situe au stade de début de floraison. Ils sont plus riches en azote et en énergie que les graminées annuelles et de plus en plus digestibles au fur et à mesure des cycles de repousse. Ils pourraient constituer ainsi la ration de base des ruminants pendant la saison humide qui dure environ 4 à 6 mois par an à condition que les parcelles soient bien entretenues. Notons toutefois que la faible productivité et la valeur nutritive assez moyenne de ces fourrages pérennes est due en partie à l'absence de fertilisation lors de la plantation ou lors de l'entretien de ces cultures. Aussi, si nous voulons utiliser ces espèces en tant qu'aliment pour les ruminants, il est fortement recommandé d'appliquer un niveau de fertilisation élevé pour accroître leurs rendements et leurs valeurs nutritives.

En dernier lieu, nous avons les fourrages à productivité moyenne, mais les plus riches en valeurs azotées et en énergie. Les légumineuses volubiles annuelles (dolique, niébé) sont les meilleurs représentants de cette catégorie. Sur la base d'un compromis entre productivité et valeur nutritive, nous pouvons les qualifier comme étant les meilleurs fourrages. Ils présentent également le meilleur compromis en termes d'ingestibilité – teneur en valeurs nutritives. Ces espèces sont également réputées comme bien adaptées à la sécheresse et elles supportent un stress hydrique important. Elles sont donc souvent recommandées pour les zones à climat semi-aride de l'île. Leur inconvénient majeur réside d'une part, dans le fait qu'en tant que légumineuses, elles contiennent probablement des facteurs antinutritionnels ou toxiques comme le tanin ou certains acides aminés comme la mimosine. La présence et les effets de ces facteurs sur la digestibilité de ces deux espèces sont mal connus à Madagascar. Aussi, une étude concernant cette question doit être menée. D'autre part, en tant que légumineuses, leur capacité à être ensilée est sûrement médiocre. Des recherches concernant l'association de ces deux espèces avec des graminées riches en sucres, comme le maïs ou le *Pennisetum purpureum* pour la fabrication d'ensilage doit être entreprises. Nous pouvons éventuellement envisager le stockage de ces deux espèces sous forme de foin.

IV – 2 Pour les fourrages issus de pâturages naturels

Le parcours à *Heteropogon contortus* et *Panicum voeltzkowii* sur sol sableux est peu productif à cause de la faible teneur en éléments fertilisants (N et P) (BOSSER, 1955). La présence d'*Heteropogon contortus* indique des sols pauvres. L'action itérative des feux couplée au lessivage du sol par les différents facteurs climatiques (vents, eaux de ruissellement, etc.) a détruit les microorganismes facilitateurs du processus d'humification. Nous pouvons également expliquer la faible productivité des pâturages et les fortes variations de cette productivité par l'effet d'inhibition de la régénération naturelle des graminées par traumatisme. Le broutage des jeunes repousses après le passage du feu et le piétinement des plantes pendant la période d'épiaison (cas des pâturages fortement fréquentés) ont entraîné la destruction des semences sur pieds et l'interruption de la photosynthèse. Le sol devient ainsi vulnérable à l'érosion à cause de l'espacement prononcé entre les touffes d'herbes.

Concernant *Heteropogon contortus*, nous observons une variation importante de la productivité entre les espèces jouxtant les forêts (cas du terroir d'Ampataka) et les espèces savanicoles (cas du terroir

d'Ankoraobato) (cf. Tableau 4, p.71). Les espèces savanicoles sont moins productives. L'analyse quantitative de la phytomasse sur des échantillons prélevés sur une même parcelle, jouxtant les forêts d'Ampataka, a montré également cette variabilité importante. L'analyse a révélé que les espèces péri-forestières ont une production primaire de 0,83 t de MS/ha (avec un écart-type de 0,03 t de MS/ha), tandis que celle des espèces savanicoles est de 2,48 t de MS/ha (avec un écart-type de 1,43 t de MS/ha). La productivité est faible dans les zones péri-forestières à cause de la concurrence en eau, en éléments minéraux et organiques du sol. De plus, l'abondance des arbres et arbustes d'ombrage dans cette zone ne permet pas à cette graminée vivace héliophile de se développer avec un maximum de recouvrement (mesuré selon la méthode zuricho - montpelliéraine de BRAUN-BLANQUET).

En comparaison des fourrages cultivés et récoltés dans la Région Alaotra - Mangoro, nous constatons qu'au lieu d'être corrélée positivement et fortement avec la teneur en matière sèche et en constituants pariétaux, la teneur en matière minérale est corrélée positivement, mais faiblement ($r < 0,5$) avec les huit autres variables exceptée l'énergie brute, avec laquelle elle est corrélée très moyennement et négativement ($r = -0,65$) (cf. Tableau 8, p.77). Autrement dit, l'évolution de la teneur en matière minérale n'est pas liée directement à celle des autres composants chimiques. Comme les minéraux sont localisés en fortes proportions dans les limbes, leur teneur aurait dû être en corrélation positive forte avec la teneur en matière azotée. Ce qui n'est pas le cas ici non plus. En réalité, l'explication la plus probable est peut-être liée à la teneur en éléments minéraux dans le sol. Notons que les pâturages où ont été prélevés les échantillons se situent dans des terrains anciennement défrichés et abandonnés à une longue jachère proches d'une plaine côtière. La conversion en pâturage s'opère parfois directement, ou le plus souvent indirectement après une mise en culture puis une jachère prolongée. L'action itérative des feux de brousse pendant plus de 20 ans dans ces zones de pâtures ainsi que la salinité élevée du sol (prouvée par la présence de deux entreprises salinières dans cette zone) ont probablement détruit les microorganismes facilitateurs du processus d'humification et ont entraîné un stockage important de minéraux dans le sol. De plus, la longue saison chaude et sèche dans la zone de l'étude (entre 7 et 8 mois par an) ne favorise pas l'effet de dilution par les eaux de ruissellement. La variabilité de la teneur par espèce dépend ensuite d'autres facteurs comme l'espèce elle-même, le stade de développement, la composition morphologique, etc.. Malheureusement, aucune étude sur la teneur en nutriments du sol, nous permettant d'affirmer ou de réfuter cette hypothèse n'a été effectuée dans le présent travail. Aussi, cette hypothèse reste à vérifier dans le futur.

La corrélation négative avec l'énergie brute démontre tout simplement que les fourrages riches en minéraux sont pauvres en énergie. Ce résultat est semblable à celui trouvé par RAKOTOARISON dans le cas des légumineuses herbacées des hauts plateaux malgaches (RAKOTOARISON, 1993).

Si nous basons notre raisonnement sur le meilleur compromis entre rendement en biomasse et valeur énergétique et azotée, *Hyparrhenia rufa* est le meilleur fourrage parmi les six espèces de graminées étudiées. Pourtant, son taux de recouvrement représente à peine 1,11% de la surface totale du pâturage et il ne supporte pas les brûlis fréquents. Ainsi, les parcelles d'*Hyparrhenia rufa* sont sur pâturées surtout pendant la saison sèche (ANDRIAMAROSOA, 2007). Si nous devions entreprendre des cultures fourragères dans ce type d'environnement (à climat chaud et sec), c'est la seule espèce recommandée parmi les six. L'avantage d'utiliser cette espèce autochtone réside dans le fait qu'elle est déjà connue comme étant la plus productive par les éleveurs locaux et pouvant très bien s'adapter aux rudes conditions du milieu, à condition d'apporter des améliorations techniques (gestion de la fertilité du sol, capacité de rétention en eau, etc.). Elle répond bien à l'utilisation d'engrais. Nous pourrions aussi la valoriser en tant que foin pour affourager les bétails pendant l'hiver (BOSSER, 1969).

La qualité nutritionnelle de *Brachiaria nana* ne doit pas être négligée. Dans l'un des terroirs d'intervention (Ankoraobato), il recouvre environ 81,35% de la surface des pâturages (cf. Tableau 4, p.71). Pourtant, cette espèce est très rare à Madagascar. Nous ne la trouvons que dans quelques endroits très localisés, surtout dans des savanes arborées et arbustives proches des zones côtières dans le sud de l'île. De plus, c'est une espèce qui supporte bien la sécheresse et est pyrophyte : elle ne craint pas l'action répétée des feux. Son inconvénient majeur réside dans sa faible productivité (1,88 T MS/ha). La faible productivité observée est la conséquence des différentes réponses d'adaptation biologique liées aux stress hydriques et à l'incidence des

feux de végétations. Le nanisme observé chez cette espèce (hauteur moyenne : 30 cm) peut être le résultat d'un blocage hormonal se produisant pendant la montaison, afin de permettre à la plante d'être moins exigeante en eau et d'en constituer une réserve pour perdurer pendant toute la saison sèche. Dans cette perspective, il n'est pas très recommandé de cultiver cette espèce sans essais préalables d'amendement en éléments fertilisants organiques et/ou chimiques, dans le but d'améliorer sa productivité et sa valeur nutritive. Eventuellement, nous pourrions proposer les parcelles de *Brachiaria nana* (dans les endroits où elles existent) comme faisant partie des parcelles délimitées préalablement dans le cadre d'une gestion sociale commune de l'exploitation de l'espace pastoral, et exploitées d'une manière raisonnée (en fonction de la charge animale présente) et alternée pour le pâturage (afin de favoriser la régénération des espèces des parcelles au repos). L'analyse des paramètres de reproduction (taux de fécondité, croissance numérique, etc.) pour les deux terroirs d'intervention montre de meilleurs résultats pour Ankoraobato que pour Ampataka (ANDRIAMAROSOA, 2007). La bonne conduite d'élevage réalisée dans ce terroir est sans doute attribuable en partie à la bonne qualité de la valeur nutritive des fourrages offerts aux troupeaux (dont l'*Hyparrhenia rufa* et *Brachiaria nana*).

Sur la base de la productivité et de la valeur nutritive, *Sporobolus festivus* possède de moins bonne qualité que *Hyparrhenia rufa* et *Brachiaria nana*. Toutefois, il présente une bonne alternative aux deux premiers dans les endroits où ils n'existent pas (cas du terroir d'Ampataka) et où les conditions du milieu ne permettent pas de les cultiver. Cependant, les remarques susmentionnées concernant la mise en culture de *Brachiaria nana* et son intégration parmi les parcelles exploitées en rotation sont également valables pour *Sporobolus festivus*.

Nous pouvons qualifier *Heteropogon contortus*, *Cynodon dactylon* et *Panicum voeltzkowii* comme les plus mauvais fourrages. Même si ces fourrages sont parmi les plus productifs et dominent l'aire pastorale en termes de recouvrement, leurs cycles végétatifs sont courts et ils se lignifient très vite. Ils doivent être exploités très jeunes et le laps de temps pour leur exploitation optimale est également très court, généralement entre deux et trois mois maximum (GRANIER & LAHORE, 1967). Mais les principaux inconvénients quant à leur utilisation en tant qu'aliment des ruminants sont leur valeur énergétique très basse, généralement inférieure à 0,5 UF (cf. Tableau 12, p.82). Ces fourrages ont peu d'intérêt à cause de leur valeur nutritive médiocre.

V - Conclusions

Du point de vue de l'utilisation des fourrages cultivés en tant qu'aliment pour les herbivores, l'analyse des rendements et de la valeur nutritive permet de tirer les conclusions suivantes :

- ✓ En régime pluvial, l'arrivée tardive de la pluie à cause de facteurs divers (changement climatique, etc.) entraîne une faible productivité des fourrages pérennes en première coupe. Le report de stocks et la constitution de stocks fourragers suffisants (ensilages, foin) pour tenir jusqu'à la fin de l'année sont donc primordiaux pour pallier cette faible productivité et garantir une meilleure offre alimentaire aux herbivores pendant la longue saison sèche (variant entre 6 et 8 mois à Madagascar) ;
- ✓ Le rôle tenu par les fourrages annuels (graminées, légumineuses) dans l'alimentation des herbivores est d'une importance capitale étant donné que ce sont les plus productives. Si les surfaces cultivables sont restreintes (cas des hauts plateaux malgaches), la faible productivité des fourrages pérennes ne permet d'assurer les besoins du troupeau que pendant un laps de temps, qui dure en moyenne de 4 à 6 mois à Madagascar (en saison de pluie). Alors que des espèces annuelles, riches en sucres comme le maïs peuvent être valorisées en vert pour assurer l'alimentation des ruminants en fin de saison de pluie et sont exploitées pour la fabrication d'ensilage en début de saison sèche ;
- ✓ Les légumineuses annuelles tiennent également une importance particulière dans le planning d'alimentation pour assurer la transition entre saison humide et saison sèche. De plus, les légumineuses fourragères sont plus riches en valeurs nutritives que les graminées, permettant de préparer le troupeau à affronter la longue saison sèche ;

- ✓ Quelle que soit l'espèce fourragère cultivée, la fertilisation organique ou chimique, surtout azotée, ne doit pas être négligée et doit être systématique si nous voulons avoir une bonne productivité et des valeurs alimentaires satisfaisantes ;
- ✓ La rotation légumineuse - graminée est fortement recommandée. Les légumineuses fourragères comme le *Stylosanthes guianensis* sont réputées pour leurs qualités à fixer de fortes quantités d'azote et à recycler certains oligo-éléments comme le calcium, les rendant accessibles à la culture suivante (HUSSON et al., 2008b). Dans le cas qui nous concerne, nous préconisons par exemple la rotation *Stylosanthes guianensis* – *Brachiaria brizantha*, la rotation *Stylosanthes guianensis* – Maïs ou encore *Stylosanthes guianensis* – riz pluvial. Nous pouvons aussi citer la rotation dolique/niébé – riz pluvial ou la rotation dolique/niébé – maïs. Dans le cadre d'une culture SCV, nous pourrions éventuellement utiliser le *Stylosanthes guianensis* en tant que plantes de couvertures mortes pour les graminées de la culture suivante.

Pour les fourrages issus de pâturages naturels, La nécessité de faire des reports de stocks ou de cultiver des fourrages pour enrichir l'alimentation des ruminants pendant la saison sèche est primordiale pour pallier la faible productivité et la valeur nutritive de qualité moyenne des graminées. D'ailleurs, la qualité nutritionnelle des graminées issues de pâturage naturel diminue considérablement au-delà du stade de fin de floraison - fructification. Pour cela, il est conseillé de cultiver des légumineuses tolérant la sécheresse, comme la dolique, le niébé ou le sorgho qui sont déjà cultivés localement pour l'alimentation humaine. Le maïs est aussi cultivé localement (variété IRAT 200) et s'adapte bien aux conditions locales malgré le manque de pluie. Ainsi, plus de 69% des agriculteurs pratiquent la culture de maïs sur brûlis (DIRAC, 2010) et nous avons estimé à environ 400 ha la superficie cultivée en maïs en 2007 dans la Commune Rurale de Bemanonga. Selon HUSSON et al. (2006), on pourrait cultiver une association maïs - légumineuses volubiles (dolique, niébé) ou une association maïs – *Stylosanthes guianensis* dans ces zones semi-arides. En tant que fourrages pour les ruminants en saison sèche, il est recommandé d'ensiler le maïs très tôt, c'est-à-dire au stade laiteux-pâteux.

Bibliographie

- ANDRIAMAROSOA, R. *Analyser et modéliser le système d'alimentation dans le contexte de l'élevage bovin malgache*. Thèse de Doctorat de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques Antananarivo - Ecole doctorale A2E- Université d'Antananarivo.
- ANDRIAMAROSOA, R. (2007). *Impacts du système d'élevage de ruminants sur la biodiversité et sur la filière ruminant dans la région du Menabe central - cas des terroirs d'Ankoraobato et d'Ampataka*. Mémoires de fin d'études pour l'obtention de Diplôme d'Etudes Approfondies de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques - Département des Eaux et Forêts. p.117 + Annexes.
- BOSSER, J. (1955). *Rapport sur la végétation et les pâturages de la C.R.A.M d'Ankilizato*. ORSTOM - Collection de référence n° 10452ex1. 8 pages.
- BOSSER, J. (1969). *Graminées des pâturages et des cultures à Madagascar*. Mémoires ORSTOM N°35. Paris. p.440. .
- BOUDET, G. (1975). *Manuel sur les pâturages tropicaux et les cultures fourragères*. IEMVT. p.254.
- D'HOORE, J. (1964). *La carte des sols d'Afrique au 1/5.000.000*. Mémoire explicatif. CCTA, Publ. n°93, Lagos. p.209.
- DIRAC, R. (2010). *Stratégies villageoises dans la gestion des paysages forestiers, Menabe Central Madagascar*. Thèse de Doctorat soutenue à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. p.119 + Annexes.
- FAO, & DWD. (2006). *New_LocClim - Local Climate Estimator (CD-ROM)*. Food and Agriculture Organization (FAO) - German Weather Service (DWD).

- FIFAMANOR, TAFA, GSDM, MAEP, CIRAD, ARP, & et al. (2007). *Conduite des systèmes de culture sur couverts végétaux et affouragement des vaches laitières - Guide pour les hautes terres de Madagascar*. FIFAMANOR - GSDM - TAFA - CIRAD - ARP - SICAlait. p.90.
- GOUNOT, M. (1969). *Méthode d'études quantitatives de la végétation*. Masson et Cie. 314 pages.
- GRANIER, P., & LAHORE, J. (1967). *Note sur la productivité du pâturage naturel - Comparaison des cycles végétatifs de l'*Hyparrhenia rufa* et de l'*Heteropogon contortus**. Institut d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux - Région de recherche madagascar. p.8.
- HARINIAINA, R. (1990). *Traitement des fourrages pauvres à l'urée: effets chez les vaches laitières*. Mémoires de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur des sciences agronomiques - Département Elevage - ESSA. p.89 + Annexes.
- HIEP, T. (2009). *Qualification en Spectrométrie dans le Proche Infra Rouge (SPIR) de l'azote et des fibres des ressources alimentaires et leur utilisation digestive par le bétail laitier en milieux tropicaux (Réunion - Vietnam)*. Thèse de Doctorat de l'Ecole Doctorale Interdisciplinaire (E.D.I) - Université de La Réunion.
- HUSSON, O., CHARPENTIER, H., RAZANAMPARANY, C., MOUSSA, N., MICHELLON, R., & NAUDIN, K. (2008). *Fiches techniques plantes de couverture: Graminées pérennes: *Brachiaria sp.* - *B. ruziziensis*, *B. brizantha*, *B. decumbens*, *B. humidicola**. CIRAD - TAFA - GSDM - AFD - MAEP. p.20.
- HUSSON, O., CHARPENTIER, H., RAZANAMPARANY, C., MOUSSA, N., MICHELLON, R., & NAUDIN, K. (2008). *Fiches techniques plantes de couverture: Légumineuses pérennes - *Stylosanthes guianensis**. CIRAD - TAFA - GSDM - AFD - MAEP. p.12.
- INRA. (1988). *Alimentation des bovins, ovins et caprins*. INRA (Institut National de la Recherche Agronomique). p.471.
- MAEP. (2006). *Recensement de l'agriculture. Campagne agricole 2004-2005*. Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche - Direction des Systèmes d'Information - Service des Statistiques Agricoles. p.50.
- MAEP, & UPDR. (2003). *Monographies régionales des 18 D.(I).R.D.R*. Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche - Unité de Politique de Développement Rural - Madagascar.
- RAKOTOARISON, B. (1993). *Contribution à l'étude de la valeur nutritive des légumineuses fourragères*. Mémoire de fin d'études - Département Elevage - ESSA. p72 + Annexes.
- RAKOTONIRINA, J. (1996). *Contribution à l'étude de la productivité et de la valeur nutritive du ray-grass italien et de l'avoine fourragers cultivés sur tanety irrigué en contre-saison*. Mémoire de fin d'études - Département Elevage - ESSA. p.123.
- RANDRIANARIVELOSEHENO, A. (2002). *Système pastoral, PPN d'Ankarafantsika*. Mémoire de DEA – ESSA -forêts. 91 pages.
- RASAMBAINARIVO, J., & RANAIVOARIVELO, N. (2003). *Profil fourrager - Madagascar*. CD - Rom Country Pasture Profiles - Food and Agriculture Organization.
- ROBERGE, G., & GODET, G. (2002). *Plantes fourragères: les légumineuses herbacées*. Memento de l'agronome, CIRAD - GRET - CTA. p.25.
- ROBERGE, G., TOUTAIN, B., HAINNAUX, G., DAUDET, A., GUERIN, H., MANDRET, G., & NOIROT, M. (1999). *Manuel de cultures fourragères*. Maisons Alfort, France, IEMVT, pp.147-184.
- STATPOINT. (2006). *STATGRAPHICS Centurion XV - Manuel de l'utilisateur*. STATPOINT INC. - [On line] www.statgraphics.com [consulté le 24 août 2010].
- STOBBS, T., & MINSON, D. (1980). *Nutrition of ruminants in the tropics*. Digestive physiology and nutrition of ruminants. Vol 3. pp.257 - 277.

CHAPITRE III
L'ANALYSE ET LA MODÉLISATION DE LA GESTION DU
TROUPEAU

Le système d'élevage bovin malgache est de nature contrastée, du fait de l'existence de deux systèmes de production : l'élevage extensif de zébus malgaches et l'élevage semi-intensif ou intensif de bovins laitiers de race européenne métissée ou pure. Le système d'élevage extensif est le plus pratiqué à Madagascar (plus de 90%) (MAEP, 2004). En élevage laitier, 90% de l'élevage est semi-intensif, représenté principalement par des vaches améliorées de type « rana » et des Pie Rouge Norvégiennes pures ou métissées à divers degrés de sang (MAEP, 2004 ; KASPRZYK, 2008). L'élevage intensif est réservé principalement à une minorité de grandes fermes d'élevage moderne appartenant à des firmes privées comme la Hutte Canadienne, Bevalala, TIKO-Farm, etc.. Les vaches laitières importées d'Europe et de Nouvelle-Zélande représentent à peine 1,11% des races élevées. Les races améliorées et les races pures représentent 20% de l'effectif national de bovins femelles (MAEP, 2006). La diversité des races laitières élevées à Madagascar est surtout liée aux conditions d'élevage dans lesquelles les animaux sont élevés dans les conditions paysannes malgaches, surtout les petites exploitations familiales. Les races métissées (1/4, 1/2 ou 3/4 de sang) ont toujours été privilégiées à cause de leur rusticité élevée par rapport aux races pures. Dans les grandes fermes d'élevage, où l'objectif a toujours été d'obtenir un potentiel de production et de reproduction élevé, on élève des animaux à haut potentiel génétique. Le cheptel est constitué principalement de races pures (Prim'Holstein, Frisonne Française Pie Noir, Pie Rouge Norvégienne, Normande) ou 7/8 de sang au minimum. Sur ce type d'élevage, on enregistre un taux de réussite de 70 à 75% pour l'insémination artificielle (MAEP, 2004). Les conditions pédoclimatiques, surtout la température et l'altitude, jouent également un rôle prépondérant dans cette diversité des races d'élevage. Les activités métaboliques des ruminants sont altérées, soit par des températures trop élevées, soit par des températures trop froides, dont les seuils sont définis par ce que l'on appelle la « zone neutre thermique » qui se situe généralement entre 5 et 20°C (INRA, 1978 ; INRA, 1988 ; NRC, 2001). Cette altération de l'activité métabolique entraîne une diminution de la capacité d'ingestion et de la production laitière. La diminution de la capacité d'ingestion est accentuée par l'augmentation de l'humidité de l'air ambiant (INRA, 1978 ; NRC, 2001). Les performances de reproduction sont également affectées par cette diminution de la capacité d'ingestion, qui entraîne la diminution de la concentration d'insuline, des métabolites associés et du glucose (TILLARD, 2007). En milieu tropical, le métissage des races européennes avec des races autochtones, plus rustiques et supportant la chaleur et l'humidité, a toujours été perçu comme une des solutions possibles pour diffuser l'élevage laitier dans les milieux inadaptés aux races pures européennes. Certes, les races métissées sont loin de présenter les mêmes performances et les mêmes productions (lait, viande) que les races pures européennes, mais elles ont l'avantage d'être plus performantes que la race locale (le zébu malgache) et de posséder plus de rusticité par rapport aux races pures européennes.

Dans le cadre de cette recherche, la question qui nécessite d'être résolue dans la démarche de modélisation du troupeau ou du pôle animal est le choix d'un modèle pertinent à utiliser pour simuler et estimer les besoins d'entretien et de production du troupeau. L'un des inconvénients majeurs de l'élevage laitier à Madagascar est l'inexistence de politiques, de normes précises et de programmes de sélection concernant la gestion des capitaux génétiques des ruminants. Ainsi, on trouve toute une palette de vaches métissées à divers degrés de sang qui vont du 1/4 au 3/4, en passant par 3/8, 1/2 et 5/8. Ces vaches possèdent toutes des performances zootechniques et des productions potentielles (lait, viande) très variées, pouvant quelques fois se rapprocher des performances des zébus malgaches et quelques fois des races européennes selon le degré de sang. Or, les modèles d'estimation des besoins des ruminants rencontrés dans la littérature concernent généralement des vaches laitières à haut potentiel qui peuvent accroître fortement leur rendement (besoins énergétiques et azotés, capacité d'ingestion, production de lait, etc.). Dans ce cas, comment aborder la diversité des races de bovins laitiers existant à Madagascar dans la modélisation des besoins du troupeau ?

L'hypothèse la plus pertinente pour répondre à cette question serait de modéliser deux classes d'animaux, basées sur leur potentiel génétique, c'est-à-dire une classe pour les vaches importées à haut niveau de production et à croissance rapide et une classe pour les vaches améliorées à production limitée.

Ce chapitre détaille le processus d'analyse et de modélisation du troupeau de bovins laitiers dans le contexte malgache. Cette démarche se fait en deux temps :

- i. Identifier les objets et leurs attributs, identifier les différentes opérations qui en découlent et établir la visibilité sous forme de diagramme UML (démarche de conception et de modélisation orientée objet). Parallèlement, il s'agit aussi de déterminer l'ensemble des activités et de définir les différentes contraintes dans la démarche de formulation de la programmation linéaire. L'étape d'analyse et de modélisation a été faite avec une approche directe sur terrain soit par observation directe des pratiques d'exploitation, soit par enquête sous forme d'entretien ;
- ii. Modéliser les besoins d'entretien et de production des troupeaux laitiers en se basant sur une approche purement bibliographique.

Analyser et modéliser la gestion du troupeau laitier dans le contexte de l'élevage bovin malgache**Résumé**

L'analyse et la modélisation de la gestion du troupeau laitier dans le contexte de l'élevage bovin malgache ont permis d'identifier six activités principales : la production et vente de lait, la vente de fumier et les ventes de différentes catégories de bovins (vache reformées, génisses, taurillons, veaux). L'identification des objets a permis de modéliser quatre classes représentant les différentes catégories du troupeau (vache, génisse, taurillon, veaux). Les modèles utilisés pour simuler la production de lait et les besoins nutritifs du troupeau comptent 45 équations comprenant la production de lait potentielle, les besoins énergétiques, la capacité d'ingestion, les besoins en calcium et en phosphore et l'évolution de la Note d'Etat Corporel (NEC). Ces équations sont réparties entre les deux types de troupeau modélisés : les vaches à haut potentiel et les vaches à croissance modérée et à production limitée. Chaque type regroupe les différentes catégories d'animaux. Concernant les contraintes d'alimentation du troupeau, six types de contraintes différents ont été modélisés comprenant principalement l'adéquation entre les besoins du troupeau en fonction de l'offre nutritive apportée par l'alimentation (fourrages, concentrés). Ces besoins concernent les besoins énergétiques, azotés et minéraux. Le rassasiement du troupeau est également pris en compte dans les contraintes d'optimisation en mettant en adéquation l'encombrement des fourrages offerts en fonction de la capacité d'ingestion du troupeau. Pour la simulation de la dynamique de la population, 5 lots pour chaque catégorie d'animaux (vache, génisse, taurillon à l'engrais, veau et velle), correspondant à une durée de simulation des besoins du troupeau de 10 ans, ont été modélisés. Pour les bâtiments d'élevage, l'utilisateur pourra faire le choix entre utiliser les modèles de bâtiment fournis avec notre logiciel informatique ou calculer à part le coût de construction d'un type de bâtiment quelconque et l'introduire manuellement. Les bâtiments modélisés et intégrés à l'intérieur du logiciel comptent six types de bâtiment d'élevage en stabulation libre (pour des effectifs de 5, 10, 20, 30, 40 ou 50 têtes) pour chaque catégorie d'animaux (vaches, génisses, taurillons).

Mots-clés : système d'élevage, modélisation, troupeau, besoins d'entretien, besoins de production, simulation, contraintes, activités, optimisation.

Abstract

Analyzing and modelling the dairy herd management allowed to identify six main activities: production and selling milk, selling manure and selling different herd categories: dairy cow, heifer, growing and finishing cattle and calf. From the object identification, we have modeled four classes representing different herd categories (dairy cow, heifer, cattle and calf). The model used to simulate the milk yield and the nutrient requirements of the herd counts 45 equations including potential milk yield, energy requirement, feed intake capacity, mineral requirements (phosphorus, calcium) and the Body Condition Score (BCS). These equations are split up between two types of modeled herd: high potential cows and moderate growing cows with limited milk-yield. Each type regroups the different cattle categories. About the food constraint of the herd, we have modeled six types of constraints including mainly the adjustment between the herd requirements according to the nutrient offer brought by the food (forages, concentrates). These requirements concerned the net energy, protein and minerals. The feed intake of the herd is also taken into account in the optimization constraint by putting into adjustment the forage fill with the feed intake capacity of the herd. About the simulation of the population dynamics, we have modeled five plots for each category of animal (cow, heifer, growing and finishing cattle and veal calves), corresponding to a length of simulation of ten years of the herd requirements. About the farm infrastructure, the user could make the choice between using the building-model furnished with our informatics software or computing the construction-cost apart and introducing it manually inside the software. The cowshed modeled and integrated inside the software counts six types of free stable (for a total number of 5, 10, 20, 30, 40 or 50 heads), for each animal category (cow, heifer, growing and finishing cattle).

Keywords: livestock system, modelling, herd, maintenance need, production need, simulation, constraints, activities, optimization.

I – Introduction

Pour les pays francophones, le système utilisé pour estimer les besoins nutritifs du troupeau est celui de l'INRA. Le système français établi depuis les années 70 et amélioré jusqu'à nos jours par l'INRA, semble être le plus couramment utilisé, tandis que pour les pays anglophones, il s'agit surtout de celui établi à l'origine aux Etats-Unis par l'ARC (Agriculture Research Council) et relayé de nos jours par la NRC (National Research Council) (INRA, 1978 ; NRC, 2001). Toutefois, d'autres systèmes de références existent comme ceux introduits dans les pays scandinaves dans les années 20 par FJORD et HANSSON et améliorés dans les années 70 par VAN ES (INRA, 1978). A Madagascar et dans les pays africains en général, peu de travaux ont été effectués sur l'élaboration de modèles d'estimation des besoins des ruminants et peu de documents sont disponibles. La majorité des recherches effectuées est surtout, soit des recherches agrostologiques comme celles réalisées il y a plusieurs décennies par BOSSER (BOSSER, 1954 ; 1955 ; 1957 ; 1958 ; 1969), BOUDET (BOUDET, 1975a ; 1975b) ou encore GRANIER et LAHORE (GRANIER & LAHORE, 1967), soit des études plus récentes sur la digestibilité et sur la valeur nutritive des fourrages (GRANIER, 1967; RANDRIAMBELOSON, 1980; HARINIAINA, 1990; RAKOTOARISON, 1993; RAKOTOZANDRINY, 1993; RANAIVOSON, 1995; RAKOTONIRINA, 1996; RAKOTOARISON, 2005, etc.). L'étude la plus pertinente sur les besoins énergétiques, azotés et en minéraux des ruminants, réalisée à Madagascar sur des zébus malgaches et des vaches laitières améliorées, a été faite par CARRE en 1975 (CARRE, 1975). La méthode et les bases de calcul utilisées sont très proches de celles publiées par l'INRA en 1978. Ce qui est tout à fait logique car la majorité des expérimentations réalisées à cette époque s'inspirent des recommandations préconisées en 1973 par la Fédération Européenne de Zootechnie sous les directions de VAN ES, BICKEL, LANDIS, VERMOREL, JARRIGE et *al.* (INRA, 1978). Nous notons toutefois que le système protéique utilisé par CARRE était la Matière Azotée Digestible (MAD). Le système PDI était en cours de mise au point à cette époque et n'a été officiellement adopté dans plusieurs pays d'Europe que vers la fin des années 70 (INRA, 1978). L'utilisation du système PDI est généralement recommandée pour les vaches à haut potentiel et à croissance élevée.

Comment simuler les besoins nutritifs du troupeau pour les vaches laitières à croissance modérée et à production limitée dans notre modèle de troupeau ?

Dans le cadre de cette recherche, nous posons comme hypothèse de travail d'utiliser les résultats issus des travaux de CARRE (cf. Annexe n°17, p.xxiv) pour les vaches métissées à croissance modérée et à production limitée. Le potentiel génétique de ces animaux ne permet pas de rentabiliser efficacement la matière azotée offerte par les aliments pendant le processus de digestion. Dans ce cas, le processus d'utilisation du système de la MAD consiste tout simplement à poser une base scientifique acceptable et raisonnable sur la mise en adéquation entre la quantité de matière azotée apportée par les fourrages et potentiellement utilisable, et les quantités de matières azotées apparemment digestibles par le troupeau, dans l'objectif d'optimiser les assolements fourragers. L'utilisateur doit faire le choix sur le type de bovins dont il aura à simuler les besoins. S'il choisit des vaches importées à haut niveau de production et à croissance rapide, le modèle utilisera le système PDI comme système protéique. Par contre, s'il choisit des vaches améliorées à production limitée et à croissance modérée, le système de la MAD remplacera automatiquement le système PDI pour simuler les besoins azotés du troupeau. Il doit aussi choisir entre le système de l'Unité d'Encombrement (UE) ou la quantité de matière ingérée par 100 kg de poids vif comme expression de la capacité d'ingestion.

II – Méthodes

II – 1 Choix et justification des terroirs d'intervention

Le choix des terroirs d'intervention a été fait selon les critères suivants :

- Les terroirs sont les plus représentatifs possibles des systèmes étudiés et des modes d'élevage de ruminants existants à Madagascar, de façon à pouvoir mener une bonne analyse du système d'élevage en vue de sa modélisation ;
- Les terroirs sont basés sur un système semi-intensif ou intensif (autrement dit, les agro-éleveurs y pratiquent des cultures fourragères) ;
- Les terroirs doivent permettre de recueillir de données (frais et intrants vétérinaires, etc.) qui vont servir d'entrées à notre modèle de simulation dans le but de le tester et de le valider.

En se basant sur les critères énoncés ci-dessus, les terroirs suivants ont été choisis :

- La Commune Rurale d'Imerimandroso : le Chef-lieu se trouve à une longitude de 48°35'44" Est, à une Latitude de 17°25'41" Sud et à une altitude de 800 mètres. La Commune se trouve sur la rive Est du Lac Alaotra, à environ 50 Km au Nord de la ville d'Ambatondrazaka (chef-lieu de la Région Alaotra – Mangoro). Elle est délimitée à l'Ouest par le lac Alaotra, au Nord par les Communes Rurales de Vohitsara et Andromba, à l'Est par la Commune de Antanandava et au Sud par la Commune d'Amparihitsokatra (cf. Annexe n°1, p.ii).
- La Commune Rurale d'Amparihitsokatra : le chef-lieu se trouve à une longitude de 48°34'12" Est, à une latitude de 17°31'41" Sud et à une altitude variant de 800 à 900 mètres. Se situant sur la rive Est du Lac Alaotra, la bifurcation vers le chef-lieu de la Commune se trouve à environ 38 km au Nord de la ville d'Ambatondrazaka et 11,5 km au Sud de la ville d'Imerimandroso. Elle est délimitée à l'Ouest par le lac Alaotra, au Nord par la Commune d'Imerimandroso, à l'Est par les Communes de Sahatavy et Antanandava et au Sud par la Commune d'Ambatosoratra (cf. Annexe n°1, p.ii).

II – 2 Démarche méthodologique

La démarche méthodologique se divise en deux étapes bien distinctes (cf. Figure 14, p.97):

- ✓ Formulation de la programmation linéaire ;
- ✓ Conception Orientée Objet.

Au total, le travail s'est focalisé sur 14 éleveurs de bovins représentant la diversité des profils des éleveurs bovins locaux. Pour cela, le critère posé est la possession de troupeaux de bovins (zébus, laitiers) et de charrettes qui est un signe de richesse chez les paysans malgaches.

II – 3 Méthodes d'analyse et de modélisation de la gestion du troupeau

II – 3 – A Les méthodes d'analyses et de modélisation de la gestion du troupeau

L'étape d'analyse a été effectuée avec les éleveurs directement sur le terrain, soit par observation directe, soit sous forme d'enquête (cf. Figure 14, p.97). La modélisation des besoins d'entretien et de production du troupeau laitier a été effectuée avec une approche purement bibliographique.

II – 3 – B Modélisation de la production potentielle de lait, des besoins nutritifs et de la capacité d'ingestion

La démarche méthodologique a été faite exclusivement à partir des données disponibles dans la littérature. Pour exprimer et modéliser les besoins du troupeau, nous nous sommes principalement référés au

système français de l'INRA de 1988 à 2007, étant donné que c'est le plus fourni en documentation et le plus pratique dans le cadre d'une modélisation informatique à cause des différentes équations de régression des besoins proposés.

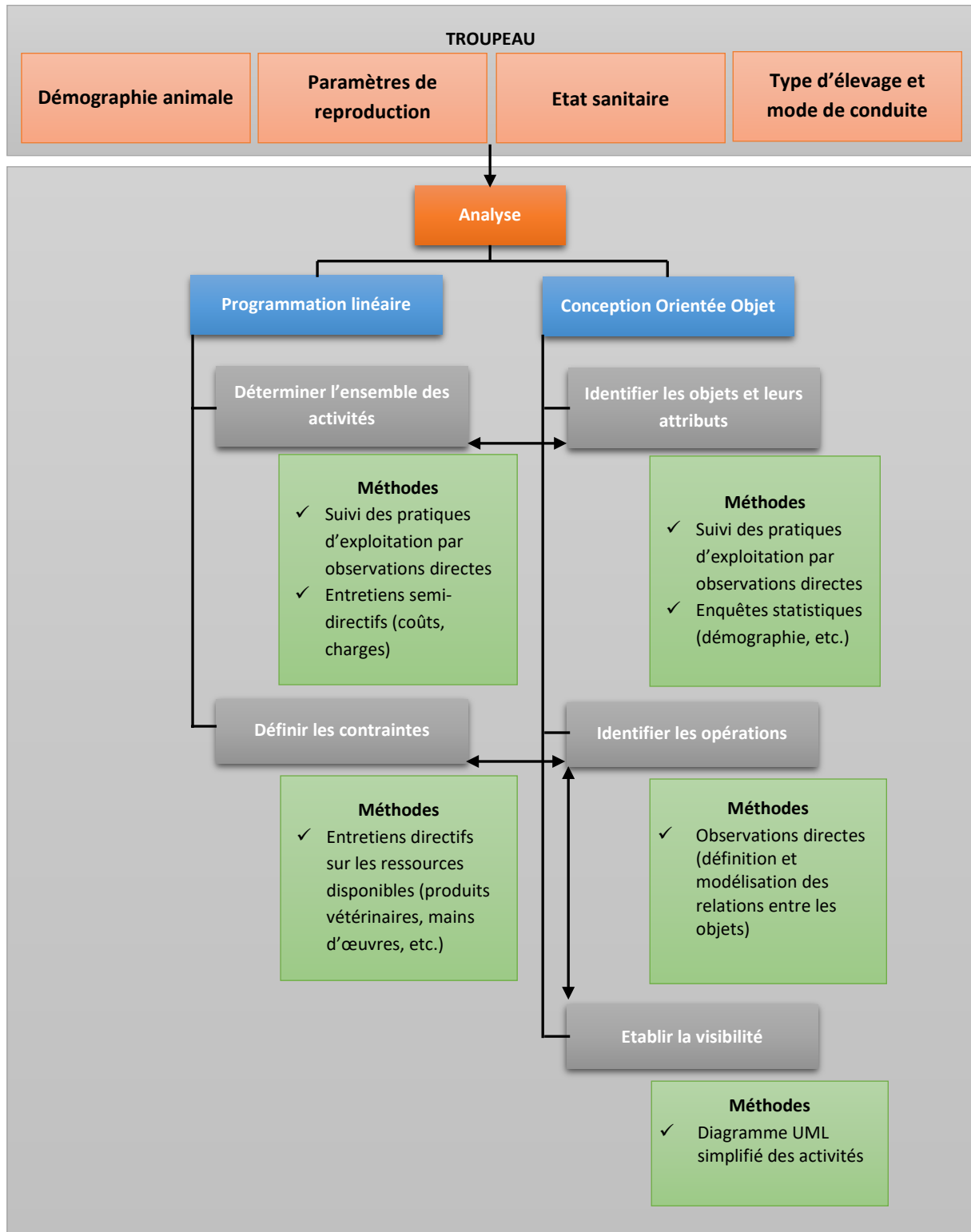


Figure 14 : La démarche d'analyse du troupeau.

Pour les vaches à production limitée, nous nous sommes référés aux résultats de CARRE (1975) pour simuler les besoins énergétiques, azotés et en éléments minéraux majeurs. Comme l'objectif de la modélisation est de simuler les besoins du troupeau dans le temps et que comme certains résultats présentés par CARRE sont sous forme de tableaux uniquement (cf. Annexe n°17, p.xxiv), il a fallu dans certains cas les convertir en une équation de régression de type linéaire pour simplifier leur utilisation, en exprimant les besoins énergétiques, azotés et en minéraux en fonction du poids vif pour la vache laitière et en fonction du poids vif et du gain moyen quotidien pour les animaux en croissance et à l'engrais (génisses, taurillons). L'estimation des équations de régression multiple linéaire a été faite avec le logiciel S.P.S.S® 14.0.

Pour les vaches laitières à haut potentiel, la capacité d'ingestion, les besoins énergétiques, azotés et en minéraux majeurs (Calcium et phosphore absorbables) sont modélisés à partir des modèles INRA de 1988, 1989 et 2007. Il en est de même pour les besoins des taurillons à l'engrais mais en utilisant les tables de l'INRA de 2007 et en adoptant la même démarche que précédemment pour l'estimation des équations de régression multiple. Pour les génisses laitières, les modèles énoncés dans la thèse de CHARDON (CHARDON, 2008) ont été choisis. Cette thèse a été réalisée à l'INRA de Rennes en 2008 et présente des modèles plus actualisés sur les besoins énergétiques et azotés et sur la capacité d'ingestion des génisses d'élevage.

II – 3 – C La modélisation de la dynamique de la population

La maîtrise de la reproduction dans les systèmes intensifs de production est nécessaire pour assurer des programmes de génétique (RICHARD, 2002). Ainsi, l'éleveur est supposé avoir un contrôle sur la conduite de la reproduction (maîtrise des géniteurs, contrôle de l'intervalle entre mises-bas, contrôle de la fécondation, contrôle de l'âge à la première mise-bas, etc.). Les taux de fécondité et de mortalité dépendent de la stratégie de l'éleveur en termes de renouvellement et de performance et sont considérés comme des paramètres exogènes. Il en est de même pour les achats et les ventes.

Notre choix sur le modèle de croissance démographique pour la simulation de la dynamique de la population animale est le modèle matriciel de LESLIE. C'est l'un des modèles les plus utilisés en dynamique des populations et en démographie. Ce modèle présente comme avantage de permettre la modélisation de la dynamique d'une population structurée en s classes d'âge (cf. Encadré 4) et de considérer le taux de reproduction et l'hétérogénéité de chaque classe d'âge. De plus, nous pouvons y intégrer facilement la stratégie de l'éleveur en termes de renouvellement et de performance étant donné que les paramètres vitaux (fertilité, taux de survie entre classes d'âge, etc.) de la matrice de Leslie peuvent être modifiés d'entrée (INPUTS).

Encadré 4: Le modèle matriciel de Leslie.

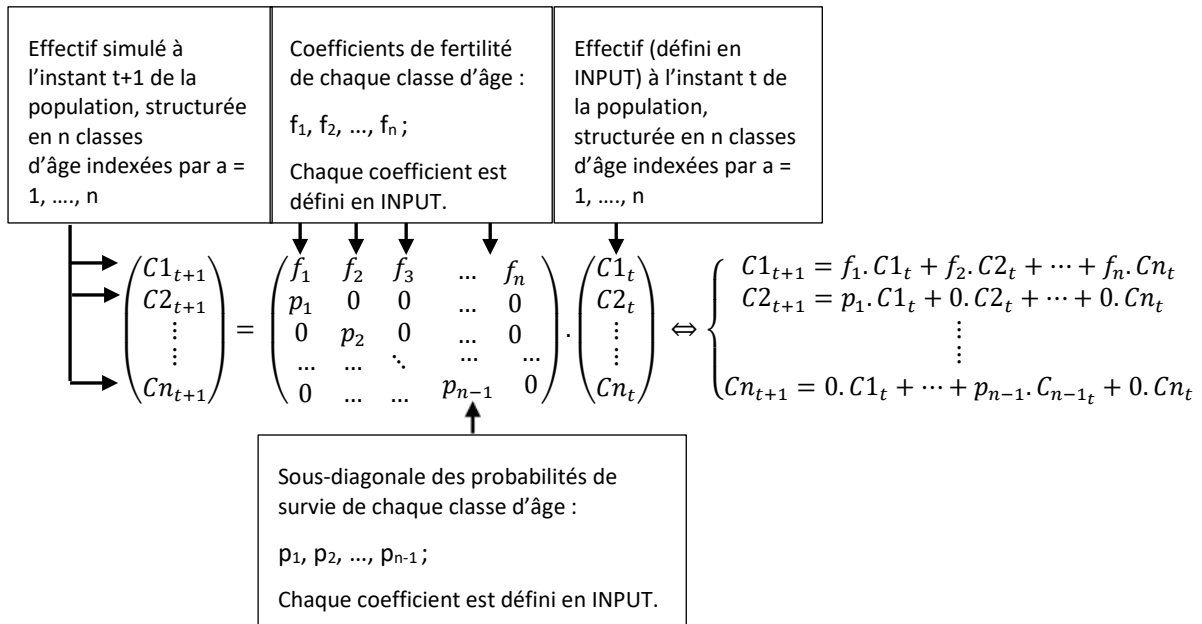
La dynamique est décrite par un modèle linéaire déterministe. La population est structurée en s classes d'âges, indexées par $a = 1, \dots, s$. La population au pas de temps t est décrite par le vecteur $N(t)$, de dimension s , qui contient le nombre d'individus dans chaque classe d'âge a au temps t , $N_a(t)$. Une application linéaire permet d'obtenir $N(t)$ à partir de $N(t-1)$. La matrice de cette application, Λ , contient tous les paramètres vitaux (taux de fertilité, taux de survie entre classes d'âge), considérés comme indépendants du temps (RIVOT, 2003):

$$N(t) = \Lambda \cdot N(t-1) \Leftrightarrow \begin{pmatrix} N_1(t) \\ \vdots \\ N_s(t) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \Lambda_{1,1} & \dots & \Lambda_{1,s} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Lambda_{s,1} & \dots & \Lambda_{s,s} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} N_1(t-1) \\ \vdots \\ N_s(t-1) \end{pmatrix}$$

La première ligne de la matrice Λ ($\Lambda_{1,1}, \Lambda_{1,2}, \dots, \Lambda_{1,s}$) contient les coefficients de fertilité de chaque classe d'âge, la sous diagonale ($\Lambda_{1,1}, \Lambda_{2,2}, \dots, \Lambda_{s,s}$) les coefficients de survie d'une classe d'âge à la suivante et tous les autres coefficients de Λ sont nuls.

Source : RIVOT, 2003.

Schématiquement, le modèle matriciel de LESLIE s'opère sous la forme matricielle suivante :



II – 3 – D La modélisation des bâtiments d'élevage

Les bâtiments d'élevage font partie intégrante du système biotechnique de production. Etant donné que l'objectif de cette recherche est de mettre à la disposition des différents acteurs de développement un outil d'aide à la décision permettant de faire le choix optimal sur la stratégie de production et sur la rentabilité des investissements dans l'élevage de bovins laitiers, nous avons modélisé en amont des exploitations-type en fonction de la taille du troupeau et des choix d'alimentation (utilisation d'ensilage ou non, etc.).

Pour la modélisation des bâtiments d'élevage, nous nous sommes inspirés des recommandations et des données techniques du « guide pratique » de construction de bâtiments d'élevage de bovins élaboré par la Chambre d'agriculture d'Auvergne, en France (LAGRANGE, et al., 2006). Pour la modélisation proprement dite, deux logiciels informatiques ont été utilisés :

- ✓ Le logiciel Autodesk® Robot® Structural Analysis Professional 2010 - 2015 pour le calcul de la structure des bâtiments en entier (notamment des fermes métalliques supportant la toiture), pour le calcul de la structure en béton armé des fosses à fumier et enfin pour l'établissement des devis en matériaux de construction nécessaires aux calculs des coûts des bâtiments par catégorie d'animaux (étables pour vaches, génisses, taurillons).
- ✓ Le logiciel Autodesk® AutoCAD® 2004 - 2007 pour la modélisation des plans des bâtiments par catégorie d'animaux (étables pour vaches, génisses, taurillons), des logettes et des cornadis.

Les bâtiments-type modélisés ont été ensuite intégrés dans notre modèle informatique pour faciliter le calcul de coûts des bâtiments à partir des coûts des différents matériaux de construction. Ceci, dans le but de faciliter et d'apporter des éléments de réflexion sur l'orientation technique, politique et organisationnelle, dans le processus d'investissement dans ce secteur.

II – 3 – E La modélisation de l'évolution de la Note d'Etat Corporel

La modélisation de l'évolution fictive de la Note d'Etat Corporel (NEC) a été faite à partir de la littérature. L'équation de régression utilisée est celui de BRUN-LAFLEUR et al. (2011).

III – Éléments de modélisation

III – 1 Les activités animales

L'élevage modélisé est un élevage à vocation naisseur – producteur de viande. En moyenne, nous avons compté 8,5 têtes de bovins par exploitation. Le cheptel est caractérisé par une forte proportion de castrés (26,89%) et de taureaux (18,49%). Les vaches constituent 24,37% du cheptel (cf. Graphique 1, p.49). Les mâles castrés et les taureaux sont destinés principalement aux travaux agricoles (piétinement des rizières, traction, etc.), mais également à l'approvisionnement des marchés locaux en viande.

Garder une forte proportion de vaches est un moyen d'accroître rapidement l'effectif du cheptel. La production de veaux et de velles par simple naissance est un moyen d'accumuler le maximum de têtes sans faire le moindre frais pour l'achat d'animaux. Parmi les 29 vaches recensées (pour l'ensemble des 14 exploitations), 9 d'entre elles (soit 31% du cheptel) sont des vaches métissées normandes (5/8 ou 1/2 de sang pur) que les propriétaires ont fait venir spécialement des hauts plateaux (Manjakandriana, Antsirabe) pour améliorer le capital génétique de leurs troupeaux. Cependant, cette initiative semble être vaine car il n'y a pas de taureaux améliorés dans le terroir étudié. En conséquence, pour la reproduction, les éleveurs utilisent des taureaux de races autochtones. Celle-ci se fait uniquement par monte naturelle.

La production laitière est généralement réservée à l'alimentation des veaux et à l'autoconsommation, mais elle est quelques fois vendue au marché local si la quantité produite est assez abondante. En moyenne, la production laitière des vaches métissées tourne autour de 4 litres/jour au pic de lactation, pour une durée de lactation d'environ 280 jours, ce qui est relativement faible par rapport aux « Rana » qui produisent environ 5 à 8 litres/jour au pic, sur 10 mois de lactation. Pour les vaches zébus, la production laitière est très basse comparée à celle des vaches métissées : autour de 2 litres/jour pendant environ six mois.

Toutes les velles qui naissent sont systématiquement vendues pour ne pas alourdir les charges liées au troupeau à l'exception de celles qui vont remplacer les vaches réformées. Les génisses destinées au renouvellement du troupeau représentent 14,29% de celui-ci. En plus de leur future fonction de reproductrices, elles assurent un rôle de sécurisation financière pour l'éleveur car elles peuvent être vendues à tout moment en cas de besoin urgent d'argent. C'est aussi un moyen de compenser les pertes dues à la mortalité des vaches qui présentent un taux de mortalité annuel de 3 à 5%. Les achats de génisses sont rares, mais peuvent se produire pour des agro-éleveurs qui veulent démarrer un nouveau cheptel. Le taux de mortalité le plus élevé (11%) est enregistré chez les taurillons et les génisses car ces deux catégories sont les plus vulnérables aux maladies bactériennes (charbons bactériens) et parasitaires (distomatoses) rencontrées dans la zone d'étude. Le taux de fécondité des vaches est assez fort (78%) comparé à la moyenne nationale (60%). Cependant, le croît numérique du troupeau est pratiquement nul car les velles sont systématiquement vendues et la proportion de mâles castrés est élevée (27% du troupeau).

Les activités animales consistent essentiellement en :

- ✓ Production et vente de lait ;
- ✓ Vente de fumier ;
- ✓ Vente de vaches réformées ;
- ✓ Achat et vente de génisses ;
- ✓ Vente de castrés et de taureaux ;
- ✓ Vente de velles et de veaux.

Ainsi, pour mieux prendre en compte ces observations et adapter le modèle aux spécificités et aux attentes des éleveurs malgaches, nous avons considéré trois catégories d'animaux dans le processus de modélisation du troupeau :

- ✓ Les vaches laitières ;

- ✓ Les taurillons à l'engrais ;
- ✓ Les génisses d'élevage.

III – 2 Identification des objets et de leurs attributs

Les activités animales concernent les achats et les ventes des différentes catégories de bovins composant le troupeau, ainsi que leurs produits respectifs (viande, lait). Nous pouvons donc définir les catégories d'animaux comme des classes étant donné qu'elles génèrent des activités dans le monde réel et qu'elles possèdent des attributs qui leurs sont propres. A part les catégories d'animaux, il y a aussi les dépenses rattachées à l'atelier proprement dites et qui génèrent des activités. Le pôle animal comporte donc 8 classes :

- ✓ La classe Vaches ;
- ✓ La classe Taurillons ;
- ✓ La classe Genisses ;
- ✓ La classe Veaux_Velles ;
- ✓ La classe Dynamique_Population ;
- ✓ La classe Charges_Directes ;
- ✓ La classe Main_d'œuvre_AtelierBovin.

III – 3 Représentation UML simplifiée

Dans ce modèle, le troupeau est représenté par des effectifs répartis entre différentes catégories (veaux, velles, génisses, taurillons ou vaches), différentes classes d'âge et de rang de lactation (pour les vaches) (cf. III – 7 ; III – 7 – A, p.113). Il ne s'agit donc pas d'un modèle individu-centré (GRIMM et *al.*, 2005) dans lequel chaque classe est instanciée en autant d'objets qu'il y a d'animaux modélisés qui appartiennent à la catégorie représentée par la classe. Ces classes s'instancient donc en des objets qui ne représentent pas un animal individuel, mais qui représentent une catégorie d'animal. En conséquence, les classes « Vache_Laitière », « Taurillon » et « Genisse » s'instancient en un objet unique (classes singleton) (cf. Figure 15, p.102). En revanche, comme les veaux et les velles ont exactement les mêmes attributs et méthodes, la classe « Veau_Velle » s'instancie en deux objets, l'un qui représente la catégorie des veaux, l'autre qui représente la catégorie des velles. Toutes ces classes sont instanciées à partir de la classe principale « Bovin_Laitier » (cf. Figure 15, p.102).

Le système protéique et le système utilisé pour exprimer la capacité d'ingestion (UEB ou kg MS / 100 kg PV) change en fonction du type de bovin choisi par l'utilisateur du modèle informatique. Chacune des quatre classes a donc son propre système protéique et son propre système d'expression de la capacité d'ingestion.

La classe Vache est une classe abstraite dont hérite les deux classes ci-dessous (cf. Figure 15, p.102):

- ✓ La classe Vaches_A_HautPotential ;
- ✓ La classe Vaches_A_ProductionLimitee.

Ces deux classes diffèrent par leur système protéique et par le système utilisé pour exprimer la capacité d'ingestion. La classe « vache à production limitée » comprend également un attribut supplémentaire : la « distance parcourue au pâturage » (cf. Figure 15, p.102). Cet attribut est utile pour calculer les dépenses énergétiques et azotées pendant le déplacement au pâturage. Pour les vaches à haut potentiel, cette précision n'est pas nécessaire car le modèle INRA utilisé pour le calcul de la dépense énergétique prend déjà en compte ce critère.

En dernier lieu, il y a la classe « Dynamique_Population » qui instancie les résultats de la simulation de la dynamique de la population, et les classes « Charges_Directes » et « Main_d'œuvre_AtelierBovin » destinées à instancier toutes les dépenses liées à l'atelier bovin (cf. Figure 15, p.102). Ces deux dernières sont instanciées à partir d'une classe principale « Charges_Troupeaux ».

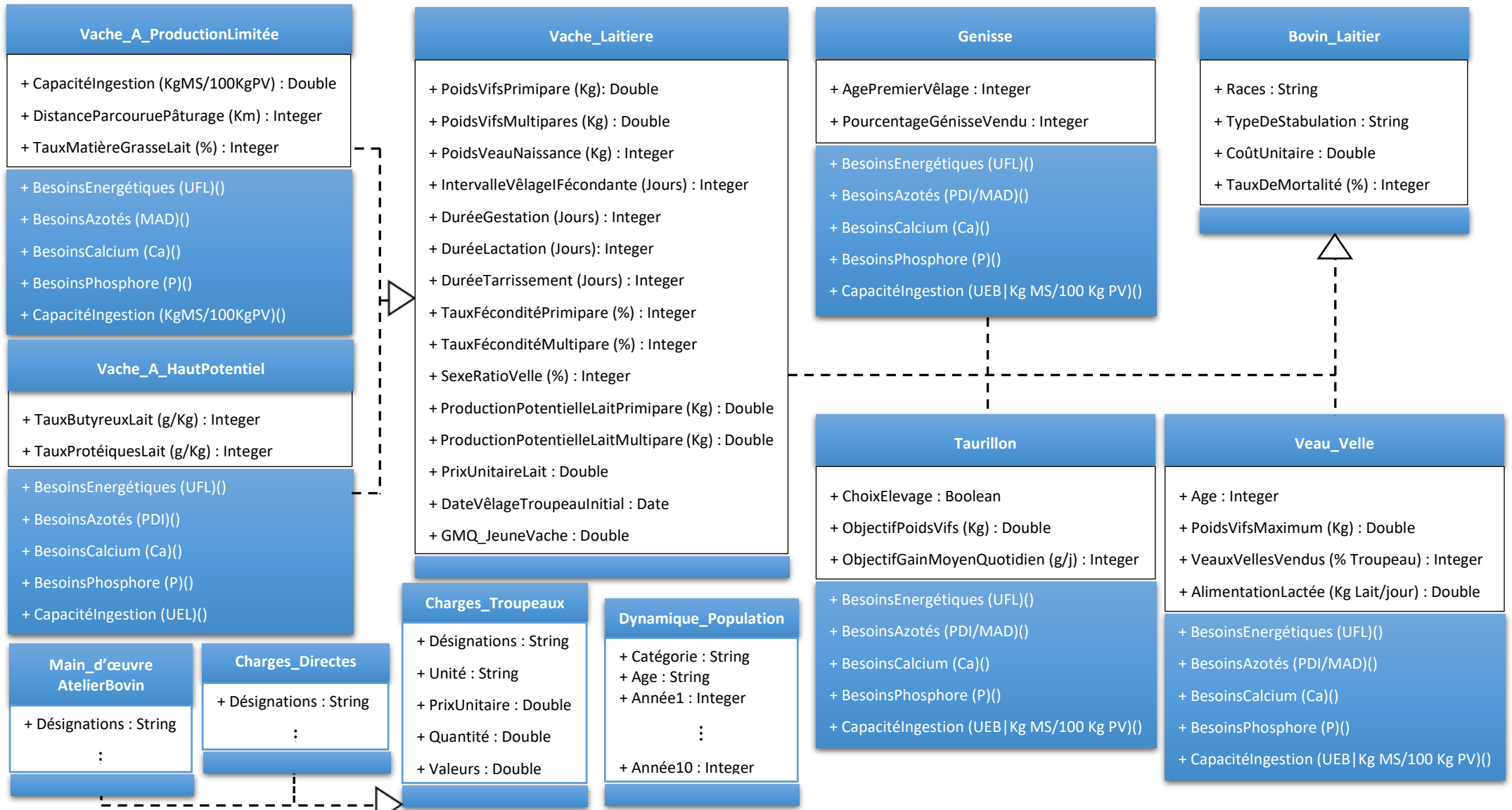


Figure 15 : Diagramme de classes du modèle de troupeau.

III – 4 Hypothèses de travail sur la modélisation du troupeau

Formuler quelques hypothèses de travail a été nécessaire dans le but de cerner et d'apporter quelques précisions sur les caractéristiques du troupeau modélisé. Les hypothèses de travail suivants ont été posées :

- Nous supposons que la durée de la simulation des besoins des animaux est de 10 ans, avec un pas de temps de simulation d'une semaine. Ce pas de temps d'une semaine est suffisant pour représenter l'évolution des besoins du troupeau. Il a aussi fallu faire un compromis entre le niveau de détail du modèle et le temps d'exécution de la simulation. En particulier, il ne faut pas que le temps d'exécution de la simulation soit trop long sur un ordinateur de faible puissance.
- Pour les vaches à haut potentiel, l'âge au premier vêlage des génisses est de 24 mois. Selon l'INRA, pour la pratique d'un premier vêlage à 24 mois, l'objectif de poids à atteindre est d'un peu moins de 80% du poids adulte (INRA, 2007). Ce niveau de croissance est considéré comme optimal pour la longévité de la vache et pour ses lactations ultérieures. Pour notre modèle informatique, le poids au premier vêlage et le poids à l'âge adulte sont définis d'entrée par l'utilisateur.
- Pour les vaches à production limitée et à croissance modérée, l'âge au premier vêlage est de 32 mois. Le poids au premier vêlage et le poids à l'âge adulte sont fixés d'entrée par l'utilisateur.
- Nous supposons que tous les animaux qui appartiennent à un même lot et qui sont dans la même classe d'âge ont les mêmes besoins, les mêmes niveaux de production et les mêmes paramètres de stade physiologique. Ils sont donc gérés de façon similaire et reçoivent les mêmes traitements (rationnement, etc.).
- Pour les races de vaches à haut potentiel, les animaux sont considérés comme veaux d'élevage pour un âge allant de la naissance jusqu'à 4 ou 5 mois, avec un poids vif maximum de 150 Kg (INRA, 2007). Comme les potentiels de croissance des tissus squelettiques et musculaires sont élevés pendant cette période, le gain moyen quotidien est différent de celui des génisses en croissance et des taurillons à l'engrais âgés de plus de 5 mois. Le gain moyen quotidien (GMQ) recherché pour le veau est donc calculé à partir de son poids à la naissance jusqu'au poids de 150 Kg, à 5 mois d'âge. Le gain moyen quotidien recherché pour les génisses est calculé à partir du poids de 150 Kg jusqu'au poids vif au premier vêlage, à 24 mois d'âge. Pour les taurillons à l'engrais, le gain moyen quotidien recherché à partir de l'âge de 5 mois et l'objectif de poids final à atteindre sont définis par l'utilisateur. Nous supposons que les taurillons engraisés sont vendus au plus tard à l'âge de 24 mois. Si l'objectif de poids est atteint avant cet âge, nous supposons que les taurillons sont immédiatement vendus.
- Pour les vaches à croissance modérée, l'âge maximum des veaux est toujours de 4 à 5 mois, mais nous n'avons pas défini un objectif de poids vif à atteindre à cet âge. Le gain moyen quotidien recherché est donc calculé en fonction du poids du veau à la naissance et du poids de la vache au premier vêlage, à 32 mois. Pour les taurillons à l'engrais issus de ce type de vache, le gain moyen quotidien recherché et l'objectif de poids final à atteindre sont définis par l'utilisateur. Comme ce type d'animaux est supposé à croissance modérée, la limite d'âge à la vente a été fixée à 48 mois au plus tard. Le choix de GMQ imposé par l'utilisateur va conditionner la durée de l'atteinte de l'objectif de poids. Si l'objectif de poids est atteint avant cet âge, nous supposons que les taurillons sont immédiatement vendus.
- Quel que soit le type de bovin, nous supposons que le sevrage des veaux et des velles s'effectue à un poids vif d'environ 80 Kg. Pour les races de vache à haut potentiel, ce poids correspond à environ 8 semaines d'âge. Pour les vaches à croissance modérée, ce poids correspond à un âge se situant entre 3 et 5 mois.
- Nous supposons que les achats de génisses et les ventes de vaches de réforme et/ou de génisses s'effectuent pendant la même période, c'est-à-dire en fin d'année d'exercice. Les vaches sont supposées encore productives avant la mise à la réforme. Les achats de femelles pour remplacer les vaches réformées concernent toujours des génisses gestantes prêtes à vêler. Dans un souci de simplification, nous supposons que la date de premier vêlage pour les génisses achetées coïncide avec celle du lot auquel nous allons les affecter. L'âge à la vente des génisses est de 24 ou de 32 mois selon

le cas, c'est-à-dire des génisses en âge de vêler. Pour les veaux et velles par contre, nous supposons que si l'éleveur décide de ne pas les maintenir dans son exploitation, il les vendra dès qu'ils sont sevrés pour éviter un coût supplémentaire en aliments.

- Nous supposons que la reproduction des vaches est assurée par insémination artificielle.
- Nous supposons que l'offre et la demande de la vente d'animaux sur le marché sont toujours satisfaites.

III – 5 Les modèles utilisés pour simuler la production potentielle de lait, les besoins et la capacité d'ingestion du troupeau

III – 5 – A. Chez les vaches laitières

III – 5 – A – 1 La production potentielle de lait

La production potentielle de lait correspond à la quantité de lait synthétisée par la mamelle lorsque la disponibilité en nutriments n'est pas limitante, et pour une lactation sans problème sanitaire (INRA, 2007). Elle varie avec le potentiel génétique de l'animal, son numéro de lactation, son stade de lactation et de gestation.

Le modèle que nous avons utilisé pour simuler la production potentielle de lait est celui proposé par l'INRA en 2007. Cette production est calculée en fonction de la production potentielle au pic de lactation et des semaines de lactation et de gestation. La production de lait au pic de lactation pour les primipares et les multipares est spécifiée d'entrée par l'utilisateur (cf. Figure 15, p.102). Il en est de même pour le taux protéique et butyreux du lait. Seule la durée de la lactation est fixée à 305 jours pour les vaches fortes productrices. Pour les vaches à production limitée, cette durée est entièrement paramétrable.

Pour les primipares :

$$PL_{Pot}(Kg/Jour) = PL_{MaxPot} \times [1,084 - (0,7 \times e^{-0,46 \times SemL}) - (0,009 \times SemL) - (0,69 \times e^{-0,16 \times (45 - SemG)})]$$

(Equation 29)

Pour les multipares :

$$PL_{Pot}(Kg/Jour) = PL_{MaxPot} \times [1,047 - (0,69 \times e^{-0,90 \times SemL}) - (0,0127 \times SemL) - (0,50 \times e^{-0,12 \times (45 - SemG)})]$$

(Equation 30)

Source : INRA, 2007.

Avec :

PL_{MaxPot} : la production potentielle au pic de lactation (Kg/Jour).

SemL : la semaine de lactation.

SemG : le nombre de semaines de gestation.

III – 5 – A – 2 Les besoins énergétiques des vaches à haut potentiel

Pour les vaches à haut potentiel, le modèle utilisé pour simuler les besoins énergétiques est celui proposé par l'INRA en 2007 :

$$BesUFL = [(0,041 \times PV^{0,75}) \times I_{act}] + (0,44 \times PL_{4\%}) + [3,25 - (0,08 \times \text{âge})] + (0,00072 \times PV_{nais} \times e^{0,116 \times SemG})$$

(Equation 31)

Source : INRA, 2007.

Avec :

$PV^{0,75}$: poids métabolique (en $kg^{0,75}$).

I_{act} : indice d'activité : $I_{act} = 1$ en stabulation entravée ; 1,1 en stabulation libre ; 1,2 au pâturage.

$PL_{4\%}$: Production de lait à 4% de matières grasses (Kg).

$$PL_{4\%} = PL \times [0,4 + (0,015 \times TB)] \quad (\text{Equation 32})$$

TB : taux butyreux du lait (en g/Kg de lait).

Âge : âge de la vache (en mois).

PV_{nais} : poids prévisible du veau à la naissance (Kg).

Si le poids à l'âge adulte n'est pas atteint pour les primipares, le besoin énergétique de croissance doit être ajouté au besoin d'entretien ($0,041 \times PV^{0,75}$). Pour le calcul, l'hypothèse avancée par l'INRA en 1988 est retenue en considérant que les primipares consomment la même ration de base que les adultes et en fixant un apport en équivalent lait de 5 kg pour assurer la croissance pour les vaches vêlant à 24 mois. En utilisant le modèle INRA de 2007, ceci équivaut à :

$$BesUF_{croissance} = 0,44 \times 5 \times [0,4 + (0,015 \times TB)] \quad (\text{Equation 33})$$

III – 5 – A – 3 Les besoins énergétiques des vaches à faible potentiel

Pour les vaches à croissance modérée et à production limitée, le besoin énergétique d'entretien a été calculé par régression linéaire à partir des résultats de CARRE (CARRE, 1975) (cf. Annexe n°17, p.xxiv), soit :

$$UFL_{entretien} = 0,006126 \times PV + 0,6775 \quad (r^2 = 0,99) \quad (\text{Equation 34})$$

Le calcul des dépenses énergétiques liées aux déplacements au pâturage a été fait sur la base de 0,022 UF par kilomètre parcouru pour 100 Kg de poids vif (BOUDET, 1975b). La distance parcourue quotidiennement au pâturage est spécifiée d'entrée par l'utilisateur (cf. Figure 15, p.102).

Ainsi, le besoin énergétique d'une vache à production limitée, en gestation et en lactation est obtenu à partir de l'équation :

$$BesUFL = [0,0061 \times PV + 0,6775] + (UF_{Lait} \times PL_{Pot}) + [(UF_g \times PV)/100] + [(0,0220 \times PV)/100] \times dist \quad (\text{Equation 35})$$

Avec :

PV : poids vif de la vache (Kg).

UF_{Lait} : besoin énergétique pour la production de lait (cf. Annexe n°17, p.xxiv).

PL_{Pot} : la production potentielle de lait (Kg/Jour).

UF_g : besoin énergétique des 3 derniers mois de gestation (cf. Annexe n°17, p.xxiv). Si le mois de gestation est inférieur à 7, alors $UF_g = 0$.

dist : la distance parcourue pour les déplacements au pâturage (en kilomètres).

Si le poids à l'âge adulte n'est pas atteint pour les primipares, le besoin énergétique de croissance doit être ajouté au besoin d'entretien ($0,006126 \times PV + 0,6775$). Pour le calcul, l'hypothèse avancée par l'INRA en 1988 est retenue, en considérant que les primipares consomment la même ration de base que les adultes et en fixant un apport en équivalent lait de 3 kg pour assurer la croissance pour les vaches vêlant avant d'avoir atteint leur poids adulte. Pour avoir plus de concordance avec le cas des vaches métissées malgaches, la valeur du besoin en énergie liée à la production de lait et qui varie en fonction de la teneur en matières grasses (3%, 4% et 5%) (cf. Annexe n°17, p.xxiv) est retenue (CARRE, 1975).

III – 5 – A – 4 Les besoins azotés des vaches à haut potentiel

Le modèle de besoin azoté utilisé pour les vaches à haut potentiel est celui de l'INRA en 2007 :

$$BesPDI (g) = (3,25 \times PV^{0,75}) + (1,56 \times PL_{Pot} \times TP) + (0,07 \times PV_{nais} \times e^{0,111 \times SemG}) \quad (\text{Equation 36})$$

Source : INRA, 2007.

Avec :

PV^{0,75} : poids métabolique (en kg^{0,75})

TP : le taux protéique du lait en g/Kg de lait.

PL_{pot} : la production potentielle de lait (Kg/Jour).

SemG : le nombre de semaines de gestation.

Si le poids à l'âge adulte n'est pas atteint pour les primipares, le besoin azoté de croissance doit être ajouté au besoin d'entretien (3,25 x PV^{0,75}). En fixant un apport en équivalent lait de 5 kg pour assurer la croissance, le modèle INRA de 2007 propose comme besoin en protéines lié à la croissance la valeur de 1,56 fois la quantité de protéines produites dans le lait :

$$\text{BesPDI}_{\text{croissance}} = 1,56 \times 5 \times \text{TP} \quad (\text{Equation 37})$$

III – 5 – A – 5 Les besoins azotés des vaches à faible potentiel

Pour les vaches à production limitée, le besoin azoté d'entretien équivaut à 0,6 g de MAD par kilogramme de poids vif (CARRE, 1975). Pour les déplacements au pâturage, le besoin en matière azotée digestible est assimilé à un travail léger à 0,3 g de MAD par kilogramme de poids vif (BOUDET, 1975b).

Le besoin en MAD est obtenu avec l'équation :

$$\text{BesMAD (g)} = [0,6 \times \text{PV}] + (\text{MAD}_{\text{Lait}} \times \text{PL}_{\text{Pot}}) + [(\text{MAD}_g \times \text{PV})/100] + [(0,3 \times \text{PV}) \times \text{dist}] \quad (\text{Equation 38})$$

Avec :

PL_{pot} : la production potentielle de lait (Kg/Jour).

MAD_{Lait} : besoin azoté pour la production de lait (cf. Annexe n°17 ; 17-2, p.xxv).

MAD_g : besoin azoté des 3 derniers mois de gestation (cf. Annexe n°17 ; 17 - 2, p.xxv). Si le mois de gestation est inférieur à 7, alors MAD_g = 0.

Si le poids à l'âge adulte n'est pas atteint pour les primipares, le besoin azoté de croissance doit être ajouté au besoin d'entretien (0,6 x PV). Un apport en équivalent lait de 3Kg est fixé pour assurer la croissance :

$$\text{BesMAD}_{\text{croissance}} = 3 \times \text{MAD}_{\text{Lait}} \quad (\text{Equation 39})$$

III – 5 – A – 6 Les besoins en Calcium et Phosphore absorbables des vaches à haut potentiel

Le besoin en calcium et en phosphore absorbables pour les vaches à haut potentiel est fonction du poids vif des vaches et des quantités totales ingérées en fourrages étant donné que ces éléments sont apportés directement par la ration. Le besoin de production est fonction de l'exportation de calcium et de phosphore dans le lait (INRA, 2007) :

$$\text{BesCa}_{\text{abs}}(\text{g}) = (0,663 \times \text{QI}) + (0,008 \times \text{PV}) + (1,25 \times \text{PL}_{\text{Pot}}) + [(23,5)/(1 + e^{(18,8-5,03 \times \text{Log}(\text{SemG}))})] \quad (\text{Equation 40})$$

Source : INRA, 2007.

Avec QI est la quantité totale ingérée. Elle est obtenue par régression linéaire à partir de la table de l'INRA 2007 :

$$\text{QI (Kg MS)} = (0,06 \times \text{PV}) - 20 \quad (r^2 = 1) \quad (\text{Equation 41})$$

PV : Poids vifs (Kg)

PL_{pot} : la production potentielle de lait (Kg/Jour).

SemG : le nombre de semaines de gestation.

Si le poids à l'âge adulte n'est pas atteint pour les primipares, le besoin de croissance en Ca absorbable doit être ajouté au besoin d'entretien $((0,663 \times QI) + (0,008 \times PV))$. En fixant un apport en équivalent lait de 5 kg pour assurer la croissance, le besoin en calcium absorbable lié à la production de lait représente 6,25 g.

Pour le besoin en phosphore :

$$\text{BesP}_{\text{abs}} = (0,83 \times QI) + (0,002 \times PV) + (0,9 \times \text{PL}_{\text{Pot}}) + [(7,38)/(1 + e^{(19,1-5,46 \times \text{Log}(\text{SemG}))})] \text{ (Equation 42)}$$

Source : INRA, 2007.

Avec :

PV : Poids vifs (Kg).

PL_{Pot} : la production potentielle de lait (Kg/Jour).

SemG : le nombre de semaines de gestation.

Si le poids à l'âge adulte n'est pas atteint pour les primipares, le besoin de croissance en P absorbable doit être ajouté au besoin d'entretien $((0,83 \times QI) + (0,002 \times PV))$. Le calcul de la quantité ingérée (QI) est donné par l'équation 37. En fixant un apport en équivalent lait de 5 kg pour assurer la croissance, le besoin en phosphore absorbable lié à la croissance représente 4,5 g.

III – 5 – A – 7 Les besoins en Calcium et Phosphore des vaches à faible potentiel

Pour les vaches à faible potentiel, les besoins en Ca et P sont obtenus à partir des résultats de CARRE (cf. Annexe n°17 ; 17 - 3, p.xxvi) :

$$\text{BesCa} = ((5 \times PV)/100) + (3 \times \text{PL}_{\text{Pot}}) + ((6 \times PV)/100) \text{ (Equation 43)}$$

Source : CARRE, 1975.

$$\text{BesP} = ((3 \times PV)/100) + (2,5 \times \text{PL}_{\text{Pot}}) + ((5,5 \times PV)/100) \text{ (Equation 44)}$$

Source : CARRE, 1975.

Avec :

PV : Poids vifs (Kg)

PL_{Pot} : la production potentielle de lait (Kg/Jour).

Si le poids à l'âge adulte n'est pas atteint pour les primipares, les besoins de croissance en Ca et P doivent être ajoutés respectivement aux besoins d'entretien $((5 \times PV)$ et $(3 \times PV))$. En fixant un apport en équivalent lait de 3 kg pour assurer la croissance, les besoins en calcium et en phosphore liés à la croissance représentent respectivement 9 g et 7,5 g.

III – 5 – A – 8 La capacité d'ingestion des vaches

Pour les vaches à haut potentiel, la capacité d'ingestion exprimée en unité d'encombrement (UEL) s'accroît avec la production potentielle de lait et avec le format de l'animal, mais diminue quand la note d'état corporel (NEC) augmente (INRA, 2007). Elle est modulée par l'âge de la vache et par le stade physiologique.

$$\text{CI (UEL)} = [13,9 + (0,015 \times (PV - 600)) + (0,15 \times \text{PL}_{\text{Pot}}) + (1,5 \times (3 - \text{NEC}))] \times \text{IL} \times \text{IG} \times \text{IM} \text{ (Equation 45)}$$

Source : INRA, 2007.

Avec :

$$\text{IL : Indice de lactation : IL} = a + ((1 - a) \times (1 - e^{-0,16 \times \text{SemL}})) \text{ (Equation 46)}$$

a = 0,6 pour les primipares et a = 0,7 pour les multipares. IL = 1 pour les vaches taries.

$$\text{IG : Indice de gestation : IG} = 0,8 + (0,2 \times (1 - e^{-0,25 \times (40 - \text{SemG})})) \text{ (Equation 47)}$$

$$\text{IM : indice de maturité : IM} = -0,1 + (1,1 \times (1 - e^{-0,08 \times \text{Age}})) \text{ (Equation 48)}$$

NEC : la Note d'Etat Corporel.

Pour les vaches à production limitée, la capacité d'ingestion est exprimée en kilogramme de matière sèche pour 100 kg de poids vif. Bien entendu, la valeur de la capacité d'ingestion sera précisée d'entrée par l'utilisateur du modèle, mais nous allons définir comme valeur par défaut 2,5 Kg de matière sèche pour 100 kg de poids vif. Pour avoir plus de souplesse sur l'utilisation du modèle, cette valeur pourra être modifiée à volonté, en supposant par exemple que l'utilisateur aurait effectué des essais d'affouragement et trouvé une valeur différente.

III – 5 – A – 9 L'évolution de la Note d'Etat Corporel (NEC)

L'équation de régression utilisée pour simuler l'évolution de la Note d'Etat Corporel est celle de BRUN-LAFLEUR et al., (2011) :

$$NEC = 3.5 * ((1.3000 - (0.0200 * PLP_{MaxPot})) + ((-0.3000 + (0.0200 * PLP_{MaxPot})) * \text{Exp}(-0.2400 * \text{SemL})) + ((-0.0045 + (0.00035 * PLP_{MaxPot})) * \text{SemL})) \quad (\text{Equation 49})$$

Avec :

PL_{MaxPot} : la production potentielle au pic de lactation (Kg/Jour).

SemL : Semaine de lactation.

Notons que dans l'hypothèse où l'intervalle vêlage – insémination fécondante dure plus de 90 jours, entraînant un cycle vêlage – vêlage plus long et que si la NEC calculée avec l'équation 21 diminue en dessous de la note de 3,5 pendant le tarissement, notre modèle informatique est programmé de façon à ce qu'au-delà de la 53^{ème} semaine, la valeur de la NEC sera toujours maintenue à 3,5 pour être plus réaliste. Dans notre programme informatique, ce cycle de calcul recommence à chaque vêlage. Dans la pratique, cette éventualité peut toujours être maîtrisée en contrôlant de près la quantité de ration et de concentré à distribuer aux vaches avant le vêlage.

III – 5 – B Chez les bovins en croissance et à l'engrais

III – 5 – B – 1 Les besoins énergétiques des animaux en croissance issus d'une vache à haut potentiel

Pour les génisses, le modèle utilisé pour simuler les besoins énergétiques est obtenu à partir de l'équation citée par CHARDON en 2008 :

$$\text{BesUFL}_{\text{génisse}} = (0,045 \times PV^{0,75}) + (0,0336 \times PV^{0,75} \times \text{GMQ}^{1,457}) \quad (\text{Equation 50})$$

Source : CHARDON, 2008.

Avec :

$PV^{0,75}$: poids métabolique.

GMQ : le gain moyen quotidien.

Pour les taurillons à l'engrais, deux modèles ont pu être extraits par régression linéaire multiple à partir des tables de l'INRA en 2007.

Si les taurillons à l'engrais sont de race Holstein :

$$\text{BesUFV}_{\text{taurillon}} = (0,0131 \times PV) + (0,0031 \times \text{GMQ}) - 2,0854 \quad (r = 0,993) \quad (\text{Equation 51})$$

Si les taurillons sont issus d'autres races de troupeaux laitiers:

$$\text{BesUFV}_{\text{taurillon}} = (0,0130 \times PV) + (0,0032 \times \text{GMQ}) - 2,3599 \quad (r = 0,993) \quad (\text{Equation 52})$$

Pour les veaux et velles, le modèle utilisé est celui établi par TROCCON en 1987 et publié par l'INRA en 1989 (INRA, 1989):

$$\text{BesUFL}_{\text{veau}} = (0,042 \times \text{PV}^{0,75}) + (0,0435 \times \text{PV}^{0,75} \times \text{GMQ}^{1,4}) \quad (\text{Equation 53})$$

Source : INRA, 1989.

III – 5 – B – 2 Les besoins énergétiques des animaux en croissance issus d'une vache à faible potentiel

Pour les génisses, le modèle est obtenu par régression linéaire multiple à partir des résultats de CARRE (1975) (cf. Annexe n°17 ; 17 - 1, p.xxiv) :

$$\text{BesUFL}_{\text{génisse}} = (0,0109 \times \text{PV}) + (0,0034 \times \text{GMQ}) - 1,3941 \quad (r = 0,966) \quad (\text{Equation 54})$$

Pour les taurillons à l'engrais issus de vaches faibles productrices, les besoins énergétiques ont été obtenus en sommant le besoin énergétique d'entretien (cf. Equation 34, p.105) et l'énergie nécessaire à l'engraissement. Pour simplifier le calcul, nous avons supposé que les besoins énergétiques varient par paliers en fonction des tranches d'âge. Comme base de calcul, les besoins énergétiques en fin d'engraissement énoncés par CARRE (cf. Annexe n°17, p.xxiv), ont été choisis : si l'âge est inférieur à 18 mois, le besoin est de 2,7 UF/Kg gain ; si l'âge est compris entre 18 mois et 2 ans, le besoin est de 3,2 UF/Kg de gain ; si l'âge est compris entre 2 et 3 ans, le besoin est de 4,1 UF/Kg gain ; si l'âge est supérieur à 3 ans, le besoin est de 5,2 UF/Kg gain.

III – 5 – B – 3 Les besoins azotés des animaux en croissance issus d'une vache à haut potentiel

Pour les génisses, le modèle utilisé pour simuler les besoins azotés est obtenu par régression linéaire multiple à partir des tables de l'INRA en 2007 :

$$\text{BesPDI}_{\text{génisse}} = (0,8 \times \text{PV}) + (0,25 \times \text{GMQ}) + 6,134 \quad (r = 0,993) \quad (\text{Equation 55})$$

Pour les taurillons à l'engrais, deux modèles ont pu être extraits par régression linéaire multiple à partir des tables de l'INRA en 2007.

Si les taurillons à l'engrais sont de race Holstein :

$$\text{BesPDI}_{\text{taurillon}} = (0,7189 \times \text{PV}) + (0,2025 \times \text{GMQ}) + 78,5147 \quad (r = 0,992) \quad (\text{Equation 56})$$

Si les taurillons sont issus d'autres races de troupeaux laitiers :

$$\text{BesPDI}_{\text{taurillon}} = (0,7199 \times \text{PV}) + (0,2100 \times \text{GMQ}) + 70,8232 \quad (r = 0,994) \quad (\text{Equation 57})$$

Pour les veaux et velles, le modèle utilisé est celui énoncé par CHARDON en 2008 :

$$\text{BesPDI}_{\text{veau}} = (0,547 \times \text{PV}) + (171 \times \text{GMQ}) + (23,11 \times \text{BesUFL}) + 28,7 \quad (\text{Equation 58})$$

III – 5 – B – 4 Les besoins azotés des animaux en croissance issus d'une vache à faible potentiel

Pour les génisses, le modèle est obtenu par régression linéaire multiple à partir des résultats de CARRE (1975) (cf. Annexe n°17, p.xxvi) :

$$\text{MAD}_{\text{génisse}} = (0,7753 \times \text{PV}) + (0,4038 \times \text{GMQ}) - 88,9767 \quad (r = 0,913) \quad (\text{Equation 59})$$

Pour les taurillons à l'engrais, les besoins totaux équivalent à 90 g MAD/UF (CARRE, 1975).

III – 5 – B – 5 Les besoins en calcium et phosphore absorbables des animaux en croissance issus d'une vache à haut potentiel

Pour les génisses, le modèle utilisé pour simuler les besoins en calcium absorbable est obtenu par régression linéaire multiple à partir des tables de l'INRA en 2007 :

$$\text{BesCa}_{\text{génisse}} = (0,0096 \times \text{PV}) + (0,0119 \times \text{GMQ}) + 2,2070 \quad (r = 0,995) \quad (\text{Equation 60})$$

Pour le phosphore absorbable, l'équation énoncée par l'INRA en 2007 a été adoptée :

$$\text{BesP}_{\text{génisse}} = (1,4 \times \text{BesUFL}) + 3,81 \quad (\text{Equation 61})$$

Pour les taurillons de race Holstein, l'équation de régression linéaire obtenue à partir des tables de l'INRA en 2007 pour le besoin en Calcium absorbable est :

$$\text{BesCa}_{\text{taurillon}} = (0,0051 \times \text{PV}) + (0,0118 \times \text{GMQ}) + 3,9622 \quad (r = 0,981) \quad (\text{Equation 62})$$

Chez les autres races de taurillons :

$$\text{BesCa}_{\text{taurillon}} = (0,0053 \times \text{PV}) + (0,0115 \times \text{GMQ}) + 4,2303 \quad (r = 0,982) \quad (\text{Equation 63})$$

Chez les veaux, les mêmes démarches ont été choisies :

$$\text{BesCa}_{\text{veau}} = (0,0261 \times \text{PV}) + (0,0145 \times \text{GMQ}) - 1,6324 \quad (r = 1) \quad (\text{Equation 64})$$

Pour les besoins en phosphore absorbable, chez les taurillons de race Holstein :

$$\text{BesP}_{\text{taurillon}} = (0,0203 \times \text{PV}) + (0,0068 \times \text{GMQ}) + 1,8780 \quad (r = 0,996) \quad (\text{Equation 65})$$

Chez les autres races de taurillons :

$$\text{BesP}_{\text{taurillon}} = (0,0204 \times \text{PV}) + (0,0067 \times \text{GMQ}) + 1,9942 \quad (r = 0,997) \quad (\text{Equation 66})$$

Chez les veaux :

$$\text{BesP}_{\text{veau}} = (0,0260 \times \text{PV}) + (0,0030 \times \text{GMQ}) + 2,1522 \quad (r = 0,999) \quad (\text{Equation 67})$$

III – 5 – B – 6 Les besoins en calcium et phosphore des animaux en croissance issus d'une vache à faible potentiel

Le besoin en calcium est obtenu par régression linéaire à partir des résultats de CARRE (1975) :

$$\text{BesCa} = (0,03 \times \text{PV}) + 18,30 \quad (r = 0,98) \quad (\text{Equation 68})$$

Le besoin en phosphore est :

$$\text{BesP} = (0,03 \times \text{PV}) + 11,80 \quad (r = 0,92) \quad (\text{Equation 69})$$

III – 5 – B – 7 La capacité d'ingestion des animaux en croissance

Pour les animaux à croissance élevée, la capacité d'ingestion exprimée en UEB est obtenue avec les modèles INRA de 2007.

Chez les génisses : $\text{CI (UEB)} = 0,039 \times \text{PV}^{0,9}$ (Equation 70)

Chez les taurillons Holstein : $\text{CI (UEB)} = 0,219 \times \text{PV}^{0,6}$ (Equation 71)

Chez les autres races de taurillons : $\text{CI (UEB)} = 0,205 \times \text{PV}^{0,6}$ (Equation 72)

Chez les veaux : $\text{CI (UEB)} = 0,042 \times \text{PV}^{0,9}$ (Equation 73)

Chez les animaux à faible performance, la capacité d'ingestion est exprimée en kilogrammes de matière sèche par 100 kg de poids vif. La valeur de la capacité d'ingestion sera précisée d'entrée par l'utilisateur du modèle.

III – 6 Définition des contraintes d'alimentation

Dans le cadre d'une optimisation du système de production, l'objectif principal en ce qui concerne l'alimentation du troupeau est de garantir une ration alimentaire optimale pour satisfaire les besoins de celui-ci. Dans cette perspective, les contraintes d'alimentation doivent permettre une adéquation entre les ressources alimentaires disponibles et les besoins du troupeau. Autrement dit, la somme des besoins énergétiques, azotés et minéraux de chaque catégorie d'animaux, par période et par an doit être inférieure ou égale à la somme des

apports énergétiques, azotés et minéraux de chaque espèce végétale produite et intra-consommée à l'intérieur de l'exploitation, par période et par an. Pour notre cas, le concept de « période » est associé aux saisons. Le nombre de périodes et la durée de chaque période au cours d'une année d'exercice sont définis d'entrée du modèle par l'utilisateur. Au maximum, on peut spécifier 12 périodes correspondant à 12 mois, soit une année.

Chaque activité de production végétale et animale est définie en fonction des éléments suivants :

- sp : espèces fourragères ;
- fp : fourrages pérennes ;
- fa : fourrages annuels ;
- p : période ;
- ye : année ;
- race : races de bovins utilisées ;
- cat : catégories de bovins (vaches, génisses, taurillons).

Pour chaque valeur de ye et de p, l'inéquation suivante doit être vérifiée :

$$\sum_{f \in \{sp,fp,fa\}} VALIMi_{f,p,ye} \cdot Rdti_{f,p,ye} \cdot Xi_{f,p,ye} + \sum_{f \in \{sp,fp,fa\}} VALIMA_{f,p,ye} \cdot Xa_{f,p,ye} + \sum_{f \in \{sp,fp,fa\}} VALIMsi_{f,p,ye} \cdot SI_{f,p,ye} + VALIMco_{p,ye} \cdot CoA_{p,ye} \geq \sum_{race,cat} BesX_{race,cat,p,ye} \cdot Eff_{race,cat,p,ye} \quad (\text{Equation 74})$$

Avec :

Xi : les activités végétales (en hectare) produites et intra-consommées ;

VALIMI : valeurs énergétiques (UFL, UFV), protéiques (PDIN, PDIE ou MAD selon le cas) et minérales (Ca_{abs}, P_{abs} ou Ca, P selon le cas des fourrages produits et intra-consommés ;

Rdti : rendements en Kg MS/ha des fourrages produits et intra-consommés ;

VALIMA : valeurs énergétiques, protéiques et minérales des fourrages achetés (s'il y a eu lieu) ;

Xa : la quantité en Kg MS/ha des fourrages achetés puis intra-consommés (s'il y a eu des achats de fourrages) ;

VALIMCo : valeurs énergétiques, protéiques et minérales des concentrés achetés ;

CoA : la quantité de concentré achetée par période et par an (en Kg MS) ;

BesX : Besoins d'entretien et de production des animaux en énergie (UFL, UFV), protéines (PDI ou MAD selon le cas) et en éléments minéraux (Ca_{abs}, P_{abs} ou Ca, P selon le cas), par période et par an, pour une race et une catégorie de bovins donnée ;

Eff : effectif par race et catégorie d'animaux, par période et par an ;

VALIMsi : valeurs énergétiques, protéiques et minérales du stock initial (c'est à dire en début d'année d'exercice) pour les fourrages stockés (s'il existe).

SI : la quantité en kg MS du stock initial de fourrages. Nous supposons ici que si des stocks initiaux en fourrages existent au début de chaque année d'exercice, ils seront consommés en même temps que ceux nouvellement produits pendant la période planifiée par l'utilisateur pour son utilisation. Pour les fourrages stockés, le calcul de la variation de stocks par espèce et par année d'exercice est donné par la relation :

Pour chaque année ye et pour chaque fourrage $f \in \{sp, fp, fa\}$, on doit avoir :

$$SF_{f,ye} = SI_{f,ye} + \sum_p \left(Xa_{f,p,ye} + Rdti_{f,p,ye} \cdot Xi_{f,p,ye} - \sum_{race,cat} QI_{Bov,cat,f,p,ye} \cdot Eff_{race,cat,p,ye} \right) \quad (\text{Equation 75})$$

SF : la quantité en Kg MS du stock final en fin de l'année d'exercice.

QI : la quantité ingérée (en Kg MS) par animal de chaque catégorie et chaque race, de chaque espèce fourragère stockée. Nous supposons que chaque espèce est distribuée *ad libitum* à chaque catégorie d'animaux.

Pour les vaches : $QI_{race,vache,f,p,ye} = CI_{race,vache,p,ye} / VEF_{f,p,ye}$ (Equation 76)

$$\text{Pour les animaux en croissance : } QI_{\text{race,cat,f,p,ye}} = UF_{\text{race,cat,p,ye}}/UFF_{\text{f,p,ye}} \quad (\text{Equation 77})$$

Avec :

CI : la capacité d'ingestion (UEL) de la vache, par période et par an ;

VEF : valeurs d'encombrements (UEL) du fourrage acheté, stocké ou produit et intra-consommé ;

UF_{Bov} : besoins énergétiques du bovin en croissance ;

UFF : valeur énergétique du fourrage acheté, stocké ou produit et intra-consommé.

La proportion de concentrés dans la ration totale est fournie par l'utilisateur. La proportion de concentrés dans la ration totale, notée %C, ne doit pas dépasser une proportion maximale spécifiée. Par exemple, si l'on souhaite que les apports énergétiques, azotés et minéraux des concentrés restent inférieurs à ceux de l'ensemble des fourrages, l'inéquation suivante doit être satisfaite pour chaque année ye et pour chaque période p :

$$\begin{aligned} & \sum_{f \in \{\text{sp,fp,fa}\}} \%C \cdot \text{VALIMi}_{f,p,ye} \cdot \text{Rdti}_{f,p,ye} \cdot \text{Xi}_{f,p,ye} + \sum_{f \in \{\text{sp,fp,fa}\}} \%C \cdot \text{VALIMa}_{f,p,ye} \cdot \text{Xa}_{f,p,ye} \\ & + \sum_{f \in \{\text{sp,fp,fa}\}} \%C \cdot \text{VALIMsi}_{f,p,ye} \cdot \text{SI}_{f,p,ye} \geq (1 - \%C) \cdot \text{VALIMco}_{p,ye} \cdot \text{CoA}_{p,ye} \end{aligned} \quad (\text{Equation 78})$$

Remarquons que pour les taurillons à l'engrais, si le gain moyen quotidien recherché est inférieur à 800 g par jour, alors l'unité énergétique des fourrages mis en correspondance avec le besoin des animaux est l'UFL au lieu de l'UFV. Cette remarque est surtout valable pour les animaux à croissance modérée comme les bovins métissés malgaches. Pour les taurillons à l'engrais de races pures, notre modèle informatique fixe un niveau de gain minimum de 1000 g/jour.

Pour l'encombrement, si le système utilisé est l'Unité d'Encombrement (UE), la somme des valeurs d'encombrement des fourrages distribués par période et par an doit être supérieure à la capacité d'ingestion du troupeau, afin de s'assurer que le troupeau soit toujours rassasié :

$$\begin{aligned} & \sum_{f \in \{\text{sp,fp,fa}\}} \text{VEFi}_{f,p,ye} \cdot \text{Rdti}_{f,p,ye} \cdot \text{Xi}_{f,p,ye} + \sum_{f \in \{\text{sp,fp,fa}\}} \text{VEFa}_{f,p,ye} \cdot \text{Xa}_{f,p,ye} \\ & + \sum_{f \in \{\text{sp,fp,fa}\}} \text{VEFsi}_{f,p,ye} \cdot \text{SI}_{f,p,ye} + \text{VEC} \cdot \text{CoA}_{p,ye} \geq \sum_{\text{race,cat}} \text{CI}_{\text{race,cat,p,ye}} \cdot \text{Eff}_{\text{race,cat,p,ye}} \end{aligned} \quad (\text{Equation 79})$$

Avec :

VEFi : valeurs d'encombrement (UEL, UEB) des fourrages produits et intra-consommés ;

VEFa : valeurs d'encombrement (UEL, UEB) des fourrages achetés puis intra-consommés (s'il y a eu des achats de fourrages) ;

VEFsi : valeurs d'encombrements (UEL, UEB) du stock fourrager initial ;

VEC : valeur moyenne d'encombrement des concentrés. Elle est entièrement paramétrable et est fournie par l'utilisateur ;

CI : la capacité d'ingestion (UEL, UEB) selon la race et les catégories de bovins, par période et par an.

Si le système utilisé est le niveau de matière sèche ingérée par 100 kg de poids vif, la quantité de matière sèche produite et distribuée par période et par an doit être supérieure à la capacité d'ingestion des animaux :

$$\sum_{f \in \{\text{sp,fp,fa}\}} \text{Rdti}_{f,p,ye} \cdot \text{Xi}_{f,p,ye} + \sum_{f \in \{\text{sp,fp,fa}\}, p, ye} \text{Xa}_{f,p,ye} + \sum_{f \in \{\text{sp,fp,fa}\}} \text{SI}_{f,p,ye} + \text{CoA}_{p,ye} \geq \sum_{\text{Bov,cat}} \text{CI}_{\text{race,cat,p,ye}} \cdot \text{Eff}_{\text{race,cat,p,ye}} \quad (\text{Equation 80})$$

Avec CI est la capacité d'ingestion par catégorie de bovins (en Kg MS) par période et par an.

III – 7 La dynamique de la population

III – 7 – A Le partage du troupeau en lots

Pour simplifier le calcul de la dynamique de la population, le troupeau est partagé en lots comprenant chacun des animaux de différentes catégories (vache, génisse, taurillon, veau), de différentes classes d'âge et de rang de lactation pour les vaches (2^{ème}, 3^{ème}, ... lactation) (cf. Figure 16, p.114). Nous supposons que tous les individus issus d'une même filiation sont affectés à un même lot au fur et à mesure de l'avancement de la simulation. A titre d'exemple, le troupeau initial en début de simulation constitue notre premier lot de bovins. Tous les veaux et velles issus du troupeau initial sont affectés et maintenus au deuxième lot jusqu'à l'âge de réforme (après 6 lactations). Tous ceux provenant du deuxième sont affectés au troisième et ainsi de suite (cf. Figure 16, p.114). Au total, 5 lots sont constitués pour chaque catégorie d'animaux (vache, génisse, taurillon à l'engrais) qui correspondent à une durée de simulation des besoins du troupeau de 10 ans. Cette définition diffère du concept d'allotissement d'un troupeau que nous avons l'habitude de voir dans la littérature. Dans cette dernière, un lot comporte des animaux de même catégorie (par exemple vache uniquement, etc.), de même âge, de même parité et qui ont des besoins alimentaires semblables. Le but de notre démarche a été ici de classer et de suivre plus facilement la progression de chaque catégorie d'animaux. Les considérations suivantes ont été choisies :

- Dans le but de simplifier le raisonnement, une date de vêlage unique est appliquée à toutes les femelles en production du troupeau initial. Nous supposons aussi que la date de vêlage est unique pour toutes les femelles (primipare et multipare) d'un même lot. Les décalages constatés au niveau de la date de vêlage entre les femelles de lots différents sont dus essentiellement à l'intervalle vêlage-insémination fécondante défini d'entrée par l'utilisateur. Autrement dit, la dynamique de la population est basée sur une hypothèse d'homogénéité du troupeau.
- Comme indiqué ci-dessus, l'âge au premier vêlage pour les vaches à haut potentiel est fixé à 24 mois et la durée de la lactation est de 305 jours. Ces deux paramètres sont les seuls à être non-paramétrable dans notre modèle. Tous les autres tels que l'intervalle vêlage-insémination fécondante, la durée de la gestation, la lactation, le taux de fécondité et le taux de mortalité par catégorie d'animaux sont entièrement paramétrables et sont définis d'entrée par l'utilisateur (cf. Figure 16, p.114).
- Les vaches à faible potentiel ont un âge au premier vêlage de 32 mois. C'est le seul paramètre fixé à l'avance et qui ne peut pas être modifié.
- Les animaux au sein de chaque lot changent de catégorie tous les 12 mois sauf pour les veaux et les velles qui deviennent respectivement des taurillons et des génisses à environ 5 mois d'âge, soit au cours de la même année. Notons que dans notre programme informatique, ces deux catégories figurent dans les tableaux de progression de l'effectif en tant que veaux et velles de 0 à 5 mois et deviennent par la suite des taurillons et des génisses de 6 à 11 mois.
- Au sein d'un même lot, nous tenons compte des différences de besoins et de performances liées à l'âge, au stade physiologique de chaque catégorie d'animaux et à la parité des vaches. La dynamique de la population et les besoins des animaux sont simulés séparément pour chaque groupe appartenant au même lot.
- Nous supposons que les vaches sont mises à la réforme après six lactations, soit à environ 8 ans pour les vaches fortes productrices. C'est la durée de vie moyenne des bovins en élevage semi – intensif à Madagascar.
- Les femelles sont plus nombreuses que les mâles à Madagascar avec un taux de 51,33% de femelles (MAEP, 2006). Dans le calcul de la dynamique de la population, si le nombre de veaux et velles qui naissent est impair et si l'utilisateur choisit une sex-ratio de 50% de veaux (ou de velles) nés, nous supposons que les femelles sont plus nombreuses que les mâles avec un ratio de 0,5133 de femelles pour 0,4867 de mâles.

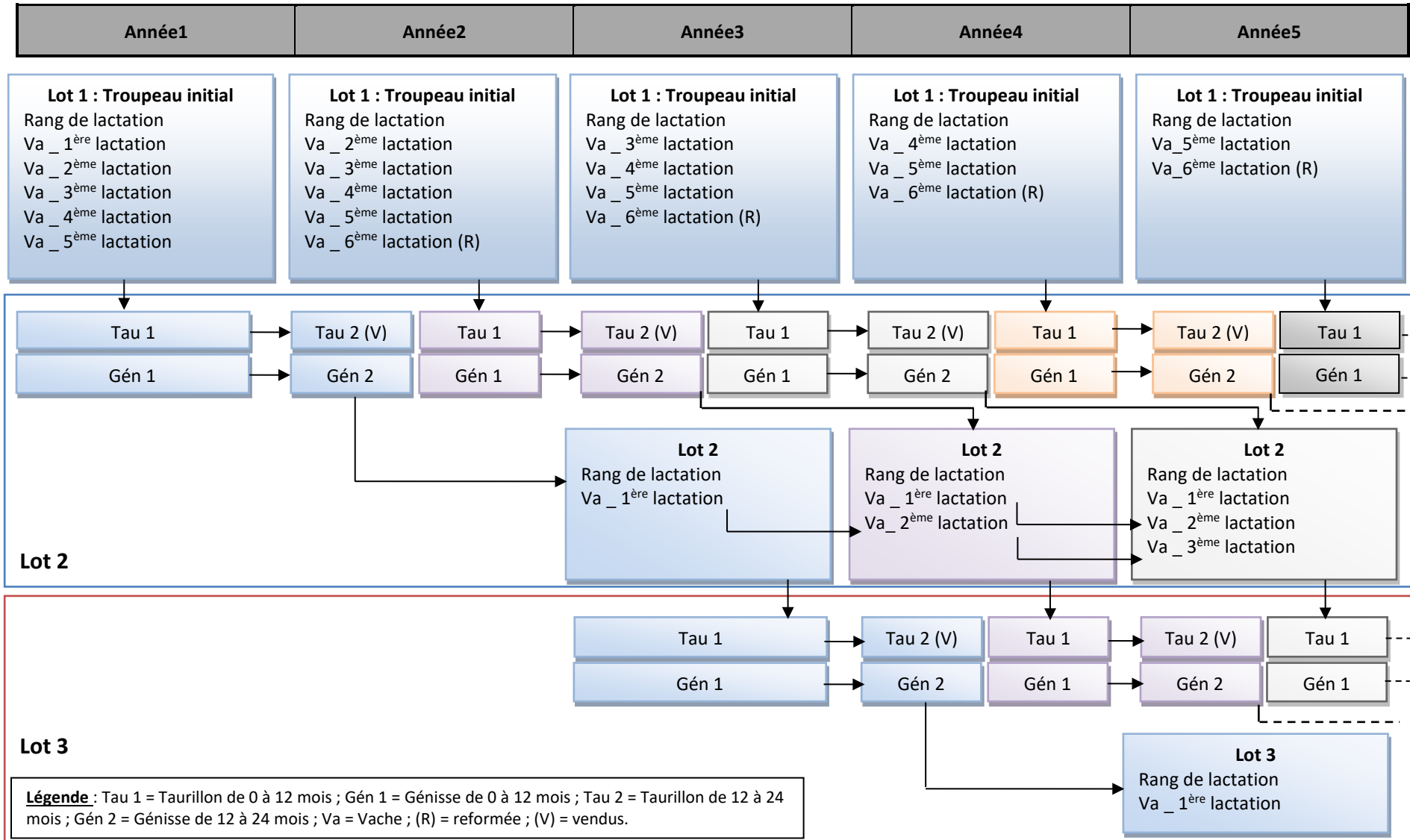


Figure 16 : Le partage du troupeau en lots et la dynamique de la population, cas des vaches à haut potentiel (année 1 à 5 de simulation).

- Il en est de même pour les ventes de veaux, de vaches et de génisses. Si l'utilisateur choisit un taux de vente de 50% pour chaque catégorie d'animaux et si l'effectif de ces derniers est impair, nous supposons que le nombre d'animaux maintenus dans le troupeau est supérieur par rapport aux animaux vendus, avec un taux de maintien de 51% pour 49% de ventes. En ce qui concerne les vaches nées pour le renouvellement, les éleveurs préfèrent en garder une partie assez importante (31%) (KASPRZYK, 2008).

Ce qu'il faut savoir, c'est que ces paramètres sont appliqués à chaque fois que les animaux changent de catégories. A titre d'exemple, si l'utilisateur a spécifié un taux de mortalité pour les veaux ou les vaches, il est appliqué au moment où ils vont devenir des taurillons ou des génisses de moins de 1 an et ainsi de suite. D'où l'intérêt majeur de l'utilisation de la matrice de LESLIE pour la manipulation des données.

III – 7 – B Stratégie et processus de décision sur les achats et les ventes

L'objectif principal sur la stratégie d'achat, de vente et de renouvellement du troupeau est de garder un effectif stable des vaches en production. Concernant le processus de décision associé à cette stratégie, nous supposons que la décision d'acheter des génisses gestantes (Gga) intervient quand il n'y a plus suffisamment de génisses en âge de vêler (Gg) susceptibles de remplacer les vaches qui partent à la réforme (VR). En début d'exécution, le programme regarde si le nombre de génisses gestantes (Gg) est inférieur (ou égal) au nombre de vaches de réforme (VR) (cf. figure 17, p.116). Si c'est le cas (branche A), le nombre de génisses achetées (Gga) doit permettre de stabiliser l'effectif du troupeau et nous avons donc $Gga = VR - Gg$. Le nouveau nombre de génisses (Gg1) est donc forcément VR et l'on ne vend pas de génisses ($Ggv = 0$). Sinon (branche B), lorsque le nombre de génisses gestantes est supérieur au nombre de vaches de réforme, le programme teste si des ventes sont programmées en testant si le pourcentage de ventes %Vg est positif. Si ce n'est pas le cas (branche C : %Vg = 0), aucune génisse n'est vendue ($Ggv = 0$) et le nouveau nombre de génisses gestante est donc $Gg1 = Gg$. En revanche, si des ventes sont programmées (branche D), le nombre de génisses à vendre Ggv, est déterminé en fonction du nombre de génisses et du pourcentage de ventes. En moyenne, ce nombre doit être égal à $\%Vg \times Gg$. Comme ce nombre n'est pas forcément un nombre entier et comme les effectifs des fermes modélisées sont très modestes (cf. Annexe n°18, p.xxvii), il est déterminé en effectuant un tirage pseudo-aléatoire uniforme entre 0 et 1, c'est-à-dire en produisant une séquence de nombres conformes à certains prérequis statistiques liés à l'aspect aléatoire (KNUTH & EST, 1981). Le tirage se fait à chaque vente. Si le nombre tiré est inférieur à %Vg, il s'agit de la génisse gestante retenue (Gg1), sinon il s'agit de la génisse vendue (Ggv). Pour que l'effectif du troupeau ne diminue pas, la valeur qui est tirée pour Ggv ne doit pas excéder $Gg - VR$ pour que toutes les vaches de réforme soient bien remplacées. Par conséquent, si la valeur tirée dépasse $Gg - VR$ (branche E), Ggv est plafonnée à $Gg - VR$ et le nouveau nombre de génisses gestantes (Gg1) est donc de nouveau exactement égal à VR. En revanche, si le nombre de génisse à vendre qui a été tiré est inférieur à $Gg - VR$ (branche F), alors le nouveau nombre de génisses gestantes est $Gg1 = Gg - Ggv$, et ce nombre est alors supérieur à VR : l'effectif du troupeau augmente.

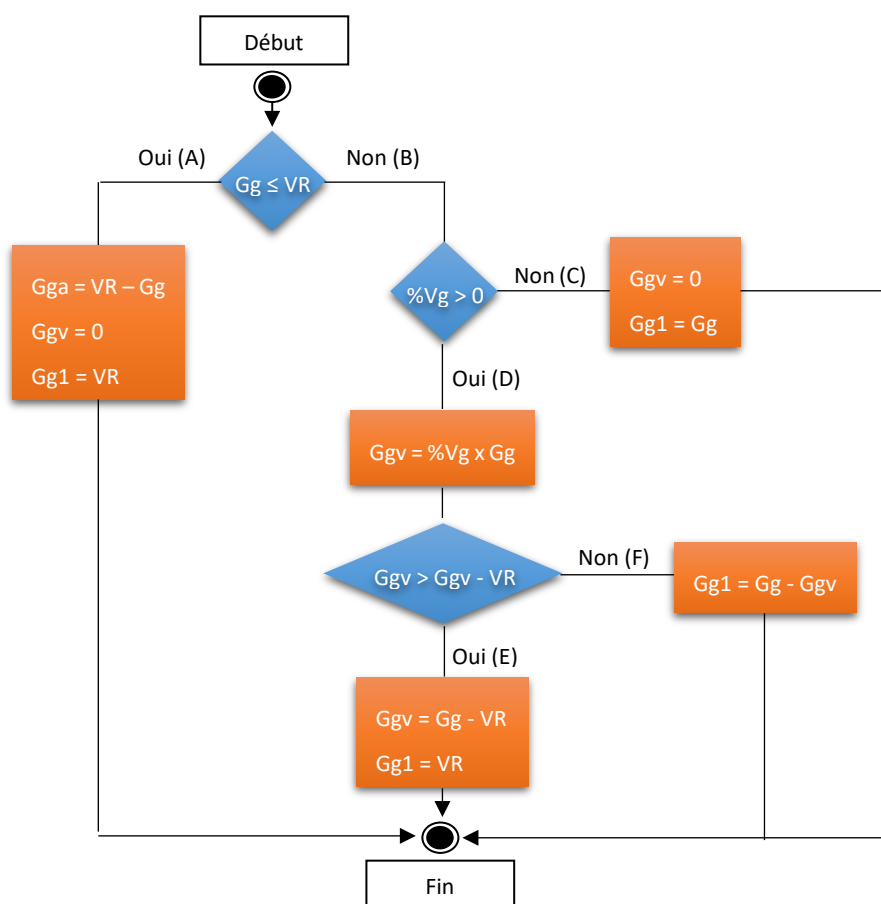


Figure 17 : Processus de décision sur les achats et les ventes de génisses gestantes.

La figure 17 ne présente que le processus de décision pour le cas des génisses gestantes. D'autres processus de décision interviennent : les paramètres de productivité numérique comme le taux de fécondité et le taux de mortalité des vaches, la sex-ratio des veaux-nés, le taux de mortalité par catégorie d'animaux. Le taux de fécondité et le taux de mortalité des vaches sont définis d'entrée par l'utilisateur. Il en est de même pour la sex-ratio. Ces paramètres conditionnent le nombre de naissance, d'où le nombre de génisses gestantes. Par souci de simplification, la figure 16 ne prend pas en compte la mortalité. Par exemple dans le cas des génisses gestantes, la prise en compte de la mortalité implique que pour déterminer le nombre de génisses achetées ou vendues, il faut remplacer VR par $VR + VM$, VM désignant le nombre de vaches reproductrices mortes sur la période considérée. Concernant la décision de vendre des veaux, des velles et des génisses, ce choix relève essentiellement de l'utilisateur du modèle informatique. S'il décide de vendre la totalité des velles chaque année, préciser un taux de vente pour les génisses du troupeau n'aura aucune influence puisque toutes les velles auront été vendues. Par contre si c'est une partie des velles seulement qui est vendue, alors les velles restantes qui deviendront à leur tour des génisses seront vendues en totalité ou en partie en fonction du taux de vente des génisses qui aura été précisé. Si elles ne sont pas vendues, elles deviendront des vaches reproductrices au sein de l'exploitation. Dans cette perspective, la stratégie d'élever des génisses pour les vendre ensuite est un moyen d'accroître la valeur des animaux vendus, mais en engageant des coûts de production supplémentaires (alimentation, etc.). La même logique est utilisée pour les veaux et les taurillons. L'utilisateur pourra choisir d'élever ou non des taurillons pour les engraisser. Dans ce cas, l'objectif de poids et le Gain Moyen Quotidien sont choisis d'entrée. Le taux de mortalité est également défini d'entrée. Le même principe que pour les velles est appliqué. Si la totalité des veaux-nés est vendue, préciser un taux de mortalité pour les taurillons n'aura aucune influence sur l'effectif puisque la totalité des veaux auront été vendue. Si une partie seulement des veaux est morte ou vendue, les veaux restants deviendront des taurillons. Le taux de mortalité des taurillons pourra encore altérer le nombre de taurillons-engraissés et vendus.

III – 8 Les bâtiments d'élevage

Les types de bâtiment utilisés dans l'élevage de bovins laitiers varient énormément en fonction du degré d'intensification, de l'éloignement entre l'exploitation agricole et les fournisseurs de matériaux de construction, des moyens financiers à la disposition de l'éleveur, de la disponibilité et de l'accès aux crédits nécessaires pour financer la construction, etc. Pour l'élevage semi-intensif périurbain rencontré dans les hauts plateaux malgaches, il s'agit le plus souvent de petits parcs fabriqués avec des matériaux de construction rencontrés localement (bois rond, toiture en chaumes ou en tôles, etc.) (cf. photo n°3). Pour l'élevage intensif en revanche, nous avons surtout des bâtiments en dur fabriqués avec des matériaux de construction sophistiqués (fermes en bois traité ou en acier, etc.) et qui sont équipés (logettes, cornadis, laiterie, matériels de traite, etc.) pour une capacité de production élevée (cf. photos n°4 et 5). Ce type de bâtiment se trouve seulement dans quelques grandes fermes d'élevage à Madagascar (TIKO-Farm, Tombotsoa, Bevalala, etc.).



Photo : Marta Kasprzyk M. (2008)

Photo n°3 : parc pour vaches laitières (Tritriva – Antsirabe/ Madagascar).



Photo : LAGRANGE et al. (2006)



Photo : LAGRANGE et al. (2006)

Photo n°4 : vue extérieur d'une étable longitudinale à logettes (stabulation libre) (Auvergne / France).

Photo n°5 : logettes pour vaches (vue intérieure d'une étable longitudinale - stabulation libre).

En tenant compte de la diversité des bâtiments d'élevage utilisés à Madagascar, le logiciel est programmé de sorte que l'utilisateur pourra faire le choix entre utiliser les modèles de bâtiment fournis avec notre modèle informatique ou calculer à part le coût de construction d'un type de bâtiment quelconque et le saisir manuellement à l'intérieur du modèle informatique.

Ce deuxième choix se justifie surtout dans le cas où l'exploitation agricole se trouve dans une zone éloignée ou peu accessible et où l'approvisionnement en matériaux de construction est difficile et très coûteux. C'est le cas de la majorité des petites fermes d'élevage laitier. Ainsi, la solution souvent adoptée est de construire les bâtiments d'élevage avec des matériaux trouvés localement.

Pour les modèles de bâtiments intégrés, six types de bâtiment d'élevage en stabulation libre (pour des effectifs de 5, 10, 20, 30, 40 ou 50 têtes) ont été modélisés pour chaque catégorie d'animaux (vaches, génisses, taurillons). Ce sont des « étables longitudinales à logettes » (cf. photos n°4 et 5), qui s'inspirent des recommandations techniques de LAGRANGE (LAGRANGE, et *al.*, 2006). En saisissant simplement le prix des matériaux de construction, le modèle calcule rapidement le coût des bâtiments et génère automatiquement les devis estimatifs.

L'objectif initial était de modéliser les bâtiments par mètre carré et/ou par mètre linéaire pour faciliter le devis estimatif. L'utilisateur devrait fixer manuellement la taille des bâtiments d'entrée. Mais, en tenant compte des propriétés techniques des bâtiments présentés par LAGRANGE et *al.* dans leur guide pratique (LAGRANGE et *al.*, 2006) et en calculant la structure des fermes métalliques avec le logiciel Autodesk® Robot® Structural Analysis Professional 2010 (cf. Photo n°6), nous nous sommes rendus compte qu'il est plus judicieux de fixer dès le départ la taille des bâtiments en fonction du nombre de têtes qui va y loger (pour 5, 10, 20,30, 40 et 50 vaches).

Les calculs ont démontré que la conception d'un bâtiment avec des fermes métalliques, par mètre carré et/ou par mètre linéaire, est une mauvaise conception. Sur certaines dimensions la structure est instable sous l'effet de son propre poids et des différentes charges s'exerçant sur lui (poids de la toiture, vents, etc.). Les détails techniques des calculs effectués pour la modélisation des bâtiments ont été inclus dans les fiches techniques accompagnant le modèle informatique que nous avons créé.

Concernant les plans des bâtiments, les plans type simplifiés présentant les différents types d'agencement possibles de LAGRANGE et *al.* (2006) ont été pris comme référence.

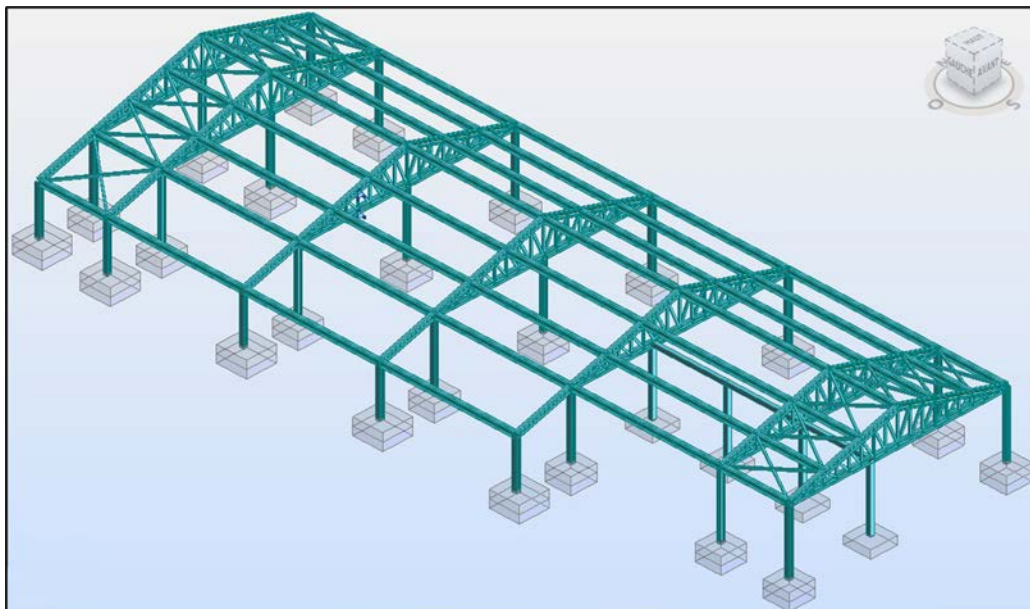


Photo n°6: exemple d'une ferme métallique supportant la structure d'une étable longitudinale modélisée avec le logiciel Autodesk® Robot® Structural Analysis (cas d'une étable pour 40 vaches) (photo de l'auteur).

Nous avons standardisé par la suite les différents types d'agencement en un plan type (cf. Figure 18, p.120) comprenant :

- ✓ Une laiterie équipée d'un tank réfrigérant (A sur la Figure 18) ;
- ✓ Une salle de traite (B sur la Figure 18) ;
- ✓ Une nurserie/salle d'isolement (C sur la Figure 18) ;
- ✓ Un couloir d'alimentation (D sur la Figure 18) ;
- ✓ Deux aires bétonnées raclées situées de part et d'autre des rangées à logettes (E sur la Figure 18) ;
- ✓ Un couloir de paillage (F sur la Figure 18) ;
- ✓ Deux rangées de logettes (G sur la Figure 18) ;
- ✓ Une fosse à fumier avec canal de déversement (H et I sur la Figure 18).

Tableau 13: Caractéristiques des bâtiments d'élevage pour les vaches.

Effectifs (Vaches)	5	10	20	30	40	50
Dimension (L x l) (m)	25 x 10	30 x 10	37 x 16	42 x 16	51 x 16	65 x 16
Surface de bâtiment (m ²)	250	300	592	672	816	1.040
Surface de la laiterie (m ²)	30	30	30	30	30	60
Capacité de la Fosse (m ³)	30	60	120	160	240	300
Dimension de la fosse (L x l x h)	5 x 3 x 2	10 x 3 x 2	10 x 6 x 2	10 x 8 x 2	12 x 10 x 2	15 x 10 x 2
Hauteur sous plafond	4					
Salle de traite en épi 50°	2 x 3	2 x 3	2 x 4	2 x 4	2 x 5	2 x 5
Taille du trayeur	1,66 à 1,75					
Hauteur des quais	0,85					
Logettes (L x l) (m)	1,25 x 2,3					
Couloir de paillage (Largeur)	3,7	3,7	3,4	3,4	3,4	3,4

La dimension des bâtiments change en fonction du nombre de têtes abritées. La longueur du bâtiment augmente au fur et à mesure que le nombre de têtes augmente (5, 10, 20, 30, 40 et 50 têtes) (cf. Tableau 13). Quel que soit le nombre de têtes abritées, la disposition des pièces composant les bâtiments ne change pas sauf pour les bâtiments pour 5 ou 10 vaches laitières où il n'y a plus qu'une seule rangée de logettes, ce qui diminue la largeur du bâtiment.

La dimension des fosses à fumier augmente aussi au fur et à mesure que le nombre de têtes augmente. Pour les dimensions de ces fosses, les résultats des recherches sur les quantités de fumiers produites par les vaches Holstein (cf. Annexe n°19, p.xxvii) effectuées par WILKERSON et *al.* en 1997 et citées par NIDUMOLU en 2007 (NIDUMOLU, 2007), ont été pris comme base de calcul. La densité du fumier en tas est d'environ 1200 kg/m³ (DELEBECQUE, 1990). L'hypothèse de calcul posée est que les fosses sont vidées tous les 90 jours et que le poids des vaches à l'âge adulte est de 750 Kg (pour avoir plus de marge).

Tableau 14: Caractéristiques des bâtiments d'élevage pour les animaux en croissance.

Effectifs	5	10	20	30	40	50
Dimension (L x l) (m)	16 x 15	15 x 28	20 x 28	25 x 28	30 x 28	40 x 28
Surface de bâtiment (m ²)	240	420	560	700	840	1.120
Capacité de la Fosse (m ³)	40	40 x 2	80 x 2	120 x 2	160 x 2	200 x 2
Dimension de la fosse (L x l x h)	5 x 4 x 2	5 x 4 x 2	8 x 5 x 2	10 x 6 x 2	10 x 8 x 2	10 x 10 x 2
Hauteur sous plafond	4					
Logettes (L x l) (m)	1,05 x 2,3					
Couloir de paillage (Largeur)	2,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4

Stabulation libre

Etable longitudinale à logettes

Nombre de places: 30 Vaches
Nombre de places élevage : 30 Veaux

Légendes

- (A) Laiterie
- (B) Salle de traite
- (C) Veaux / Isolement
- (D) Couloir d'alimentation
- (E) Aire bétonnée raclée
- (F) Couloir de paillage
- (G) Logettes
- (H) Canal à lisier
- (I) Fosse enterrée (10 m x 8 m x 2 m)

- Tank à lait réfrigérant (Nombres: 1)
- Abreuvoir (Dimension: 3 m x 1 m x 1 m; Nombre : 4)
- Dallage en Beton armé (Dimension: 4 m x 5 m; Nombre: 9)
- Dallage en Beton ordinaire (Dimension: 4 m x 5 m; Nombre: 8)
- Dallage en Beton ordinaire (Dimension: 8 m x 5 m; Nombre: 4)
- Dallage en Beton ordinaire (Dimension: 6 m x 5 m; Nombre: 2)
- Dallage en Beton ordinaire (Dimension: 5 m x 5 m; Nombre: 4)

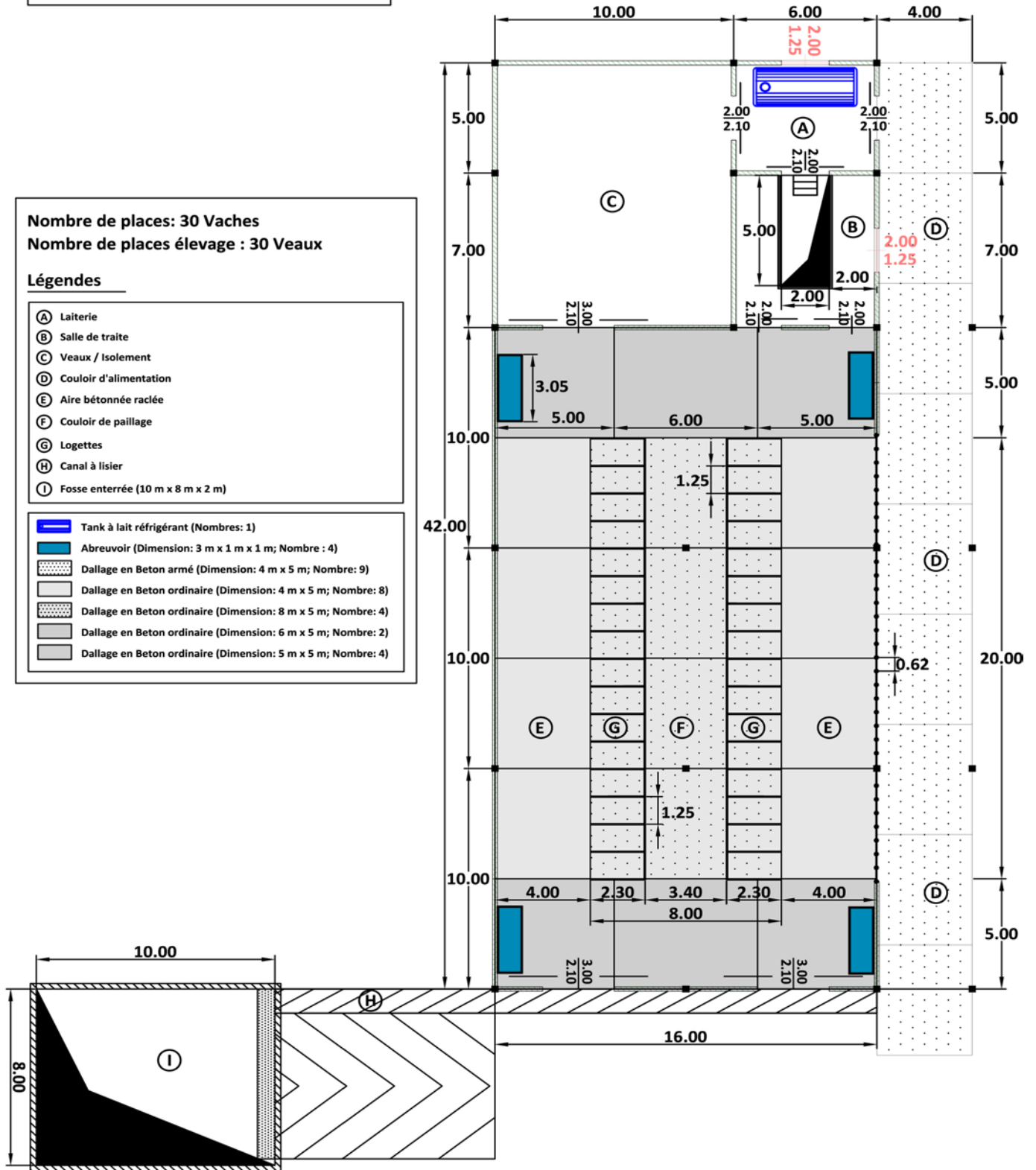


Figure 18: Exemple de plan type d'une étable longitudinale à logettes (stabulation libre) – cas d'une étable pour 30 vaches.

Pour les animaux en croissance, l'architecture des bâtiments est différente de celle des vaches (cf. photo n°10). Nous avons fait en sorte que les bâtiments puissent recevoir deux classes d'animaux, les moins de 1 an et les plus de 1 an. Les méthodes utilisées pour les calculs sont les mêmes que précédemment.

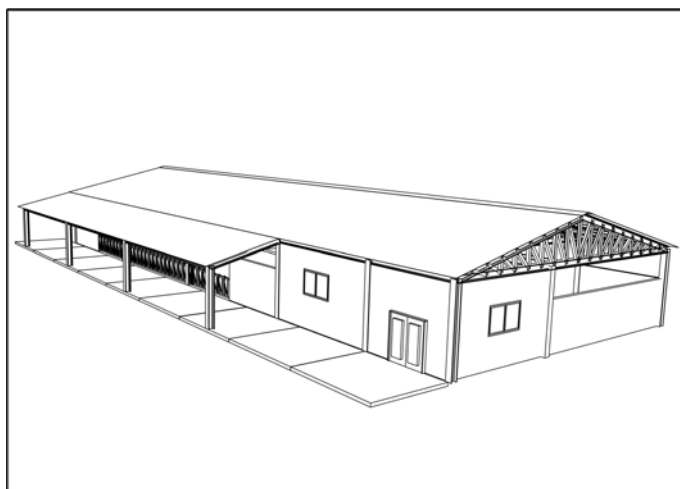


Photo n°7 : vue en perspective (façade principale) – étable longitudinale pour 30 vaches laitières.

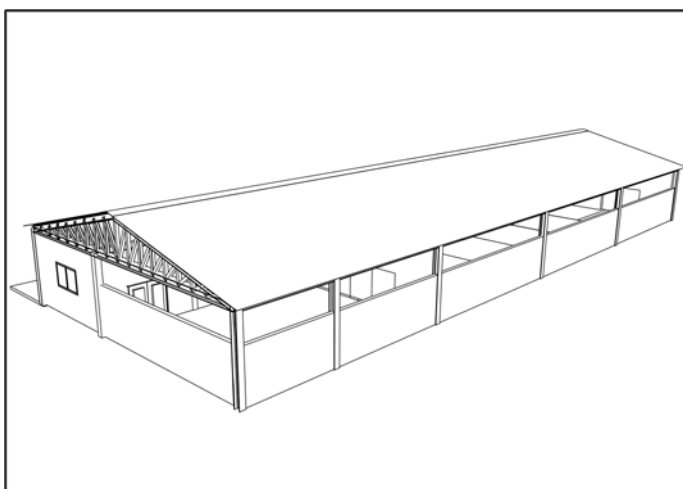


Photo n°8 : vue en perspective (façade postérieure) – étable longitudinale pour 30 vaches laitières.

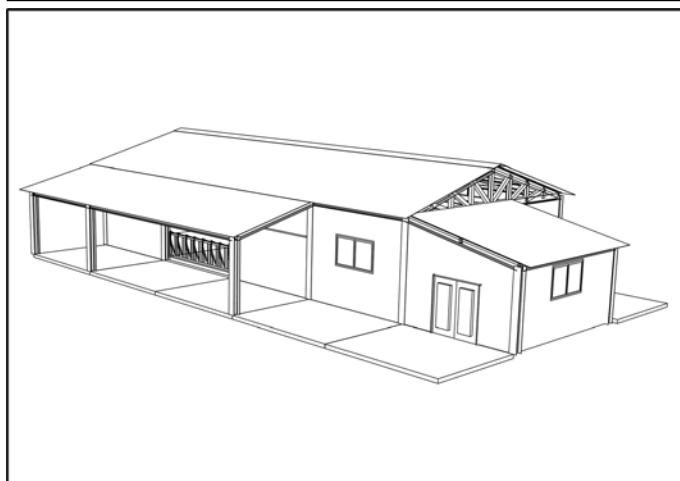


Photo n°9 : vue en perspective (façade principale) – étable longitudinale pour 5 vaches laitières.

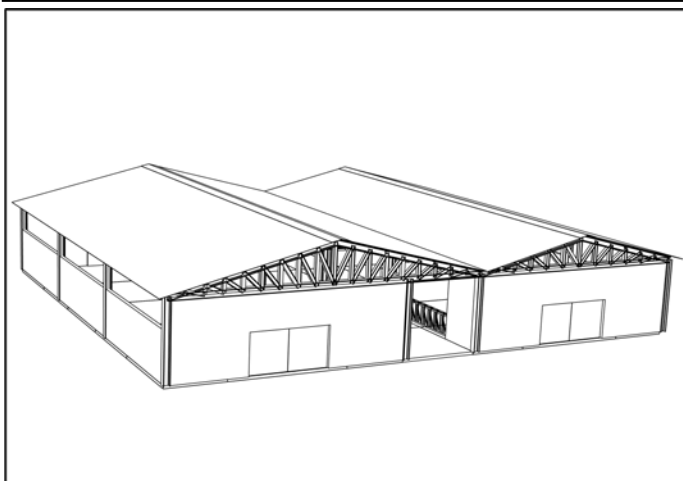


Photo n°10 : vue en perspective étable longitudinale pour 60 génisses (30 : moins de 1 an ; 30 : plus de 1 an).

Concernant l'utilisation du volet "bâtiment d'élevage" à l'intérieur du modèle informatique, l'utilisateur peut choisir manuellement la taille du bâtiment à utiliser (pour 10, 20, etc. vaches, génisses ou taurillons) et saisir d'entrée leur nombre de bâtiment pour le calcul des devis estimatifs. Mais le programme informatique peut également générer automatiquement le nombre de bâtiments à utiliser, en fonction de l'effectif de chaque catégorie d'animaux calculé à partir de la dynamique de la population. Pour générer le nombre de bâtiments nécessaires, le programme procède par pas de 5 têtes de bovins. A titre d'exemple, si le nombre maximal de vaches pendant les 10 ans de simulation se situe entre 10 et 15, alors il faut allouer un bâtiment pour 10 vaches et un bâtiment pour 5 vaches. Si ce nombre est, par contre, de 18 vaches, il faut allouer immédiatement un seul bâtiment pour 20 vaches. Et ainsi de suite. Mais notons que cette approche comporte un inconvénient. En effet, le prix des matériaux de construction peut varier énormément et change d'une région à l'autre ou d'un pays à l'autre. Aussi, allouer un bâtiment pour 10 vaches et un bâtiment pour 5 vaches par exemple peut être plus onéreux que de construire un seul bâtiment pour 20 vaches. L'appréciation de ce problème est laissée à l'utilisateur du modèle.

Soulignons que le devis des bâtiments obtenus avec le modèle n'inclut pas les équipements laitiers (tank à lait réfrigérant, trayeur, etc.) et les autres installations à l'intérieur des bâtiments (installations électriques, etc.). Toutefois, le volet « Immobilisations » à l'intérieur du modèle est prévu pour saisir ces derniers.

III – 5 Conclusion

L'analyse du troupeau sur 14 exploitations d'élevage bovin semi-intensif au Nord de Madagascar a permis de comprendre que la fonction de l'élevage est principalement naisseur - producteur de viande. Les activités sont diversifiées en cultures vivrières, production de lait et de viande pour l'autoconsommation et/ou pour la capitalisation par la vente d'animaux sur pied. Les activités animales concernent la production et la vente de lait, de fumier, l'achat et la vente de bovins de tous âges et de toutes catégories. Les catégories d'animaux sont considérées en tant qu'objet et modélisées dans le formalisme UML avec 5 classes d'animaux : vache à haut potentiel, vache à production limitée, veaux-velles, génisses et taurillons. Les besoins du troupeau et la dynamique de la population ont été modélisés entièrement à partir des connaissances issues de la bibliographie. Les contraintes d'optimisation du troupeau concernent essentiellement l'alimentation de ce dernier et sont basées sur la mise en adéquation entre les besoins du troupeau en éléments nutritifs d'une part et la quantité et la qualité nutritive des fourrages offerts d'autre part. Pour les bâtiments d'élevage, six types de bâtiment d'élevage en stabulation libre ont été modélisés pour chaque catégorie d'animaux (vaches, génisses, taurillons).

Bibliographie

- BOSSER, J. (1954). *Les pâturages naturels de Madagascar*. Mémoires de l'Institut Scientifique de Madagascar - Série B - Tome V. p.19.
- BOSSER, J. (1955). *Rapport sur la végétation et les pâturages de la C.R.A.M d'Ankilizato*. ORSTOM - Collection de référence n° 10452ex1. 8 pages.
- BOSSER, J. (1957). *Etudes sur les pâturages naturels faites à l'Institut de Recherche Scientifique de Madagascar*. Office de la recherche scientifique et technique outre-mer - ORSTOM. pp.67 - 72.
- BOSSER, J. (1958). *Etude sur les pâturages à Madagascar*. ORSTOM Fonds documentaires n°29.531. p.6.
- BOSSER, J. (1969). *Graminées des pâturages et des cultures à Madagascar*. Mémoires ORSTOM N°35. Paris. p.440. .
- BOUDET, G. (1975). *Manuel sur les pâturages tropicaux et les cultures fourragères*. IEMVT. p.254.
- BOUDET, G. (1975). *Problèmes posés par l'estimation de la capacité de charge d'un pâturage naturel tropical*. Collection de référence ORSTOM n° 8655 BBU. Pages 265 – 267.
- CARRE, A. (1975). *L'alimentation des animaux domestiques à Madagascar*. Ministère du développement rural - Service de l'enseignement et de la formation agricole. p.78.
- CHARDON, X. (2008). *Evaluation environnementale des exploitations laitières par modélisation dynamique de leur fonctionnement et des flux de matières au sein du système: développement et application du simulateur MELODIE*. Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement - Agro Paris Tech. p.204 + Annexes.
- DELEBECQUE, R. (1990). *Bâtiment 2 - Eléments de construction*. Edition Delagrave - Paris. p.128.
- GRANIER, P. (1967). *Etude sur la digestibilité chez le zébu*. Institut d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux - Région de recherche madagascar. p.30.

- GRANIER, P., & LAHORE, J. (1967). *Note sur la productivité du pâturage naturel - Comparaison des cycles végétatifs de l'Hypparrhenia rufa et de l'Heteropogon contortus*. Institut d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux - Région de recherche madagascar. p.8.
- GRIMM, VOLKER, RAILSBACK, & STEVEN, F. (2005). *Individual-based Modeling and Ecology*. Princeton University Press. ISBN 978-0-691-09666-7. p.485.
- HARINIAINA, R. (1990). *Traitement des fourrages pauvres à l'urée: effets chez les vaches laitières*. Mémoires de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur des sciences agronomiques - Département Elevage - ESSA. p.89 + Annexes.
- INRA. (1978). *Alimentation des ruminants*. Institut National de la Recherche Agronomique.
- INRA. (1988). *Alimentation des bovins, ovins et caprins*. INRA (Institut National de la Recherche Agronomique). p.471.
- INRA. (1989). *Ruminant nutrition - Recommended allowances and feed tables*. London-Paris: INRA/John Libbey Eurotext. p.389.
- INRA. (2007). *Alimentation des bovins, ovins et caprins - Besoins des animaux - Valeurs des aliments*. INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) - Editions QUAE. p.307.
- KASPRZYK, M. (2008). *Diversité des systèmes d'alimentation des troupeaux bovins laitiers à Betafo - Région du Vakinankaratra - Madagascar*. Mémoires de fin d'études pour l'obtention du Diplôme d'Agronomie Approfondie - SupAgro Montpellier - CIRAD. p.96.
- KNUTH, D., & EST, D. (1981). *The Art of Computer Programming, volume 2: Seminumerical Algorithms*. Addison-Wesley, Reading, MA, deuxième édition.
- LAGRANGE, G., LAPENDRIE, Y., BELARD, D., SALLARD, L., NICOLAS, J., & CABAL, J. (2006). *Construire un bâtiment en élevage bovin*. Services Bâtiments des Chambres Départementales d'Agriculture - Chambre Régionale d'Agriculture d'Auvergne. p.23.
- MAEP. (2004). *Filières de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche et Actions du Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche: fiche N°202 - Tome 2*. Filières de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche et Actions du Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche: fiche N°202 - Tome 2.
- MAEP. (2006). *Recensement de l'agriculture. Campagne agricole 2004-2005*. Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche - Direction des Systèmes d'Information - Service des Statistiques Agricoles. p.50.
- NIDUMOLU, U. (2007). *Regional bio-economic modelling of dairy sector in a unique island setting: a case of ile de La Réunion*. Report of the project MODLAIT - Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) - Département Elevage et Médecine Vétérinaire - Pôle Elevage St Pierre La Réunion. p.97.
- NRC. (2001). *Nutrient Requirements of dairy cattle. Seventh revised edition 2001*. National Research Council - National Academy Press - Washington, D.C. p.363.
- RAKOTOARISON, B. (1993). *Contribution à l'étude de la valeur nutritive des légumineuses fourragères*. Mémoire de fin d'études - Département Elevage - ESSA. p72 + Annexes.
- RAKOTOARISON, B. (2005). *Etude de la valeur nutritive de Desmodium uncinatum, Hedychium coronarium et Musa paradisiaca pour une meilleure valorisation des ressources fourragères des hautes terres malgaches*. Thèse de Doctorat. Département Elevage - ESSA. p.127.
- RAKOTONIRINA, J. (1996). *Contribution à l'étude de la productivité et de la valeur nutritive du ray-grass italien et de l'avoine fourragers cultivés sur tanety irrigué en contre-saison*. Mémoire de fin d'études - Département Elevage - ESSA. p.123.

- RAKOTOZANDRINY, J. (1993). *Pour une meilleure connaissance de la valeur nutritive des fourrages chez le bovin de race Pie Rouge Norvégienne (P.R.N) à Antsirabe*. Thèse Doctorat d'Etat. Université d'Antananarivo, Madagascar. p.135 + annexes.
- RANAIVOSON, S. (1995). *Contribution à l'étude des impacts des troupeaux bovins sur l'écosystème forestier du Parc National de Ranomafana*. Mémoire de fins d'étude. Département des Eaux et Forêts – ESSA. p.114.
- RANDRIAMBELOSON, M. (1980). *Etude de la digestibilité des fourrages chez les ruminants*. Mémoires de Diplôme d'Etudes Approfondies en Sciences Biologiques Appliquées. p.70 + annexes.
- RICHARD, D. (2002). *La gestion des animaux et des troupeaux*. Memento de l'agronome, CIRAD - GRET - CTA. pp.1325 - 1353.
- RIVOT, E. (2003). *Investigations Baysiennes de la dynamique des populations de Saumon Atlantique (Salmo Salar L.) - Des observations de terrain à la construction du modèle statistique pour apprendre et gérer*. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes pour obtenir le titre de Docteur ès-Sciences de l'ENSAR (Spécialité: Halieutique). p.201 + Annexes.
- TILLARD, E. (2007). *Approche globale des facteurs associés à l'infertilité et l'infécondité chez la vache laitière: importance relative des facteurs nutritionnels et des troubles sanitaires dans les élevages de l'île de La Réunion*. Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Montpellier II. p.305 + Annexes.

CHAPITRE IV
LA MODELISATION DU SYSTEME DE PILOTAGE,
IMPLEMENTATION INFORMATIQUE : LE MODELE D-
ALGO

Le troisième pôle qui est le « système de pilotage » constitue le cœur même et l'utilité de l'outil informatique. En effet, ce pôle regroupe tous les centres de décisions concernant le choix des investissements à entreprendre que ce soit en début de l'horizon de planification ou en régime de croisière. Ces décisions concernent aussi la stratégie de gestion (mobilisation des moyens de production, assolement fourrager, etc.), les modalités d'organisation et le financement à moyen et long terme de l'exploitation. Généralement, ces décisions doivent s'appuyer sur des indicateurs objectivement vérifiables sur lesquels l'agent économique va baser son raisonnement dans le but d'avoir le plus possible des visions rationnelles sur les actions à entreprendre, que ce soit en termes d'investissement, de financement ou en termes de gestion. L'objectif de la présente recherche est justement de fournir ces indicateurs aux utilisateurs du modèle (ingénieurs, techniciens, chercheurs, etc.) dans le but de faciliter leur prise de décision. Dans les exploitations laitières, l'objectif principal est toujours de maximiser le profit en maximisant les volumes de production. Ceci, le plus rapidement possible, afin de rentabiliser au maximum les investissements entrepris étant donné que ces derniers sont généralement lourds. Pour maximiser les volumes de production, on a souvent recours aux méthodes de la recherche opérationnelle. Concernant le profit, les indicateurs utilisés sont le plus souvent basés sur une estimation de la valeur ajoutée au niveau de l'atelier d'élevage. Autrement dit, les méthodes utilisées pour appuyer et faciliter les décisions sont toutes issues de modèles analytiques-mathématiques.

L'implémentation informatique consiste à coder le modèle biotechnique de production du système d'élevage de bovins laitiers sous forme d'un programme écrit dans un langage informatique de programmation. Rappelons que l'objectif principal est d'appuyer les décisions concernant le choix du système de production et des investissements avec des bases scientifiques pertinentes. Pour atteindre cet objectif, nous avons avancé comme solution possible l'utilisation d'un outil informatique d'aide à la décision pour simuler la rentabilité des investissements. L'implémentation informatique est une étape importante pour concrétiser l'outil en question. En effet, les phases d'analyse et de modélisation entreprises avant l'implémentation proprement dite ont permis entre autres d'identifier les entités du système d'élevage que nous voulons modéliser, avec leurs attributs et leurs méthodes, et de comprendre les relations qui les relient entre elles. Elles ont permis de représenter et modéliser suivant une démarche alliant conception orientée objet et modélisation analytique les trois pôles du système : le système fourrager, le troupeau et le système de pilotage. Le troisième pôle simule l'optimisation linéaire et le calcul des divers indicateurs économiques pour appuyer les décisions.

Compte tenu du formalisme orienté objet adopté pour modéliser le système d'élevage de bovin laitier, ce chapitre détaille le processus d'intégration des modèles mathématiques-analytiques de décisions sur le modèle objet du système de pilotage. Il aborde aussi l'implémentation informatique du nouveau modèle biotechnique, bioéconomique et informatique d'aide à la décision, nommé « D - Algo », ainsi qu'une description fonctionnelle sur son utilisation. Cette démarche se fait en deux temps :

- i. Identifier les objets du système de pilotage et leurs attributs, identifier les différentes opérations qui découlent entre ce pôle et les pôles « système fourrager » et « troupeaux » et établir la visibilité sous forme de diagramme UML (démarche de conception et de modélisation orientée objet). Parallèlement, il s'agit aussi de déterminer l'ensemble des variables de décisions et des différents coefficients à partir des attributs des deux autres pôles, qui seront utiles dans la démarche de formulation de la programmation linéaire. Cette approche a été faite suivant une approche purement bibliographique ;
- ii. L'« implémentation » est l'écriture des lignes de programmes pour mettre en œuvre une fonction ou un composant au sein d'un système : implémenter une interface, un algorithme (LAROUSSE, 2009). Il était tout à fait logique d'utiliser un langage de programmation informatique orienté objet dans la phase d'implémentation informatique compte tenu du formalisme orienté objet adopté dans la démarche méthodologique.

L'art de modéliser le système de pilotage et d'implémenter informatiquement un modèle biotechnique de système d'élevage de bovin laitier : D-Algo

Résumé

Le système de gestion ou de pilotage d'un système d'élevage concentre le pôle décisionnel sur l'objectif, l'organisation et les pratiques de l'acteur principal d'une exploitation laitière. Pour notre modèle informatique, nous avons créé 8 classes avec leurs propres attributs : la classe « Rotation culturale », « Optimisation », « Assolement », « Chargement », « Limite de la Fonction Objective », « Valeurs Duales », « Devis du Silo » et « Economique ». La classe « Optimisation » contient toutes les méthodes que ce soit d'optimisation de l'assolement ou de calcul des divers indicateurs économiques sur lesquels appuyer les décisions. Les autres classes sont destinées à recueillir et afficher les données calculées à partir de la classe « Optimisation », à l'exception de la classe « Rotation culturale » qui est utilisée pour planifier les différentes rotations culturales avant la phase d'optimisation avec la programmation linéaire. Par ailleurs, nous avons créé 4 classes supplémentaires : la classe « Immobilisations Non-Amortissables », « Autres Immobilisations », « Autres Subventions » et « Charges », qui sont utiles aux calculs des indicateurs économiques. Nous avons ensuite procédé à l'implémentation informatique du modèle que nous avons nommé « D-Algo ». « D-Algo » est un modèle biotechnique, bioéconomique et informatique d'aide à la décision. C'est un modèle informatique intégré de système d'élevage de bovins laitiers destiné à appuyer les différents agents de terrains (ingénieurs, zootechniciens, etc.) dans leur prise de décisions sur le choix du système de production et des investissements à entreprendre. Le modèle est implémenté avec l'architecture « n-tier ». Il présente une architecture à cinq niveaux : l'analyste, le niveau de présentation, le niveau métier, le niveau d'accès aux données et le niveau de la base de données. Les différentes classes et les moteurs de calcul représentant les composants biotechniques du système d'élevage sont regroupés à l'intérieur du niveau métier (business logic). Le modèle génère une succession multi-annuelle d'assolement à partir de la méthode de la programmation linéaire, permettant de planifier la production des matières premières (fourrages, etc.) nécessaires à l'élevage du troupeau. L'assolement optimisé suit une évolution multi périodique et récursive. Ensuite, il calcule la recette nette de l'atelier bovin et la rentabilité des investissements.

Mots-clés : système de pilotage, système d'élevage, optimisation, implémentation, modélisation.

Abstract

The piloting system or management system of a livestock system concentrates the decisional pole on goal, organization and practice of the main actor of a dairy farm. For our informatics model, we have created 8 classes with their own attributes: the class « Rotation culturale », « Optimisation », « Assolement », « Chargement », « Limite de la Fonction Objective », « Valeurs Duales », « Devis du Silo » and « Economique ». The class « Optimisation » gathered all the methods either for the multi annual cropping plans or for the economic indicators computing. The other classes are destined to acquire and to display data from « Optimisation » class, except the « Rotation culturale » class which is used to plan different crop-rotations before the optimization phase with the linear programming. Besides, we have created 4 more classes: the class « Immobilisations Non-Amortissables », « Immobilisation », « Subvention » and « Charges », which are useful for computing economic indicators. Then we have proceeded with the informatics implementation of the model named « D-Algo ». « D-Algo » is a biotechnical, bioeconomical and informatics model for decision making. It's an integrated informatics model of a dairy livestock system intended for helping farmers and field agents to make decisions on the choice of the production system and of the investment to carry out. The model is implemented with the « n-tier » architecture. It has five tiers architectures: the analyst, the presentation tier, the business-logic tier, the data access – tier and the database tier. The different classes and the compute-modules, representing the biotechnical components of the dairy livestock system, are regrouped inside the business-logic tier. The model generates a set of multi-annual cropping plans from the linear programming method, allowing to plan the production of forages necessary to the herd-alimentation. The multi annual cropping plans follow a recursive and multi-periodic evolution. Then, it computes the profit and the net takings of the investments.

Keywords: piloting system, livestock system, optimization, implementation, modelling.

I – Introduction

Dans les exploitations laitières, la décision est prise d'une manière structurée, c'est-à-dire que l'objectif principal est clairement défini dès le départ et les différentes contraintes, imposées par l'environnement, sont connues par le chef d'exploitation. Ce qui induit un comportement visant à optimiser au maximum les décisions pour atteindre l'objectif fixé. Selon MONTMAIN et *al.* (2003), si la formalisation de cet objectif aboutit à une description mathématique, alors on peut la ramener à un problème de recherche opérationnelle. Ce qui est pertinent pour notre modèle car la fonction économique à optimiser est la maximisation de la marge brute liée aux activités fourragères et aux troupeaux, sous l'influence directe des contraintes des ressources disponibles. Les coefficients techniques nécessaires à la formulation des problèmes d'optimisation doivent être obtenus d'une manière structurée et organisée. La modélisation du système de pilotage devrait donc inclure la représentation modulaire de ce pôle dans le but de faciliter l'intégration à l'intérieur du modèle des méthodes analytiques d'optimisation et de calculs économiques. En effet, ces coefficients techniques sont liés aux attributs des classes composant les modèles objets des pôles « système fourrager » et « troupeaux ». Au niveau conceptuel, la stratégie d'implémenter directement la programmation linéaire et d'invoquer ces coefficients à partir de leur classe propriétaire respective reviendrait à adopter une approche de type procédurale. Ce qui n'est pas préconisé dans le monde de la programmation informatique actuelle car cette approche est coûteuse en temps (que ce soit en termes de programmation mais aussi de traitement des données) et nécessite des ordinateurs puissants pour traiter les tâches.

L'intérêt de l'approche objet réside dans la facilité à modéliser et à représenter ces trois pôles en tant qu'objets dans le monde virtuel de l'informatique, y stocker les données liées à ces objets via leurs attributs et y ajouter des méthodes contenant le comportement de l'objet (programmation linéaire, fonctions économiques, etc.). L'« approche objet » est centrée sur les « objets » et non sur les « tâches » à exécuter (LASSERRE, 2009). La création d'un objet en langage informatique nécessite la création d'une « classe informatique ». Les caractéristiques des objets sont représentées par les attributs de la classe mère et les tâches qu'ils exécutent sont implémentées par les méthodes de classe. En programmation orientée objet, le concepteur se focalise sur les attributs et sur les méthodes de classe. On peut aussi assurer la persistance des objets en les stockant dans une base de données relationnelle. Ce sont des objets d'autres classes (le dataset) qui gèrent le mapping objet-relationnel, c'est-à-dire les relations entre les classes qui représentent les objets et la base de données.

II – Méthodes

II – 1 Analyse et modélisation du système de pilotage (le pôle humain)

Le système de pilotage n'a pas fait l'objet d'une analyse particulière sur terrain. Il s'agit d'un pôle conceptuel représentant les structures de décision d'un système d'élevage de bovins laitiers. Les éléments d'analyse utiles à la modélisation ont été définis directement à partir des concepts généraux sur le système d'élevage et à partir de l'objectif principal et des hypothèses de notre recherche, étant donné que ces derniers ont été clairement explicités dès le départ. De ce fait, nous sommes passés directement à la modélisation orientée objet de ce pôle en représentant les objets s'y rapportant sous forme de diagramme UML (Unified Modelling Language).

Les fonctions analytiques et économétriques se rapportant à l'optimisation du système de production et aux calculs de la rentabilité des investissements ont été modélisées en tant que méthodes de classes. Parmi ces méthodes, nous avons : la programmation linéaire multi-périodique récursive, le résultat d'exploitation avant impôt, la recette nette d'exploitation (ou flux net de trésorerie), la « Valeur Actuelle Nette » (VAN) et le « Taux Interne de Rentabilité » (TIR).

II – 2 Implémentation informatique : le modèle D-Algo

Le modèle « D-Algo » a été implémenté suivant l'architecture « n-tier ». L'architecture n-tier impose une séparation en 3 « couches » (ou « tiers ») minimum : la couche « présentation » qui gère l'interface homme – machine (la vue et la logique de contrôle ou le contrôleur), la couche « métier » qui gère les opérations effectuées par l'application et la couche « base de données ». Les différentes classes représentant les objets du pôle « système fourrager », « troupeaux » et « système de pilotage » sont programmées au niveau du tier « métier ». L'interaction avec l'utilisateur du logiciel s'effectue au niveau du tier « présentation ». Cette interaction se présente sous deux formes : la saisie et la sauvegarde des données d'entrées et l'affichage des données que ce soit d'entrées ou de sorties. Les données saisies sont sauvegardées dans une base de données relationnelle dans le tier « base de données ». La gestion du mapping objet-relationnel est assurée par un dataset (considéré ici selon le sens de « composant ou librairie d'accès aux données de l'architecture ADO.NET » conçu par Microsoft®, mais non pas selon le concept général usuel utilisé dans les Systèmes de Gestion de la Base de Donnée Relationnelle (SGBD)).

Le logiciel est développé sous l'environnement de développement Microsoft® Visual Studio Express 2008 – 2013 qui présente l'avantage d'être une plateforme de développement « orienté objet ». Les différentes classes informatiques représentant le modèle biotechnique du système d'élevage, ont été programmées avec une approche purement « orientée objet ». Nous avons utilisé le langage Visual Basic.NET (VB.NET) de la société Microsoft® qui présente l'avantage d'être simple et performant. C'est un langage de programmation orienté objet exécuté sous l'environnement de développement Microsoft® Visual Studio. Les systèmes d'exploitation cibles pour l'utilisation du modèle sont les versions 64 bits de Microsoft® Windows 7 ; 8 ; 8.1 et 10. La configuration matérielle requise pour utiliser D-Algo est un ordinateur possédant un processeur Core2Duo minimum, mais de préférence un processeur multi-cœur type Core-i, 4Go de RAM et 200 Mo d'espace libre sur le disque dur.

Concernant la méthode de la programmation linéaire, l'implémentation informatique d'un algorithme de résolution de problèmes d'optimisation peut être un travail long et fastidieux. Heureusement, une autre alternative existe et elle permet un gain de temps de développement très appréciable : c'est l'utilisation d'un d'« API » ou « Application Programming Interface ». Nous avons utilisé le solveur sous forme d'API « Ip_solve », produit à l'origine par BERKELAAR et DIRKS avec d'autres collaborateurs à l'Université de Technologie de Eindhoven et amélioré depuis 2004 par EIKLAND et NOTEBAERT (GOURVEST, 2009).

III – Résultats

III – 1 La modélisation du système de pilotage

Nous avons modélisé 8 classes principales avec leurs propres attributs : la classe « Rotation culturale », « Optimisation », « Assolement », « Chargement », « Limite de la Fonction Objective », « Valeurs Duales », « Devis du Silo » et « Economique ».

La rotation culturale fait partie de la stratégie de l'éleveur pour gérer la fertilité et le mode d'occupation du sol en fonction des ressources disponibles (foncier, financier, humains, etc.). De ce fait, elle est toujours planifiée à l'avance. Suivant la même logique, les espèces fourragères en rotation culturale sont précisées d'entrée par l'utilisateur avant la phase d'optimisation avec la programmation linéaire. D'où la nécessité de la classe « Rotation culturale ». Elle est basée sur le simple principe d'instancier les cultures planifiées pour se succéder en culture précédente – culture suivante (cf. Figure 19, p.130). L'exemple d'affichage de la classe nous donne un exemple de rotation entre graminées et légumineuses (cf. Figure 19, p.130).

Quatre classes supplémentaires ont été créées avec la modélisation du système de pilotage : la classe « Immobilisations non-amortissables » (INA), « Autres Immobilisations », « Autres Subventions » et « Charges ».

Normalement, ces quatre classes auraient dû être traitées avec la modélisation du système fourrager étant donné qu'elles font partie intégrante du système biotechnique de production. Mais comme leur utilité première est liée directement aux calculs économétriques du système de pilotage, nous l'avons intégré avec ce pôle pour des raisons de commodité. Les classes « Immobilisations non-amortissables » et « Autres immobilisations » sont instanciées à partir de la classe principale « Immobilisations ». Les classes « Autres Subventions » et « Charges » sont instanciées à partir de la classe « Dépenses » (cf. Figure 20, p.131).

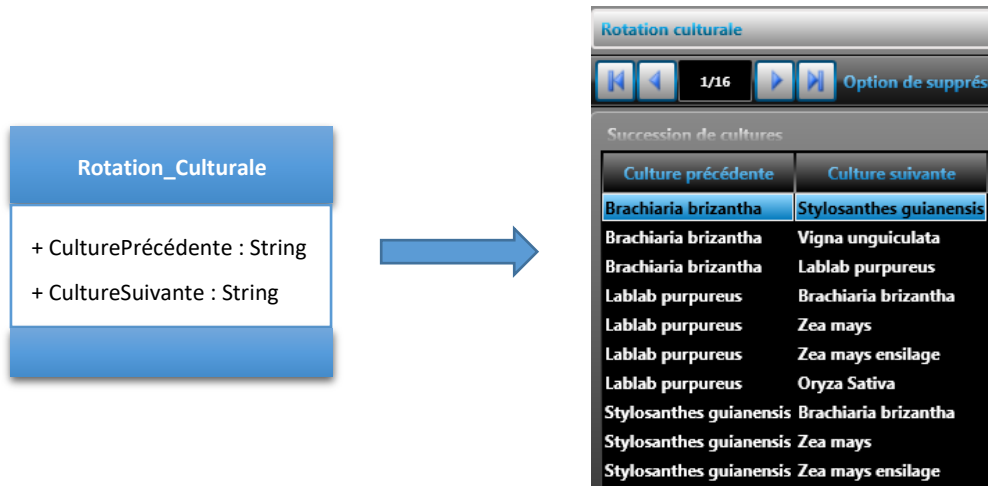


Figure 19 : Classe UML et exemple d'affichage de la couche « présentation » de la classe « rotation culturale ».

La classe « optimisation » contient en tant que méthodes de classe les modèles analytiques et économétriques d'aide à la décision. Les données calculées à partir de cette classe seront par la suite instanciées dans les classes restantes (cf. Figure 21, p.132). Plus tard, elles sont stockées dans une base de donnée. Les données d'entrées de ces modèles proviennent de la valeur des attributs des objets instanciés à partir des classes composant les pôle « système fourrager », « troupeaux », de la classe « Rotation_Culturale », ainsi que ceux instanciés par les classes « Immobilisations non-amortissables » (INA), « Autres Immobilisations », « Autres Subventions » et « Charges » (cf. Figure 21, p.132).

La classe « Assolement » instancie les résultats de l'optimisation de l'assolement avec la programmation linéaire multi-périodique récursive sur 10 ans de simulation.

La classe « Chargement » instancie les résultats de calcul de chargement (en UGB/ha) après l'optimisation de l'assolement pour chaque année de simulation.

La classe « Devis du Silo » instancie les résultats obtenus du devis du silo après que la taille du silo a été calculé automatiquement après la phase d'optimisation de l'assolement. Cette classe sera instanciée en autant de fois qu'un ensilage d'herbe ou de maïs sera pris dans l'assolement par le solveur.

Les classes « Limite de la Fonction Objective », « Valeurs Duales » seront destinées à instancier les résultats de l'analyse de sensibilité obtenue avec le solveur lp-Solve pour chaque année de simulation.

La classe « économique » est une classe principale à partir de laquelle sera instanciée 4 classes filles : la classe « Rentabilité », « Immobilisations », « Financement » et « Subvention ». Ces classes instancient les résultats des calculs économétriques.

Autrement dit, les instances de ces 8 dernières classes constituent les données de sorties (outputs) de l'optimisation avec la programmation linéaire multi-périodique et récursive (assolement, calcul de chargement) et des calculs économétriques (rentabilité des investissements, etc.) (cf. Figure 21, p.132).

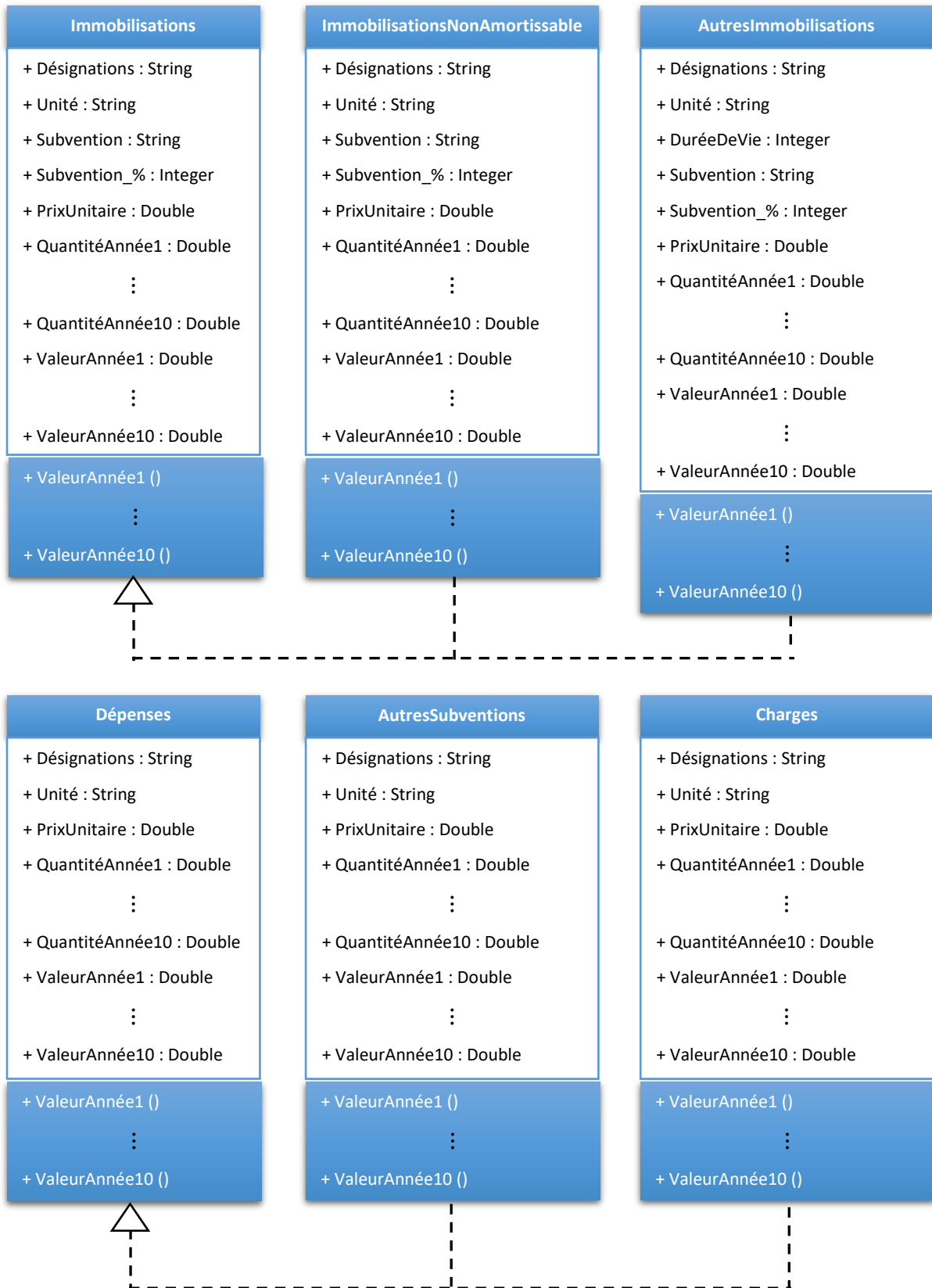


Figure 20 : Classes supplémentaires du système de pilotage.

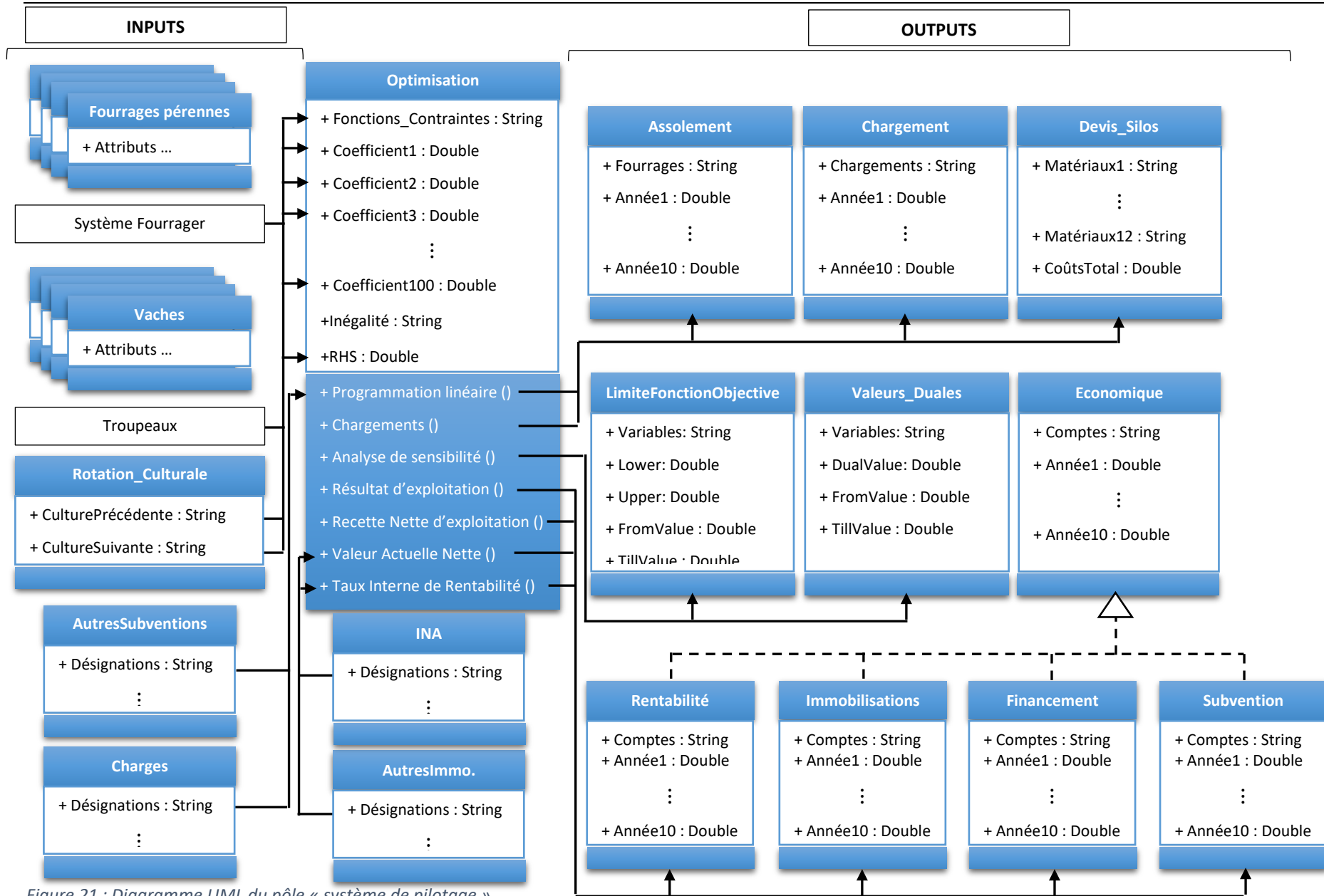


Figure 21 : Diagramme UML du pôle « système de pilotage ».

III – 2 Implémentation informatique : le modèle « D-Algo »

D-Algo est un nouveau modèle biotechnique, bioéconomique et informatique d'aide à la décision. L'appellation est une abréviation de l'anglais « Dairy-cattle Algorithm ». C'est un modèle informatique intégré de système d'élevage de bovins laitiers destiné à appuyer les différents agents de terrains (ingénieurs, zootechniciens, etc.) dans leur prise de décisions sur le choix du système de production à mettre en œuvre et sur les investissements à entreprendre. Il peut également être utilisé directement pour les exploitations en régime de croisière en tant qu'outil de conseil en ferme dans le cadre d'une extension des activités ou d'un renouvellement des infrastructures et des outils de production. Le domaine d'utilisation est centré uniquement sur l'élevage de bovin laitier. La durée de la simulation est de dix ans. Ce modèle génère d'abord par simulation une succession d'assolement permettant de produire les matières premières (fourrages, etc.) nécessaires à l'élevage du troupeau. L'assolement optimisé suit une évolution multi-périodique et récursive. Ensuite, il calcule la recette nette de l'atelier bovin et la rentabilité des investissements. L'interface d'accueil du logiciel a été conçue principalement pour être en conformité avec l'ontologie du schéma fonctionnel du système d'élevage tel que LHOSTE l'a décrit en 2001 (LHOSTE, 2001) (cf. Photo n°11). Ceci dans le but de faciliter la prise en main du modèle par des personnes familières avec les concepts et les fondamentaux du système d'élevage. Les différentes composantes principales du logiciel sont reportées en annexe (cf. Annexe N°20, p.xxvii). La présente sous-partie décrit en détail l'implémentation informatique du logiciel.

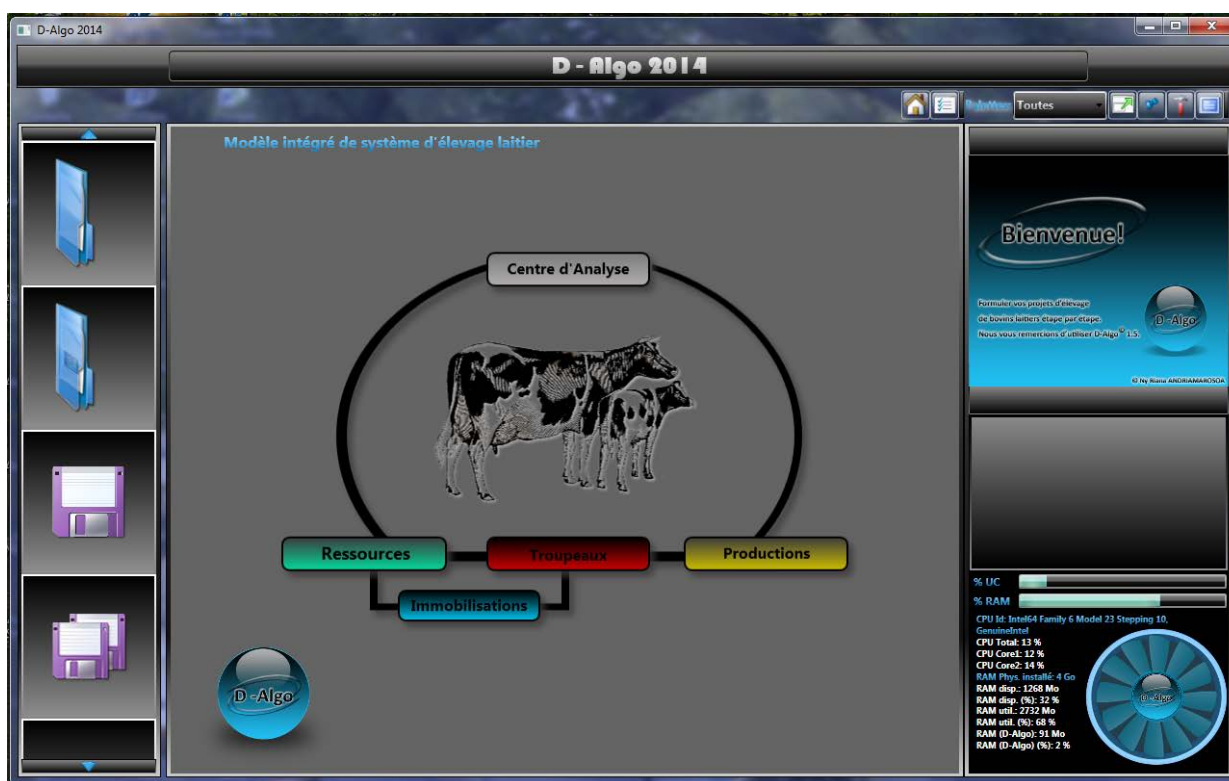


Photo n°11 : Interface principale du logiciel D-Algo.

III – 2 – A La simulation avec « D-Algo »

La démarche de simulation avec le modèle « D - Algo » compte deux étapes bien distinctes. D'abord, il y a l'étape de saisie et de configuration des données d'entrée et de simulation du troupeau. Ensuite, il y a l'étape d'optimisation des assolements et de calculs de la rentabilité financière, que le modèle accomplit tout seul. La première étape est d'abord une étape de saisie et de configuration de toutes les informations se

rapportant aux pôles « Système fourrager » et « Troupeaux ». Ensuite, on introduit les informations sur les « Immobilisations ».

Toutes les informations recueillies avec cette première étape sont importantes car elles constituent les données d'entrée du modèle d'optimisation et de calcul de la rentabilité des investissements implémentés dans le « Système de pilotage ». Soulignons que chaque étape n'est pas obligatoire. Si nous prenons comme exemple le fait que l'utilisateur ne planifie pas de cultiver des ensilages de maïs ou d'herbe, il n'est pas nécessaire de remplir les caractéristiques se rapportant aux ensilages (cf. Figure 22). Si un ensilage de maïs ou d'herbe en silo-couloir est enregistré et présent dans l'inventaire des aliments, alors le modèle calcule automatiquement le coût des silos après la phase d'optimisation s'il est retenu dans l'assolement. De même, si l'utilisateur ne planifie pas d'élever des taurillons à l'engrais alors il n'est pas nécessaire d'allouer des bâtiments à ces derniers. D'ailleurs, si nous supposons par exemple que l'utilisateur choisit d'élever le troupeau au pâturage et qu'il n'est pas nécessaire d'allouer des bâtiments au troupeau, alors nous n'avons pas besoin de calculer le coût des bâtiments.

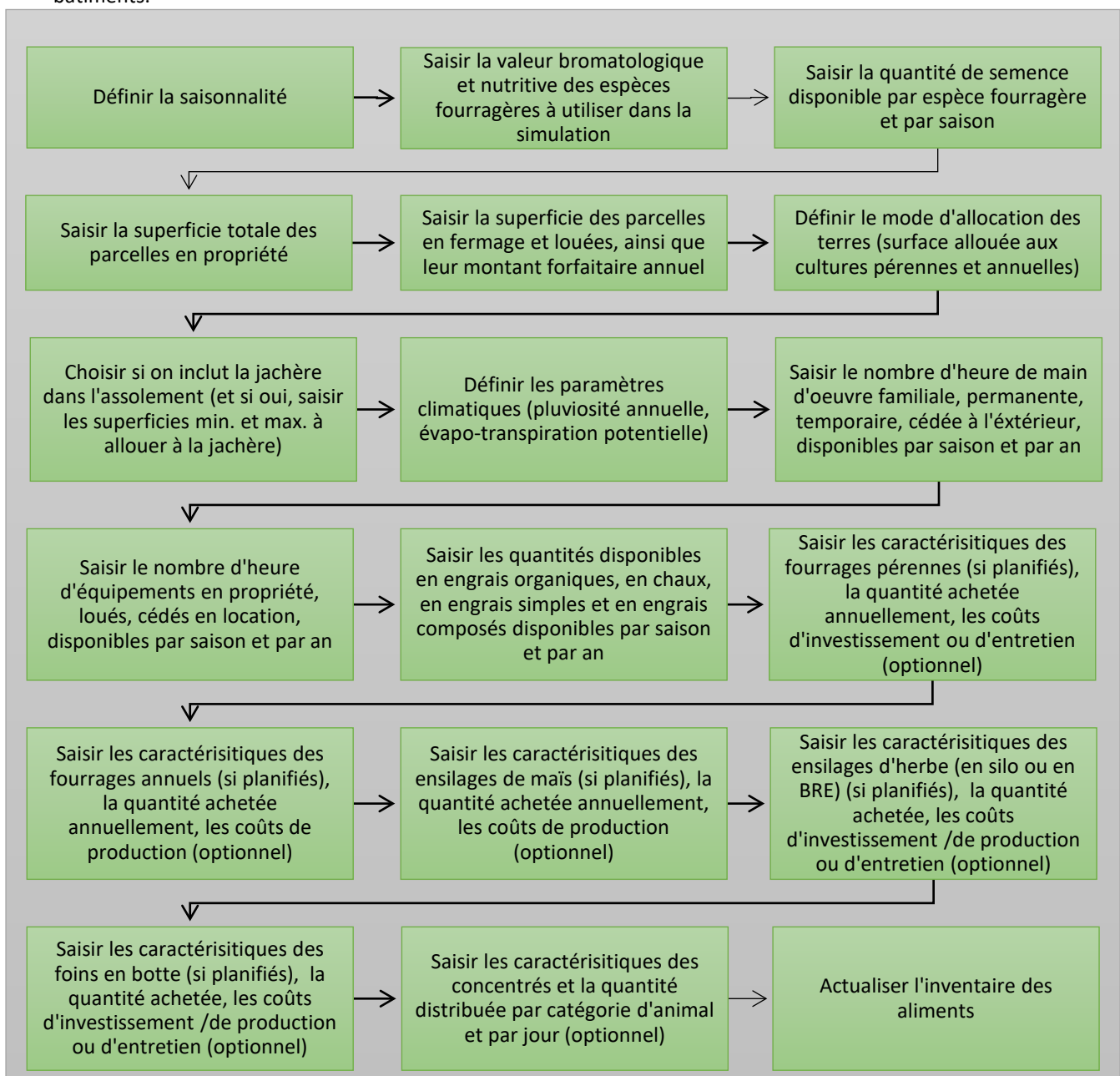


Figure 22 : La démarche de saisie des données d'entrée – pôle « Système fourrager ».

Pour le pôle « Troupeaux » (cf. figure 23), des simulations des besoins du troupeau et de la dynamique de la population sont effectuées. Ces simulations ne sont qu'une étape intermédiaire qui va permettre à la deuxième étape de D-Algo de déterminer l'assolement optimal, qui assure la satisfaction de ces besoins tout en maximisant la rentabilité financière de l'exploitation agricole. Ces besoins simulés sont stockés dans les tables de la base de données.

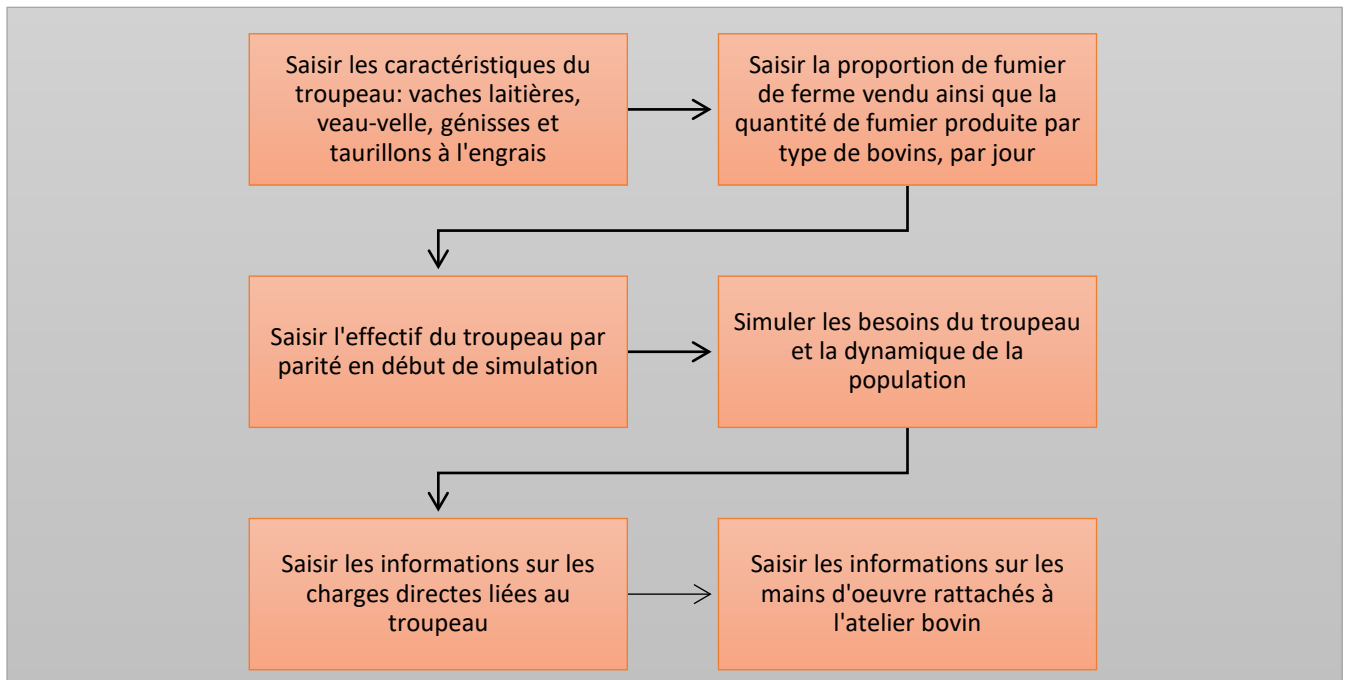


Figure 23 : La démarche de saisie des données d'entrée – pôle « Troupeaux ».

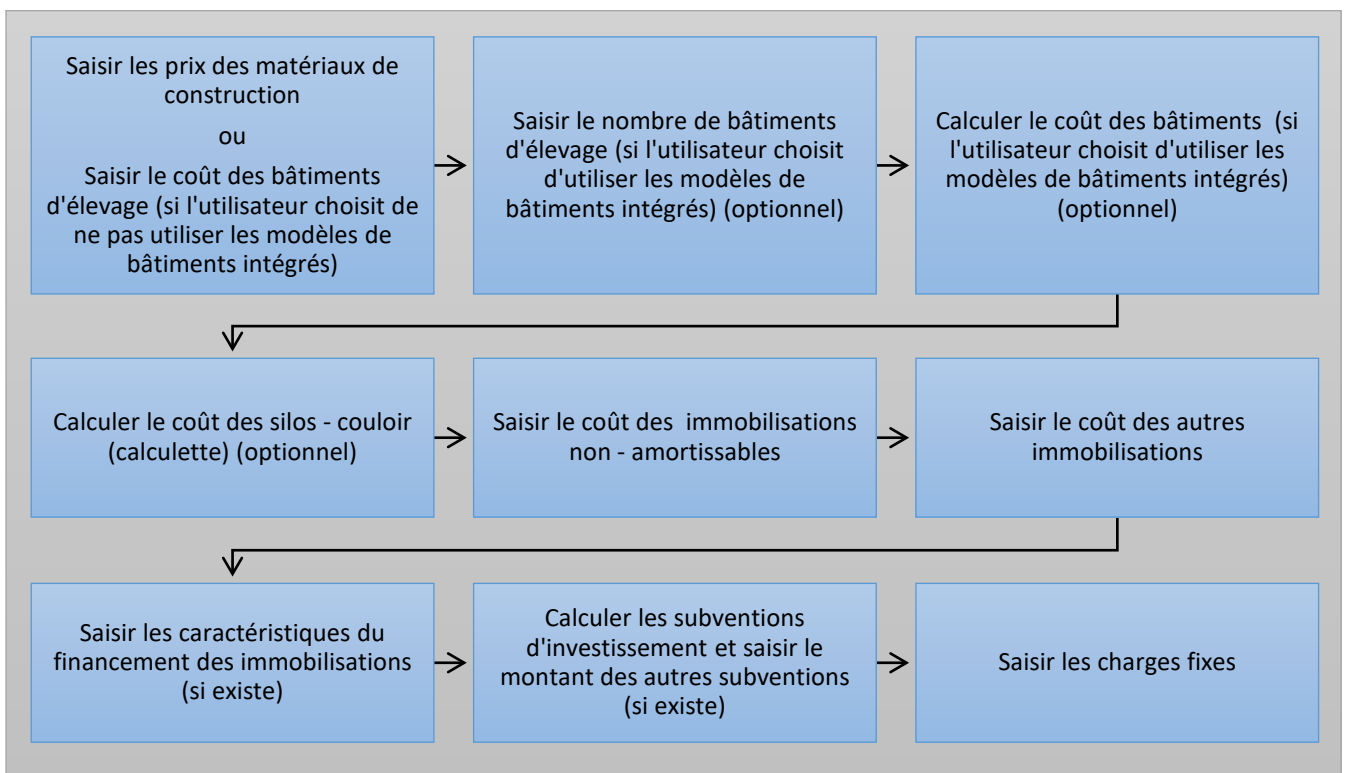


Figure 24 : La démarche de saisie des données d'entrée – « Immobilisations ».

La deuxième étape optimise avec la programmation linéaire multi-périodique récursive les assolements et calcule le chargement à l'hectare, la recette nette d'exploitation, la rentabilité des investissements et le volume de production total (cf. Figure 25).

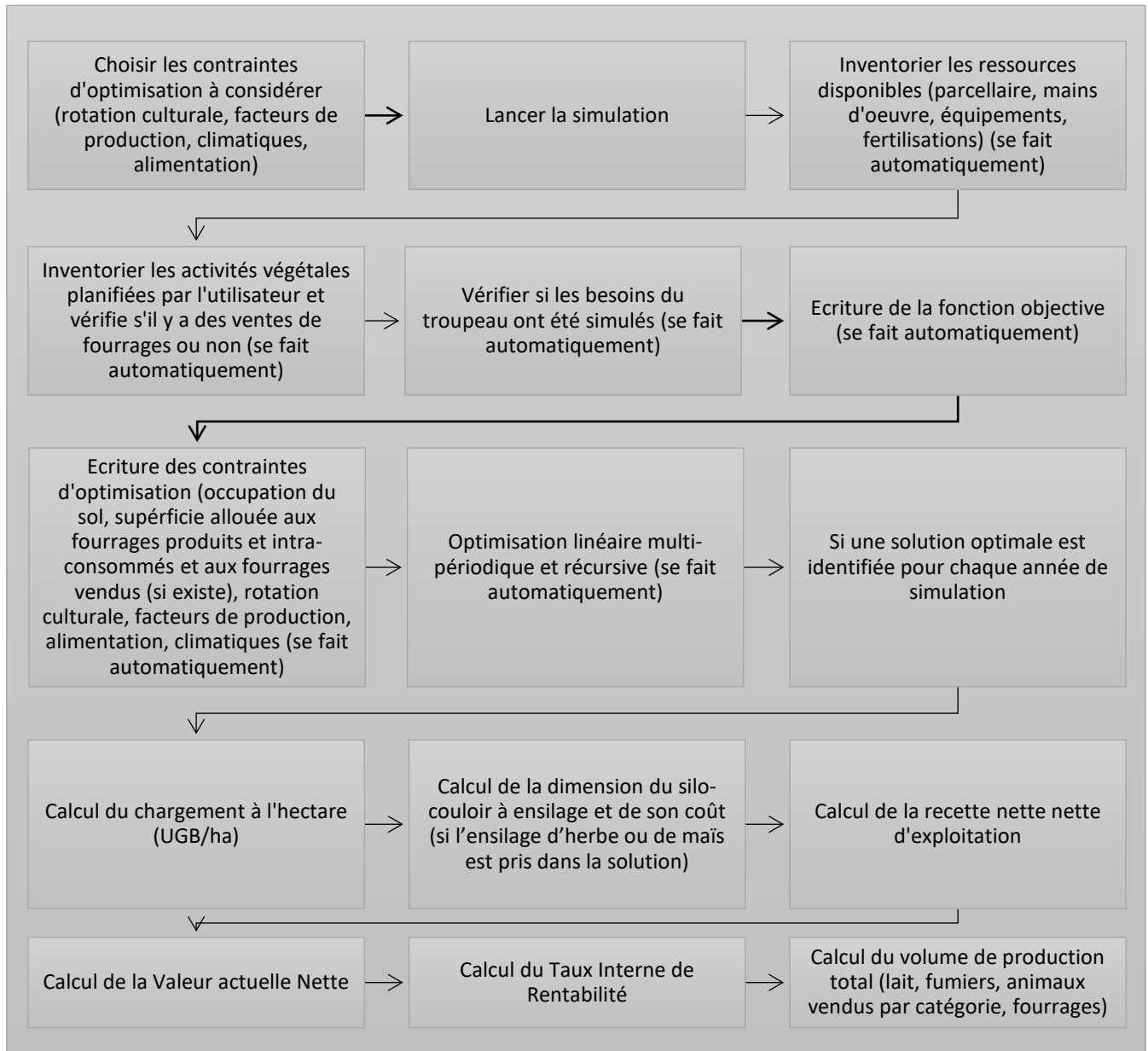


Figure 25 : Démarche de simulation avec D-Algo.

L'utilisateur a le choix d'inclure ou non dans les contraintes d'optimisation la contrainte d'occupation du sol (jachère), de rotation culturale, les contraintes sur les facteurs de production (la disponibilité en main d'œuvre, en équipements et en intrants agricoles comme les semences, les engrais organiques, etc.) et les contraintes climatiques (besoins en eau de la plante). Il en est de même pour les contraintes d'alimentation du troupeau (le besoin énergétique, protéique, en minéraux (Ca et P) et la capacité d'ingestion). Les structures de décisions relatives à l'introduction des différentes contraintes dans le problème d'optimisation sont détaillées dans la figure 26 (cf. p.137).

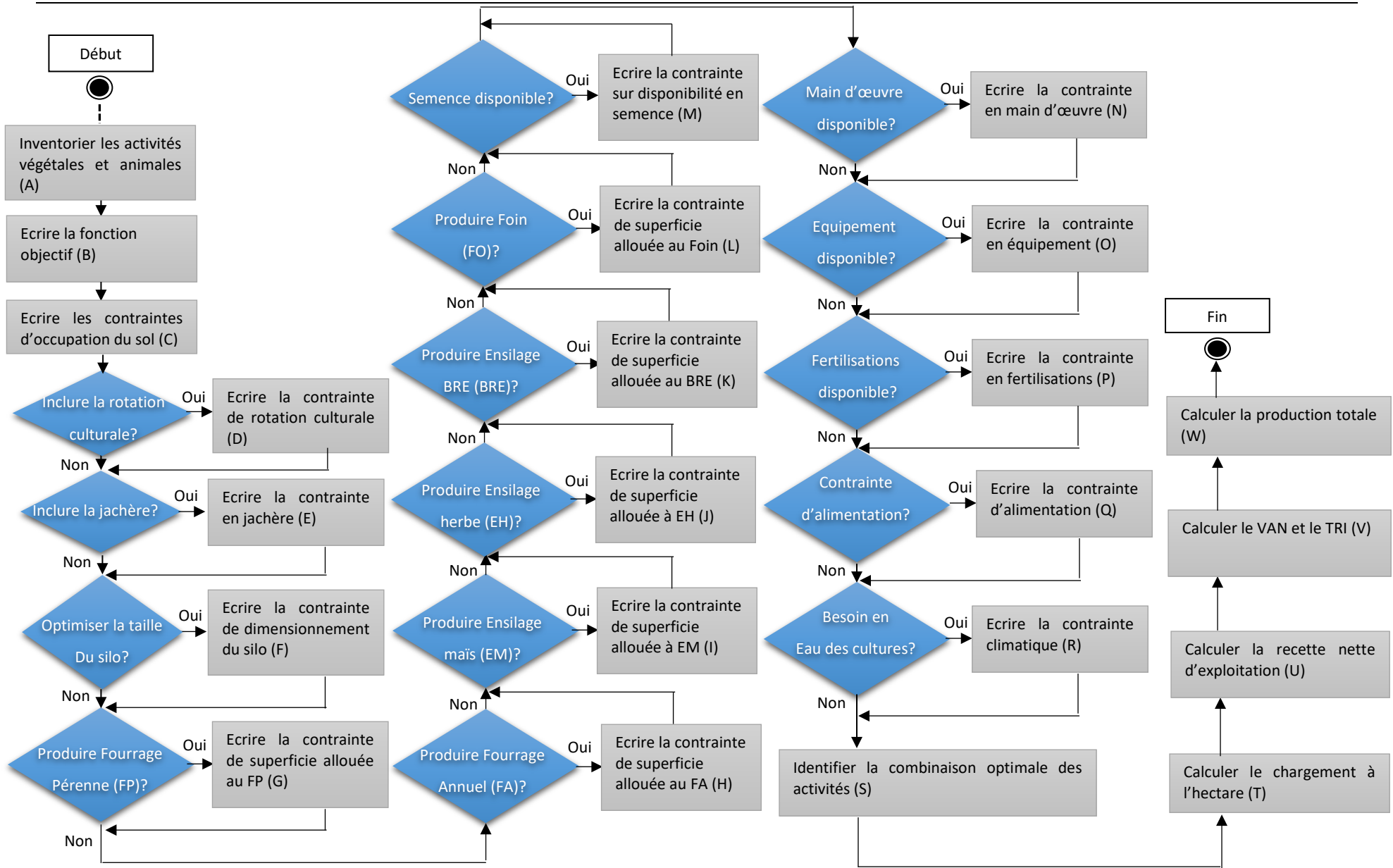


Figure 26 : La démarche de simulation.

III – 2 – B Architecture interne de « D-Algo »

Le modèle D – Algo est implémenté selon l’architecture n – tiers. Il présente une architecture à cinq niveaux (cf. Figure 27, p.139).

Le premier niveau est celui de l’ « analyste » ou de l’ « utilisateur » qui interprète les informations affichées par le « niveau de présentation » et envoie les messages au « contrôleur », toujours en interagissant avec la « vue » par click de souris ou en tapant au clavier. Ce qu’il faut savoir, c’est que le contrôleur communique avec l’utilisateur à travers ce que l’on appelle une « procédure événementielle », qui est une portion de code implémentée avec l’interface graphique derrière les composants (ou widgets) destinés à interagir avec l’utilisateur (boutons, saisisseur de texte, labels, etc.).

Le deuxième niveau est la « vue », qui est caractérisé par des fenêtres informatiques classiques ou « formulaires » que l’utilisateur voit à l’écran.

Le troisième niveau correspond à la couche « métier ». En quelques sortes, c’est le cerveau de l’application. Toutes les fonctions de calcul comme celles de la dynamique de la population, des VAN et TRI, des coûts des bâtiments d’élevage et du silo-couloir ou encore celles qui concernent l’optimisation linéaire, sont implémentées et invoquées à partir des méthodes de classes à l’intérieur de ce niveau. Au total, dans le pôle « système fourrager », les activités fourragères comptent 37 classes. Parmi celles-ci, 12 appartiennent aux ressources disponibles. Pour cette première version, le solveur Ip_Solve est programmé de sorte qu’il puisse accueillir 100 activités fourragères (fourrages intra-consommés et vendus compris). Les classes se rapportant au volet « Troupeaux » sont au nombre de 8. Ces méthodes de calcul sont celles des équations représentées dans le chapitre III (cf. pages 104 à 110). Pour la routine d’optimisation linéaire, sa tâche principale est d’une part d’automatiser la formulation du problème (écriture de la fonction objectif, remplissage de la matrice des contraintes avec les coefficients techniques, etc.) et d’autre part de résoudre le problème d’optimisation. La routine a été implémentée à l’intérieur des classes (en tant que méthodes de classe) du système de pilotage.

Le quatrième niveau est le « niveau d’accès aux données ». La gestion du mapping objet-relationnel est assurée par un dataset (considéré ici selon le sens de « composant ou librairie d’accès aux données de l’architecture ADO.NET » conçu par Microsoft®). Le dataset est conçu pour gérer les opérations de création, d’ouverture de tables, de modification, de sauvegarde, de suppressions et de recherches des données (ou requêtes). Elles permettent également d’afficher à l’écran les données qui correspondent aux requêtes de l’utilisateur. Les datasets sont des classes informatiques. On peut les instancier indépendamment les unes des autres de manière à les faire communiquer entre elles, ce qui facilite la circulation des flux de données dans n’importe quel niveau du modèle. Toutes les données provenant du niveau métier, que ce soit les données d’entrée ou de sorties, sont stockées dans la base de données à l’aide des « datasets ». Au total, ils sont au nombre de 6 (un pour chaque pôle, sauf pour le pôle « Système fourrager » qui en utilise deux : un pour les fourrages proprement dits et un pour les ressources disponibles).

Le cinquième niveau est le « niveau de la base de données ». Pour stocker les données, que ce soit celles provenant des classes d’objet ou celles provenant des fonctions implémentées en approche procédurale, nous avons utilisé une base de donnée « SQL Server » fournie par Microsoft®. Depuis 2012, « SQL Server » est un « Système de Gestion de la Base de Données » (SGBD) compacte conçu principalement par Microsoft® pour être utilisé au niveau local, c’est-à-dire avec les ordinateurs de bureau, les tablettes PC ou encore les périphériques portables comme les téléphones nouvelles générations utilisant des applications Microsoft® (Windows Mobile et Windows 10 et 10.1), et au niveau de grands serveurs informatiques. Il présente comme avantage d’être facile à implémenter et à transporter.

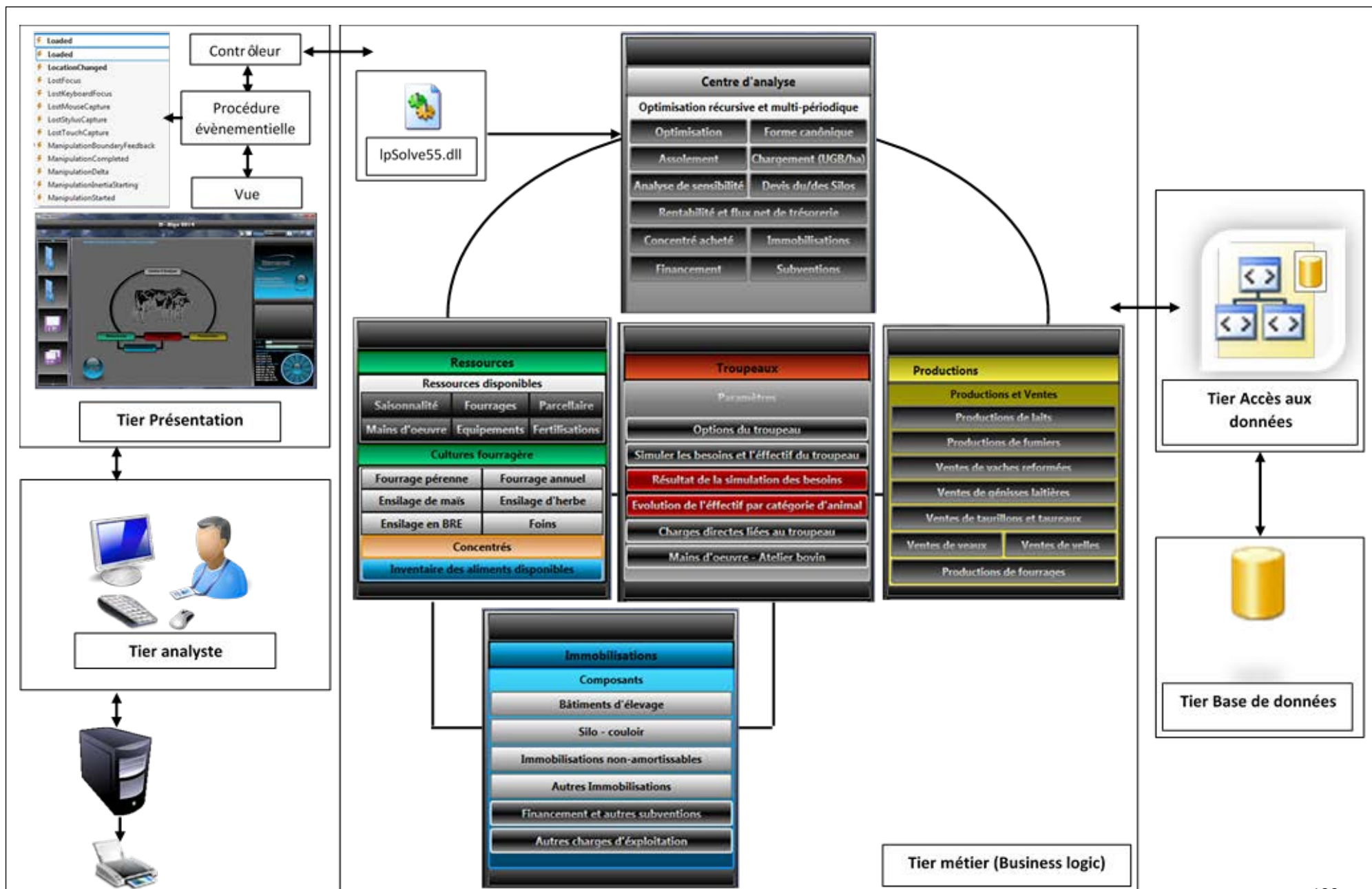


Figure 27 : Architecture interne du modèle « D- Algo ».

Au total, nous comptons 223 tables à l'intérieur de notre base de données, dont les plus importantes appartiennent au pôle « Troupeaux » (102 tables) et au volet « Centre d'analyse » (51 tables). Pour le pôle « Troupeaux », ces tables stockent sur une durée de dix ans les caractéristiques du troupeau, c'est-à-dire les instances des cinq classes de bovins, les besoins des cinq lots de bovins par catégorie d'animaux (vache, génisse et taurillon) et les résultats de la dynamique de la population. Pour le pôle « Système de pilotage », il s'agit essentiellement des résultats de calculs de l'optimisation linéaire, de l'analyse financière (flux net de trésorerie, VAN, TRI) et du chargement. Pour le pôle « Système Fourrager », les données d'entrée et de sortie (Ressource disponible, caractéristiques des fourrages pérennes, annuels, etc.) et les instances des résultats de calcul (coûts de production annuelle, etc.) à partir des méthodes de classe en constituent les principales données sauvegardées. Pour les « Immobilisations », il s'agit des données d'entrée et de sortie des calculs, comme le coût des bâtiments d'élevage, ou encore les montants des subventions d'investissement.

III – 2 – C Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité ou analyse post – optimale est une information complémentaire fournie à propos de la solution optimale trouvée (GOURVEST, 2009). L'un des avantages à utiliser l'API « Ip_Solve » est la capacité à fournir des informations de sensibilité à condition de la paramétrer correctement pour effectuer cette tâche. En effet, par défaut les informations sur l'analyse de sensibilité n'apparaissent pas. Le modèle D-Algo permet de faire une analyse de sensibilité de la solution optimale. Les résultats fournis par l'analyse de sensibilité obtenue sont de deux sortes : les limites de la fonction objective et les valeurs duales.

Pour les limites de la fonction objective, pour chaque variable de décision, Ip_solve donne une borne inférieure (« From ») et une borne supérieure (« Till ») entre lesquelles la valeur du coefficient objectif peut varier sans que la solution optimale ne change. Autrement dit, pour chaque variable de décision, tant que le coefficient objectif de cette variable se trouve dans cet intervalle [From ; Till], les valeurs des variables restent inchangées (mais en revanche, la fonction objectif change de valeurs, de même que les informations de sensibilité des autres variables). Dans le cas où la variable de décision est exclue de la solution optimale (sa valeur est donc égale à 0), Ip_solve fournit une troisième valeur, « FromValue », qui est la valeur que prendrait la variable si le coefficient objectif atteignait l'une ou l'autre des deux bornes From et Till.

Pour les « Valeurs duales », elles sont fournies pour l'ensemble des contraintes et des variables. Ip_solve fournit encore trois valeurs. La valeur duale (« Dual Value »), qui indique la variation de la fonction objectif quand la valeur de la contrainte est augmentée d'une unité (cf. encadré 5, p.141). Cette valeur donne donc une bonne indication de combien coûte une contrainte ou une restriction. En effet, si la valeur duale est élevée, alors la contrainte correspondante est très influente sur la fonction objectif (GOURVEST, 2009). Ainsi, si l'on est capable de la changer, même un tout petit peu, alors la solution sera bien meilleure. La valeur duale permet donc d'identifier les actions à entreprendre du point de vue technique, gestionnaire, etc. pour améliorer le résultat de l'exploitation. Le signe de la valeur duale a également une signification. Une valeur positive signifie que si la borne supérieure de la contrainte devient de plus en plus grande, alors la valeur de la fonction objectif sera elle aussi plus grande (GOURVEST, 2009). Au contraire, si la valeur duale est négative, alors la valeur de la fonction objectif diminue si la borne supérieure de la contrainte devient plus grande. Les valeurs From et Till indiquent les limites entre lesquelles la borne supérieure de la contrainte (b_i) peut varier sans que la valeur duale ne change. En revanche, tout changement de la valeur de b_i implique, si la contrainte est active (cf. Encadré 5, p.141), un changement de la valeur de la fonction objectif, mais peut également impliquer un changement de la solution optimale. La seule chose qui ne change pas, c'est le coût de cette contrainte.

Encadré 5 : Variables primales et variables duales

Pour le problème d'optimisation linéaire traité par D-algo, les valeurs primales (notées x_j , $1 \leq j \leq n$), ou variables de décision, sont les activités végétales (en hectare) produites et intra-consommées. Ces valeurs primales doivent obéir à des contraintes sous forme d'inéquations linéaires du type $\sum_{j=1}^n a_{i,j}x_j \leq b_i$. Par exemple, pour la contrainte d'occupation du sol, b_i représente une surface, pour les contraintes de main d'oeuvre, b_i représente un nombre d'heures de main d'oeuvre disponible, etc. Pour chacune de ces contraintes, la valeur duale associée représente le gain de rentabilité (la fonction objectif) que l'on obtiendrait si l'on augmentait la valeur de la borne supérieure b_i d'une unité (par exemple le gain de rentabilité si l'on augmente la surface de l'exploitation de un hectare ou si l'on dispose de une heure de main d'oeuvre supplémentaire).

La valeur duale est non nulle si et seulement si, pour la solution optimale, la contrainte est active, c'est-à-dire si et seulement si $\sum_{j=1}^n a_{i,j}x_j = b_i$. En conséquence, si $\sum_{j=1}^n a_{i,j}x_j < b_i$, la contrainte n'est pas active et sa valeur duale est donc nulle.

IV - Conclusions

Au total, nous avons créé 15 classes dans le processus de modélisation du système de pilotage. Parmi ces classes, la classe « Optimisation » constitue la classe principale pour optimiser le système de production. Elle comporte également les méthodes de classes de calcul économétrique. Les classes composant les pôles système fourrager et troupeaux, la classe « Rotation_Culturale », ainsi que les classes « Immobilisations non-amortissables », « Autres immobilisations », « Autres Subventions » et « Charges » fournissent les données d'entrées de la classe « Optimisation ». Tandis que les 9 classes restantes instancient les résultats de l'optimisation de l'assolement et les résultats des calculs économétriques. Le logiciel informatique nommé « D-Algo » a été développé avec l'architecture n-tier, en prenant comme patron le schéma fonctionnel du système d'élevage énoncé par LHOSTE en 2001. Le logiciel génère par programmation linéaire (basée sur l'algorithme du simplexe) une succession d'assolement permettant de produire les matières premières (fourrages, etc.) nécessaires à l'élevage du troupeau. D'abord le logiciel simule sur une durée de dix ans les besoins d'entretien et de production du troupeau et la dynamique de la population. Ensuite, pour assurer l'alimentation du troupeau, les surfaces de cultures fourragères doivent être adéquates pour satisfaire les besoins d'entretien et de production des animaux (en énergie, en matières azotées et en minéraux et si possible à moindre coût même si ce n'est pas toujours le cas), en fonction des différentes contraintes (matériels, humains, intrants agricoles, etc.) s'exerçant sur le système. L'assolement optimisé suit une évolution multi-périodique et récursive sur une durée de dix ans également. Enfin, après l'optimisation de l'assolement, le logiciel calcule les divers indicateurs de rentabilité des investissements (Chargement, Valeur Actuelle Nette, Taux Interne de Rentabilité, Recette nette d'exploitation) et la production totale (lait, fumiers, fourrages, ventes d'animaux par catégorie). Pour la programmation linéaire, le solveur « Ip-solve » sous forme d'API (Application Programming Interface) est intégré avec le logiciel « D-Algo ». La base de données SQL Server est utilisée pour stocker les données d'entrées et de sorties.

Bibliographie

GOURVEST, H. (2009). *Ip_solve reference guide*. [On line] <http://www.progdigy.com> [consulté le 22 octobre 2010].

LAROUSSE. (2009). *Le petit Larousse*. Edition Larousse.

LASSERRE, P. (2009). *Cours VB.NET*. [On line] <http://plasserre.Developpez.com/cours/vb-net/> [consulté le 18 juin 2009]. p.1087.

LHOSTE, P. (2001). *L'étude et le diagnostic des systèmes d'élevage*. Atelier de formation des agronomes SCV Madagascar - CIRAD -MIPA. pp.1239 - 1266.

MONTMAIN, J., PENALVA, J., AKHARRAZ, A., CHAPURLAT, V., COUTURIER, P., & CRAMPES, M. (2003). *Choix publics stratégiques et systèmes sociaux - Etat de l'art sur les théories de la décision et méthodologies de l'approche système*. Commissariat à l'énergie atomique, Ecole des Mines d'Ales, Unité de Recherche sur la Complexité - Centre de Recherche LGI2P. p.244.

CHAPITRE V
VALIDATION CONCEPTUELLE DU MODELE D-ALGO,
DISCUSSION GENERALE
ET PERSPECTIVES D'AMELIORATION

I - Validation conceptuelle du modèle « D-ALGO »

I - 1 Introduction

La validation conceptuelle permet de vérifier que « *les théories et les hypothèses qui sont à la base du modèle conceptuel sont correctes ou du moins justifiables et que le modèle de représentation du problème ou du système, sa structure, et ses relations logiques, mathématiques et causales sont corrects par rapport à l'utilisation attendue du modèle. La validation conceptuelle est considérée comme une justification acceptable du contenu scientifique dans le modèle mais ne garantit pas que le modèle donne des prédictions exactes* » (LE BARS, 2003). L'une des contraintes majeures dans la réalisation du processus de validation de modèle biotechnique intégré est l'insuffisance de données fiables. Le paramétrage et la validation de modèle peuvent donc prendre beaucoup de temps, parfois pendant plusieurs années (THORNTON & HERRERO, 2001). Ainsi, THORNTON et HERRERO (2001), ont proposé dix conditions minimum qu'un modèle biotechnique doit satisfaire si on veut l'utiliser correctement :

1. Décrire et quantifier les interactions entre les composants du système.
2. Représenter les pratiques de gestion de l'éleveur.
3. Déterminer les impacts des stratégies de gestion de l'utilisation des terres et des autres ressources.
4. Quantifier les contraintes en nutriments au niveau du système en entier.
5. Quantifier la variabilité associée aux différentes conditions climatiques sur la performance du système.
6. Fournir un aperçu sur les extrants (économiques, environnemental et social) obtenus en utilisant les différentes ressources de l'exploitation.
7. Permettre la possibilité d'étudier les effets à moyen et long – terme des stratégies analysées.
8. Traduire les résultats du modèle en support opérationnel pour la gestion saisonnière de l'exploitation. Par exemple, les résultats doivent permettre de fournir des stratégies de gestion du rationnement, des fourrages et des pâturages, alors que les contraintes des cultures fourragères telles que l'utilisation des fertilisations/fumiers, etc. peuvent être d'une importance capitale.
9. Utiliser un minimum de jeu de données qui peut être rassemblé avec facilité, pour le paramétrage, la validation et l'utilisation générale du modèle.
10. Intégrer des données à partir de différents niveaux d'agrégation.

Ces conditions peuvent ne pas être réunies simultanément au sein d'un seul modèle. Toutefois, des gammes de modèles ont pu les intégrer avec succès dans le passé (THORNTON & HERRERO, 2001).

I - 2 Expérimentation

L'expérimentation est basée sur les difficultés rencontrées fréquemment à Madagascar en matière d'élevage de bovins laitiers. Ces difficultés sont liées aux conditions climatiques et environnementales. Ainsi, nous supposons que la date de vêlage des vaches est groupée essentiellement pendant la saison sèche. Ce choix sur la date de vêlage a été motivé surtout par le fait que, à Madagascar, la saison sèche dure plus longtemps que la saison humide. Le troupeau ne peut bénéficier de fourrages verts de bonne valeur nutritive que pendant quelques mois de l'année seulement (entre 4 et 5 mois). Ainsi, il est intéressant de simuler le cas où les vaches mettent bas pendant la saison sèche, où les fourrages verts sont à un stade de lignification avancé, alors que les besoins (entretien, production) du troupeau sont optimums. Il faut recourir au report de stocks (ensilages, pailles) pour nourrir le troupeau. Pour notre exemple d'expérimentation, des vaches à haut potentiel sont simulées en prenant comme système protéique le système PDI et comme expression de la capacité d'ingestion le système des Unités d'Encombrements (UE). Des données récoltées exclusivement dans les Communes Rurales d'Imerimandroso et d'Amparihitsokatra - Région Alaotra – Mangoro sont utilisées pour les ressources disponibles. Soulignons que nous ne pouvons pas considérer ces données comme représentatives de la Région.

Nous avons seulement utilisé ces dernières à des fins de simulation pour tester le modèle. Notons que les détails des données d'entrées utilisées dans cette expérimentation ont été intégrés en annexe (cf. Annexe N°21, p.xxxii). Comme contraintes d'optimisation, nous avons considéré les contraintes en alimentation, en main d'œuvre, en équipement, en intrants agricoles (fertilisations) et la contrainte de besoins en eau des cultures fourragères.

I – 2 – A Le troupeau

En posant comme hypothèse une charge de 2 vaches/ha, on peut considérer le cas d'une exploitation laitière élevant 40 vaches. Cette valeur de charge est généralement fixée d'une manière empirique en milieu rural malgache. Nous simulons volontairement 41 vaches (20 en deuxième lactation et 21 en troisième) au lieu de 40 vaches, de type prim'Holstein pour démontrer l'efficacité du solveur lors de l'optimisation de l'assolement, avec une production au pic de lactation de 20 Kg/jour pour les primipares et de 27 Kg/jour pour les multipares, soit, respectivement, environ 5.000 et 6.000 Kg de lait sur 305 jours de lactation. Les taux butyreux et protéiques sont respectivement de 40 et 31 g/Kg de lait. Les poids vifs sont fixés à 500 Kg pour toutes les primipares, 550 Kg pour toutes les multipares et 40 Kg pour le veau à la naissance. Comme il s'agit de race à haut potentiel, l'âge au premier vêlage des génisses est défini par défaut à 24 mois. Le gain moyen quotidien des primipares est de 900 g par jour. L'intervalle vêlage-insémination fécondante est de 110 jours. La durée de la gestation est de 280 jours. Nous ne tenons pas compte des paramètres de reproduction et les valeurs retenues sont celles par défaut. Ainsi, le taux de fécondité de toutes les vaches est de 100 % et le taux de mortalité de toutes les classes d'animaux est de zéro. Le sex - ratio entre veaux et velles à la naissance est de 50-50. Tous les veaux et velles nés dans l'exploitation sont systématiquement vendus après sevrage. L'alimentation lactée des veaux et velles avant sevrage est de 8 Kg par jour sur toute la durée de la simulation (10 ans), la date de vêlage, unique pour chaque lot du troupeau, se déroule entre le mois de mai et le mois de septembre, c'est à dire pendant la saison sèche. La reproduction est assurée par insémination artificielle au prix de 30.000 Ariary/vache. Ce prix est le prix moyen de l'insémination artificielle dans les hauts plateaux malgaches (KASPRZYK, 2008).

Le modèle « D-Algo » considère deux types de main d'œuvre permanente à l'exploitation : la main d'œuvre affectée à l'atelier bovin et la main d'œuvre affectée aux autres tâches de l'exploitation, comme la culture fourragère ou encore le désilage. Dans notre scénario de simulation, le nombre d'employé affecté à l'atelier bovin est d'une (1) personne pour cinq UGB soit 8 pour les 41 vaches et nous supposons que ce nombre est toujours satisfait. Ce raisonnement part du principe que, généralement, les employés qui s'occupent de l'atelier bovin sont soit des membres de la famille, dans le cas de petites et moyennes exploitations dont le nombre de têtes de bovins ne dépasse pas plus d'une dizaine, soit des salariés permanents engagés par le ou les chefs d'exploitation. Ce dernier cas est rencontré dans le cas des grandes entreprises agricoles comme TIKO-Farm ou encore Tombotsoa à Antsirabe. A partir des observations sur terrains, dans les exploitations laitières, nous fixons le nombre d'heures disponibles par main d'œuvre permanente et par mois à environ 300 heures, soit l'équivalent d'une personne travaillant 10 heures par jour tout au long de l'année.

I – 2 – B Alimentation

Nous supposons que toutes les opérations culturales sont entièrement motorisées en utilisant un tracteur de puissance moyenne (90 chevaux) et en recourant principalement à des salariés permanents de l'exploitation, appuyés par de la main d'œuvre temporaire. Nous supposons que les besoins en temps de travail humain par hectare sont deux fois supérieurs aux besoins en temps de travail avec un tracteur (c'est-à-dire le travail d'un conducteur d'engin aidé par un assistant). Le nombre d'heures disponibles en main d'œuvre temporaire par période et par an, qui a été considéré dans la simulation, a été obtenu par enquête dans la zone de l'étude. Pour l'estimation du temps de travail en culture motorisée, faute de données plus récentes concernant l'utilisation d'un tracteur de puissance moyenne à Madagascar, nous nous référons aux données enregistrées dans les grandes fermes d'Etat du moyen-ouest dans les années 70. Pour une SAU supérieure à 100 ha, la disponibilité moyenne en temps de travail annuel est de 4.225 heures (Tracteur + : charrue : 1.759,3 heures ; Semoir : 227,3 ; Epandeur d'engrais : 131 heures ; Gyrobroyeur : 535,30 heures ; Faucheuse à herbe :

396,3 heures ; Remorque : 1.175 heures), soit à peu près 606,25 heures sur 6 mois d'utilisation sauf pour le remorquage qui s'effectue tout au long de l'année (97,92 heures/mois) (RAMANAMPANOHARANA, 1976).

Concernant la disponibilité en intrants agricoles, nous ne considérons dans la contrainte d'optimisation que la disponibilité en fertilisant, en utilisant les données obtenues par enquête sur les fumiers de ferme (soit environ 10.700 Kg/ha pour l'ensemble des cultures). La quantité d'engrais disponible auprès des agriculteurs est très limitée pour diverses raisons (disponibilité pécuniaire, imperfection du marché, etc.). Ainsi, pour démontrer le bon fonctionnement des modules de classe qui gèrent la contrainte en fertilisants, la quantité d'urée disponible est fixée à 100 Kg/ha/période et celle du NPK 11-22-16 à 300 Kg/ha/période.

A propos de la saisonnalité des activités agricoles, 12 périodes correspondant à 12 mois pour chaque année de simulation sont définies. La disponibilité et les besoins en main d'œuvre, en équipement et en intrants agricoles, sont définis sur les 12 périodes pour chaque année.

Concernant le rationnement du troupeau, la ration de base hivernale (mois de mai à Novembre) est l'ensilage de maïs à volonté. Le *Brachiaria brizantha* et le *Stylosanthes guianensis* sont distribués à volonté pendant quatre mois, entre le mois de Décembre et le mois de Mars. Des fourrages annuels (*Dolichos lablab*, *Vigna unguiculata* et *Zea mays*) sont distribués en tant qu'aliment de transition avant l'arrivée de la saison sèche (entre Avril et Mai). Concernant les concentrés, nous avons utilisé du maïs grain et du tourteau de soja, distribués respectivement à raison de 7,44 Kg MS/jour/vache et 3,55 Kg MS/jour/vache tout au long de l'année. Ces deux valeurs sont des moyennes obtenues à partir de calculs de deux ration-types (été et hiver) pour vache primipare au pic de lactation (l'une vêlant en été et l'une en hiver), basées sur l'utilisation des fourrages et des deux concentrés cités ci-dessus (cf. Annexe N°21 ; 21 - 10, p.xl). Il en est de même pour la valeur de la proportion de concentrés dans la ration et de la valeur d'encombrement moyen des concentrés. Ainsi, la proportion de concentrés dans la ration totale est fixée à 49,23 % et la valeur d'encombrement moyen des concentrés à 0,4. Le tricalcique est utilisée comme minéral d'équilibre et est distribué à raison de 0,2 g/jour/vache.

Comme contrainte d'alimentation, les besoins énergétiques, protéiques, calciques et phosphoriques du troupeau sont considérés, ainsi que la capacité d'ingestion en unités d'encombrements (UE).

Les données recueillies dans la Région Alaotra – Mangoro sur les cultures fourragères sont utilisées. Notons toutefois que, faute de données disponibles sur l'ensilage de maïs, pratique encore inexistante dans cette Région, nous avons ajouté une activité supplémentaire dans l'itinéraire technique : la culture de maïs pour la fabrication d'ensilage. Pour la valeur nutritive de l'ensilage de maïs et du maïs grain, nous nous sommes référés aux valeurs trouvées dans la littérature, notamment celles fournies dans RAMANAMPANOHARANA (1976), ANDRIANOELIMANANA (2000) et BARBET-MASSIN et al. (2004).

Dans le scénario de simulation, la préparation de l'ensilage ainsi que le désilage sont supposés être effectués manuellement. Concernant les ventes de fourrages, nous supposons dans notre scénario qu'une filière, et donc qu'un marché existe, bien que ce ne soit pas encore le cas dans la Région Alaotra – Mangoro, sauf pour l'achat et la vente de bottes de pailles. Mais envisager cette perspective serait surtout intéressant dans le cas où il faudrait par exemple consacrer une partie des surfaces cultivées aux cultures en semis direct sur couverture végétale (SCV). Ainsi, les fourrages cultivés et vendus peuvent servir de plantes de couvertures vives (ou mortes) aux cultures en SCV. Dans notre scénario de simulation, 15% de la quantité totale produite en fourrage pérenne et 10% de la quantité totale produite en fourrage annuel sont vendus à un prix de 50 Ariary/Kg MS. Les pourcentages ont été choisis arbitrairement. Ce prix correspond en moyenne à l'achat d'1 kilogramme de fourrages verts dans la Région de Vakinankaratra (KASPRZYK, 2008). Au niveau de la stratégie de rotation culturale, la rotation légumineuse – graminée est privilégiée. Ainsi, les contraintes de rotation telles que la succession légumineuse annuelle (*Dolichos lablab* et *Vigna unguiculata*) – graminées (*Brachiaria brizantha*, *Zea mays*, *Oryza Sativa*) et la succession légumineuse annuelle – maïs ou maïs-ensilage sont définies d'entrée. De même pour la succession entre fourrages pérennes (*Brachiaria brizantha* – *Stylosanthes guianensis* ou vice-versa) (cf. Annexe 21 ; 21-11, p.xliv).

I – 2 – C Le parcellaire

La surface agricole utile est définie d'entrée dans le modèle « D-Algo ». La simulation est faite pour une exploitation avec une SAU de 20 ha. Nous supposons que la parcelle est en propriété et que l'exploitation ne pratique ni fermage, ni location de parcelles. A Madagascar, il n'y a ni politique, ni réglementation concernant l'allocation et la gestion des parcelles (jachère, etc.) pour les cultures vivrières et les cultures fourragères. Pour notre scénario de simulation, un pourcentage de 55% de la SAU est alloué aux cultures pérennes et le reste aux cultures annuelles. La jachère est incluse dans l'assolement en allouant entre 5% et 10% de la SAU. Concernant les contraintes climatiques, les besoins minimums en pluviosité de chaque espèce fourragère sont considérés, en prenant comme paramètre climatique celui de la Région Alaotra avec une pluviosité minimale annuelle de 99,96 mm/an.

I – 2 – D Le bâtiment d'élevage

Le troupeau est en stabulation libre. Pour ce scénario de simulation, nous avons utilisé les modèles de bâtiments d'élevage intégrés avec « D-Algo ». Comme nous avons introduit dans l'itinéraire technique l'ensilage de maïs, le coût du modèle de silo-couloir fourni avec « D-Algo » est automatiquement calculé après la phase d'optimisation, c'est-à-dire une fois que la surface maximale allouée à l'ensilage est connue. Le prix des matériaux de construction a été obtenu par enquête auprès des fournisseurs à Antananarivo au mois d'août 2011 (cf. Annexe N°21 ; 21-13, p.xlv)

I – 2 – E Les autres immobilisations

Les différents moyens de production investis dans le projet varient d'un système de production à l'autre. En effet, en plus des équipements laitiers (trayeurs, tank, etc.), il faut investir dans des machinismes agricoles comme le tracteur, le semoir, la charrue cover-crop, etc.. Les consommations en carburant des engins motorisés (motoculteur, tracteur) sont calculées à partir de la consommation en carburant par cheval et par heure. Pour les moteurs diesels, elle est de 0,11 l/cheval/heure (PIROT, 1998). La consommation en lubrifiant (vidanges de boîte, de pont et des systèmes hydrauliques) est estimée à partir de la consommation du moteur. En moyenne, elle est de 4,5 l/100 l de carburant pour les moteurs diesel (PIROT, 1998). Par ailleurs, le prix d'un litre de gasoil est estimé à 3.000 Ariary et celui du lubrifiant en vrac (huile de viscosité cinématique 30, 50) à 5.000 Ariary dans la zone de l'Alaotra, ce qui a permis d'estimer le prix horaire de l'utilisation d'un tracteur d'une puissance moyenne de 90 cv à 32.930 Ariary. Le prix d'achat des immobilisations a été obtenu par enquête statistique auprès des fournisseurs à Antananarivo au mois d'août 2011 (cf. Annexe 21 ; 21-14, p.xlvi).

I – 2 – F Subvention et financement des immobilisations

Le modèle « D-Algo » permet de tenir compte de la possibilité de contracter des emprunts à moyen et long terme sur les investissements en immobilisations. Il offre également la possibilité de percevoir des subventions sur les achats d'équipements et la construction des bâtiments d'élevage et du silo. Bien que des organismes bancaires (banques, institutions de micro – crédits, etc.) accordent ce type d'emprunt à Madagascar, l'emprunt suscite peu d'intérêt au niveau des agro-éleveurs locaux à cause des taux d'intérêt élevés et des conditions complexes de remboursement (gages, hypothèque, etc.) exigées par ces derniers. Toutefois, dans notre scénario, nous avons simulé en première année, un emprunt à long terme qui couvre 25% du montant total des immobilisations à rembourser sur 5 ans avec un taux d'intérêt annuel de 10%.

I – 2 – G Les autres charges d'exploitation

Les autres charges d'exploitation concernent toutes les charges fixes et variables non-rattachées aux parcelles fourragères, mais nécessaires au fonctionnement de l'exploitation. Elles concernent par exemple les produits vétérinaires, les frais d'élevage tels que le coût de l'insémination artificielle, les produits de nettoyage de l'équipement laitier (bocal, trayeur, bidons, tank, etc.), les charges sociales de tous les salariés permanents de l'exploitation, le coût d'entretien des bâtiments d'élevage et des matériels roulants (tracteur, motoculteur, etc.), l'eau et l'électricité, ainsi que les charges relatives aux formalités administratives liées aux ventes d'animaux (ristournes sur ventes, certificat d'origine sur ventes, passeport, etc.).

I – 2 – H Analyse financière

Pour le calcul de la rentabilité des investissements, beaucoup d'économistes utilisent un taux d'actualisation requis variant entre 8 et 12 % (ICRA, 2004). Dans le cas d'une exploitation bovine villageoise, ce taux est estimé à 10% pour les propriétaires de bovins (ITTY, et al., 1994). Un taux d'actualisation de 10% est fixé. L'impôt sur les bénéfices est également fixé à 10%.

Pour le système de production analysé dans notre scénario de simulation, deux sous-scénarios différents ont été considérés. Le premier sous-scénario est basé sur l'hypothèse qu'il n'y a aucune subvention sur les autres immobilisations et la construction des bâtiments d'élevage et du silo. Le deuxième sous-scénario assume que la construction des bâtiments d'élevage, du silo, ainsi que les achats d'équipements laitiers (tank à lait réfrigérant, trayeur électrique, etc.) et de machinismes agricoles (motoculteurs, tracteur, charrue, semoir, gyrobroyeur, etc.) sont subventionnés à hauteur de 25% de leurs coûts d'acquisition.

I - 3 Résultats des simulations

Selon les dix conditions minimum qu'un modèle biotechnique doit remplir (selon THORNTON et HERRERO en 2001), les 5 premières conditions, à savoir, les interactions entre les composants du système, les pratiques de gestion, la stratégie de gestion de l'utilisation des terres et des autres ressources, les contraintes en nutriments, la variabilité associée aux différentes conditions climatiques, ainsi que la huitième condition (traduire les résultats du modèle en support opérationnel pour la gestion saisonnière de l'exploitation), peuvent être appréciées à partir des résultats de l'assolement et de l'analyse de sensibilité fournie par le solveur.

I – 3 – A Optimisation de l'assolement

Nous pouvons dire que les résultats de l'assolement obtenus avec « D-Algo » reproduisent bien le choix stratégique sur les plans de la production et de l'utilisation globale des parcelles (rotation culturale, jachère, etc.). En effet, les résultats de l'assolement reflètent bien la stratégie de rotation culturale entre légumineuse pérenne (*Stylosanthes guianensis*) et graminée pérenne (*Brachiaria brizantha*) (cf. Tableau 15). Il en est de même entre le *Vigna unguiculata* (1,76 ha) et l'association *Oryza Sativa* – jachère (0,08 + 0,97 ha) (cf. Tableau 15). Par contre, la rotation légumineuse annuelle – maïs et légumineuse annuelle – maïs-ensilage n'ont pas été prises en compte par le solveur. Ainsi, le maïs-fourrage et le maïs-ensilage se succède entre eux.

Tableau 15: Plan d'assolement simulé avec « D-Algo » pour une exploitation pour 41 vaches (SAU = 20 ha).

Fourrages	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
<i>Brachiaria brizantha (ha)</i>	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37
<i>Stylosanthes guianensis (ha)</i>	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37
<i>Lablab purpureus (ha)</i>	2,67	2,67	2,67	2,67	2,67	2,67	2,67	2,67	2,67	2,67
<i>Oryza Sativa (ha)</i>	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
<i>Vigna unguiculata (ha)</i>	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76
<i>Zea mays (ha)</i>	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63
<i>Zea mays_ensilage (ha)</i>	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63
Jachère (ha)	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97

Nous observons que 53% des parcelles cultivées sont affectés aux cultures pérennes (*Brachiaria Brizantha*, *Stylosanthes Guianensis*). Or, nous avons imposé une contrainte d'allocation du sol d'au moins 55% pour les fourrages pérennes. Ceci s'explique par le fait que le solveur privilégie la succession légumineuse pérenne – graminée pérenne ou vice-versa car il est plus facile de gérer les parcelles en faisant la rotation entre cultures pérennes ou entre cultures annuels à cause de leur durée de vie semblable. « D-Algo » reproduisent d'une manière logique l'utilisation globale des parcelles pour les cultures en tenant compte de leur historique. En effet, tant que la durée de vie des parcelles n'est pas expirée, l'algorithme implémenté intègre

automatiquement des contraintes d'allocation du sol pour chaque espèce fourragère l'année suivante, pour la transférer d'une année à l'autre. Les résultats montrent clairement que les contraintes de transfert des cultures précédentes influent sur les résultats de l'année suivante. Ce qui reflète l'aspect multi-périodique et récursif du résultat obtenu.

Les simulations effectuées montrent le niveau de réalisme obtenu notamment sur les contraintes d'alimentation. La planification simultanée de fourrages riches (légumineuses) et pauvres (graminées annuelles) en valeurs nutritives entraîne une allocation de surface plus élevée pour les fourrages riches en valeurs nutritives et digestibles. La surface allouée par le solveur à l'*Oryza Sativa* est faible (0,08 ha), probablement à cause de sa valeur alimentaire médiocre et de son encombrement élevé (cf. Tableau 15, p.148). En effet, les échantillons récoltés pour la simulation ont été prélevés au stade pailleux et donc à un stade de lignification très avancée. Nous remarquons également que la superficie allouée au *Zea mays* (fourrage, ensilage) est faible par rapport aux deux légumineuses annuelles (*Vigna unguiculata*, *Lablab purpureus*) (cf. Tableau 15, p.148). Le *Lablab purpureus* se succède également à lui-même étant donné qu'il est plus productif et plus riche en valeur nutritive par rapport à *Vigna unguiculata* (cf. Tableau 15, p.148).

Rappelons que les contraintes d'occupations du sol, de rotation culturale ou encore d'alimentation ne sont pas les seules contraintes d'optimisation qui influencent la solution proposée par le solveur. Nous notons aussi d'autres contraintes d'optimisation comme les besoins en mains d'œuvre ou en fertilisations des cultures.

1 – 3 – B Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité fournit des informations sur la stabilité d'une solution optimale. Le modèle « D-Algo » fournit des informations de sensibilité (les limites de la fonction objectif et la valeur duale de chaque contrainte) pour chaque année de simulation. Les valeurs From et Till donnent les bornes entre lesquelles chaque coefficient objectif (ici, la marge brute) peut varier sans que ne change la solution optimale (asseulement). A titre d'exemple, l'analyse de sensibilité en première année de simulation pour une exploitation élevant 41 vaches (SAU = 20 ha) montre que le résultat de l'optimisation obtenue est relativement stable quelles que soient les activités fourragères considérées (cf. Tableau 16).

Tableau 16: Exemple d'analyse de sensibilité (limites de la fonction objective) obtenue en première année de simulation avec « D-Algo », pour une exploitation pour 41 vaches (SAU = 20 ha).

Variables*	From ...	Till ...	From Value ...	Till value ...
SCI_Brachiaria_brizantha_ha	- infini	412 159,06	- infini	412 159,06
SCI_Stylosanthes_guianensis_ha	-516 706,60	412 159,06	- infini	412 159,06
SCI_Lablab_purpureus_ha	-9 005 596,13	-5 213 033,36	- infini	-5 213 033,36
SCI_Oryza_Sativa_ha	- infini	-3 687 232,00	- infini	-3 687 232,00
SCI_Vigna_unguiculata_ha	- infini	-5 200 938,25	- infini	-5 200 938,25
SCI_Zea_mays_ha	-7 762 251,30	-1 240 437,15	- infini	-1 240 437,15
SCI_Zea_mays_ensilage_ha	-31 405 310,87	+ infini	- infini	+ infini
Ventes_Brachiaria_brizantha_ha	- infini	2 473 067,98	- infini	2 473 067,98
Ventes_Stylosanthes_guianensis_ha	-2 750 504,07	2 513 067,98	- infini	2 513 067,98
Ventes_Lablab_purpureus_ha	-29 780 020,89	4 353 044,07	- infini	4 353 044,07
Ventes_Oryza_Sativa_ha	- infini	19 184 256,36	- infini	19 184 256,36
Ventes_Vigna_unguiculata_ha	- infini	4 364 700,06	- infini	4 364 700,06
Ventes_Zea_mays_ha	-18 299 617,39	40 396 709,94	- infini	40 396 709,94
Ventes_Zea_mays_ensilage_ha	- infini	14 580 227,26	0	14 580 227,26
J	- infini	222 635,47	- infini	222 635,47

* SCI_espèces_fourragères_ha : espèces fourragères produites et intra-consommées ;
Ventes_espèces_fourragères_ha : espèces fourragères produites et vendues ; J : surface allouée à la jachère.

En effet, si nous prenons l'exemple de la culture de *Lablab_purpureus* – fourrage intra-consommé dans l'exploitation (SCI_Lablab_purpureus_ha), le coefficient objectif de cette activité est de -15.387.652,48 Ariary/ha et la valeur de la variable obtenue après optimisation est de 2,67 ha. Les informations de sensibilité montrent que tant que la valeur du coefficient objectif varie entre -9 005 596,13 et -5 213 033,36 Ariary/ha (cf. Tableau 16), alors la surface allouée à cette culture ne changera pas, c'est-à-dire 2,67 ha. Par contre, si la valeur du coefficient objectif de cette culture se trouve au-delà de -5 213 033,36 Ariary, alors la solution optimale va changer. Si nous prenons l'exemple de la vente d'ensilage de maïs (Ventes_Zea_mays_ensilage_ha), la valeur de cette variable est 0, c'est-à-dire que la solution a été rejetée par le solveur. Les informations sur la sensibilité nous indiquent ici que cette activité rentrera dans la solution optimale à condition que la valeur de son coefficient objectif soit supérieure à 14.580.227,26 Ariary/ha. En effet, tant que le coefficient objectif reste à cette limite, la solution reste à 0 ha (FromValue ...).

Ce qu'il faut signaler ici c'est que l'intervalle de variation du coefficient objectif de chaque activité fourragère est très large. Cela veut dire que la solution optimale obtenue et les activités fourragères sont stables.

Les informations sur les valeurs duales fournissent également des informations très importantes pour améliorer les résultats de l'optimisation. Comme nous l'avons dit dans le chapitre précédent, la valeur duale permet d'identifier les actions à entreprendre au point de vue technique, gestionnaire, etc. pour améliorer le résultat de l'exploitation. La valeur duale la plus élevée dans notre simulation est celle de la contrainte relative à la surface allouée au *Lablab_purpureus* produits et intra-consommés (7.161.820,35 Ariary/ha), suivie de la surface allouée au *Zea_mays* produits et intra-consommés (7.125.264,79 Ariary/ha) et de la surface allouée à *Oryza Sativa* (7.025.709,23 Ariary/ha). En d'autres termes, il n'est pas recommandé de produire et de vendre du *Lablab_purpureus* à l'extérieur de l'exploitation. Une amélioration de la qualité (valeurs alimentaires) et de la quantité (rendements, etc.) du *Lablab_purpureus* pourrait donc améliorer substantiellement la valeur de la fonction objectif.

Dans notre simulation, les stratégies de rotation influent peu sur la valeur de la fonction objectif (valeur égale à 0 pour toutes les rotations culturales sauf pour la rotation *Vigna_unguiculata* - *Brachiaria_brizantha* où elle est de 1.252.692,65 Ariary/ha). Toutefois, si la valeur duale d'une contrainte de rotation est élevée, alors nous pourrions tester différentes stratégies de rotation pour voir l'influence (positive ou négative) qui pourrait se produire au niveau des résultats sur la fonction objective.

En résumé, les informations apportées par les analyses de sensibilité sont très utiles pour prendre des décisions sur l'organisation interne et externe de l'exploitation. Le modèle « D-Algo » facilite cette prise de décisions et permet d'apporter des éléments de réflexion sur la planification des activités à entreprendre dans le cas où le projet serait mis en œuvre.

Si nous reprenons les dix conditions minimums qu'un modèle biotechnique doit satisfaire (THORNTON & HERRERO, 2001), les conditions 6 et 7 (fournir un aperçu sur les extrants, permettre la possibilité d'étudier les effets à moyen et long – terme des stratégies analysées) peuvent être estimées à partir de la rentabilité des investissements et de l'apport du modèle aux choix d'investissements.

I – 3 – C La rentabilité des investissements

Les résultats montrent que les investissements sont rentables qu'ils soient subventionnés ou non (cf. Tableau 17).

Tableau 17: Rentabilité des investissements réalisés en première année de simulation.

Subvention	Investissement (Ariary)	VAN (Ariary)	TIR (%)
Oui	772.485.383,86	327.250.380,35	16,68
Non		76.036.499,48	10,77

En analysant de près les dépenses d'investissement, nous constatons que le bâtiment d'élevage constitue 38,88% (300.339.585 Ariary) de l'investissement total, le silo à ensilage 11,77% (90.883.890,45 Ariary) et les autres immobilisations telles que les équipements laitiers, etc., 28,97% (223.776.552 Ariary). Aussi, subventionner à hauteur de 25% l'acquisition des immobilisations permet d'améliorer respectivement de 61% et de 54 % la VAN et le TIR du projet. Le point le plus important à considérer ici serait donc la cohérence obtenue au niveau du résultat. En effet, nous constatons qu'en subventionnant massivement les investissements, le résultat obtenu est significatif. Ceci s'explique par le fait que la parité de la devise malgache est trop faible. En effet, dans notre simulation, le prix des produits de l'exploitation tels que le lait (1.200 Ariary/litre) ou le bétail (3.000.000 Ariary pour une vache par exemple) est trop bas par rapport aux dépenses d'investissement, qui se focalisent majoritairement sur l'achat de produits importés tels que les matériaux de construction pour le bâtiment d'élevage ou encore les équipements laitiers (tank réfrigérant, etc.).

1 – 3 – D Apport du modèle « D-Algo » dans le choix des investissements

La rentabilité des investissements dépend essentiellement de l'importance de l'investissement effectué pour mettre en œuvre le projet et des flux nets de trésorerie générés par le projet. En réalité, baser le choix d'un projet seulement par rapport à la taille de l'exploitation n'est pas judicieux et ceci quel que soit l'indicateur choisi (VAN ou TIR). A titre d'exemple, nous avons comparé par simulation quatre types d'exploitation différents par la taille (SAU variant entre 10 et 20 ha), le nombre de cheptel (entre 10 et 40 têtes), ainsi que le niveau d'investissement effectué. Le premier niveau d'intensification suppose que toutes les opérations culturales sont entièrement motorisées en utilisant un tracteur de puissance moyenne de 90 chevaux et en recourant principalement à des salariés permanents de l'exploitation appuyés par des mains d'œuvre temporaires si nécessaire (cas des exploitations pour 30 et 40 vaches laitières). Le deuxième niveau suppose que nous avons un système mixte en combinant la motorisation (avec un motoculteur de moins de 30 chevaux) et la culture manuelle, en recourant à des mains d'œuvre permanentes et temporaires à l'exploitation (cas des exploitations pour 10 et 20 vaches laitières). L'utilisation du motoculteur se limite uniquement à la phase de préparation du sol (labour, Epandage d'engrais, hersage), le semis et le transport d'intrant agricole comme le fumier. Le reste des opérations (sarclage, coupe, etc.) est entièrement manuel. Le détail des immobilisations pour ces deux niveaux d'intensification est reporté en annexe (cf. Annexe N°21 ; 21-14, p.xlvi).

L'analyse de la rentabilité des investissements obtenue démontre quelques paradoxes. Si nous basons le critère de choix d'un projet par rapport à la taille de l'exploitation et ceci quel que soit le niveau d'intensification, nous trouvons que les valeurs fournies par la VAN et le TIR sont en contradictions. En effet, le critère de la VAN donne la préférence à l'exploitation avec une SAU de 20 ha et élevant un troupeau de 40 vaches laitières (VAN = 314.769.544,85 Ariary ; TIR = 16,46) (cf. Tableau 18). Tandis que celui du TIR donne la préférence à l'exploitation avec une SAU de 10 ha et élevant un troupeau de 20 vaches laitières (VAN = 212.093.535,24 Ariary ; TIR=18,22) (cf. Tableau 18). Cette situation s'observe souvent quand le taux de rentabilité de deux projets est voisin l'un de l'autre.

Tableau 18 : Rentabilité des investissements par niveau d'intensification du système fourrager. Résultats obtenus avec « D-Algo ».

SAU (ha)	Nombre de vaches	Production de lait (Kg) sur 10 ans	Investissement (Ariary)	VAN (Ariary)	TIR	VAN (S)* (Ariary)	TIR (S)*
10	10	584 201,75 Kg	245.265.513,92	-38 040 388,81	7,17	45 390 520,57	12,37
10	20	1 227 008,71 Kg	421.758.340,92	69 961 014,81	11,78	212 093 535,24	18,22
15	30	1 809 360,11 Kg	581.257.088,76	-44 680 383,03	8,24	145 072 510,55	13,64
20	40	2 336 807,00 Kg	772.485.383,86	63.555.663,98	10,55	314.769.544,85	16,46

* VAN (S) et TIR (S) : valeur de la VAN et TIR si certaines immobilisations sont subventionnées à hauteur de 25% du coût de fabrication ou d'acquisition.

Si nous considérons la VAN comme critère pour faire le choix entre deux projets, alors l'attention devrait se focaliser sur l'objectif de production et donc en terme de volume. Les résultats de la simulation

montrent que le système de production dont l'investissement est le plus élevé possède également le volume de production le plus élevé (2.395.412,21 Kg de lait sur 10 ans), c'est-à-dire l'exploitation pour 40 vaches laitières. C'est aussi le système de production qui génère le plus de bénéfice car c'est le système qui a la VAN la plus élevée (cf. Tableau 18, p.151). Cette logique coule de sens car si on veut produire plus, il faut investir plus dans les moyens et les infrastructures de production.

Remarquons que, ici, la production de lait potentielle (PLP) n'est qu'une illustration pour matérialiser la fluctuation du volume de production en fonction de la taille de l'exploitation et du nombre de vache composant le cheptel. D'autres sources de recettes existent comme les ventes de fourrages, de fumiers de ferme, de vaches reformées ou encore d'animaux en croissance, etc..

Le TIR est un bon indicateur de rentabilité des investissements quand il s'agit de prendre des décisions sur l'organisation interne et sur le choix du système de production. A titre d'exemple, dans notre simulation, nous observons que l'investissement n'est pas rentable dans le cas des exploitations avec une SAU respective de 10 et 15 ha, élevant chacune 10 et 30 vaches laitières (cf. Tableau 18, p.151). Le TIR est proche du coût d'opportunité du capital (fixé à 10 %) pour ces deux exploitations. Ces observations sont probablement dues au poids de l'investissement propre à chaque type de système de production simulé. En effet, pour l'exploitation de 10 ha de SAU, élevant 10 vaches laitières, nous constatons que le coût de construction du bâtiments d'élevage et du silo à ensilage représente respectivement 40,93 et 25,99 % de l'investissement total (cf. Tableau 19). Pour l'exploitation de 15 ha de SAU, élevant 30 vaches laitières, ces coûts représentent 45 et 11 % de l'investissement total (cf. Tableau 19). Ces coûts sont très lourds par rapport au bénéfice dégagé par l'exploitation. La décision de subventionner l'achat des immobilisations et la construction des bâtiments d'élevage améliorerait nettement la rentabilité (cf. Tableau 18, p.151). Si l'on ne subventionne pas le coût de construction de ces infrastructures, un autre choix serait de construire des bâtiments et des parcs avec des matériaux de construction rencontrés localement (bois rond, toiture en chaumes ou en tôles, etc.), c'est-à-dire des matériaux moins sophistiqués et moins chers.

Tableau 19 : Contribution de chaque immobilisation dans l'investissement total (en Ariary) pour le scénario de simulation.

SAU (ha)	10,00	10,00	15,00	20,00
Nombres de vaches	10,00	20,00	30,00	40,00
Investissement Total (Ariary)	245 265 513,92	421 758 340,92	581 257 088,76	772 485 383,86
Bâtiment d'élevage	100 376 913,00	237 289 840,00	261 925 158,00	300 339 585,00
% Bâtiment d'élevage	40,93	56,26	45,06	38,88
Silo – couloir	63 755 097,02	63 755 097,02	63 755 097,02	90 883 890,45
% Silo – couloir	25,99	15,12	10,97	11,77
Autres immobilisations	38 240 474,00	44 820 374,00	140 164 563,00	223 776 552,00
% Autres Immobilisations	15,59	10,63	24,11	28,97
Autres **	42 893 029,90	75 893 029,90	115 412 270,74	157 485 356,41
% Autres **	17,49	17,99	19,86	20,39

Notons que le choix d'investissement sur les équipements (machinisme agricole, laitier, etc.) influe également sur la rentabilité du système. Si nous reprenons le cas des exploitations élevant 30 et 40 vaches laitières, nous remarquons que les « autres immobilisations » représentent respectivement 24,11 et 28,97 % de l'investissement total. Ce qui est élevé par rapport aux autres systèmes simulés (exploitations élevant 10 et 20 vaches laitières). Ceci s'explique par le fait que nous avons investi dans un tracteur de moyenne puissance de 90 chevaux pour ces deux systèmes. Alors que pour les autres, nous avons investi dans un motoculteur de faible puissance qui coûte moins cher. Toute proportion gardée, nous constatons que pour l'exploitation élevant 30 vaches laitières, ce niveau d'investissement est assez élevé comparativement à celui de 40 vaches laitières, alors

que le volume de production ne suit pas la même logique. Les mêmes faits sont également observés entre l'exploitation élevant 10 et 20 vaches laitières. Remarquons que, ici, l'achat d'un tracteur ou d'un motoculteur n'est qu'une illustration pour comprendre le choix d'investissement sur les immobilisations.

Ces résultats doivent être considérés avec prudence. Si la surface cultivable n'est pas limitée et si le volume de capitaux disponibles le permet, la meilleure décision à prendre en compte serait d'investir complètement dans une exploitation pour 40 vaches laitières étant donné que c'est le plus rentable. Par contre en cas de décision contraire, il vaudrait mieux choisir une formule plus adaptée en raisonnant en termes de coûts (acquisition d'équipement, coût d'exploitation) et réduire les dépenses d'investissement et d'exploitation des biens investis. Ainsi, dans le cas des petites exploitations avec une SAU de moins de 10 ha, la leçon à tirer serait qu'il faudrait raisonner avec prudence les formules les plus appropriées en termes d'investissement pour atteindre les objectifs de production et pour satisfaire les exigences de production et de superficie à mettre en culture.

II - Discussion générale

L'objectif de cette recherche était de mettre à la disposition des différents acteurs de développement, œuvrant dans le domaine de l'élevage laitier, un outil d'aide à la décision permettant de faire le choix optimal sur la stratégie de production et sur la rentabilité des investissements dans ce secteur. Cet outil devrait permettre d'apporter des éléments de réflexion sur l'orientation technique, socio-économique, politique et organisationnelle dans le processus d'investissement dans ce secteur.

Pour atteindre cet objectif, nous avons avancé comme solution possible : 1) la modélisation informatique du système d'élevage de bovins laitiers, 2) en adoptant deux approches théoriques : la théorie de « l'utilité espérée » et de la « rationalité limitée ». Le modèle « D-Algo » a été modélisé et programmé informatiquement suivant le formalisme « orienté-objet ». La démarche de conception et de modélisation orienté-objet facilite l'implémentation informatique du système d'élevage de bovins laitiers en offrant une représentation modulaire de celui-ci. Toutefois, l'approche adoptée ne met pas forcément en évidence en quoi le modèle relève de la théorie de « l'utilité espérée » et de la « rationalité limitée ».

II – 1 Les approches théoriques du modèle D-Algo

La validation conceptuelle effectuée précédemment a montré que le modèle informatique « D-Algo » est fonctionnel et opérationnel. Nous pouvons dire que la première hypothèse de recherche est vérifiée. En effet, avec un jeu minimum de données, nous avons pu tester quelques scénarii formulés à partir de problèmes fréquemment rencontrés en élevage de bovins laitiers, et apporter des éléments de réflexion basés sur divers indicateurs économétriques fournis par D-Algo. Ces indicateurs facilitent effectivement la prise de décision sur l'orientation technique, socio-économique, politique et organisationnelle à adopter. Ceci, en un minimum de temps et sans avoir à dépenser de l'argent étant donné qu'il n'a pas été nécessaire de tester les solutions obtenues sur terrain.

Quand on parle de théorie de l'« utilité espérée » et de la « rationalité limitée », la décision se repose généralement sur l'utilisation d'une fonction d'utilité, donc d'une approche mathématique de la décision. La principale caractéristique de ces deux approches théoriques est l'« imperfection de l'information ». La « théorie de l'utilité espérée » repose sur la recherche de solution optimale, d'où la fonction d'utilité. Ceci, tout en sachant que le décideur ne possède qu'une connaissance limitée et imparfaite de la situation. C'est la « rationalité limitée ». Le modèle « D-Algo » maximise une fonction d'utilité qui est la marge brute liée aux activités fourragères et aux troupeaux. Cette fonction d'utilité permet par la suite de calculer divers indicateurs économétriques : la recette nette d'exploitation, la valeur actuelle nette et le taux de rentabilité interne des

investissements. Rappelons que ces fonctions de calculs ont été implémentées en tant que méthode de classe dans notre approche « orienté-objet ». Vu sous cette perspective, l'approche adoptée a permis d'atteindre l'objectif principal de la recherche. Le modèle D-Algo satisfait également au paradigme de l'« utilité espérée ». Selon l'approche de l'« utilité espérée, la décision prise doit être le résultat d'un choix comparatif entre les diverses solutions possibles » (MONTMAIN, et al., 2003). La validation conceptuelle effectuée précédemment a permis de tester effectivement cette théorie. Nous avons pu comparer différentes configurations d'une exploitation-type basées sur le niveau d'intensification du système fourrager. Le choix optimal sur la stratégie de production et sur la rentabilité des investissements est basé sur les indicateurs économétriques fournis par D-Algo.

Selon MONTMAIN et al. (2003), « les limitations dans la connaissance des faits et hypothèses proviennent des contraintes de l'organisation qui sélectionne ou favorise tel ou tel scénario en fonction des intérêts du décideur ». D'où le terme de « rationalité limitée ». Dans quelle mesure la modélisation et le fondement théorique de D-Algo sont-ils confrontés à cette imperfection de l'information ?

Du fait de l'inexistence de cadre politique, juridique et de structure d'encadrement technique formelle sur le développement de l'élevage laitier à Madagascar, nous ne disposons pas d'éléments sur lesquels nous aurions pu baser notre modèle afin que celui-ci réponde à un objectif précis de développement du secteur laitier. Avant les événements de 2009, ce sont les grandes entreprises laitières de l'île comme TIKO qui imposaient leurs propres règles de jeu dans le secteur du développement de la filière. A cause de la situation politique et économique actuelle que ce soit au niveau local ou mondial, la filière laitière est morose et désorganisée.

Toutes ces lacunes dans le système que nous avons à modéliser nous a conduit à concevoir un outil très générique, et par conséquent, à avancer beaucoup d'hypothèses de travail pour développer chaque module de classes composant le modèle informatique (système fourrager, troupeau, etc.) dans le but d'obtenir autant que possible un outil qui pourrait s'adapter aux diverses situations rencontrées localement. A titre d'exemple, lors de la modélisation du système d'alimentation, nous avons dû avancer comme hypothèse que les espèces fourragères à conserver peuvent être annuelles ou pérennes, tempérées ou tropicales. Ceci reflète bien l'inexistence de cadre politique et de structure d'encadrement technique formelle sur le développement de l'élevage laitier à Madagascar. En effet, à l'exemple de l'île de La Réunion, la politique de développement laitière locale préconise l'utilisation de prairie de graminées tempérées (dactyle, raygrass, brome, etc.) pour la fabrication d'ensilage, plutôt que de graminées tropicales (kikuyu, maïs-fourrage, etc.). Un autre exemple serait la modélisation du troupeau. L'inexistence de politique et de programme d'amélioration génétique des bovins laitiers élevés à Madagascar nous a obligé à modéliser deux classes d'animaux, basées sur leur potentiel génétique, c'est-à-dire une classe pour les vaches importées à haut niveau de production et à croissance rapide et une classe pour les vaches améliorées à production limitée. Ceci dans le but d'avoir un outil le plus générique possible pour pouvoir représenter la diversité des races laitières rencontrées à Madagascar.

Il en est de même pour le développement des scénarii de simulation et pour la validation du modèle. L'approche aurait pu être meilleure si, pour l'élaboration des scénarii, nous avions pu nous référer à des problématiques concrètes de développement observées au niveau d'un programme national ou d'un secteur formel de développement de l'élevage laitier. Aussi, nous avons dû nous contenter de développer des scénarii fictifs pour valider le modèle au niveau conceptuel afin de s'assurer que le programme informatique fonctionne bien dans son ensemble. D'où le concept de « rationalité limitée et procédurale » héritées de SIMON en 1947 (SIMON, 1947) et de « rationalité adaptative » de CYERT et MARCH en 1963 (CYERT & MARCH, 1963).

D'un autre côté, ces limites pourraient être dépassées dans des travaux ultérieurs parce que le modèle « D-Algo » pourrait justement trouver son utilité dans la mise en place de politiques régionales et nationales de développement de l'élevage laitier. Pour cela, il faudrait que les objectifs soient bien définis, clairs et précis. A l'heure actuelle, « D-Algo » pourra apporter des éléments de réflexion sur la structure type d'une exploitation laitière à promouvoir dans l'île. Ces éléments de réflexion serviront par la suite à développer un modèle plus complexe prenant en compte la structure du marché et l'évolution globale de la filière lait à l'échelle régionale

et nationale. Pour cela, l'hypothèse fréquemment avancée et la plus utilisée est de considérer que la fonction objectif du modèle agrégé serait la somme pondérée des fonctions objectives des modèles d'exploitation individuelles (LOUHICHI, 2004 ; LOUHICHI et *al.*, 2005 ; FLICHMAN et *al.*, 2006 ; NIDUMOLU, 2007).

II – 2 Apport du modèle au processus décisionnel

Conçu initialement en tant qu'outil d'analyse prospective dans le cadre d'une évaluation *ex-ante*, « D-Algo » possède également une généricité et une certaine souplesse pour être utilisé en tant qu'outil de conseil en ferme pour appuyer le processus décisionnel de l'éleveur dans le choix des investissements. En tant que modèle bioéconomique, « D-Algo » intègre des relations entre système de production animal et système de production fourragère. Il comporte des modules économiques nécessaires pour inventorier et quantifier toutes les ressources indispensables (financières, humaines, matérielles, etc.) au fonctionnement du système. Le modèle donne une représentation virtuelle du système dans son ensemble, de son évolution dans le temps et dans l'espace, à partir d'un plan d'assolement généré par optimisation linéaire et à partir d'indicateurs économiques qui permettent de comparer la dépense initiale à la valeur actuelle des recettes nettes attendues de l'investissement, le tout sur un horizon de planification de dix ans. Vue sous cette perspective, la première hypothèse de recherche (« *les prises de décisions sur la recherche d'une organisation et d'un système de production plus rémunérateur nécessitent une modélisation informatique du système d'élevage de bovins laitiers* ») est validée.

L'objectif majeur a été de s'assurer qu'il y ait une bonne cohérence entre la stratégie de gestion (mode d'allocation du sol, rotation culturale, gestion du troupeau, etc.) définie en entrée du modèle et les solutions simulées. « D-Algo » prend en compte toutes les contraintes de gestion imposées sur l'horizon de planification et de simulation, et les intègre dans le calcul des solutions proposées. La stratégie de gestion est simulée d'une manière cohérente sur le plan spatio-temporel, notamment au niveau de l'établissement des plans d'activité, de l'adéquation entre besoins du troupeau et aliments proposés, de l'organisation du travail dans l'exploitation c'est-à-dire de l'adéquation entre besoins et disponibilités en ressources (main d'œuvre, équipement, fertilisations, etc.). Mais l'un des points forts de « D-Algo » est sa capacité à fournir une analyse de sensibilité exhaustive, permettant d'identifier les interventions prioritaires au point de vue technique et organisationnel pour améliorer la rentabilité du projet. L'analyse de sensibilité permet aussi d'apprécier la stabilité du projet dans son ensemble, ce qui procure des avantages indéniables quand on veut simuler plusieurs configurations possibles d'une exploitation laitière, dans la recherche d'une organisation et d'un système de production adaptés aux contextes régionaux et nationaux. Les apports de la modélisation analytique ainsi que l'approche de la conception orientée objet présentent des avantages certains dans la structure de « D-Algo », dans la mesure où le modèle est très facile à paramétrer dans son ensemble.

Malgré ces avantages, le modèle D-Algo n'est pas exempt de limites au niveau conceptuel.

III - Limites et perspectives du modèle au niveau conceptuel

III - 1 La surestimation des solutions

Les solutions proposées par le modèle d'optimisation sont surestimées à cause de la méthode mathématique utilisée (optimisation linéaire) et du modèle utilisé pour la production laitière.

III – 2 Prendre en compte les risques aléatoires

D'abord pour la méthode utilisée, l'optimisation linéaire est une méthode mathématique déterministe. Or, les activités agro-pastorales sont toujours soumises à des risques liés à un grand nombre de facteurs d'ordre climatique, biologique, économique, ou encore liés aux techniques de productions. A titre

d'exemple, nous pouvons citer les variations de la production dues aux variations de rendements causées par les cataclysmes naturels (cyclones, etc.) et par les fortes mortalités causées par les maladies, et, à production constante, les variations de profits dues aux fluctuations des prix du bétail et des matières premières en fonction des saisons ou des difficultés de transports, aux difficultés de mise sur le marché et d'écoulement des produits, etc.. L'aversion au risque des fermiers explique pourquoi ils n'intensifient pas leur production, pourquoi ils diversifient leurs activités et comment ils choisissent parmi plusieurs activités alternatives (CHONG et YANAGIDA, 1981 ; BOUSSARD, 1999 ; WEINTRAUB et al., 2001). Pour faire face aux risques, les agro-éleveurs doivent inclure dans leurs décisions la gestion des risques. Selon MONTMAIN et al. (2003), le management du risque est l'activité de pilotage de la décision en situation complexe et « *il se fonde sur l'expertise (prudence) pour la gestion des risques (prévention) et s'assure du respect des exigences sociétales (précaution)* ».

Une des possibilités d'amélioration de « D- Algo » serait donc l'intégration du risque dans les problèmes d'optimisation pour apporter plus de réalisme aux solutions obtenues. Plusieurs techniques de programmation du risque en agriculture ont été développées après les études de FREUND en 1964. En général, elles se basent sur l'optimisation linéaire d'où leur dénomination commune de « Programmation linéaire du risque ». Elles consistent à optimiser une fonction d'utilité linéaire (ou quelque fois non-linéaire), soumises à des contraintes généralement linéaires. Quelles que soient les méthodes, des contraintes additionnelles sont introduites dans le modèle pour pénaliser les activités les plus risquées. Parmi ces méthodes, notre choix s'est principalement porté sur le Target MOTAD (TAUER, 1983), dont la forme générale est :

$$\begin{aligned} \text{Max } C(Z) &= \sum_{j=1}^n E(c_j)x_j \\ \text{Sous les contraintes : } \sum_{j=1}^n a_{i,j} x_j &\leq b_i \quad (i = 1, \dots, m) \\ \sum_{j=1}^n c_{k,j} x_j + Dev_k &\geq T \quad (k = 1, \dots, s) \\ \sum_{k=1}^s p_k Dev_k &\leq \lambda \quad (0 \leq \lambda \leq M) \end{aligned}$$

Avec : $x_j, Dev_k \geq 0$ (Pour tout j,k)

$C(Z)$: revenus espérés totaux ;

$E(C_j)$: revenu espéré pour l'activité j ;

x_j : niveau de la j^{ème} activité ;

$a_{i,j}$: coefficients de la matrice de contraintes ;

b_i : variables auxiliaires ;

$c_{k,j}$: revenu de l'activité j pour le scénario k ;

T : niveau de revenu cible ou niveau de sécurité de revenu ;

Dev_k : la déviation négative à l'objectif de revenu cible T du scénario k

p_k : probabilité d'occurrence du scénario k (les scénarios sont supposés équiprobables).

λ : coefficient d'aversion aux risques, compris entre 0 et M (où M est un grand nombre).

Le « Target MOTAD » ou « MOTAD ciblé » a été développé par TAUER en 1983. Il incorpore un « niveau de sécurité de revenu » tout en acceptant certaines pertes limitées, caractérisées par la mesure des déviations négatives à partir du niveau de sécurité. Le « revenu cible » ou « niveau de sécurité de revenu » est le niveau de « revenu minimum de survie » ou encore « un revenu seuil que se fixe le producteur pour éviter toute catastrophe » (ALARY, et al., 2005). La forme générale du Target MOTAD maximise son revenu espéré sous la contrainte de ne pas dépasser un maximum de déviations par rapport à l'objectif de revenu, qu'il définit à l'avance (ALARY et al., 2005). Le Target MOTAD présente l'avantage d'être simple d'utilisation et de donner des solutions dominantes au premier et second degré de stochasticité (TAUER, 1983). Cette méthode dont la

formalisation mathématique a l'avantage de maintenir la linéarité, peut utiliser des méthodes de résolution classique de l'optimisation linéaire. Le Target MOTAD a toujours été qualifié comme faisant partie des modèles appelés « safety-first » qui présente l'avantage de prioriser et de satisfaire d'abord la question de la « sécurité » dans l'organisation des activités, avant de maximiser le profit avec ce même plan de sécurité. A titre d'exemples, nous pouvons citer le cas d'un exploitant qui veut fixer un revenu minimum de survie pour couvrir au moins le besoin familial ou encore celui d'un exploitant qui veut accroître son exploitation et maximiser son flux net de trésorerie mais qui veut avant tout éviter des flux nets de trésorerie négatifs quelle que soit l'année (PENG, 1997).

III – 3 Rendre plus réaliste le modèle de production laitière

Concernant le modèle utilisé pour estimer la production laitière, l'obstacle majeur pour le développement d'un modèle plus pertinent de l'évolution de la production laitière au niveau des races élevées localement est la trop grande hétérogénéité des situations, due à l'inexistence de programmes de sélection et de gestion des capitaux génétiques des ruminants au niveau national. En effet, à cause de problèmes génétiques comme l'effet de consanguinité et la trop grande diversité des races élevées, les productions de lait varient énormément d'une région à l'autre, d'une exploitation à l'autre, et même au sein d'une même exploitation et ceci même si les animaux sont élevés dans les mêmes conditions (quantité et qualité des rations distribuées, normes d'hygiène, etc.). L'amélioration génétique des troupeaux laitiers est assurée uniquement par l'insémination artificielle qui coûte trois fois plus chère que la monte naturelle (KASPRZYK, 2008).

Pour « D-Algo », le meilleur moyen d'intégrer des modèles mathématiques de production laitière, tenant compte des spécificités locales et régionales, serait d'ajouter un module supplémentaire de calcul statistique destiné à recueillir des échantillons de données obtenus à partir d'enquêtes sur terrain pendant toute la durée d'un cycle de lactation normal. Eventuellement, nous pourrions y inclure des algorithmes de calcul de régression (linéaire, logarithmique, exponentielle, quadratique, etc.) dans le but de prédire une équation de régression qui traduirait plus les spécificités régionales en matière de production de lait, en fonction du type de bovins utilisés et de leurs caractéristiques (zootechniques, etc.). L'utilisateur pourrait choisir entre utiliser la production potentielle de lait ou utiliser le module statistique de régression. Toutefois, ce dernier point reste à approfondir au niveau de son pragmatisme et de sa capacité à refléter les cas observés sur terrain.

III – 4 Pouvoir changer les itinéraires techniques en cours de simulation

Une limite de « D-Algo » que nous pouvons également mentionner est l'impossibilité de définir ou de changer d'itinéraire technique en fonction des années de simulation. L'itinéraire technique est défini en début de simulation et ne varie pas jusqu'à la fin de celle-ci. Avec la version actuelle de « D-Algo », un plan d'assolement est généré une fois par an pendant toute la durée de la simulation, d'une seule traite de l'année 1 à l'année 10. Ce qui implique une connaissance limitée de la situation car les modèles d'assolement simulés ne reflètent pas assez le vrai comportement d'un éleveur dans des conditions réelles. En effet, un éleveur peut modifier sa stratégie de production à tout moment en fonction des informations disponibles (climatiques, économiques, etc.) à sa disposition. Ce qui valide encore une fois notre deuxième hypothèse de recherche.

La première amélioration à apporter dans ce cas de figure serait la possibilité pour l'utilisateur de pouvoir exécuter la simulation en plusieurs étapes successives, avec la possibilité de modifier manuellement l'itinéraire technique à la fin de chaque étape. A titre d'exemple, l'utilisateur pourrait répéter chaque simulation tous les 2 ans, apporter des modifications sur l'itinéraire technique en fonction des résultats obtenus sur les deux années de simulation précédentes puis reprendre la simulation jusqu'à ce que la durée de la simulation soit terminée. Ainsi, si la simulation dure 10 ans par exemple, l'utilisateur pourrait réaliser 5 planifications jusqu'à la

fin de la simulation. En d'autres termes, nous pourrions anticiper sur l'état du système pour faire face aux changements d'environnement.

III – 5 Choisir un pas de temps mensuel

Dans la version actuelle de « D-Algo », pour laquelle le pas de temps est l'année, Nous pouvons définir pour chaque année de simulation un certain nombre de saisons (ces saisons ne doivent donc pas dépasser 12 mois). L'introduction du concept de saisonnalité par année de simulation a permis de mettre facilement en adéquation l'organisation du travail en fonction des ressources disponibles, ainsi que de faire correspondre la quantité d'aliments disponibles aux besoins du troupeau.

Cependant, les assolements doivent être générés de manière annuelle. Une amélioration envisageable serait la possibilité de choisir le mois comme pas de temps de la simulation, et donc de pouvoir générer les assolements à l'échelle du mois. Ajouter une nouvelle approche en réduisant fortement le pas de temps de la simulation au niveau du mois permettrait de réaliser plusieurs planifications par an pour améliorer l'état du système face aux changements environnementaux. Nous pourrions par exemple générer un plan d'assolement pour la saison humide, puis planifier un itinéraire technique différent du premier et générer un autre assolement, pour la saison sèche pendant la période dite de « contre-saison », en tenant compte des besoins du troupeau et des résultats et des informations (parcelles déjà occupées, etc.) obtenus pendant la saison humide. Ceci aurait pour conséquence un temps de calcul plus longs, notamment pendant la phase d'optimisation des assolements. Toutefois, avec la puissance des ordinateurs actuels, cela ne devrait pas poser trop de problèmes.

III – 6 Prendre en compte les variabilités climatiques intra-annuelles

Dans le cas où un pas de temps mensuel serait implémenté, une autre limite de « D-Algo » sur laquelle nous pourrions apporter des améliorations est la prise en compte des variabilités climatiques intra-annuelles. Dans la version actuelle de « D-Algo », la pluviosité et l'évapotranspiration potentielle sont définies à partir de la moyenne annuelle de la zone étudiée. Autrement dit, nous supposons que la valeur de ces paramètres est répartie uniformément tout au long de l'année. Or, il existe des mois plus arrosés que d'autres et les besoins en eau de chaque plante varient également d'une espèce à l'autre, et en fonction de la période de l'année. Les besoins en eau sont des contraintes permanentes et vitales dans les activités fourragères, surtout au niveau des rendements de culture. Il faudrait donc exprimer ces deux paramètres (pluviosité et évapotranspiration potentielle) en fonction de la saisonnalité des activités agricoles pour avoir une modélisation temporelle plus fine des besoins en eau de la plante et de la quantité d'eau disponible.

III – 7 Ajouter un module de gestion des effluents

Dans la version actuelle de « D-Algo », le fumier produit au sein de l'exploitation est soit transformé sous forme d'engrais organique pour les activités fourragères, soit vendu sans qu'il n'y ait une réelle prise en compte de son devenir au sein de l'exploitation, ni de son impact environnemental. « D-Algo » suppose que le fumier produit à chaque période est introduit systématiquement dans les contraintes d'optimisation en tant qu'engrais organique disponible et utilisé pendant cette même période. Or, dans les *scenarii* élaborés précédemment comme exemples, les activités fourragères ont lieu uniquement pendant la saison des pluies. Autrement dit, pendant la saison sèche, il y a un surplus de fumier non utilisé et nous ne savons pas réellement ce qu'il devient par la suite. Il faudrait donc ajouter un module de gestion des effluents comme le fumier. Ainsi, les stocks de fumier non utilisé pourront être transférés sur d'autres périodes pendant lesquelles nous aurons besoin de les utiliser. Eventuellement, nous pourrions aussi y intégrer un moteur de calcul pour effectuer le bilan entre la quantité d'azote ingérée et excrétée sous diverses formes (fécale, urinaire, dans le lait, etc.).

III – 8 Faire une analyse de l'émission des composés à risque pour l'environnement

Une autre possibilité pour améliorer « D-Algo » serait de lui donner la capacité de faire une analyse de l'émission des composés à risque pour l'environnement, comme les rejets d'azote et de carbone sous formes diverses (nitrates (NO_3^-), protoxyde d'azote (N_2O), dioxyde de carbone (CO_2), méthane (CH_4), etc.) dans l'atmosphère, le sol et l'eau. Nous pourrions par exemple y implémenter des classes permettant de simuler les pertes de nitrates, d'ammoniac ou encore de méthane. L'objectif serait de faire évoluer le modèle en y introduisant des aspects environnementaux, de façon à ce que nous puissions concilier protection de l'environnement et profits. En effet, ces deux objectifs sont souvent antagonistes car nous avons tendance à privilégier l'une ou l'autre au lieu d'avoir une analyse approfondie sur la question.

Bibliographie

- ALARY, V., MEKERSI, S., REDJEL, N., ZEGHIDA, A., BOUGUERA, A., & BENDAOU, M. (2005). *Les obstacles aux transferts technologiques dans les petites et moyennes exploitations agricoles des zones arides et semi arides du Maghreb*. Discussions sur les conditions d'amélioration de la productivité en Algérie, Maroc et Tunisie. Tunis: Femise Network 2 - CIRAD - EMVT/ICARDA . p.234.
- ANDRIANOELIMANANA, N. (2000). *Ny fiompiana omby be ronono (L'élevage de bovins laitiers)*. Centre de Formation Professionnelle Bevalala - FORMAGRI - FERT madagascar. p.230.
- BARBET-MASSIN, V., GRIMAUD, P., MICHON, A., & THOMAS, P. (2004). *Guide technique pour la création, la gestion et la valorisation des prairies à La Réunion*. Union des Associations Foncières Pastorales - CIRAD pôle ELEVAGE. p.99.
- BOUSSARD, J. (1999). *Economic aspects of risk in agriculture*. INRA - Unité de recherche sur les politiques économiques. p.16.
- CHONG, S., & YANAGIDA, J. (1981). *A comparison of Quadratic programming, MOTAD, Marginal Risk Constraint Linear Programming and Direction Constraint Linear Programming*. Reno: Division of Agricultural & Resource Economics - University of Nevada. p.23.
- CYERT, R., & MARCH, J. (1963). *A behavioural theory of the Firm*. New Jersey: Prentice - Hall.
- FLICHMAN, G., DONATELLI, M., LOUHICHI, K., ROMSTAD, E., HECKELEI, T., & AUCLAIR, D. (2006). *Quantitative models of SEAMLESS-IF and procedures for up-and downscaling*. System for Environmental and Agricultural Modelling Linking European Science and Society -Report N°17. IAMM, CRA, UMB, UBONN, INRA, NUI, WU, ALTERRA. p.112.
- ICRA. (2004). *Analyse coûts - bénéfices*. Concepts-clés. Ressources pédagogiques ICRA. p.6.
- ITTY, P., ROWLANDS, G., TRAUB, D., HECKER, P., COULIBALY, L., & D'IETEREN. (1994). *Etude économique de la production bovine villageoise dans une région du Nord de la Côte d'Ivoire, infestée par les glossines*. Etude économique de la production bovine villageoise dans une région du Nord de la Côte d'Ivoire. Revue Elevage et Médecine vétérinaire des Pays Tropicaux n°47 (3). pp. 333-343.
- KASPRZYK, M. (2008). *Diversité des systèmes d'alimentation des troupeaux bovins laitiers à Betafo - Région du Vakinankaratra - Madagascar*. Mémoires de fin d'études pour l'obtention du Diplôme d'Agronomie Approfondie - SupAgro Montpellier - CIRAD. p.96.

- LE BARS, M. (2003). *Un simulateur multi-agent pour l'Aide à la Décision d'un collectif: application à la gestion d'une ressource limitée Agro-environnementale*. Thèse de Doctorat ès-Sciences de l'Université Paris IX Dauphine - UFR Sciences des Organisations. p.234.
- LOUHICHI, K. (2004). *Application d'un modèle économique dynamique à l'analyse prospective des systèmes d'élevage laitiers à La Réunion*. CIRAD - ELEVAGE. p.111.
- LOUHICHI, K., FONSECA, B., FLICHMAN, G., JANSSEN, S., & HENGSDIJK, H. (2005). *A generic template for FSSIM. System for Environmental and Agricultural Modelling Linking European Science and Society -Report N°4*. Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier - Wageningen University - Sixth Framework Programme. p.39.
- MONTMAIN, J., PENALVA, J., AKHARRAZ, A., CHAPURLAT, V., COUTURIER, P., & CRAMPES, M. (2003). *Choix publics stratégiques et systèmes sociaux - Etat de l'art sur les théories de la décision et méthodologies de l'approche système*. Commissariat à l'énergie atomique, Ecole des Mines d'Alès, Unité de Recherche sur la Complexité - Centre de Recherche LGI2P. p.244.
- NIDUMOLU, U. (2007). *Regional bio-economic modelling of dairy sector in a unique island setting: a case of ile de La Réunion*. Report of the project MODLAIT - Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) - Département Elevage et Médecine Vétérinaire - Pôle Elevage St Pierre La Réunion. p.97.
- PENG, W. (1997). *Risk analysis of Adopting Conservation Practices on a Representative Peanut-Cotton Farm in Virginia*. Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Agricultural and Applied Economics. p.255.
- PIROT, R. (1998). *La motorisation dans les cultures tropicales*. . CIRAD, CTA. p.351.
- RAMANAMPANOHARANA, S. (1976). *L'ensilage de maïs: utilisation dans l'élevage bovin à la Sakay*. Mémoire de fin d'études de l'EESSA - Département Elevage - Université d'Antananarivo. p.76 + Annexes.
- SIMON, H. (1947). *Administrative behavior*. New York: MacMillan.
- TAUER, L. (1983). *Target Motad*. American Journal of Agricultural Economics, Vol. 65, N°3, pp.606-610.
- THORNTON, P., & HERRERO, M. (2001). *Integrated crop-livestock simulation models for scenario analysis and impact assessment*. Agricultural Systems 70. pp.581 - 602.
- WEINTRAUB, A., ROMERO, C., BJORN DAL, T., & LANE, D. (2001). *Operational Research Models and the Management of Renewable Natural Resources: a review*. SNF Project N°5400 - Research Council of Norway - Centre for Fisheries Economics - Foundation for research in Economics and Business Administration. p.32.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le modèle informatique « D-Algo » est destiné à simuler les performances technico-économiques de stratégies de production et d'investissement dans le cadre d'une évaluation *ex-ante* d'un système d'élevage de bovins laitiers. L'échelle d'utilisation du modèle est limitée à l'exploitation individuelle. Il permet de simuler de manière réursive et multi-périodiques différentes options stratégiques et des choix tactiques comme le choix de l'itinéraire technique à adopter, les règles de rotation culturale à utiliser, le choix des dépenses d'investissement à entreprendre pour faire fonctionner et rentabiliser le projet, le choix sur le type de bovins à utiliser, la préférence sur le niveau d'intensification du système fourrager par rapport aux ressources disponibles (capitales, mains d'œuvre, équipements, etc.). A partir d'un plan d'assolement généré par simulation et à partir d'indicateurs économiques qui permettent de comparer la dépense initiale à la valeur actuelle des recettes nettes attendues de l'investissement, il apporte des éléments de réflexion pour appuyer les prises de décisions sur la recherche d'une organisation et d'un système de production plus rémunérateur. Le modèle informatique est souple, facile à manipuler et permet de tester différents scénarios dans la recherche de l'assemblage optimal des facteurs de production en jeu, en fonction du degré d'intensification, des objectifs de l'éleveur, des activités et des contraintes existant à l'intérieur du système d'élevage. Il apporte également une vision globale sur l'adéquation entre ressources disponibles et besoins du troupeau en fonction de contraintes multiples (disponibilité en surfaces cultivables, en intrants, en mains d'œuvre, etc.), qui permettrait d'apporter des améliorations sur la pratique d'élevage, les modes de conduite du troupeau et les stratégies d'investissement dans de nouveaux équipements notamment dans le cadre d'un développement et d'extension de l'exploitation en régime de croisière. L'une des forces de « D-Algo » est sa capacité à fournir une analyse de sensibilité assez exhaustive, particulièrement au niveau des limites de la fonction objective et des valeurs duales. Ces informations sont précieuses car elles permettent d'évaluer sur le long – terme les décisions prises au sein de l'exploitation et d'identifier les choix stratégiques qui pourraient affecter le résultat global de l'exploitation.

Concernant la démarche de conception et de modélisation, les deux hypothèses avancées au début de cette thèse sont bien confirmées. Le contexte actuel de la filière « lait » à Madagascar montre clairement l'intérêt d'avoir à disposition un outil informatique d'aide à la décision pour faciliter l'élaboration de politiques régionales et nationales de développement de l'élevage laitier. Toutefois, la démarche de conception, de modélisation et de validation entreprise dans cette thèse, auraient pu être meilleure si elle était basée sur des objectifs de développement clairs et précis.

Le choix d'adopter la démarche de « Conception Orientée Objet », couplée avec la méthode analytique - mathématique de la programmation linéaire, a été judicieux dans la mesure où la structure actuelle du modèle permet d'y apporter des modifications importantes (intégration du risque, fréquence de planification de l'itinéraire technique, etc.) et même de l'étendre à d'autres domaines (considération de l'impact environnemental, etc.) presque sans aucune limite tant que les technologies informatiques de programmation et la puissance des ordinateurs actuels le permettent.

Comme faiblesse, les solutions proposées par le modèle sont surement surestimées. Premièrement, l'optimisation de l'assolement avec « D-Algo » utilise la programmation linéaire. Or, les études effectuées en Caroline du Nord par FREUND en 1954 sur l'utilisation de la programmation linéaire en tant qu'outil de planification des exploitations agricoles ont montré que les résultats expérimentés dans le système physique (en termes de revenu) sont loin de représenter ceux obtenus par calcul théorique. De plus, les plans théoriques proposés sont parfois très risqués, alors les agriculteurs étaient réticents à les appliquer. Deuxièmement, le revenu annuel de l'exploitation virtuelle est assuré principalement par la vente de lait. Or, le calcul de la production laitière dans notre modèle est basé sur le modèle INRA de la « production de lait potentielle ». La production de lait potentielle considère que la disponibilité en nutriments n'est pas limitant. Alors que dans la réalité, la production effective de lait est fonction de la caractéristique de l'animal utilisé (race, âge, poids vif, etc.) et de la qualité de l'alimentation (valeurs alimentaires, niveau de concentrés, etc.). La production de lait effective pourrait donc être différente de la production de lait potentielle. Ainsi, il est recommandé de prendre

des marges de sécurité et de bien considérer toutes les éventualités pour la mise en œuvre d'un projet de petite envergure, modélisé avec « D-Algo ». A titre d'exemple, si le taux de rentabilité obtenu après simulation a une valeur proche ou même égale au taux d'actualisation, ou bien si la VAN obtenue est trop proche ou même égale à zéro, il faudrait rechercher une meilleure formule plus rentable avant de mettre en œuvre le projet.

Les perspectives d'avenir pour le modèle « D-Algo » est énorme. Les quelques améliorations possibles énoncées dans cette thèse ne sont pas exhaustives et ne sont qu'une partie infime des possibilités. « D-Algo » n'est qu'à sa première version (1.2.0) et n'est pas encore mature. De ce fait, il est loin d'être parfait. Dans les années à venir, il faudrait étendre son rayon d'action à d'autres domaines de l'élevage de ruminants (bovins allaitants, caprins, etc.). Il faudrait aussi aborder les nombreuses questions de recherche qui subsistent dans le domaine de l'élevage de ruminants comme la gestion et l'utilisation durable des pâturages, le rationnement du troupeau, simulation et gestion de la conduite de la reproduction, etc.. Il faudrait aussi envisager la possibilité de le coupler avec d'autres modèles informatiques existant, à condition qu'il y aurait de la synergie et de la complémentarité entre les différents modèles et que les conditions technologiques le permettent (utilisation de l'API par exemple).

La prochaine étape concernant le développement du modèle concernera d'abord la validation opérationnelle du modèle sur terrain. Ceci afin que divers spécialistes travaillant dans le domaine de l'élevage laitier puissent l'appréhender et émettre des critiques constructives pour le faire évoluer par rapport aux limites d'application du modèle sur le terrain. Il faudrait aussi tester l'aspect pragmatique du modèle informatique par rapport aux nouveaux utilisateurs, c'est-à-dire déterminer si le modèle est facile d'utilisation, non-équivoque et facile à interpréter. « D-Algo » pourrait ensuite être utilisé par les techniciens et les chercheurs travaillant dans le secteur de l'élevage laitier. Dans le domaine de l'enseignement, il pourrait être utilisé à des fins pédagogiques pour aider les étudiants à avoir une meilleure compréhension du fonctionnement d'un système d'élevage de bovins laitiers.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFFHOLDER, F., FOREST, F., LIDON, B., & VALONY, M. (2002). *La gestion de l'eau*. Memento de l'agronome, CIRAD - GRET - CTA. pp.643 - 662.
- ALARY, V., MEKERSI, S., REDJEL, N., ZEGHIDA, A., BOUGUERA, A., & BENDAOU, M. (2005). *Les obstacles aux transferts technologiques dans les petites et moyennes exploitations agricoles des zones arides et semi arides du Maghreb*. Discussions sur les conditions d'amélioration de la productivité en Algérie, Maroc et Tunisie. Tunis: Femise Network 2 - CIRAD - EMVT/ICARDA . p.234.
- ANDRIAMAROSOA, N. (2016). *Analyser et modéliser le système d'alimentation dans le contexte de l'élevage bovin malgache*. Thèse de Doctorat de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques Antananarivo - Ecole doctorale A2E- Université d'Antananarivo.
- ANDRIAMAROSOA, R. (2007). *Impacts du système d'élevage de ruminants sur la biodiversité et sur la filière ruminant dans la région du Menabe central - cas des terroirs d'Ankoraobato et d'Ampataka*. Mémoires de fin d'études pour l'obtention de Diplôme d'Etudes Approfondies de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques - Département des Eaux et Forêts. p.117 + Annexes.
- ANDRIAMAROSOA, R. (2016). *Concilier les approches mathématiques de la décision et l'approche systémique pour créer un modèle informatique du système d'élevage de bovins laitiers, fondé sur les théories de l'"utilité espérée" et de la "rationalité limitée"*. Thèse de Doctorat de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques Antananarivo - Ecole doctorale A2E- Université d'Antananarivo.
- ANDRIAMAROSOA, R., DIRAC, R., SORG, J., & BUTLER, A. (2010). *Optimisation socio-économique et écologique des systèmes d'élevage (Menabe central, Madagascar)*. Science et changements planétaires "Sécheresse" 21(3) - John Libbey Eurotext. pp.211 - 218.
- ANDRIANOELIMANANA, N. (2000). *Ny fiompiana omby be ronono (L'élevage de bovins laitiers)*. Centre de Formation Professionnelle Bevalala - FORMAGRI - FERT madagascar. p.230.
- ARNALDI-MARTIN, N., & LHERM, M. (2002). *Impact de scénarios de modification de la PAC sur des élevages bovins allaitants en zone intermédiaire - cas de l'Indre*. Notes et Etudes Economiques N°17. pp.77 – 106.
- ARNAUD, L., & GAY, B. (1994). *De l'eau pour le maraîchage - Expériences et procédés*. GRET - Centre Technique de Coopération Agricole et Rurale. p.126.
- BARBET-MASSIN, V., GRIMAUD, P., MICHON, A., & THOMAS, P. (2004). *Guide technique pour la création, la gestion et la valorisation des prairies à La Réunion*. Union des Associations Foncières Pastorales - CIRAD pôle ELEVAGE. p.99.
- BERRO, A. (2001). *Optimisation multi - objectif et stratégies d'évolution en environnement dynamique*. Thèse en vue de l'obtention du doctorat en informatique - Université des Sciences Sociales Toulouse I. p.170.
- BERTALANFFY, L. (1980). *Théorie générale des systèmes*. . Paris: Dunod.
- BISSON - VAIVRES, S., & FICANO, C. (1998). *Outils mathématiques de gestion*. Edition Bréal - Rosny. pp.251 – 270.
- BOOCH, G. (1992). *Conception orientée objets et applications*. Paris: Addison Wesley.
- BOOCH, G., RUMBAUGH, J., & JACOBSON, I. (1999). *The Unified Modeling language user guide*. Addison – Wesley.
- BOSSER, J. (1954). *Les pâturages naturels de Madagascar*. Mémoires de l'Institut Scientifique de Madagascar - Série B - Tome V. p.19.
- BOSSER, J. (1955). *Rapport sur la végétation et les pâturages de la C.R.A.M d'Ankilizato*. ORSTOM - Collection de référence n° 10452ex1. 8 pages.

- BOSSER, J. (1955). *Rapport sur la végétation et les pâturages de la C.R.A.M d'Ankilizato*. ORSTOM - Collection de référence n° 10452ex1. 8 pages.
- BOSSER, J. (1957). *Etudes sur les pâturages naturels faites à l'Institut de Recherche Scientifique de Madagascar*. Office de la recherche scientifique et technique outre-mer - ORSTOM. pp.67 - 72.
- BOSSER, J. (1958). *Etude sur les pâturages à Madagascar*. ORSTOM Fonds documentaires n°29.531. p.6.
- BOSSER, J. (1969). *Graminées des pâturages et des cultures à Madagascar*. Mémoires ORSTOM N°35. Paris. p.440.
- BOUDET, G. (1975). *Manuel sur les pâturages tropicaux et les cultures fourragères*. IEMVT. p.254.
- BOUDET, G. (1975). *Problèmes posés par l'estimation de la capacité de charge d'un pâturage naturel tropical*. Collection de référence ORSTOM n° 8655 BBU. Pages 265 – 267.
- BOUSSARD, J. (1999). *Economic aspects of risk in agriculture*. INRA - Unité de recherche sur les politiques économiques. p.16.
- BRUN-LAFLEUR, L., CUTULLIC, E., FAVERDIN, P., DELABY, L., & DISENHAUS, C. (2011). *Modélisation individuelle de la reproduction des vaches Holstein intégrant les effets de la production laitière et des réserves corporelles*. Rencontre Recherche Ruminant (3R) - INRA. p.4.
- CARRE, A. (1975). *L'alimentation des animaux domestiques à Madagascar*. Ministère du développement rural - Service de l'enseignement et de la formation agricole. p.78.
- CHARDON, X. (2008). *Evaluation environnementale des exploitations laitières par modélisation dynamique de leur fonctionnement et des flux de matières au sein du système: développement et application du simulateur MELODIE*. Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement - Agro Paris Tech. p.204 + Annexes.
- CHONG, S., & YANAGIDA, J. (1981). *A comparison of Quadratic programming, MOTAD, Marginal Risk Constraint Linear Programming and Direction Constraint Linear Programming*. Reno: Division of Agricultural & Resource Economics - University of Nevada. p.23.
- CRAINIC, T., & BOURJOLLY, J. (2005). *Gestion de la production, des biens et services - Technologie de la décision*. MBA 8419. ESG - UQAM - Université de Québec à Montréal. p.46.
- CRESCENZO, P. (2001). *OFL: un modèle pour paramétrer la sémantique opérationnelle des langages à objets - Application aux relations inter-classes*. Thèse de Doctorat en Informatique - Université de Nice - Sophia Antipolis. p. 186.
- CYERT, R., & MARCH, J. (1963). *A behavioural theory of the Firm*. New Jersey: Prentice - Hall.
- DELEBECQUE, R. (1990). *Bâtiment 2 - Eléments de construction*. Edition Delagrave - Paris. p.128.
- D'HOORE, J. (1964). *La carte des sols d'Afrique au 1/5.000.000*. Mémoire explicatif. CCTA, Publ. n°93, Lagos. p.209.
- DI SCALA, R. (2004). *Java 2 - Les fondements du langage Java*. [On line] <http://www.Developpez.com/cours/> [consulté le 18 juin 2009]. p. 392.
- DIRAC, R. (2010). *Stratégies villageoises dans la gestion des paysages forestiers, Menabe Central Madagascar*. Thèse de Doctorat soutenue à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. p.119 + Annexes.
- DUPUY, J. (1999). *Aux origines des sciences cognitives*. Edition La Découverte.
- FAO, & DWD. (2006). *New_LocClim - Local Climate Estimator (CD-ROM)*. Food and Agriculture Organization (FAO) - German Weather Service (DWD).

- FIFAMANOR, Tafa, GSDM, MAEP, CIRAD, ARP, & et al. (2007). *Conduite des systèmes de culture sur couverts végétaux et affouragement des vaches laitières - Guide pour les hautes terres de Madagascar*. FIFAMANOR - GSDM - Tafa - CIRAD - ARP - SICAlait. p.90.
- FLICHMAN, G., DONATELLI, M., LOUHICHI, K., ROMSTAD, E., HECKELEI, T., & AUCLAIR, D. (2006). *Quantitative models of SEAMLESS-IF and procedures for up-and downscaling*. System for Environmental and Agricultural Modelling Linking European Science and Society -Report N°17. IAMM, CRA, UMB, UBONN, INRA, NUI, WU, ALTERRA. p.112.
- FREUND, R. (1956). *The introduction of risk into a programming model*. . *Econometrica* 24. pp. 253 - 264.
- FUMEY, M. (2001). *Méthode d'évaluation des risques agrégés: application au choix des investissements de renouvellement d'installations*. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse - Spécialité systèmes industriels. p. 178.
- GOUNOT, M. (1969). *Méthode d'études quantitatives de la végétation*. Masson et Cie. 314 pages.
- GOURVEST, H. (2009). *Ip_solve reference guide*. [On line] <http://www.progdigy.com> [consulté le 22 octobre 2010].
- GOURVEST, H. (2009). *Ip_solve reference guide*. [On line] <http://www.progdigy.com> [consulté le 22 octobre 2010].
- GRANIER, P. (1967). *Etude sur la digestibilité chez le zébu*. Institut d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux - Région de recherche madagascar. p.30.
- GRANIER, P., & LAHORE, J. (1967). *Note sur la productivité du pâturage naturel - Comparaison des cycles végétatifs de l'*Hyparrhenia rufa* et de l'*Heteropogon contortus**. Institut d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux - Région de recherche madagascar. p.8.
- GRIMM, VOLKER, RAILSBACK, & STEVEN, F. (2005). *Individual-based Modeling and Ecology*. Princeton University Press. ISBN 978-0-691-09666-7. p.485.
- HARINIAINA, R. (1990). *Traitement des fourrages pauvres à l'urée: effets chez les vaches laitières*. Mémoires de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur des sciences agronomiques - Département Elevage - ESSA. p.89 + Annexes.
- HART, R., LARCOMBE, M., SHERLOCK, R., & SMITH, L. (1998). *Optimization techniques for a computer simulation of a pastoral dairy farm*. University of Waikato - New Zealand, Maffra Herd Improvement Co-op-Australia, Dairying Reaserch Corporation Limited-New Zealand. p.23.
- HAZELL, P., & NORTON, R. (1986). *Mathematical programming for economic analysis in agriculture*. New York: MacMillan Publishing Company. p. 400.
- HIEP, T. (2009). *Qualification en Spectrométrie dans le Proche Infra Rouge (SPIR) de l'azote et des fibres des ressources alimentaires et leur utilisation digestive par le bétail laitier en milieux tropicaux (Réunion - Vietnam)*. Thèse de Doctorat de l'Ecole Doctorale Interdisciplinaire (E.D.I) - Université de La Réunion.
- HORVITZ, E. (1987). *Reasoning about beliefs and actions under computational resource constraints*. Proceedings of the 1987 Workshop on Uncertainty in Artificial Intelligence.
- HUSSON, O., CHARPENTIER, H., RAZANAMPARANY, C., MOUSSA, N., MICHELLON, R., & NAUDIN, K. (2008). *Fiches techniques plantes de couverture: Graminées pérennes: *Brachiaria sp.* - *B. ruziziensis*, *B. brizantha*, *B. decumbens*, *B. humidicola**. CIRAD - Tafa - GSDM - AFD - MAEP. p.20.
- HUSSON, O., CHARPENTIER, H., RAZANAMPARANY, C., MOUSSA, N., MICHELLON, R., & NAUDIN, K. (2008). *Fiches techniques plantes de couverture: Légumineuses pérennes - *Stylosanthes guianensis**. CIRAD - Tafa - GSDM - AFD - MAEP. p.12.

- ICRA. (2004). *Analyse coûts - bénéfiques*. Concepts-clés. Ressources pédagogiques ICRA. p.6.
- INRA. (1978). *Alimentation des ruminants*. Institut National de la Recherche Agronomique.
- INRA. (1988). *Alimentation des bovins, ovins et caprins*. INRA (Institut National de la Recherche Agronomique). p.471.
- INRA. (1989). *Ruminant nutrition - Recommended allowances and feed tables*. London-Paris: INRA/John Libbey Eurotext. p.389.
- INRA. (2007). *Alimentation des bovins, ovins et caprins - Besoins des animaux - Valeurs des aliments*. INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) - Editions QUAE. p.307.
- INSTITUT DE L'ELEVAGE. (2009). *Bilan fourrager rapide*. [On line] www.inst-elevage.asso.fr [consulté le 24 août 2010].
- ITTY, P., ROWLANDS, G., TRAUB, D., HECKER, P., COULIBALY, L., & D'IETEREN. (1994). *Etude économique de la production bovine villageoise dans une région du Nord de la Côte d'Ivoire, infestée par les glossines*. Etude économique de la production bovine villageoise dans une région du Nord de la Côte d'Ivoire. *Revue Elevage et Médecine vétérinaire des Pays Tropicaux* n°47 (3). pp. 333-343.
- KASPRZYK, M. (2008). *Diversité des systèmes d'alimentation des troupeaux bovins laitiers à Betafo - Région du Vakinankaratra - Madagascar*. Mémoires de fin d'études pour l'obtention du Diplôme d'Agronomie Approfondie - SupAgro Montpellier - CIRAD. p.96.
- KNUTH, D., & EST, D. (1981). *The Art of Computer Programming, volume 2: Seminumerical Algorithms*. Addison-Wesley, Reading, MA, deuxième édition.
- LAGRANGE, G., LAPENDRIE, Y., BELARD, D., SALLARD, L., NICOLAS, J., & CABAL, J. (2006). *Construire un bâtiment en élevage bovin*. Services Bâtiments des Chambres Départementales d'Agriculture - Chambre Régionale d'Agriculture d'Auvergne. p.23.
- LAROUSSE. (2009). *Le petit Larousse*. Edition Larousse.
- LASSERRE, P. (2009). *Cours VB.NET*. [On line] <http://plasserre.Developpez.com/cours/vb-net/> [consulté le 18 juin 2009]. p.1087.
- LE BARS, M. (2003). *Un simulateur multi-agent pour l'Aide à la Décision d'un collectif: application à la gestion d'une ressource limitée Agro-environnementale*. Thèse de Doctorat ès-Sciences de l'Université Paris IX Dauphine - UFR Sciences des Organisations. p.234.
- LECOMPTE, P. (2001). *Diagnostic des systèmes d'alimentation. Programmes Productions Animales*. CIRAD-EMVT.
- LEVINS, R. (1966). *The strategy of model building in population biology*. *American Sciences* Vol.54. pp.421 – 431.
- LHOSTE, P. (2001). *L'étude et le diagnostic des systèmes d'élevage*. Atelier de formation des agronomes SCV Madagascar - CIRAD -MIPA. pp.1239 - 1266.
- LHOSTE, P., & ALARY, V. (2002). *Le diagnostic des systèmes d'élevage*. Mémento de l'agronome, CIRAD - GRET - CTA. p.32.
- LOUHICHI, K. (2004). *Application d'un modèle économique dynamique à l'analyse prospective des systèmes d'élevage laitiers à La Réunion*. CIRAD - ELEVAGE. p.111.
- LOUHICHI, K., FERTIL, G., ALARY, V., CHOISIS, J., & LEPETIT, J. (2003). *Apport de la modélisation économique à l'analyse prospective et l'aide au pilotage des systèmes d'élevage laitiers à La Réunion*. CIRAD-EMVT; INRA-SAD; SICALAIT. 4 pages.
- LOUHICHI, K., FONSECA, B., FLICHTMAN, G., JANSSEN, S., & HENGSDIJK, H. (2005). *A generic template for FSSIM. System for Environmental and Agricultural Modelling Linking European Science and Society -Report N°4*.

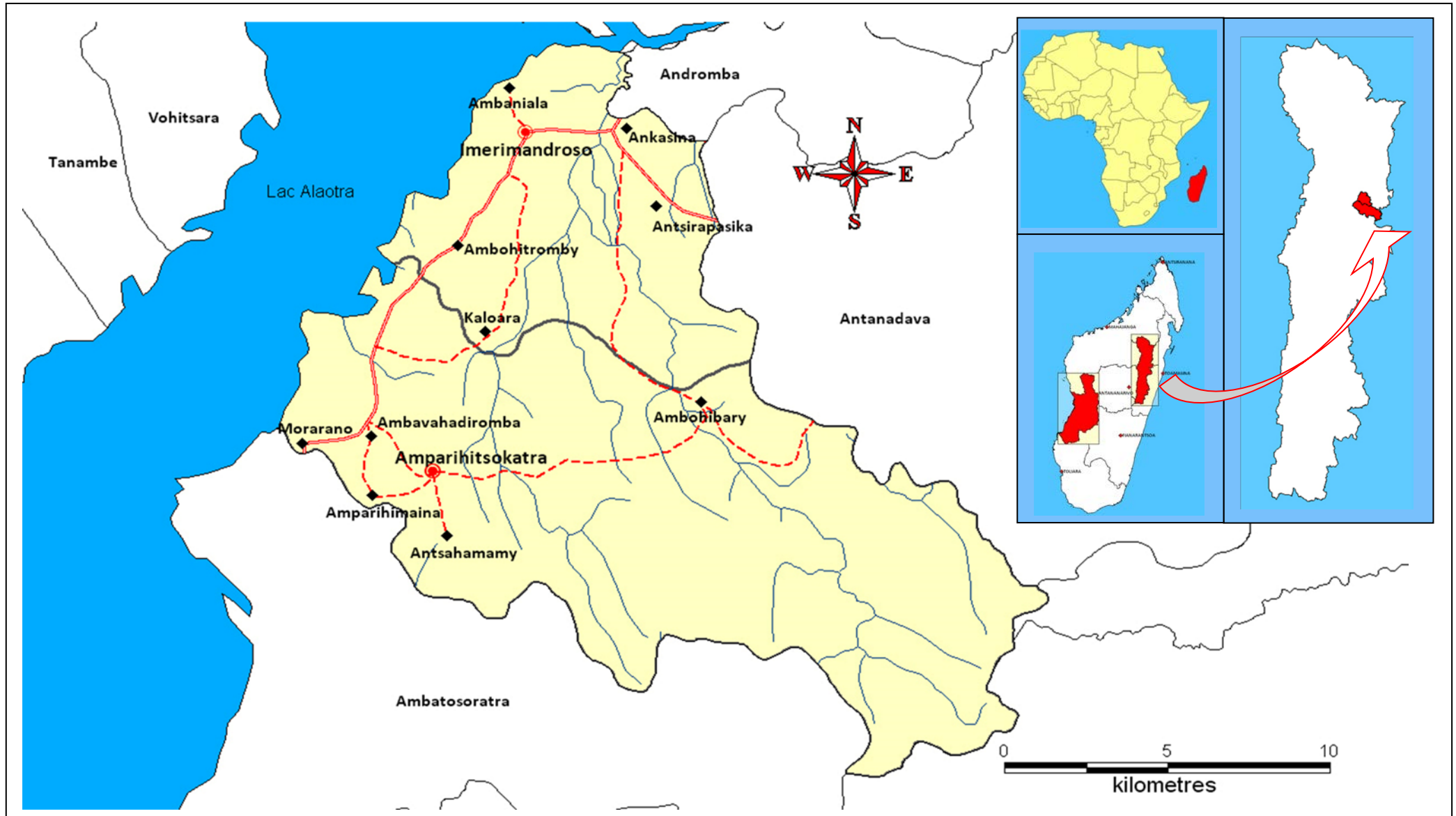
- Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier - Wageningen University - Sixth Framework Programme. p.39.
- LUGAN, J. (2006). *Lexique de systématique et de perspectives*. Conseil économique et social Midi - Pyrénées - Section prospective. p.97.
- MAEP. (2004). *Filières de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche et Actions du Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche: fiche N°202 - Tome 2*. Filières de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche et Actions du Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche: fiche N°202 - Tome 2.
- MAEP. (2006). *Recensement de l'agriculture. Campagne agricole 2004-2005*. Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche - Direction des Systèmes d'Information - Service des Statistiques Agricoles. p.50.
- MAEP, & UPDR. (2003). *Monographies régionales des 18 D.(I).R.D.R*. Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche - Unité de Politique de Développement Rural - Madagascar.
- MEYER, B. (1992). *Introduction à la théorie des langages de programmation*. Paris: InterEdition.
- MONTMAIN, J., PENALVA, J., AKHARRAZ, A., CHAPURLAT, V., COUTURIER, P., & CRAMPES, M. (2003). *Choix publics stratégiques et systèmes sociaux - Etat de l'art sur les théories de la décision et méthodologies de l'approche système*. Commissariat à l'énergie atomique, Ecole des Mines d'Alès, Unité de Recherche sur la Complexité - Centre de Recherche LGI2P. p.244.
- MORRISON, D., KINGWELL, R., PANNELL, D., & EWING, M. (1986). *A mathematical programming model of a crop-livestock farm system*. *Agricultural Systems* 20. pp.243-268.
- NIDUMOLU, U. (2007). *Regional bio-economic modelling of dairy sector in a unique island setting: a case of ile de La Réunion*. Report of the project MODLAIT - Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) - Département Elevage et Médecine Vétérinaire - Pôle Elevage St Pierre La Réunion. p.97.
- NRC. (2001). *Nutrient Requirements of dairy cattle. Seventh revised edition 2001*. National Research Council - National Academy Press - Washington, D.C. p.363.
- PAROTT, L. (2006). *Modélisation systématique*. GEO3532 - Modélisation, Département de géographie, Université de Montréal. p.26.
- PENG, W. (1997). *Risk analysis of Adopting Conservation Practices on a Representative Peanut-Cotton Farm in Virginia*. Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Agricultural and Applied Economics. p.255.
- PIROT, R. (1998). *La motorisation dans les cultures tropicales*. . CIRAD, CTA. p.351.
- RABEMANAMBOLA, M. (2007). *Contribution à l'étude d'une filière alimentaire et de son inscription spatiale dans un pays en voie de développement*. Clermont Ferrand: Thèse en vue de l'obtention du grade de Docteur en Géographie. Université de Clermont Ferrand II. p.332 + Annexes.
- RAKOTOARISON, B. (1993). *Contribution à l'étude de la valeur nutritive des légumineuses fourragères*. Mémoire de fin d'études - Département Elevage - ESSA. p72 + Annexes.
- RAKOTOARISON, B. (2005). *Etude de la valeur nutritive de Desmodium uncinatum, Hedychium coronarium et Musa paradisiaca pour une meilleure valorisation des ressources fourragères des hautes terres malgaches*. Thèse de Doctorat. Département Elevage - ESSA. p.127.
- RAKOTONIRINA, J. (1996). *Contribution à l'étude de la productivité et de la valeur nutritive du ray-grass italien et de l'avoine fourragers cultivés sur tanety irrigué en contre-saison*. Mémoire de fin d'études - Département Elevage - ESSA. p.123.

- RAKOTOZANDRINY, J. (1993). *Pour une meilleure connaissance de la valeur nutritive des fourrages chez le bovin de race Pie Rouge Norvégienne (P.R.N) à Antsirabe*. Thèse Doctorat d'Etat. Université d'Antananarivo, Madagascar. p.135 + annexes.
- RAMANAMPANOHARANA, S. (1976). *L'ensilage de maïs: utilisation dans l'élevage bovin à la Sakay*. Mémoire de fin d'études de l'EESSA - Département Elevage - Université d'Antananarivo. p.76 + Annexes.
- RANAIVOSON, S. (1995). *Contribution à l'étude des impacts des troupeaux bovins sur l'écosystème forestier du Parc National de Ranomafana*. Mémoire de fins d'étude. Département des Eaux et Forêts – ESSA. p.114.
- RANDRIAMBELOSON, M. (1980). *Etude de la digestibilité des fourrages chez les ruminants*. Mémoires de Diplôme d'Etudes Approfondies en Sciences Biologiques Appliquées. p.70 + annexes.
- RANDRIANARIVELOSEHENO, A. (2002). *Système pastoral, PPN d'Ankarafantsika*. Mémoire de DEA – ESSA -forêts. 91 pages.
- RASAMBAINARIVO, J., & RANAIVOARIVELO, N. (2003). *Profil fourrager - Madagascar*. CD - Rom Country Pasture Profiles - Food and Agriculture Organization.
- RICHARD, D. (2002). *La gestion des animaux et des troupeaux*. Memento de l'agronome, CIRAD - GRET - CTA. pp.1325 - 1353.
- RIVOT, E. (2003). *Investigations Baysiennes de la dynamique des populations de Saumon Atlantique (Salmo Salar L.) - Des observations de terrain à la construction du modèle statistique pour apprendre et gérer*. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes pour obtenir le titre de Docteur ès-Sciences de l'ENSAR (Spécialité: Halieutique). p.201 + Annexes.
- ROBERGE, G., & GODET, G. (2002). *Plantes fourragères: les légumineuses herbacées*. Memento de l'agronome, CIRAD - GRET - CTA. p.25.
- ROBERGE, G., TOUTAIN, B., HAINNAUX, G., DAUDET, A., GUERIN, H., MANDRET, G., & NOIROT, M. (1999). *Manuel de cultures fourragères*. Maisons Alfort, France, IEMVT, pp.147-184.
- ROY, B. (1985). *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Paris: Economica.
- ROY, B. (1992). *Science de la décision ou science de l'aide à la décision?* Revue Internationale de systémique 6 (5). pp.497-529.
- ROY, B. (2000). *Réflexions sur le thème: quête de l'optimum et aide à la décision*. Cahier du Lamsade (167). p.21.
- RUSSEL, S. (1999). *Rationality and Intelligence Foundations of rational agency, applied logic series (Vol. 14)*. Wooldridge M. and Rao A., (Eds.), Kluwer Academics Publishers. pp.11-33.
- SIGAUD, O. (2004). *Introduction à la modélisation orientée objets avec UML*. Support de cours "Génie logiciel et programmation orientée objet" de l'ENSTAT.
- SIMON, H. (1947). *Administrative behavior*. New York: MacMillan.
- SIMON, H. (1983). *Administration et processus de décision (Traduction française de Administrative behavior, 1947)*. Paris: Economica.
- STATPOINT. (2006). *STATGRAPHICS Centurion XV - Manuel de l'utilisateur*. STATPOINT INC. - [On line] www.statgraphics.com [consulté le 24 août 2010].
- STOBBS, T., & MINSON, D. (1980). *Nutrition of ruminants in the tropics*. Digestive physiology and nutrition of ruminants. Vol 3. pp.257 - 277.
- TAHE, S. (2005). *M2VC - win, un moteur MVC pour des applications windows .NET*. [On line] <http://tahe.developpez.com/web/php/mvc> [consulté le 18 juin 2009]. p. 35.
- TAUER, L. (1983). *Target Motad*. American Journal of Agricultural Economics, Vol. 65, N°3, pp.606-610.

- THORNTON, P. (1998). *Crop - Livestock Interactions: a review of opportunities for developing integrated models*. Stirling Thorne Associates. p.68.
- THORNTON, P., & HERRERO, M. (2001). *Integrated crop-livestock simulation models for scenario analysis and impact assessment*. *Agricultural Systems* 70. pp.581 - 602.
- TILLARD, E. (2007). *Approche globale des facteurs associés à l'infertilité et l'infécondité chez la vache laitière: importance relative des facteurs nutritionnels et des troubles sanitaires dans les élevages de l'île de La Réunion*. Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Montpellier II. p.305 + Annexes.
- WEINTRAUB, A., ROMERO, C., BJORNDAL, T., & LANE, D. (2001). *Operational Research Models and the Management of Renewable Natural Resources: a review*. SNF Project N°5400 - Research Council of Norway - Centre for Fisheries Economics - Foundation for research in Economics and Business Administration. p.32.
- YANG, X., DARRELL, J., NORDBERG, T., & WOLFE, M. (2000). *Phosphorus-Based Nutrient Management Planning on Dairy/Poultry Farms: Implications for Economic and Environmental Risks*. Tampa, Florida: American Agricultural Economics Association. p.24. .
- YANG, X., DARRELL, J., NORDBERG, T., & WOLFE, M. (2000). *Phosphorus-Based Nutrient Management Planning on Dairy/Poultry Farms: Implications for Economic and Environmental Risks*. Tampa, Florida: American Agricultural Economics Association. p.24.

ANNEXES

Annexe 1 : Localisation géographique des terroirs d'intervention.



- ◆ Village
- Chef lieu de Commune

Voies de communication
 - - - Chemins de terre
 = Route Nationale

Rivière
 ——— permanente
 - - - temporaire

■ Commune Rurale □ Communes Rurales
 ■ Lac Alaotra

Carte n°1 : Communes Rurales d'Imerimandroso et Amparihitsokatra – Région Alaotra – Mangoro.



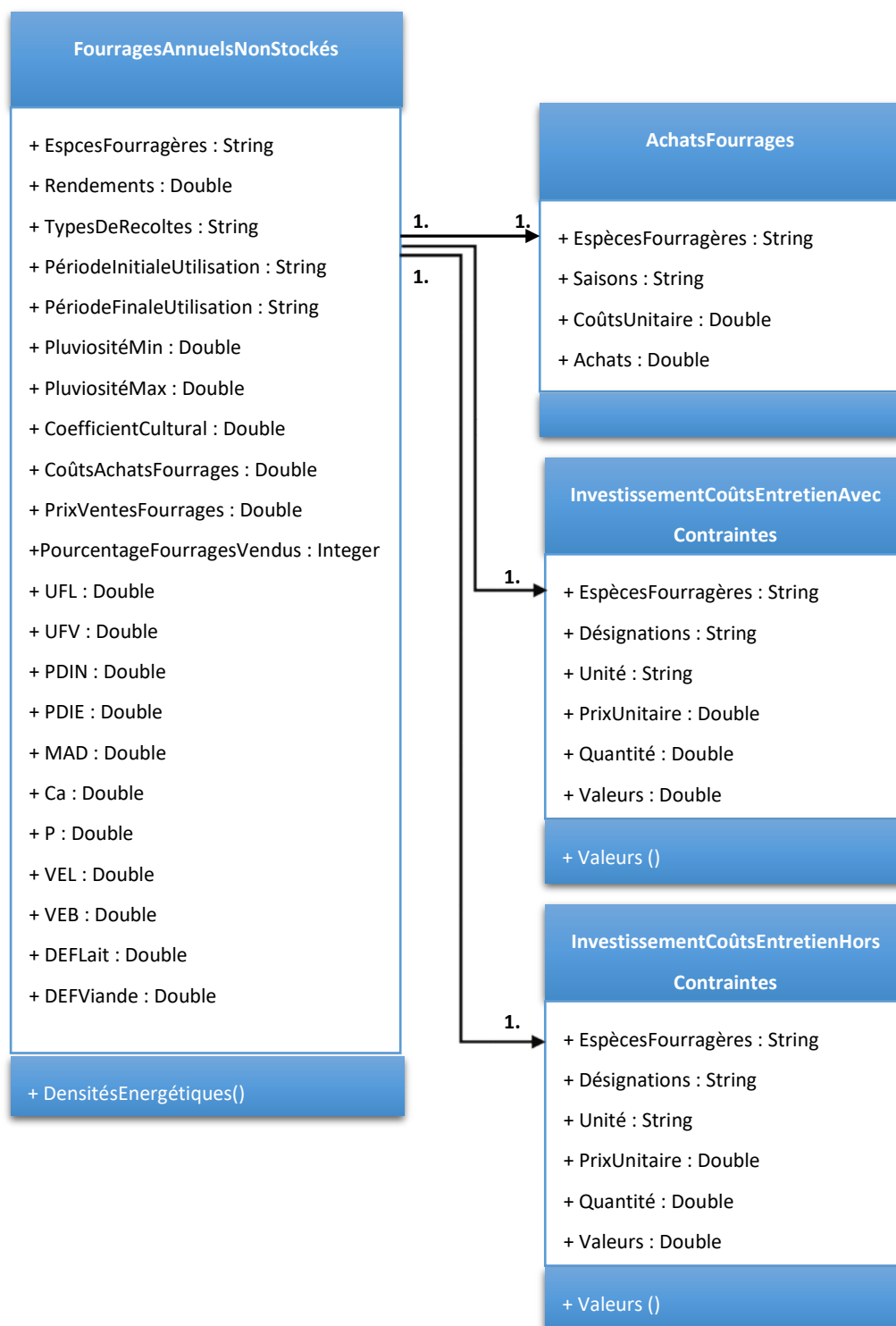
◆ Village	<u>Voies de communication</u>	<u>Rivière</u>	■ Commune Rurale de Bemanonga	□ Communes Rurales
● Site de l'étude	- - - Chemins de terre	— permanente	■ Commune Urbaine de Morondava	
■ Chef lieu de Commune	— Route Nationale	- - - temporaire	■ Canal de Mozambique	

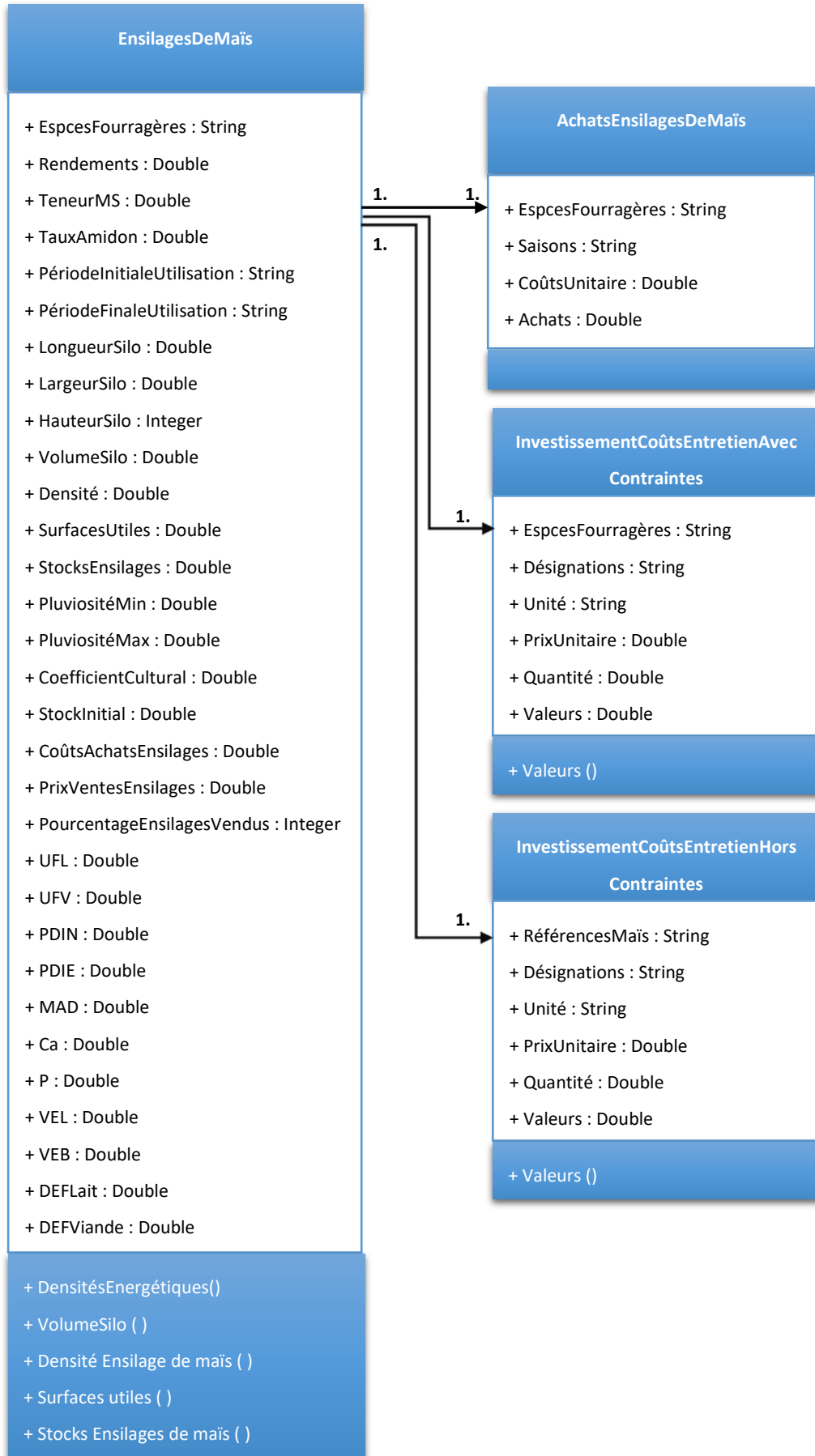
Carte n°2 : Commune Rurale de Bemanonga – Région Menabe.

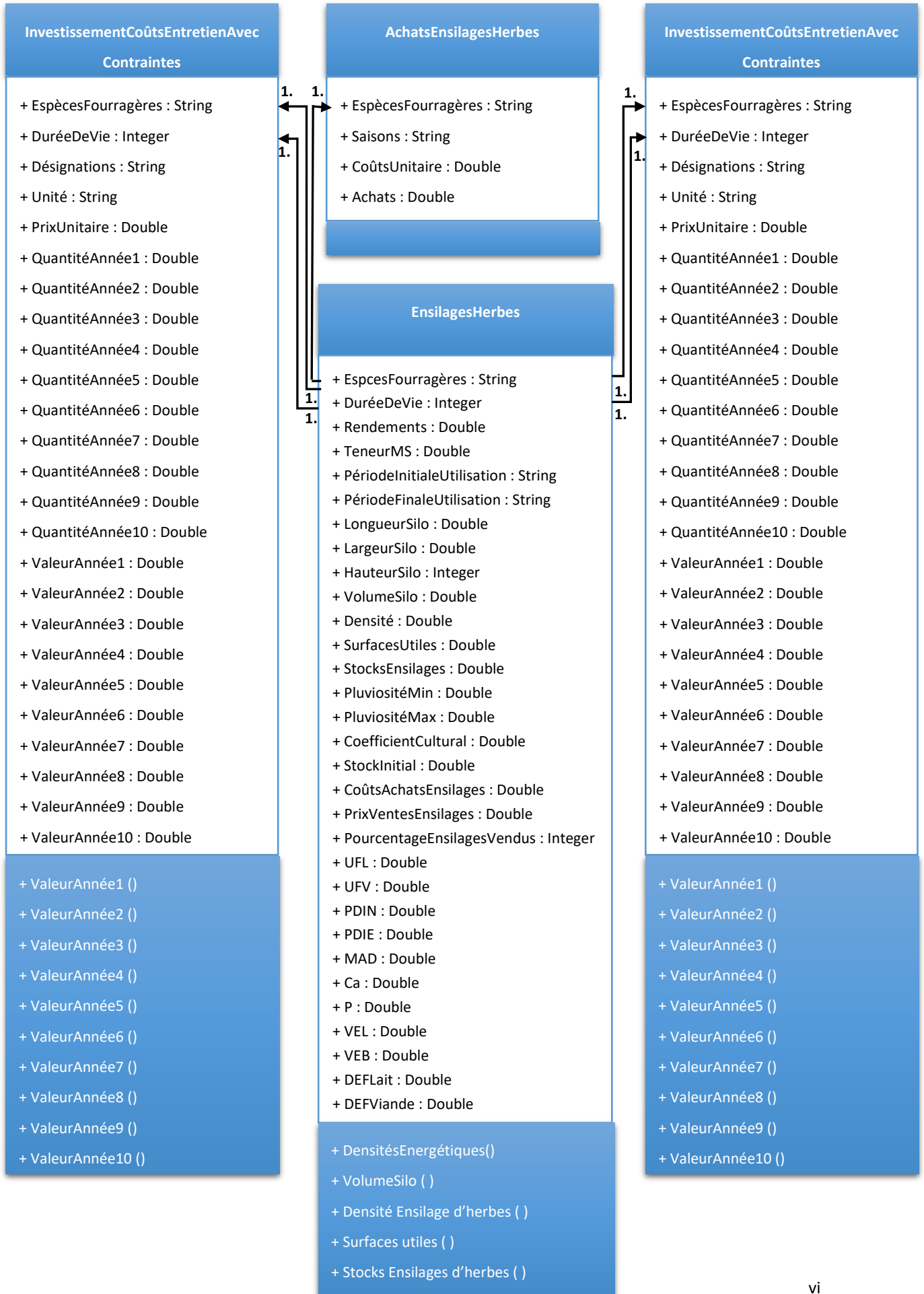
Annexe 2 : Poids sec des balles rondes enrubbannées en fonction de la teneur en matière sèche des fourrages.

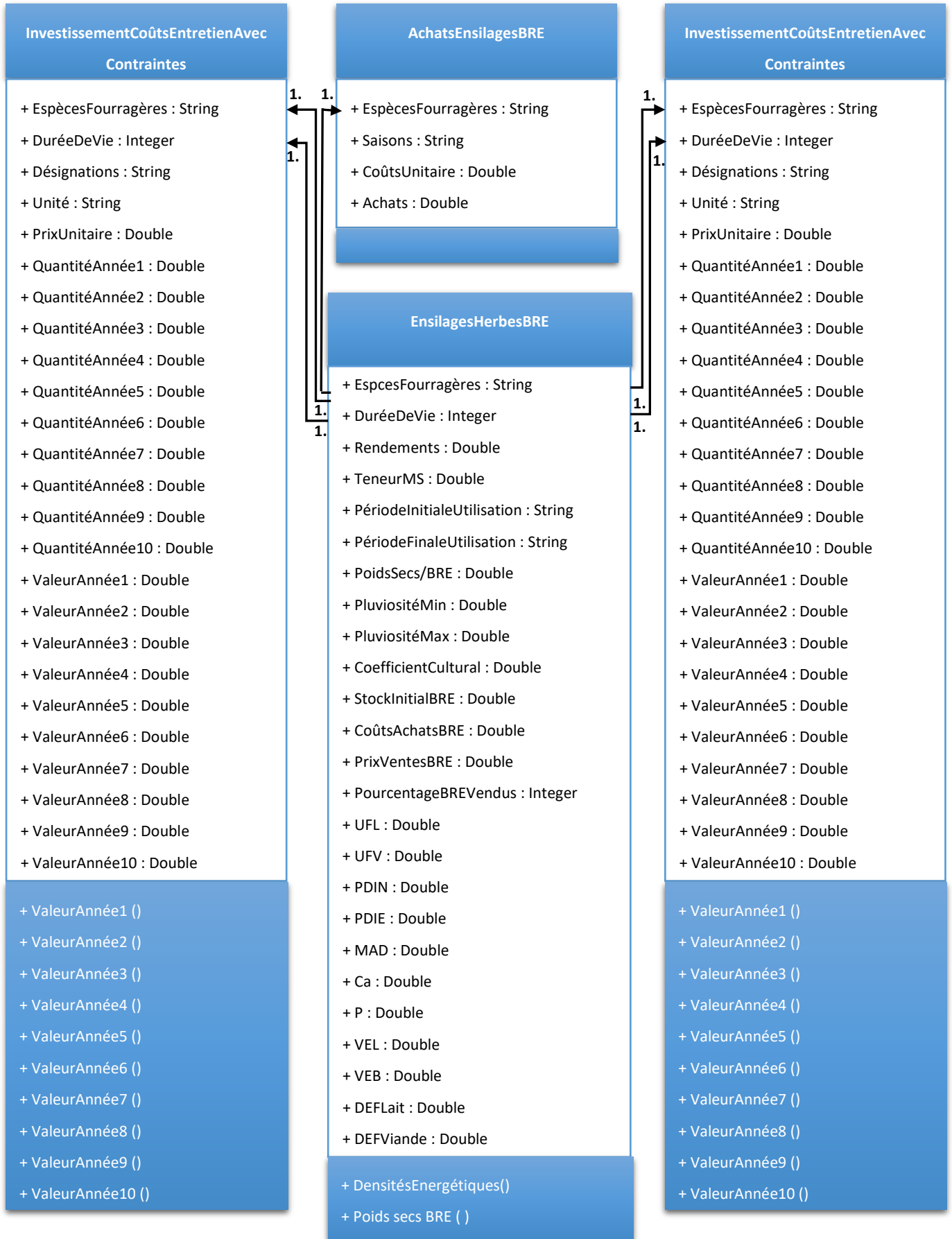
Teneur en Matière sèche (%)	Poids secs (Kg MS / BRE)
18	115
25	160
35	215
45	260

Source: BARBET-MASSIN et al., 2004.

Annexe 3 : Diagramme UML du système d'alimentation (fourrages annuels non – stockés, ensilages de maïs, ensilages d'herbe, ensilages en balle ronde, foins en botte).









Annexe 4 : Tableau ANOVA de l'analyse de régression multiple de l'ensilage d'herbe.

Modèle	Somme des carrés	ddl	Carré moyen	F	Signification
Régression	787 337,500	2	393 668,750	1,5E + 017	0,000
Résidu	0,00	147	0,000		
Total	787 337,500	149			

Variable indépendante : Matière Sèche (%), Hauteur (m). Variable dépendante : Densité (Kg MS/m³).

Annexe 5 : Tableau ANOVA de l'analyse de régression multiple de l'ensilage de maïs.

Modèle	Somme des carrés	ddl	Carré moyen	F	Signification
Régression	115 133 625,491	3	38 377 875,164	20 271,951	0,000
Résidu	24 419 761,118	12 899	1 893,151		
Total	139 553 386,609	12 902			

Variable indépendante : Matière Sèche (%), Hauteur (m). Variable dépendante : Densité (Kg MS/m³).

Annexe 6 : Balles rondes enrubannées - récapitulatif du modèle et estimations des paramètres.

Equation	Récapitulatif des modèles					Estimations de paramètres		
	R-deux	F	df1	df2	Sig.	Constante	b1	b2
Linéaire	0,995	364,298	1	2	0,003	22,774	5,357	0
Logarithmique	0,997	617,317	1	2	0,002	-345,864	158,371	0
Quadratique	1,000	202598,886	2	1	0,002	-23,513	8,61	-0,052
Exponentielle	0,965	55,590	1	2	0,018	71,811	0,030	0

Variable indépendante : Matière Sèche (%). Variable dépendante : Poids secs (Kg MS/BRE).

Annexe 7 : Temps de travaux préconisés par opération culturale (homme-jour/ha).

Itinéraire technique	<i>Stylosanthes guianensis</i>	<i>Brachiaria brizantha</i>	Riz pluvial	Maïs + légumineuses
Labours à l'angady	50	50	50	50
Préparations autres que le labour	15	15	15	15
Semis	20	20	35	40
Epannage d'herbicide d'entretien	-	-	2	-
Epannage d'insecticide	-	-	-	2
1er Entretiens	25	25	27	30
2ème Entretiens	25	25	27	30
Récoltes	-	-	47	45

ANNEXES

Annexe 8 : Temps de travaux réalisés par opérations culturales dans les Communes d’Imerimandroso et Amparihitsokatra (Homme-jour/ha).

PARCELLES /ESPECES	LABOURS A L'ANGADY				PREPARATIONS DU SOL AUTRES QUE LE LABOUR				SEMIS				SARCLAGES1				SARCLAGES2				RECOLTES	
	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C3	C4
P1	10,00	3,00	13,33	6,83	22,76	30,00	3,16	30,67	3,17	20,00	38,33	43,33	30,00	66,67	21,88	18,18	21,43	16,67	15,63	18,18	10,94	52,00
P2	10,00	15,00	37,50	8,50	18,52	22,00	4,17	24,13	15,00	30,00	33,82	18,09	80,00	40,00	30,00	30,43	27,27	15,00	20,00	21,74	11,11	16,00
P3	21,05	6,15	11,54	80,00	21,43	40,00	2,56	21,17	40,00	15,38	25,00	21,17	29,63	30,00	28,69	46,67	13,33	15,00	21,52	33,33	10,61	10,00
P4	9,64	?	3,66	4,69	18,18	15,63	2,78	16,00	16,67	30,00	40,43	53,33	21,43	46,88	31,82	16,86	20,00	33,33	22,73	16,86	16,00	25,00
P5	6,67	?	9,38	8,57	25,45	50,00	4,32	13,33	33,33	38,17	30,00	16,90	27,27	35,93	25,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	10,91	18,00
P6	11,11	?	20,00	10,00	26,79	50,00	4,00	15,00	20,69	21,05	25,00	15,82	13,33	25,00	29,39	29,71	30,00	20,00	25,19	25,47	21,74	31,00
P7	6,67	?	13,33	6,15	10,59	40,00	5,75	15,22	17,04	28,93	30,00	17,50	20,00	29,74	33,33	24,14	30,00	18,73	33,33	23,43	14,81	23,00
P8	6,67	?	12,90	8,00	35,93	56,18	4,35	30,00	21,43	17,86	26,67	18,74	20,00	31,25	33,33	31,65	42,37	21,28	33,33	23,53	14,81	18,00
P9	10,00			3,00	50,00			25,00	18,18			11,76	30,00			25,00	35,93			50,00		31,00
P10	7,93			15,87	29,74			30,00	6,67			15,00	33,33			23,43	25,00			37,50		32,00
P11	7,50			9,39	31,25			20,83	6,67			21,88	30,00			23,53	29,74			40,00		32,00
P12	8,33			10,00	20,00			13,33	5,33			15,00	42,37			50,00	31,25			16,67		28,00
P13				10,00				12,59				12,50				37,50				33,33		8,00
P14				8,00				25,00				13,33				40,00				25,19		16,00
P15				10,00				25,00				15,74				16,67				25,00		33,00
P16				8,00				80,00				31,25				40,00				25,00		17,00
P17				8,00				10,00				31,25				25,19				20,00		22,00
P18				8,00				6,67				60,00				25,00				16,67		10,00
P19				5,00				30,00				30,00				25,00				25,00		14,00
P20				8,00				28,57				29,00				20,00				15,00		32,00

C1 : *Stylosanthes guianensis*

C2 : *Brachiaria brizantha*

C3 : Riz

C4 : Maïs – Légumineuses

Annexe 9 : Test sur échantillon unique sur la disponibilité en mains d'œuvre pour les labours, préparations du sol autres que le labour, l'épandage de fumiers (en homme-jour/hectare).

9 – 1 Test-t: Labours

9 – 1 – 1 Statistiques sur échantillon unique

Cultures		N	Moyenne	Ecart-type	Erreur standard moyenne
<i>Stylosanthes guianensis</i>	Labours	12	9,6308	3,91291	1,12956
<i>Brachiaria brizantha</i>	Labours	3	8,0500	6,22154	3,59201
Riz	Labours	8	15,2050	10,09281	3,56835
Maïs - légumineuses	Labours	20	11,8000	16,26328	3,63658

9 – 1 – 2 Test sur échantillon unique

Cultures		Valeur du test = 50					
		t	ddl	Sig. (bilatérale)	Différence moyenne	Intervalle de confiance 95% de la différence	
						Inférieure	Supérieure
<i>Stylosanthes guianensis</i>	Labours	-35,739	11	0,000	-40,36917	-42,8553	-37,8830
<i>Brachiaria brizantha</i>	Labours	-11,679	7	0,007	-41,95000	-57,4052	-26,4948
Riz	Labours	-9,751	7	0,000	-34,79500	-43,2328	-26,3572
Maïs – légumineuses	Labours	-10,504	19	0,000	-38,20000	-45,8114	-30,5886

9 – 2 Test-t : Préparations du sol autres que le labour (PSAL)

9 – 2 – 1 Statistiques sur échantillon unique

Cultures		N	Moyenne	Ecart-type	Erreur standard moyenne
<i>Stylosanthes guianensis</i>	PSAL	12	25,8867	10,17520	2,93733
<i>Brachiaria brizantha</i>	PSAL	8	37,9763	14,37719	5,08310
Riz	PSAL	8	3,8863	1,03374	0,36548
Maïs - légumineuses	PSAL	20	23,6255	15,22454	3,40431

9 – 2 – 2 Test sur échantillon unique

Cultures		Valeur du test = 15					
		t	ddl	Sig. (bilatérale)	Différence moyenne	Intervalle de confiance 95% de la différence	
						Inférieure	Supérieure
<i>Stylosanthes guianensis</i>	PSAL	3,706	11	0,003	10,88667	4,4217	17,3517
<i>Brachiaria brizantha</i>	PSAL	4,520	7	0,003	22,97625	10,9566	34,9959
Riz	PSAL	-30,408	7	0,000	-11,11375	-11,9780	-10,2495
Maïs-légumineuses	PSAL	2,534	19	0,020	8,62550	1,5002	15,7508

9 – 3 Test-t : main d'œuvre (MO) semis9 – 3 – 1 Statistiques sur échantillon unique

Cultures		N	Moyenne	Ecart-type	Erreur standard moyenne
<i>Stylosanthes guianensis</i>	MO Semis (hj/ha)	12	17,0150	11,18150	3,22782
<i>Brachiaria brizantha</i>	MO Semis (hj/ha)	8	25,1738	7,77155	2,74766
Riz	MO Semis (hj/ha)	8	31,1563	5,89382	2,08378
Maïs - légumineuses	MO Semis (hj/ha)	20	24,5795	13,66925	3,05654

9 – 3 – 2 Test sur échantillon unique (*Stylosanthes guianensis*, *Brachiaria brizantha*)

Cultures		Valeur du test = 20					
		t	ddl	Sig. (bilatérale)	Différence moyenne	Intervalle de confiance 95% de la différence	
						Inférieure	Supérieure
<i>Stylosanthes guianensis</i>	MO Semis (hj/ha)	-0,925	11	0,375	-2,98500	-10,0894	4,1194
<i>Brachiaria brizantha</i>	MO Semis (hj/ha)	1,883	7	0,102	5,17375	-1,3234	11,6709

9 – 3 – 3 Test sur échantillon unique (Riz pluvial)

Cultures		Valeur du test = 35					
		t	ddl	Sig. (bilatérale)	Différence moyenne	Intervalle de confiance 95% de la différence	
						Inférieure	Supérieure
Riz	MO Semis (hj/ha)	-1,845	7	0,108	-3,84375	-8,7711	1,0836

9 – 3 – 4 Test sur échantillon unique (Maïs - légumineuses)

Cultures		Valeur du test = 40					
		t	ddl	Sig. (bilatérale)	Différence moyenne	Intervalle de confiance 95% de la différence	
						Inférieure	Supérieure
Maïs – légumineuses	MO Semis (hj/ha)	-5,045	19	0,000	-15,42050	-21,8179	-9,0231

9 – 4 Test-t : Sarclages9 – 4 – 1 Statistiques sur échantillon unique

Cultures		N	Moyenne	Ecart-type	Erreur standard moyenne
<i>Stylosanthes guianensis</i>	MO 1er sarclages (hj/ha)	12	31,4467	17,05050	4,92206
	MO 2ème sarclages (hj/ha)	12	27,1933	7,85708	2,26814
<i>Brachiaria brizantha</i>	MO 1er sarclages (hj/ha)	8	38,1838	13,39311	4,73518
	MO 2ème sarclages (hj/ha)	8	20,0013	5,88010	2,07893
Riz	MO 1er Sarclages (hj/ha)	8	29,1800	4,02019	1,42135
	MO 2ème Sarclages (hj/ha)	8	23,9663	6,38441	2,25723
Maïs - légumineuses	MO 1er Sarclages (hj/ha)	20	28,4480	9,72387	2,17432
	MO 2ème Sarclages (hj/ha)	20	25,5950	9,04668	2,02290

9 – 4 – 2 Test sur échantillon unique (*Stylosanthes guianensis*, *Brachiaria brizantha*)

Cultures		Valeur du test = 25					
		t	ddl	Sig. (bilatérale)	Différence moyenne	Intervalle de confiance 95% de la différence	
						Inférieure	Supérieure
<i>Stylosanthes guianensis</i>	MO 1er sarclages (hj/ha)	1,310	11	0,217	6,44667	-4,3867	17,2800
	MO 2ème sarclages (hj/ha)	0,967	11	0,354	2,19333	-2,7988	7,1855
<i>Brachiaria brizantha</i>	MO 1er sarclages (hj/ha)	2,784	7	0,027	13,18375	1,9868	24,3807
	MO 2ème sarclages (hj/ha)	-2,404	7	0,047	-4,99875	-9,9146	-0,0829

9 – 4 – 3 Test sur échantillon unique (Riz pluvial)

Cultures		Valeur du test = 27					
		t	ddl	Sig. (bilatérale)	Différence moyenne	Intervalle de confiance 95% de la différence	
						Inférieure	Supérieure
Riz	MO 1er sarclages (hj/ha)	1,534	7	0,169	2,18000	-1,1810	5,5410
	MO 2ème sarclages (hj/ha)	-1,344	7	0,221	-3,03375	-8,3713	2,3038

9 – 4 – 4 Test sur échantillon unique (Maïs - légumineuses)

Cultures		Valeur du test = 30					
		t	ddl	Sig. (bilatérale)	Différence moyenne	Intervalle de confiance 95% de la différence	
						Inférieure	Supérieure
Maïs - légumineuses	MO 1er sarclages (hj/ha)	-0,714	19	0,484	-1,55200	-6,1029	2,9989
	MO 2ème sarclages (hj/ha)	-2,178	19	0,042	-4,40500	-8,6390	-0,1710

9 – 5 Test-t : Récoltes**9 – 5 – 1 Statistiques sur échantillon unique**

Cultures		N	Moyenne	Ecart-type	Erreur standard moyenne
Riz	MO Récoltes (hj/ha)	8	13,8663	3,85139	1,36167
Maïs - légumineuses	MO Récoltes (hj/ha)	20	23,4000	10,67905	2,38791

9 – 5 – 2 Test sur échantillon unique (Riz pluvial)

Cultures		Valeur du test = 27					
		t	ddl	Sig. (bilatérale)	Différence moyenne	Intervalle de confiance 95% de la différence	
						Inférieure	Supérieure
Riz	MO Récoltes (hj/ha)	-24,333	7	0,000	-33,13375	-36,3536	-29,9139

9 – 5 – 3 Test sur échantillon unique (Maïs - légumineuses)

Cultures		Valeur du test = 30					
		t	ddl	Sig. (bilatérale)	Différence moyenne	Intervalle de confiance 95% de la différence	
						Inférieure	Supérieure
Maïs - légumineuses	MO Récoltes (hj/ha)	-9,046	19	0,000	-21,60000	-26,5979	-16,6021

Annexe 10 : Intrants préconisés par opérations culturales.

Intrants	Unité	<i>Stylosanthes guianensis</i>	<i>Brachiaria brizantha</i>	Riz pluvial	Maïs + légumineuses
Semences	Kg/ha	3	3	50	Maïs: 25 Légumineuses: 12
NPK 11-22-16	Kg/ha	150	150	150	150
Fumiers	Kg/ha	5.000	5.000	5.000	5.000
Urée	Kg/ha	-	-	75	75
Herbicide d'entretien (2-4 D : conc. 720g/l)	l/ha	-	-	1	-
Insecticide (cyperméthrine : conc. 240g/l)	l/ha	-	-	-	0,25

Annexe 11 : Niveaux d'intrants réalisés par opération culturale (Kg/ha).

PARCELLES/ESPECES	SEMENCES					NPK		FUMIERS				UREE1	UREE2	INSECTICIDES	HERBICIDES
	C1	C2	C3	C4M	C4L	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C3	C3	C4	C3
P1	5,00	2,00	61,11	23,33	13,33	66,67	40,00	793,15	2666,67	2000,00	144,75	32,26	50,00	1,14	0,99
P2	4,00	1,95	63,53	30,16	14,84	100,00	166,67	3000,00	1872,66	2608,70	211,71	33,33	25,00	0,24	1
P3	6,00	2,00	25,00	24,70	14,82	100,00	5,00	666,67	5319,15	2058,82	5333,33	35,29	40,00	0,25	1
P4	2,89	1,85	52,17	83,33	18,00	40,00	45,45	1666,67	2500,00	214,29	4545,45	52,63	25,00	0,25	1
P5	3,21	3,17	60,00	24,14	15,21	26,09	45,45	1666,67	2500,00	1764,71	4347,83	51,61	20,00	0,29	1
P6	3,64	6,67	59,38	23,73	15,82	43,04	24,14	666,67	2439,02	2000,00	3333,33	25,00	23,33	0,25	1
P7	3,33	5,33	60,00	25,00	15,75	45,45	3,16	3000,00	2000,00	5217,39	1686,34	27,03	12,50	0,23	1
P8	3,33	6,20	60,00	24,60	18,74	32,44	25,00	3333,33	2222,22	1538,46	2000,00	33,33	28,00	0,21	1
P9	1,91			23,53	14,12		23,43	2500,00			424,45			0,24	
P10	19,07			25,00	15,00		2,35	4000,00			3621,44			0,25	
P11	20,00			25,00	15,00		31,25	4000,00			3955,70			0,25	
P12	2,00			25,00	15,00		43,75	2800,00			3750,00			0,24	
P13				25,00	15,00		50,00				3748,83			0,25	
P14				25,00	15,00		60,00				5882,35			0,25	
P15				15,74	6,30		35,71				5000,00			0,24	
P16				25,00	20,00		27,14				4687,50			0,24	
P17				25,00	20,00		100,00				5000,00			0,25	
P18				2,40	25,00		10,00				4166,67			0,25	
P19				25,00	25,00		100,00				5000,00			0,25	
P20				25,00	20,00		100,00				3148,61			0,17	

C1 : *Stylosanthes guianensis* ; C2 : *Brachiaria brizantha* ; C3 : Riz ; C4 : Maïs – Légumineuses (C4M : Maïs ; C4L : Légumineuses)

Annexe 12 : Test sur échantillons unique sur la disponibilité en intrant agricole.**12 – 1 Test-t: Semences****12 – 1 – 1 Statistiques sur échantillon unique**

Cultures		N	Moyenne	Ecart-type	Erreur standard moyenne
<i>Stylosanthes guianensis</i>	Semences (Kg/ha)	12	6,1983	6,33435	1,82857
<i>Brachiaria brizantha</i>	Semences (Kg/ha)	8	3,6463	2,07882	0,73498
Riz	Semences (Kg/ha)	8	55,1488	12,60447	4,45635
Maïs	Semences (Kg/ha)	20	26,2830	14,50980	3,24449
Légumineuses	Semences (Kg/ha)	20	16,5965	4,15237	0,92850

12 – 1 – 2 Test sur échantillon unique (*Stylosanthes guianensis*, *Brachiaria brizantha*)

Cultures		Valeur du test = 3					
		t	ddl	Sig. (bilatérale)	Différence moyenne	Intervalle de confiance 95% de la différence	
						Inférieure	Supérieure
<i>Stylosanthes guianensis</i>	Semences (Kg/ha)	1,749	11	0,108	3,19833	-0,8263	7,2230
<i>Brachiaria brizantha</i>	Semences (Kg/ha)	0,879	7	0,408	0,64625	-1,0917	2,3842

12 – 1 – 3 Test sur échantillon unique (Riz pluvial)

Cultures		Valeur du test = 50					
		t	ddl	Sig. (bilatérale)	Différence moyenne	Intervalle de confiance 95% de la différence	
						Inférieure	Supérieure
Riz	Semences (Kg/ha)	0,155	7	0,286	5,14875	-5,3889	15,6864

12 – 1 – 4 Test sur échantillon unique (Maïs - légumineuses)

Cultures		Valeur du test = 25					
		t	ddl	Sig. (bilatérale)	Différence moyenne	Intervalle de confiance 95% de la différence	
						Inférieure	Supérieure
Maïs	Semences (Kg/ha)	0,395	9	0,697	1,28300	-5,5078	8,0738
Légumineuses	Semences (Kg/ha)	4,950	9	0,000	4,59650	2,6531	6,5399

12 – 2 Test-t: Engrais composés (NPK 11-22-16)**12 – 2 – 1 Statistiques sur échantillon unique**

Cultures		N	Moyenne	Ecart-type	Erreur standard moyenne
Riz	NPK (Kg/ha)	8	56,7113	29,19576	10,32226
Maïs - légumineuses	NPK (Kg/ha)	20	46,9250	41,27622	9,22964

12 – 2 – 2 Test sur échantillon unique

Cultures		Valeur du test = 150					
		t	ddl	Sig. (bilatérale)	Différence moyenne	Intervalle de confiance 95% de la différence	
						Inférieure	Supérieure
Riz	NPK (Kg/ha)	-9,038	7	0,000	-93,28875	-117,6970	-68,8805
Maïs - légumineuses	NPK (Kg/ha)	-11,168	19	0,000	-103,07500	-122,3929	-83,7571

12 – 3 Test-t: Fumiers de ferme**12 – 3 – 1 Statistiques sur échantillon unique**

Cultures		N	Moyenne	Ecart-type	Erreur standard moyenne
<i>Stylosanthes guianensis</i>	Fumiers (Kg/ha)	12	2341,0967	1224,96190	353,61604
<i>Brachiaria brizantha</i>	Fumiers (Kg/ha)	8	2689,9652	1096,16992	387,55459
Riz	Fumiers (Kg/ha)	8	2175,2955	1411,02324	498,87205
Maïs - légumineuses	Fumiers (Kg/ha)	20	3499,4145	1732,35578	387,36653

12 – 3 – 2 Test sur échantillon unique

Cultures		Valeur du test = 5.000					
		t	ddl	Sig. (bilatérale)	Différence moyenne	Intervalle de confiance 95% de la différence	
						Inférieure	Supérieure
<i>Stylosanthes guianensis</i>	Fumiers (Kg/ha)	-7,519	11	0,000	-2658,90333	-3437,2070	-1880,5997
<i>Brachiaria brizantha</i>	Fumiers (Kg/ha)	-5,961	7	0,001	-2310,03483	-3226,4558	-1393,6138
Riz	Fumiers (Kg/ha)	-5,662	7	0,001	-2824,70455	-4004,3495	-1645,0596
Maïs-légumineuses	Fumiers (Kg/ha)	-3,874	19	0,001	-1500,58550	-2311,3530	-689,8180

12 – 4 Test-t: Engrais simples (Urée 46-0-0)**12 – 4 – 1 Statistiques sur échantillon unique (Riz pluvial)**

Cultures		N	Moyenne	Ecart-type	Erreur standard moyenne
Riz	Urée 1 (Kg/ha)	8	36,3100	10,34871	3,65882
	Urée 2 (Kg/ha)	8	27,9788	11,78410	4,16631

12 – 4 – 2 Test sur échantillon unique (Riz pluvial)

Cultures		Valeur du test = 75					
		t	ddl	Sig. (bilatérale)	Différence moyenne	Intervalle de confiance 95% de la différence	
						Inférieure	Supérieure
Riz	Urée 1 (Kg/ha)	-10,574	7	0,000	-38,69000	-47,3417	-30,0383
	Urée 2 (Kg/ha)	-11,286	7	0,000	-47,02125	-56,8730	-37,1695

12 – 5 Test-t: Insecticides (cyperméthrine)**12 – 5 – 1 Statistiques sur échantillon unique (Maïs - légumineuses)**

Cultures		N	Moyenne	Ecart-type	Erreur standard moyenne
Maïs - légumineuses	Cyperméthrine (l/ha)	20	0,2870	0,20199	0,04517

12 – 5 – 2 Test sur échantillon unique (Maïs - légumineuses)

Cultures		Valeur du test = 0,25					
		t	ddl	Sig. (bilatérale)	Différence moyenne	Intervalle de confiance 95% de la différence	
						Inférieure	Supérieure
Maïs - légumineuses	Cyperméthrine (l/ha)	0,819	19	0,423	0,03700	-0,0575	0,1315

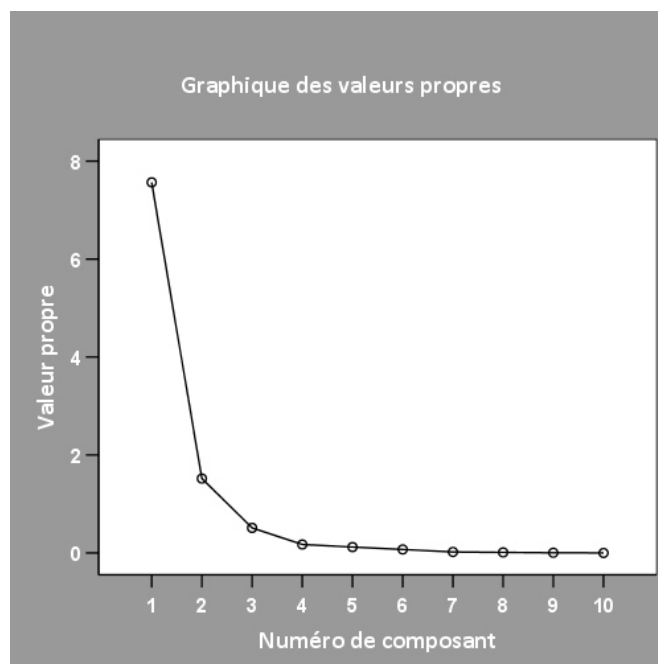
Annexe 13 : Résultats complets de l'analyse factorielle en composantes principales de la composition chimique et énergétique de fourrages provenant des parcelles fourragères des Communes rurales d'Imerimandroso et d'Amparihitsokatra.

13 – 1 Qualité de représentation			13 – 2 Matrice des composantes après rotation (a)		
	Initial ⁽¹⁾	Extraction ⁽²⁾	Corrélation	Composante	
				1	2
MS (%)	1,000	0,928	MS (%)	0,936	-0,227
MM (g/Kg MS)	1,000	0,837	MM (g/Kg MS)	0,894	-0,194
MAT (g/Kg MS)	1,000	0,955	MAT (g/Kg MS)	-0,113	0,971
NDF (g/Kg MS)	1,000	0,972	NDF (g/Kg MS)	0,894	-0,415
ADF (g/Kg MS)	1,000	0,946	ADF (g/Kg MS)	0,920	-0,316
ADL (g/Kg MS)	1,000	0,842	ADL (g/Kg MS)	0,911	-0,108
HEMI (g/Kg MS)	1,000	0,940	HEMI (g/Kg MS)	0,819	-0,520
CB (g/Kg MS)	1,000	0,945	CB (g/Kg MS)	0,867	-0,440
EB (Kcal/Kg MS)	1,000	0,812	EB (Kcal/Kg MS)	-0,495	0,753
EM (KCal/Kg MS)	1,000	0,909	EM (KCal/Kg MS)	-0,286	0,910
Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.			Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.		
(1) estimations de la variance dans chaque variable représentée par l'ensemble des composants ou facteurs.			Méthode de rotation : Varimax avec normalisation de Kaiser.		
(2) estimations de la variance dans chaque variable représentée par les composantes extraites.			(a) La rotation a convergé en 3 itérations.		

13 – 3 Variance totale expliquée*

Composante	Valeurs propres initiales			Extraction Sommes des carrés des facteurs retenus			Somme des carrés des facteurs retenus pour la rotation		
	Total	% de la variance	% cumulés	Total	% de la variance	% cumulés	Total	% de la variance	% cumulés
1	7,567	75,668	75,668	7,567	75,668	75,668	5,914	59,137	59,137
2	1,520	15,200	90,868	1,520	15,200	90,868	3,173	31,731	90,868
3	,512	5,116	95,984						
4	,173	1,729	97,713						
5	,120	1,201	98,914						
6	,072	,715	99,630						
7	,020	,203	99,833						
8	,012	,118	99,951						
9	,005	,049	100,000						
10	1,49E-010	1,49E-009	100,000						

*Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.

13 – 4 Graphique des valeurs propres**13 – 5 Matrice des composantes (a)**

	Composante	
	1	2
MS (%)	0,917	0,296
MM (g/Kg MS)	0,864	0,302
MAT (g/Kg MS)	-0,604	0,768
NDF (g/Kg MS)	0,979	0,114
ADF (g/Kg MS)	0,949	0,212
ADL (g/Kg MS)	0,833	0,384
HEMI (g/Kg MS)	0,970	-0,015
CB (g/Kg MS)	0,969	0,079
EB (Kcal/Kg MS)	-0,816	0,384
EM (KCal/Kg MS)	-0,720	0,626

Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.

a 2 composantes extraites.

13 – 6 Matrice des coefficients des coordonnées des composantes

	Composante	
	1	2
MS (%)	0,205	0,103
MM (g/Kg MS)	0,201	0,110
MAT (g/Kg MS)	0,196	0,473
NDF (g/Kg MS)	0,149	-0,004
ADF (g/Kg MS)	0,180	0,053
ADL (g/Kg MS)	0,226	0,158
HEMI (g/Kg MS)	0,104	-0,075
CB (g/Kg MS)	0,136	-0,023
EB (Kcal/Kg MS)	0,040	0,272
EM (KCal/Kg MS)	0,134	0,401

Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.

Méthode de rotation : Varimax avec normalisation de Kaiser.

Scores composante.

13 – 7 Matrice de transformation des composantes

Composante	1	2
1	0,852	-0,523
2	0,523	0,852

Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.

Méthode de rotation : Varimax avec normalisation de Kaiser.

13 – 8 Matrice de covariance des composantes

Composante	1	2
1	1,000	0,000
2	0,000	1,000

Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.

Méthode de rotation : Varimax avec normalisation de Kaiser.

Scores composante.

Annexe 14 : Matrice de corrélation entre les composants chimiques et énergétiques de *Stylosanthes guianensis* – plante entière.

	MS	MM	MAT	NDF	ADF	ADL	HEMI	CB	EB	EM
MS	1,00									
MM	0,79	1,00								
MAT	-0,05	0,26	1,00							
NDF	0,94	0,66	-0,24	1,00						
ADF	0,90	0,63	-0,31	0,99	1,00					
ADL	0,86	0,55	-0,38	0,96	0,98	1,00				
HEMI	0,85	0,61	0,06	0,81	0,71	0,69	1,00			
CB	0,90	0,63	-0,31	0,98	0,99	0,97	0,73	1,00		
EB	0,10	-0,27	0,41	0,03	-0,04	-0,04	0,28	-0,05	1,00	
EM	-0,20	-0,08	0,58	-0,49	-0,56	-0,63	-0,14	-0,54	0,39	1,00

Annexe 15 : Matrice de corrélation entre les composants chimiques et énergétiques de *Brachiaria brizantha* – plante entière.

	MS	MM	MAT	NDF	ADF	ADL	HEMI	CB	EB	EM
MS	1,00									
MM	0,88	1,00								
MAT	-0,46	-0,12	1,00							
NDF	0,36	0,09	-0,87	1,00						
ADF	0,62	0,33	-0,88	0,90	1,00					
ADL	0,49	0,32	-0,84	0,87	0,89	1,00				
HEMI	-0,46	-0,49	-0,17	0,43	0,00	0,15	1,00			
CB	0,96	0,77	-0,61	0,55	0,79	0,64	-0,37	1,00		
EB	-0,09	-0,11	0,63	-0,65	-0,51	-0,73	-0,45	-0,19	1,00	
EM	-0,49	-0,24	0,94	-0,95	-0,92	-0,92	-0,26	-0,65	0,72	1,00

Annexe 16 : Résultats complets de l'analyse factorielle en composantes principales de la composition chimique et énergétique de fourrages provenant des pâturages naturels de la Commune rurale de Bemanonga - Morondava.

16 - 1 Qualité de représentation

	Initial ⁽¹⁾	Extraction ⁽²⁾
MS (%)	1,000	0,997
MM (g/Kg MS)	1,000	0,984
MAT (g/Kg MS)	1,000	0,764
NDF (g/Kg MS)	1,000	0,998
ADF (g/Kg MS)	1,000	0,987
ADL (g/Kg MS)	1,000	0,904
HEMI (g/Kg MS)	1,000	0,957
CB (g/Kg MS)	1,000	0,974
EB (Kcal/Kg MS)	1,000	0,976
EM (KCal/Kg MS)	1,000	0,965

Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.

(1) estimations de la variance dans chaque variable représentée par l'ensemble des composants ou facteurs.

(2) estimations de la variance dans chaque variable représentée par les composantes extraites.

16 - 2 Matrice des composantes (a)

Corrélation	Composante		
	1	2	3
MS (%)	0,974	0,212	0,048
MM (g/Kg MS)	0,318	0,876	-0,339
MAT (g/Kg MS)	-0,427	0,747	0,159
NDF (g/Kg MS)	0,995	0,090	-0,004
ADF (g/Kg MS)	0,986	0,033	-0,120
ADL (g/Kg MS)	0,869	-0,358	-0,146
HEMI (g/Kg MS)	0,945	0,176	0,183
CB (g/Kg MS)	0,973	0,149	-0,074
EB (Kcal/Kg MS)	0,454	-0,693	0,539
EM (KCal/Kg MS)	0,041	0,623	0,758

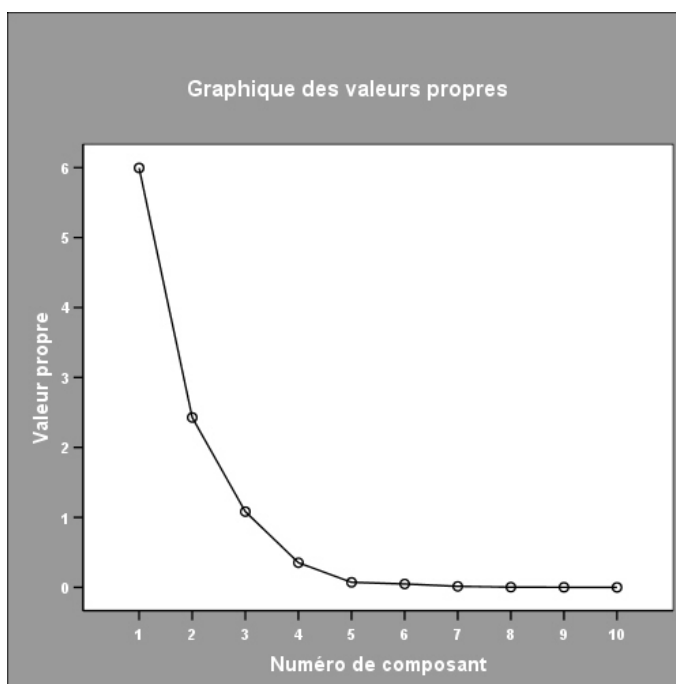
Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.

(a) Méthode de rotation : aucune.

16 - 3 Variance totale expliquée*

Composante	Valeurs propres initiales			Extraction Sommes des carrés des facteurs retenus		
	Total	% de la variance	% cumulés	Total	% de la variance	% cumulés
1	5,995	59,952	59,952	5,995	59,952	59,952
2	2,428	24,281	84,233	2,428	24,281	84,233
3	1,083	10,826	95,059	1,083	10,826	95,059
4	0,353	3,531	98,590			
5	0,072	0,723	99,312			
6	0,049	0,491	99,803			
7	0,015	0,151	99,954			
8	0,003	0,031	99,985			
9	0,002	0,015	100,000			
10	1,75E-016	1,75E-015	100,000			

*Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.

16 – 4 Graphique des valeurs propres16 – 5 Matrice des coefficients des coordonnées des composantes

	Composante		
	1	2	3
MS (%)	0,163	0,087	0,044
MM (g/Kg MS)	0,053	0,361	-0,313
MAT (g/Kg MS)	-0,071	0,307	0,147
NDF (g/Kg MS)	0,166	0,037	-0,004
ADF (g/Kg MS)	0,164	0,013	-0,110
ADL (g/Kg MS)	0,145	-0,147	-0,135
HEMI (g/Kg MS)	0,158	0,072	0,169
CB (g/Kg MS)	0,162	0,061	-0,068
EB (Kcal/Kg MS)	0,076	-0,285	0,498
EM (KCal/Kg MS)	0,007	0,257	0,701

Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.

Méthode de rotation : aucune.

Scores composante.

16 – 6 Matrice de covariance des composantes

Composante	1	2	3
1	1,000	0,000	0,000
2	0,000	1,000	0,000
3	0,000	0,000	1,000

Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.

Méthode de rotation : aucune.

Scores composante.

Annexe 17 : Besoins énergétiques, azotés et en minéraux des zébus malgaches et des races améliorées rencontrées à Madagascar (CARRE, 1975).

17 – 1 Besoins énergétiques

Entretien seul					
Zébu malgache		Races améliorées			
Poids en Kg	UF/jour	Poids en Kg	UF/jour	Poids en Kg	UF/jour
250	2,3	50	0,7	450	3,5
300	2,6	100	1,2	500	3,8
350	2,9	150	1,6	550	4,1
400	3,2	200	2	600	4,4
450	3,5	250	2,3	650	4,7
500	3,8	300	2,6	700	4,9
		350	2,9	750	5,2
		400	3,2	800	5,4

Source : CARRE, 1975.

Entretien + croissance							
Zébu malgache			Races améliorées (UF/j)				
Age	Poids en Kg	UF/jour	Poids en Kg	GMQ : 250 g/j	GMQ : 500g/j	GMQ : 750 g/j	GMQ : 1.000 g/j
	50	1,3	50		1,2	1,6	2
6 mois	100	1,9	100		1,9	2,4	2,9
15 mois	150	2,5	150		2,5	3	3,7
2 ans	200	3	200		3	3,6	4,1
2,5 ans	250	3,1	250	2,8	3,5	4,2	4,6
3 ans	300	3,2	300	3,3	4	4,8	5,3
4 ans	350	3,3	400	4,1	4,9	5,8	6,3
5 ans	400	3,5	500	4,7	5,4	6,2	7,1

Source : CARRE, 1975.

Engraissement (à ajouter à l'entretien)				
Zébu malgache		Races améliorées		
Stade	UF/Kg de gain	Age	UF/Kg de gain Début	UF/Kg de gain Fin
Début embouche		18 mois à 2 ans	2,4	3,2
Moins de 3 ans	3	2 ans à 3 ans	3,2	4,1
Plus de 3 ans	4	3 ans et plus	4	5,2
Fin embouche				
Fin embouche	5			

Source : CARRE, 1975.

Production laitière (à ajouter à l'entretien)		
% de Matières grasses	Zébu malgache	Races améliorées
	Besoins communs	
3	0,3 UF / Kg de lait	
4	0,4 UF / Kg de lait	
5	0,5 UF / Kg de lait	

Source : CARRE, 1975.

Gestation (à ajouter à l'entretien)		
Stades	Zébu malgache	Races améliorées
	Besoins communs	
7 ^{ème} mois	0,1 UF / 100 Kg PV / jour	
8 ^{ème} mois	0,2 UF / 100 Kg PV / jour	
9 ^{ème} mois	0,3 UF / 100 Kg PV / jour	

Source : CARRE, 1975.

17 – 2 Besoins azotés

Pour l'entretien seul, il faut 0,6 g de MAD par kg de poids vif (CARRE, 1975).

Production laitière (à ajouter à l'entretien)		
% de Matières grasses	Zébu malgache	Races améliorées
	Besoins communs	
3	50 g MAD / Kg de lait	
4	60 g MAD / Kg de lait	
5	70 g MAD / Kg de lait	

Source : CARRE, 1975.

Engraissement (à ajouter à l'entretien)		
Zébu malgache	Races améliorées	
Besoins totaux (g MAD/UF)	g MAD /UF Début	g MAD /UF Fin
90	90	80

Source : CARRE, 1975.

Entretien + croissance							
Zébu malgache			Races améliorées (g MAD/j)				
Age	Poids en Kg	g MAD/jour	Poids en Kg	GMQ : 250 g/j	GMQ : 500g/j	GMQ : 750 g/j	GMQ : 1.000 g/j
	50	190	50		125	175	225
6 mois	100	230	100		250	325	400
15 mois	150	230	150		325	400	475
2 ans	200	240	200		350	425	500
2,5 ans	250	250	250	300	375	450	525
3 ans	300	260	300	325	400	475	550
4 ans	350	270	400	375	450	525	600
5 ans	400	280	500	375	450	525	600

Source : CARRE, 1975.

Gestation (à ajouter à l'entretien)		
Stades	Zébu malgache	Races améliorées
	Besoins communs	
7 ^{ème} mois	15 g MAD / 100 Kg PV / jour	
8 ^{ème} mois	20 g MAD / 100 Kg PV / jour	
9 ^{ème} mois	30 g MAD / 100 Kg PV / jour	

Source : CARRE, 1975.

17 – 3 Besoins en Ca et en P

Besoins communs vaches laitières		
Stades	Ca	P
Entretien	5 g/100 Kg PV	3 g/100 Kg PV
Gestation	6 g/100 Kg PV	5,5 g/100 Kg PV
Lactation	3 g/ Kg lait	2,5 g/ Kg lait

Source : CARRE, 1975.

Besoins communs Jeunes bovins en croissance		
Poids en Kg	Ca (g/j)	P (g/j)
100	21	13
200	26	19
300	28	21
400	31	23
500	35	25

Source : CARRE, 1975.

Annexe 18 : Recensement de l'effectif bovin appartenant à 13 éleveurs enquêtés dans les Communes Imerimandroso et Amparihitsokatra en 2009.

Propriétaire	Vaches	Taureaux	Taurillons	Castrés	Génisses	Veaux	Total
P1	0	4	0	0	0	0	4
P2	2	5	3	0	2	0	12
P3	9	0	0	9	4	4	26
P4	0	2	0	0	0	0	2
P5	1	0	2	3	0	1	7
P6	3	2	0	6	4	0	15
P7	2	2	0	0	0	2	6
P8	0	0	0	4	0	0	4
P9	3	0	0	4	0	0	7
P10	2	6	0	0	1	0	9
P11	0	0	0	2	0	0	2
P12	3	0	1	2	3	4	13
P13	1	0	0	2	2	1	6
P14	3	1	1	0	1	0	6
Total/Catégorie	29	22	7	32	17	12	119

Annexe 19 : Quantité de fumier et de fèces excrétée par une vache Holstein.

Mesures	Standard ASAE	Vache produisant en moyenne plus de 20 kg de lait par jour	Vache produisant en moyenne moins de 20 kg de lait par jour	Animaux en croissance
		Moyenne (Ecart – type) (Kg /jour/1.000 Kg de poids vifs)		
Fumier	86 (17)	89 (22,5)	65,9 (17,3)	67,5 (18,5)
Fèces	60	60 (18,1)	41,2 (13,8)	32,6 (10)

Source : NIDUMOLU, 2007.

Annexe 20 : Les composantes du logiciel « D-Algo »

Les modules « Ressources », « Troupeaux » et « Immobilisations » concentrent toutes les fonctions biotechniques du modèle D - Algo. Le modèle comprend cinq composantes principales :

- le « centre d'analyse »
- les « Ressources »
- les « Troupeaux »
- les « Immobilisations »
- et les « Productions »

20 - 1 Le « Centre d'analyse »

Le système de pilotage est appelé le « Centre d'analyse ». On l'a nommé ainsi car en tant qu'outil informatique d'aide à la décision, ce composant ne pourra jamais remplacer la vraie fonction du « pôle humain ». La décision finale est seulement prise à partir des analyses effectuées à partir de ce volet. Comme la décision finale dépend essentiellement des analyses obtenues, c'est à ce niveau que sont localisés les outils relatifs à la configuration du solveur, au lancement de l'optimisation avec la programmation linéaire multi-périodique - récursive, ainsi qu'à l'affichage des résultats de l'optimisation (forme canonique de la programmation linéaire, analyse de sensibilité), de l'analyse financière (flux net de trésorerie, VAN, TRI), du chargement annuel (exprimé en UGB par hectare), du financement et des subventions des immobilisations.



20 – 2 Les Ressources

La composante « Ressources » compte deux sous-composantes principales : les « Ressources disponibles » et les « Cultures fourragères ». Comme son nom l'indique, les « ressources disponibles » concernent tous les facteurs de production existants liés au système fourrager. Parmi ceux-ci, on a :

- ✓ « Saisonnalité » : permet de spécifier le nombre de périodes et la durée de chaque période au cours d'une année d'exercice. Au maximum, on peut spécifier 12 périodes correspondant à 12 mois, soit une année. Mais on peut également cumuler plusieurs mois dans une seule période selon le degré d'engorgement des ressources disponibles (mains d'œuvre, engrais, etc.). Il n'est pas obligatoire que toutes les périodes ont des durées égales. Par contre le mois de début de la première saison doit correspondre au mois de début de la simulation ;
- ✓ « Fourrages » : le logiciel D-Algo procure dès le départ une centaine de liste d'espèce fourragère qu'on pourrait utiliser dans la simulation. Toutefois, on peut ajouter ou supprimer d'autres espèces fourragères selon les besoins de l'utilisateur. Il permet également de saisir directement la valeur bromatologique et nutritive des fourrages qu'on veut introduire dans la simulation, puis le logiciel calcule la moyenne et l'écart-type des échantillons. On peut visionner les résultats sous forme de graphique.
- ✓ « Itinéraire technique » : permet de saisir toutes les activités végétales à entreprendre dans le système fourrager (espèces à cultiver, variétés), ainsi que l'itinéraire technique à préconiser (semis, sarclages, etc.) et le nombre d'heure nécessaire à leur réalisation. Cette rubrique permettrait à l'utilisateur de prendre les décisions nécessaires sur la définition de la saisonnalité des activités végétales (nombres de périodes ou de saisons par an ainsi que leurs durées) ;
- ✓ « Semences » : permet de saisir la quantité de semences disponibles par espèces fourragères, par période et par an ;
- ✓ « Parcellaire » : permet d'indiquer les superficies disponibles en propriété, en fermage, louées, les modes d'allocation des terres (superficie réservée aux cultures pérennes, annuelles, la jachère), ainsi que la disponibilité en eau du milieu (pluviosité, évapotranspiration potentielle (ETo) ;
- ✓ « Mains d'œuvre » et « Equipements » : permettent de définir le nombre d'heure de mains d'œuvre et d'équipements (traction, etc.) disponible par période et par an ;
- ✓ « Fertilisations » : renseignent sur la quantité d'engrais (organiques, chimiques, chaux, etc.) disponibles par période et par an ;

La sous-composante « Cultures fourragères » regroupe toutes les données liées aux fourrages pérennes, fourrages annuels, fourrages stockés (ensilage de maïs, ensilage d'herbe, balle ronde enrubannée (BRE) et foins), et les aliments concentrés, c'est-à-dire les attributs des 6 classes de fourrages implémentées et de l'unique classe de concentré. Les calculs propres à chaque fourrage comme le calcul de la densité énergétique des fourrages, du volume du silo-couloir, de la densité des ensilages, des coûts de production à l'hectare ou encore du poids sec des balles rondes enrubannées sont faits à partir des méthodes de classe implémentées.

En dernier lieu, la composante « Ressources » héberge également un sous-composant appelé « Inventaire des aliments ». Il permet d'avoir un aperçu de tous les aliments planifiés ainsi que leur période d'utilisation respective et constitue une importance capitale dans le processus de formulation des contraintes d'optimisation de la programmation linéaire. En effet, c'est à partir de ce sous - composant que l'algorithme implémenté puise les informations nécessaires quand il va remplir la matrice des contraintes avec les coefficients techniques, surtout ceux concernant les contraintes d'alimentation.

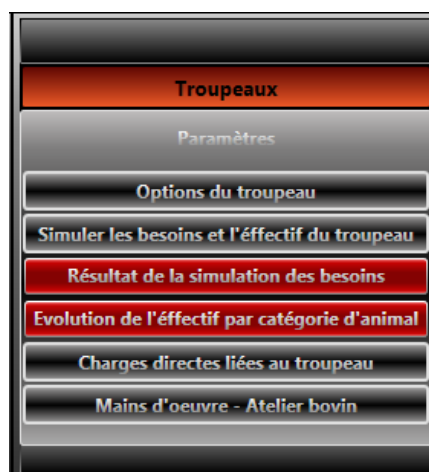


20 – 3 Le Troupeaux

Le composant « Troupeaux » rassemble toutes les informations sur les bovins laitiers simulés avec le modèle. La première sous-composante dans ce volet est « Options du troupeau ». Toutes les informations liées au troupeau comme la race de bovin utilisée, leurs performances zootechniques ou encore les paramètres de reproduction doivent être saisies à l'intérieure de cette sous-composante. Ces informations sont utilisées pour simuler les productions, les besoins du troupeau et la dynamique de la population via les méthodes de chaque classe (vache, génisse, taurillon). Les résultats des simulations sont stockés à l'intérieur de la base de données et sont consultables à partir de deux sous-composants « Résultats de la simulation des besoins » et « Evolution de l'effectif par catégorie d'animal ».

L'avant-dernière sous-composante de ce volet est la « Charge directe liées au troupeau ». Comme son nom l'indique, elle permet de définir les dépenses d'élevage par « Unité Gros Bovin » ou UGB. Pour le calcul, le coefficient UGB est de 1 pour une vache laitière adulte, 0,3 pour les génisses de moins de 1 an, 0,6 pour les génisses de 1 à 2 ans et les taurillons de moins de 1 an, et 0,8 pour les génisses d'âge supérieur à 2 ans et les taurillons de plus de 1 an.

Le dernier sous-composant est « Mains d'œuvres - Atelier bovin ». Ce sous-composant permet de saisir les besoins en nombre d'heure de mains d'œuvre par UGB/période/an pour s'occuper de l'atelier bovin.



20 – 4 Les immobilisations

La composante « Immobilisations » concerne tout ce qui touche aux investissements liés au modèle à simuler, comme les infrastructures de production (bâtiment, silo-couloir, les matériels et outillages agricoles, etc.), ainsi que les sources de financement nécessaire pour leurs acquisitions. Il concerne également les charges fixes liées à leur entretien et leur fonctionnement. Elle comporte trois sous-composants principaux : les « Immobilisations » proprement dites, le « Financement et autres subventions », les « autres charges d’exploitation ».

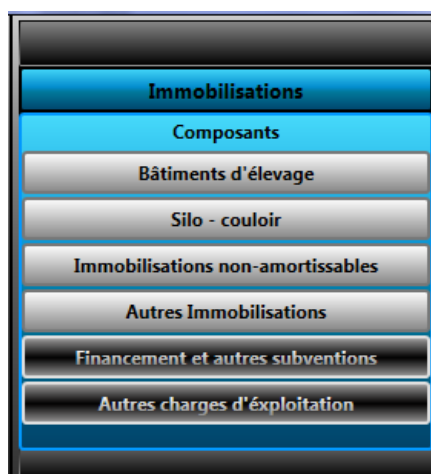
La sous-composante « Immobilisations » comporte quatre volets : les « Bâtiments d'élevage », le « Silo – couloir », les « Immobilisations non – amortissables », les « Autres immobilisations ».

- ✓ « Bâtiments d'élevage » : permet de spécifier le nombre et le type de bâtiment à utiliser et de calculer rapidement le coût des bâtiments en saisissant simplement le prix des matériaux de construction. Si l'utilisateur a choisi de saisir manuellement le coût des bâtiments, la fonction de calcul des coûts des bâtiments implémentés avec le modèle est désactivée et une autre interface permettant de saisir directement les coûts est présentée à l'utilisateur.
- ✓ « Silo – couloir » : permet de visualiser la fiche technique pour la construction des silos-couloirs. Comme nous l'avons dit, La dimension (longueur et largeur) est variable et peut être soit précisé d'entrée par l'utilisateur du modèle, soit calculer automatiquement en fonction de la surface maximale allouée à l'ensilage (maïs, herbe) par le solveur.
- ✓ Certains biens ne sont pas amortissables comme les terrains, les fonds de commerce ou encore les immobilisations financières. Dans le modèle D - Algo, ces types de biens ont leurs propres rubriques. « Immobilisations non – amortissables » permet de saisir le coût d'acquisition de ces types de biens.
- ✓ « Autres immobilisations » : enregistre tous les coûts d'acquisition des immobilisations autre que les bâtiments d'élevage, le silo-couloir et les biens non –amortissables, comme les machinismes agricoles, les équipements laitiers et les matériels et outillages divers.

La sous – composante « Financement et Autres subventions » concerne tous ce qui touche à l'emprunt à moyen et long terme pour financer l'acquisition des immobilisations. La durée de remboursement (en année) ainsi que le taux d'intérêt relatif à chaque emprunt sont définis d'entrée par l'analyste ou l'utilisateur du modèle. On suppose que le remboursement des sommes empruntés s'effectue à chaque fin d'année. « Subventions et autres » est relative à toutes les subventions d'investissement ou autres types de subventions (achat

d'équipements, achat de bovins, etc.) que l'exploitation laitière peut éventuellement bénéficier. Son utilité serait d'apporter les éléments de réflexion nécessaire à la possibilité de lancement d'une telle politique à Madagascar, dans le cadre de la relance de l'élevage laitier.

La sous – composante « Autres charges » permet de saisir toutes les autres charges liées au système biotechnique de production comme les charges liées à l'atelier bovin, les impôts et taxes divers ou les charges sociales des salariés permanents. Elle comprend aussi l'entretien et le fonctionnement des immobilisations (nettoyage des bâtiments, eau et électricité, etc.).



20 – 5 Les productions

La composante « Productions » permet d'inventorier tous les produits qui sortent de l'atelier bovin et de l'exploitation laitière. Parmi ceux-ci, on a les produits animaux (laits, fumiers), les ventes d'animaux par catégorie et la production totale par espèce fourragère (intra – consommé et vendue). Ce volet permet d'apprécier l'évolution annuelle de la productivité totale de l'exploitation laitière pendant toute la durée de la simulation.



Annexe 21 : Données d'entrées utilisées pour la simulation avec D-Algo (SAU=20 ha ; 40 vaches laitières).

21 – 1 Itinéraire technique

Espèce fourragère	Variétés	Janvier	J_heure	Février	F_heure	Mars	M_heure
<i>Brachiaria_brizantha</i>	cv. marandu	Fauches + Fertilisations d'entretien (2è année)	17,00	Fauches	10,00	Fauches	10,00
<i>Stylosanthes_guianensis</i>	CIAT 184	Sarclage + Urée	18,00	Fauches	10,00	Fauches	10,00
Maïs	IRAT200	Sarclage + Urée + produits phyto.	42,00	2ème sarclage	42,00		0
Niébé	SPLM1	Sarclage + Urée + produits phyto.	42,00	2ème sarclage	42,00		0
Dolique	marron	Sarclage + Urée + produits phyto.	42,00	2ème sarclage	42,00		0
Maïs_ensilage	IRAT200	Sarclage + Urée + produits phyto	42,00	Coupes + Préparation ensilages	310,00	Préparation ensilages	60
Paille_de_riz	B22	Sarclage + Urée + herbicidage	42,00	2ème sarclage	42,00	Récoltes+Battages	130,00
Espèce fourragère	Variétés	Avril	A_heure	Mai	M_heure	Juin	J_heure
<i>Brachiaria_brizantha</i>	cv. marandu	Fauches	10,00		0		0
<i>Stylosanthes_guianensis</i>	CIAT 184	Fauches	10,00		0		0
Maïs	IRAT200	Fauches	10,00	Fauches	0		0
Niébé	SPLM1	Fauches	10,00	Fauches	0		0
Dolique	marron	Fauches	10,00	Fauches	0		0
Maïs_ensilage	IRAT200		0	Désilage	60,00	Désilage	60,00
Paille_de_riz	B22		0		0		0
Espèce fourragère	Variétés	Juillet	J_heure	Août	A_heure	Septembre	S_heure
<i>Brachiaria_brizantha</i>	cv. marandu		0		0		0
<i>Stylosanthes_guianensis</i>	CIAT 184		0		0		0
Maïs	IRAT200		0		0		0
Niébé	SPLM1		0		0		0
Dolique	marron		0		0		0

ANNEXES

Maïs_ensilage	IRAT200	Désilage	60,00	Désilage	60,00	Désilage	60,00
Paille_de_riz	B22		0		0		0
Espèce fourragère	Variétés	Octobre	O_heure	Novembre	N_heure	Décembre	D_heure
<i>Brachiaria_brizantha</i>	cv. marandu	Préparation du sol	15,00	Semis	3,00	Fauches	10,00
<i>Stylosanthes_guianensis</i>	CIAT 184	Préparation du sol	15,00	Semis	3,00	Fauches	10,00
Maïs	IRAT200		0	Préparation du sol	15,00	Semis	24,00
Niébé	SPLM1		0	Préparation du sol	15,00	Semis	24,00
Dolique	marron		0	Préparation du sol	15,00	Semis	24,00
Maïs_ensilage	IRAT200	Désilage	60,00	Préparation du sol	15,00	Semis	24,00
Paille_de_riz	B22		0	Préparation du sol	15,00	Semis	60,00

21 – 2 Saisonnalité

Saisons	Début	Fin
S1	Mai	Mai
S2	Juin	Juin
S3	Juillet	Juillet
S4	Août	Août
S5	Septembre	Septembre
S6	Octobre	Octobre
S7	Novembre	Novembre
S8	Décembre	Décembre
S9	Janvier	Janvier
S10	Février	Février
S11	Mars	Mars
S12	Avril	Avril

Parcellaire

Superficie = 20 ha

Allocation des terres

- Superficie allouée à la culture pérenne (%) : 55%
- Superficie minimum allouée à la jachère (%) : 5%
- Superficie maximum allouée à la jachère (%) : 10%

Paramètres climatiques

- Pluviosité minimale annuelle : 99,96 mm/an
- Pluviosité maximale annuelle : 214,37 mm/an
- Evapotranspiration potentielle (ETo) : 103,78 mm/an

21 – 3 Disponibilité en main d'œuvre

Période	Main d'œuvre affecté à l'atelier bovin		Main d'œuvre permanent		Main d'œuvre temporaire*	
	Nombre	heures	Nombre	heures	Nombre	Heures
S1 (Mai)	8	300,00	5	300,00	3	489,30
S2 (Juin)	8	300,00	5	300,00	3	489,30
S3 (Juillet)	8	300,00	5	300,00	3	489,30
S4 (Août)	8	300,00	5	300,00	3	489,30
S5 (Septembre)	8	300,00	5	300,00	3	489,30
S6 (Octobre)	8	300,00	5	300,00	3	489,30
S7 (Novembre)	8	300,00	5	300,00	3	1 371,42
S8 (Décembre)	8	300,00	5	300,00	3	836,88
S9 (Janvier)	8	300,00	5	300,00	3	1 335,60
S10 (Février)	8	300,00	5	300,00	3	1 110,96
S11 (Mars)	8	300,00	5	300,00	3	143,22
S12 (Avril)	8	300,00	5	300,00	3	340,80

21 – 4 Disponibilité en équipement

Période	Nombre d'équipement en propriété	Heures disponibles
S1 (Mai)	2	0,00
S2 (Juin)	2	0,00
S3 (Juillet)	2	0,00
S4 (Août)	2	0,00
S5 (Septembre)	2	0,00
S6 (Octobre)	2	251,36
S7 (Novembre)	2	251,36
S8 (Décembre)	2	251,36
S9 (Janvier)	2	251,36
S10 (Février)	2	251,36
S11 (Mars)	2	251,36
S12 (Avril)	2	251,36

21 – 5 Disponibilité en fertilisations

Saisons	Engrais organiques	Quantités (Kg/ha)	Engrais simples	Quantités (Kg/ha)	Engrais composés	Quantités (Kg/ha)
S1 (Mai)	Fumier	-	Urée	-	NPK 11-22-16	-
S2 (Juin)	Fumier	-	Urée	-	NPK 11-22-16	-
S3 (Juillet)	Fumier	-	Urée	-	NPK 11-22-16	-
S4 (Août)	Fumier	-	Urée	-	NPK 11-22-16	-
S5 (Septembre)	Fumier	-	Urée	-	NPK 11-22-16	-
S6 (Octobre)	Fumier	2 515,53	Urée	-	NPK 11-22-16	300,00
S7 (Novembre)	Fumier	5 674,70	Urée	-	NPK 11-22-16	300,00
S8 (Décembre)	Fumier	-	Urée	-	NPK 11-22-16	300,00
S9 (Janvier)	Fumier	2 515,53	Urée	100,00	NPK 11-22-16	300,00
S10 (Février)	Fumier	-	Urée	-	NPK 11-22-16	-
S11 (Mars)	Fumier	-	Urée	-	NPK 11-22-16	-
S12 (Avril)	Fumier	-	Urée	-	NPK 11-22-16	-

21 – 6 Fourrages pérennes

Noms scientifiques : <i>Brachiaria brizantha</i>	Noms scientifiques : <i>Stylosanthes guianensis</i>
Durée de vie (année) : 3	Durée de vie (année) : 3
Rendement (T MS/ha) : 2,75	Rendement (T MS/ha) : 3,55
Types de récoltes : fourrages verts	Types de récoltes : fourrages verts
Saison initiale d'utilisation : Décembre	Saison initiale d'utilisation : Décembre
Saison finale d'utilisation : Mars	Saison finale d'utilisation : Mars
Besoins en pluviosité min. : 800 mm/an	Besoins en pluviosité min. : 900 mm/an
Besoins en pluviosité max. : 2000 mm/an	Besoins en pluviosité max. : 4000 mm/an
Coefficient cultural (Kc) : 0.00 mm/an	Coefficient cultural (Kc) : 0.00 mm/an
Prix Ventes fourrages : 50 Ar/Kg MS	Prix Ventes fourrages : 50 Ar/Kg MS
Ventes (%) : 15	Ventes (%) : 15
UFL : 0,62	UFL : 0,67
UFV : 0,52	UFV : 0,58
PDIN : 66 g	PDIN : 111,06 g
PDIE : 77,17 g	PDIE : 97,06 g
MAD : 66,34 g	MAD : 131,89 g
Ca abs: 4,60g	Ca abs: 1,45g
P abs: 2,90 g	P abs: 0,40 g
UEL: 1,13	UEL: 1,08
UEB: 1,25	UEB: 1,15

Besoins en intrants (fourrages pérennes)*Brachiaria brizantha* :**1^{ère} année :**

Saisons	Semences (Kg/ha)	Fumiers (Kg/ha)	Urée (Kg/ha)	NPK 11-22-16 (Kg/ha)	Main d'œuvre (heure/ha)	Equipement (heure/ha)
S1 (mai)	-	-	-	-	-	-
S2 (juin)	-	-	-	-	-	-
S3 (juillet)	-	-	-	-	-	-
S4 (août)	-	-	-	-	-	-
S5 (septembre)	-	-	-	-	-	-
S6 (octobre)	-	5000	-	200	30	15
S7 (novembre)	7	-	-	-	6	3
S8 (décembre)	-	-	-	-	20	10
S9 (janvier)	-	-	-	-	20	10
S10 (février)	-	-	-	-	20	10
S11 (mars)	-	-	-	-	20	10
S12 (avril)	-	-	-	-	-	-

2^{ème} et 3^{ème} année :

Saisons	Semences (Kg/ha)	Fumiers (Kg/ha)	Urée (Kg/ha)	NPK 11-22-16 (Kg/ha)	Main d'œuvre (heure/ha)	Equipement (heure/ha)
S1 (mai)	-	-	-	-	-	-
S2 (juin)	-	-	-	-	-	-
S3 (juillet)	-	-	-	-	-	-
S4 (août)	-	-	-	-	-	-
S5 (septembre)	-	-	-	-	-	-
S6 (octobre)	-	-	-	-	-	-
S7 (novembre)	-	-	-	-	-	-
S8 (décembre)	-	-	-	-	20	10
S9 (janvier)	-	5000	100	200	34	17
S10 (février)	-	-	-	-	20	10
S11 (mars)	-	-	-	-	20	10
S12 (avril)	-	-	-	-	-	-

*Stylosanthes guianensis***1^{ère} année :**

Saisons	Semences (Kg/ha)	Cyperméthrine (litre/ha)	Chaux (Kg/ha)	Fumiers (Kg/ha)	Urée (Kg/ha)	NPK 11-22-16 (Kg/ha)	Main d'œuvre (heure/ha)	Equipement (heure/ha)
S1 (mai)	-	-	-	-	-	-	-	-
S2 (juin)	-	-	-	-	-	-	-	-
S3 (juillet)	-	-	-	-	-	-	-	-
S4 (août)	-	-	-	-	-	-	-	-
S5 (septembre)	-	-	-	-	-	-	-	-
S6 (octobre)	-	-	500	5000	-	200	30	15
S7 (novembre)	6	-	-	-	-	-	6	3
S8 (décembre)	-	-	-	-	-	-	20	10
S9 (janvier)	-	0,25	-	-	100	-	20	10
S10 (février)	-	-	-	-	-	-	20	10
S11 (mars)	-	-	-	-	-	-	20	10
S12 (avril)	-	-	-	-	-	-	-	-

2^{ème} et 3^{ème} année :

Saisons	Semences (Kg/ha)	Cyperméthrine (litre/ha)	Chaux (Kg/ha)	Fumiers (Kg/ha)	Urée (Kg/ha)	NPK 11-22-16 (Kg/ha)	Main d'œuvre (heure/ha)	Equipement (heure/ha)
S1 (mai)	-	-	-	-	-	-	-	-
S2 (juin)	-	-	-	-	-	-	-	-
S3 (juillet)	-	-	-	-	-	-	-	-
S4 (août)	-	-	-	-	-	-	-	-
S5 (septembre)	-	-	-	-	-	-	-	-
S6 (octobre)	-	-	-	5000	-	-	-	-
S7 (novembre)	-	-	-	-	-	-	-	-
S8 (décembre)	-	-	-	-	-	-	20	10
S9 (janvier)	-	-	-	-	-	-	36	18
S10 (février)	-	-	-	-	-	-	20	10
S11 (mars)	-	-	-	-	-	-	20	10
S12 (avril)	-	-	-	-	-	-	-	-

21 – 7 Fourrages annuels

<p>Noms scientifiques : <i>Lablab purpureus</i> Rendement (T MS/ha) : 3,82 Types de récoltes : fourrages verts Saison initiale d'utilisation : Avril Saison finale d'utilisation : Mai Besoins en pluviosité min. : 750 mm/an Besoins en pluviosité max. : 2500 mm/an Coefficient cultural (Kc) : 0.00 mm/an Prix Ventes fourrages : 50 Ar/Kg MS Ventes (%) : 10 UFL : 0,77 UFV : 0,70 PDIN : 147,32 g PDIE : 117,08 g MAD : 184,55 g Ca abs: 3,80g P abs: 2,00 g UEL: 1,02 UEB: 1,04</p>	<p>Noms scientifiques : <i>Oryza Sativa</i> Rendement (T MS/ha) : 8,44 Types de récoltes : Pailles Saison initiale d'utilisation : Avril Saison finale d'utilisation : Novembre Besoins en pluviosité min. : 1000 mm/an Besoins en pluviosité max. : 1800 mm/an Coefficient cultural (Kc) : 0.00 mm/an Prix Ventes fourrages : 50 Ar/Kg MS Ventes (%) : 10 UFL : 0,45 UFV : 0,34 PDIN : 30,63 g PDIE : 52,38 g MAD : 15,39 g Ca abs: 0,19g P abs: 0,02 g UEL: 1,24 UEB: 1,50</p>
<p>Noms scientifiques : <i>Vigna unguiculata</i> Rendement (T MS/ha) : 2,58 Types de récoltes : fourrages verts Saison initiale d'utilisation : Avril Saison finale d'utilisation : Mai Besoins en pluviosité min. : 300 mm/an Besoins en pluviosité max. : 1100 mm/an Coefficient cultural (Kc) : 0.00 mm/an Prix Ventes fourrages : 50 Ar/Kg MS Ventes (%) : 10 UFL : 0,72 UFV : 0,65 PDIN : 124,81 g PDIE : 103,76 g MAD : 151,98 g Ca abs: 5,70g P abs: 2,60 g UEL: 1,05 UEB: 1,10</p>	<p>Noms scientifiques : <i>Zea mays</i> Rendement (T MS/ha) : 5,05 Types de récoltes : Fourrages verts Saison initiale d'utilisation : Avril Saison finale d'utilisation : Mai Besoins en pluviosité min. : 500 mm/an Besoins en pluviosité max. : 1500 mm/an Coefficient cultural (Kc) : 0.00 mm/an Prix Ventes fourrages : 50 Ar/Kg MS Ventes (%) : 10 UFL : 0,52 UFV : 0,41 PDIN : 37,83 g PDIE : 60,69 g MAD : 26,22 g Ca abs: 2,30g P abs: 1,80 g UEL: 1,21 UEB: 1,44</p>

Besoins en intrants (fourrages annuels)Lablab purpureus :

Saisons	Semences (Kg/ha)	Gaicho (g)	Chaux (Kg/ha)	Fumiers (Kg/ha)	Urée (Kg/ha)	NPK 11-22-16 (Kg/ha)	Main d'œuvre (heure/ha)	Equipement (heure/ha)
S1 (mai)	-	-	-	-	-	-	-	-
S2 (juin)	-	-	-	-	-	-	-	-
S3 (juillet)	-	-	-	-	-	-	-	-
S4 (août)	-	-	-	-	-	-	-	-
S5 (septembre)	-	-	-	-	-	-	-	-
S6 (octobre)	-	-	-	-	-	-	-	-
S7 (novembre)	-	-	500	5000	-	300	30	15
S8 (décembre)	12	60	-	-	-	-	48	24
S9 (janvier)	-	-	-	-	100	-	84	42
S10 (février)	-	-	-	-	-	-	84	42
S11 (mars)	-	-	-	-	-	-	-	-
S12 (avril)	-	-	-	-	-	-	20	10

Oryza sativa :

Saisons	Semences (Kg/ha)	Gaicho (g)	2-4D (l/ha)	Cyperméthrine (l/ha)	Chaux (Kg/ha)	Fumiers (Kg/ha)	Urée (Kg/ha)	NPK 11-22-16 (Kg/ha)	Main d'œuvre (heure/ha)	Equipement (heure/ha)
S1 (mai)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S2 (juin)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S3 (juillet)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S4 (août)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S5 (septembre)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S6 (octobre)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S7 (novembre)	-	-	-	-	500	5000	-	300	30	15
S8 (décembre)	50	125	-	-	-	-	-	-	48	24
S9 (janvier)	-	-	1,5	0,25	-	-	100	-	84	42
S10 (février)	-	-	-	-	-	-	-	-	84	42
S11 (mars)	-	-	-	-	-	-	-	-	120	10
S12 (avril)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Vigna unguiculata

Saisons	Semences (Kg/ha)	Gaicho (g)	Chaux (Kg/ha)	Fumiers (Kg/ha)	Urée (Kg/ha)	NPK 11-22-16 (Kg/ha)	Main d'œuvre (heure/ha)	Equipement (heure/ha)
S1 (mai)	-	-	-	-	-	-	-	-
S2 (juin)	-	-	-	-	-	-	-	-
S3 (juillet)	-	-	-	-	-	-	-	-
S4 (août)	-	-	-	-	-	-	-	-
S5 (septembre)	-	-	-	-	-	-	-	-
S6 (octobre)	-	-	-	-	-	-	-	-
S7 (novembre)	-	-	500	5000	-	300	30	15
S8 (décembre)	10	50	-	-	-	-	48	24
S9 (janvier)	-	-	-	-	100	-	84	42
S10 (février)	-	-	-	-	-	-	84	42
S11 (mars)	-	-	-	-	-	-	-	-
S12 (avril)	-	-	-	-	-	-	20	10

Zea mays :

Saisons	Semences (Kg/ha)	Gaicho (g)	Chaux (Kg/ha)	Fumiers (Kg/ha)	Urée (Kg/ha)	NPK 11-22-16 (Kg/ha)	Main d'œuvre (heure/ha)	Equipement (heure/ha)
S1 (mai)	-	-	-	-	-	-	-	-
S2 (juin)	-	-	-	-	-	-	-	-
S3 (juillet)	-	-	-	-	-	-	-	-
S4 (août)	-	-	-	-	-	-	-	-
S5 (septembre)	-	-	-	-	-	-	-	-
S6 (octobre)	-	-	-	-	-	-	-	-
S7 (novembre)	-	-	500	5000	-	300	30	15
S8 (décembre)	25	125	-	-	-	-	48	24
S9 (janvier)	-	-	-	-	100	-	84	42
S10 (février)	-	-	-	-	-	-	84	42
S11 (mars)	-	-	-	-	-	-	-	-
S12 (avril)	-	-	-	-	-	-	20	10

21 – 8 Ensilages

Noms scientifiques : <i>Zea mays</i>	
Rendement (T MS/ha) : 30	
Teneur MS (%) : 35	UFL : 0,83
Teneur Amidon (%) : 28	UFV : 0,76
Saison initiale d'utilisation : Avril	PDIN : 44,00 g
Saison finale d'utilisation : Novembre	PDIE : 71,00 g
Besoins en pluviosité min. : 500 mm/an	MAD : 42,00 g
Besoins en pluviosité max. : 1500 mm/an	Ca abs: 2,00g
Coefficient cultural (Kc) : 0.00 mm/an	P abs: 1,80 g
Prix Ventes fourrages : 0 Ar/Kg MS	UEL: 0,91
Ventes (%) : 0	UEB: 0,98

Besoins en intrants (ensilages)

Saisons	Semences (Kg/ha)	Gaicho (g)	Chaux (Kg/ha)	Fumiers (Kg/ha)	Urée (Kg/ha)	NPK 11-22-16 (Kg/ha)	Main d'œuvre (heure/ha)	Equipement (heure/ha)
S1 (mai)	-	-	-	-	-	-	60,00	-
S2 (juin)	-	-	-	-	-	-	60,00	-
S3 (juillet)	-	-	-	-	-	-	60,00	-
S4 (août)	-	-	-	-	-	-	60,00	-
S5 (septembre)	-	-	-	-	-	-	60,00	-
S6 (octobre)	-	-	-	-	-	-	60,00	-
S7 (novembre)	-	-	500	5000	-	300	30,00	15
S8 (décembre)	80	125	-	-	-	-	48,00	24
S9 (janvier)	-	-	-	-	100	-	84,00	42
S10 (février)	-	-	-	-	-	-	300,00	10
S11 (mars)	-	-	-	-	-	-	-	-
S12 (avril)	-	-	-	-	-	-	-	-

21 – 9 Prix des intrants

Intrants (/ha)	<i>Brachiaria brizantha</i>	<i>Stylosanthes guianensis</i>	Maïs	Niébé	Dolique	Paille de riz	Ensilage de maïs
Semences (Kg)	10.000	5.000	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200
Gaücho (g)	-	-	200	200	200	200	200
2 – 4 D (l)	-	-	-	-	-	8.000	-
Cyperméthrine (l)	-	18.000	-	-	-	18.000	-
Chaux (Kg)	-	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100
Fumiers (Kg)	50	50	50	50	50	50	50
Urée (Kg)	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500
NPK 11-22-16 (Kg)	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800
Main d'œuvre (heure)	334	334	334	334	334	334	334
Equipements (heure)	32.929,88	32.929,88	32.929,88	32.929,88	32.929,88	32.929,88	32.929,88

21 – 10 Concentrés

Concentré : Maïs grain Saison initiale d'utilisation : Mars Saison finale d'utilisation : Décembre Prix : 1200 Ar/Kg Quantité distribuée/vache/Jour : 7,44 Kg Quantité distribuée/génisse/Jour : 2,27 Kg Quantité distribuée/taurillon/Jour : 2,27 Kg UFL : 1,10 UFV : 1,11 PDIN : 69,00 g PDIE : 100,00 g MAD : 65,00 g Ca abs: 0,30g P abs: 3,00 g	Concentré : Tourteaux de soja Saison initiale d'utilisation : Mars Saison finale d'utilisation : Décembre Prix : 1400 Ar/Kg Quantité distribuée/vache/Jour : 3,55 Kg Quantité distribuée/génisse/Jour : 1,08 Kg Quantité distribuée/taurillon/Jour : 1,08 Kg UFL : 1,21 UFV : 1,20 PDIN : 377,00 g PDIE : 261,00 g MAD : 00,00 g Ca abs: 2,10 P abs: 5,00 g
---	--

Ration-types utilisées pour calculer la quantité de concentré ingérée, la valeur de la proportion de concentrés dans la ration et de la valeur d'encombrement moyen des concentrés :

Ration hivernale :I - InputsAnimal:

Vache laitière (Primipare), de 449,50 Kg, en 8^{ème} semaine de lactation, ayant une production de lait potentielle de 19,88 Kg, à 40 g/Kg de taux butyreux et 32 g/Kg de Taux protéiques.

Les besoins journaliers:

- Capacité d'ingestion: 11,20 UE
- Besoins énergétiques (BesUF): 16,60 UFL
- Besoins azotés (BesPDI): 1559,62 g
- Besoins en calcium absorbable (Ca abs): 39,34 g
- Besoins en phosphore absorbable (P abs): 29,10 g

Fourrage:

Zea mays ensilage (1^{ère} coupe). Valeurs par Kg de matière sèche:

- Valeur d'encombrement: 0,91 UEL
- Valeur énergétique: 0,83 UFL
- Valeur azotée: PDIE = 71,00 g, PDIN = 44,00 g.
- Valeur minérale: Ca abs = 0,80 g , P abs = 1,17 g.

Concentré disponible:

Tourteau de soja 48 + Maïs grain. Valeurs par Kg de matière sèche:

- Valeur énergétique: 1,15 UFL
- Valeur azotée: PDIE = 175,67 g, PDIN = 213,76 g.
- Valeur minérale: Ca abs = 0,45 g , P abs = 2,56 g.

II - Outputs

Densités énergétiques de la ration objectif et du fourrage disponible :

- DERm = 1,48
- DEF = 0,91

DEF < DERm, le fourrage ne peut pas à lui seul couvrir les besoins énergétiques de l'animal. L'apport de concentré est nécessaire.

Quantités ingérées et couvertures des besoins énergétiques:

- Taux de substitution global (Sge): 0,50
- Correction énergétique (UFL): 0,26
- Quantité de concentré ingérée (Kg MS): 9,05
- Quantité de fourrage ingérée à volonté (Kg MS): 12,31
- Pourcentage de concentrés dans la ration (%C): 42,37 %

Couvertures des besoins protéiques:

Apports PDI de la ration:

- PDIN = 2 475,50 g.
- PDIE = 2 463,19 g.

Les besoins protéiques sont couverts par la ration composée de 12,31 Kg MS de Zea mays ensilage et de 9,05 Kg MS de Tourteau de soja 48 + Maïs grain. L'excédent est de 915,88 g pour le PDIN, et de 903,57g pour le PDIE.

Apports énergétique de la ration (UFL): 20,62

Vérification du bon fonctionnement du rumen:

- Rmic = (PDIN - PDIE)/UF = 0,60 g.
- SeuilPDI = -8,00

Rmic est acceptable. On peut garder la solution proposée.

Alimentation en Calcium et Phosphore:

- Apport de la ration en Ca abs = 13,92 g.
- Apport de la ration en P abs = 37,56 g.
- Déficit en Ca abs = 25,42 g.
- Excédent en P abs = 8,46
- Rapport du déficit (Ca abs/P abs) = 3,00 g.
- Rapport du déficit (Ca/P) = 4,90 g.
- Il faut choisir un aliment qui apporte environs 4,90 fois plus de calcium que de phosphore.

Le choix de minéral d'équilibre s'est porté sur du :

Tricalcique. Valeurs par Kg de matière sèche:

- Valeur énergétique: 0,00 UFL

- Valeur azotée: PDIE = 0,00 g, PDIN = 0,00 g.
- Valeur minérale: Ca abs = 120,00 g , P abs = 104,00 g.

Il faut apporter 0,21 g par animal et par jour de Tricalcique pour combler les déficits en minéraux.

- Apport du minéral d'équilibre en Ca abs = 25,42 g.
- Apport du minéral d'équilibre en P abs = 22,03 g.

Récapitulation :

Au final, la ration est composée de 12,31 Kg MS de Zea mays ensilage (Zea mays ensilage : 12,31 Kg MS), de 9,05 Kg MS de Tourteau de soja 48 + Maïs grain (Tourteau de soja 48 : 4,25 Kg MS , Maïs grain : 4,80 Kg MS), et de 0,21 g de Tricalcique. La ration apporte:

- 20,62 UFL.
- PDIN = 2 475,50 g.
- PDIE = 2 463,19 g.
- Ca abs = 39,34 g.
- P abs = 59,59 g.

Ration d'été :

I - Inputs

Animal:

Vache laitière (Primipare), de 450,40 Kg, en 8^{ème} semaine de lactation, ayant une production de lait potentielle de 19,88 Kg, à 40 g/Kg de taux butyreux et 32 g/Kg de Taux protéiques.

Les besoins journaliers:

- Capacité d'ingestion: 11,22 UE
- Besoins énergétiques (BesUF): 16,60 UFL
- Besoins azotés (BesPDI): 1560,10 g
- Besoins en calcium absorbable (Ca abs): 39,35 g
- Besoins en phosphore absorbable (P abs): 29,10 g

Fourrage:

Brachiaria brizantha (1ère coupe) + Stylosanthes guianensis (1ère coupe). Valeurs par Kg de matière sèche:

- Valeur d'encombrement: 1,11 UEL
- Valeur énergétique: 0,61 UFL
- Valeur azotée: PDIE = 84,27 g, PDIN = 84,08 g.
- Valeur minérale: Ca abs = 1,19 g , P abs = 1,05 g.

Concentré disponible:

Tourteau de soja 48 + Maïs grain. Valeurs par Kg de matière sèche:

- Valeur énergétique: 1,12 UFL
- Valeur azotée: PDIE = 135,42 g, PDIN = 136,76 g.
- Valeur minérale: Ca abs = 0,27 g , P abs = 2,23 g.

II - Outputs

Densités énergétiques de la ration objectif et du fourrage disponible:

- DERm = 1,48
- DEF = 0,55

DEF < DERm, le fourrage ne peut pas à lui seul couvrir les besoins énergétiques de l'animal. L'apport de concentré est nécessaire.

Quantités ingérées et couvertures des besoins énergétiques:

- Taux de substitution global (Sge): 0,31
- Correction énergétique (UFL): 1,58
- Quantité de concentré ingérée (Kg MS): 12,91
- Quantité de fourrage ingérée à volonté (Kg MS): 10,11
- Pourcentage de concentrés dans la ration (%C): 56,09 %

Couvertures des besoins protéiques:

Apports PDI de la ration:

- PDIN = 2 615,41 g.
- PDIE = 2 600,03 g.

Les besoins protéiques sont couverts par la ration composée de 10,11 Kg MS de *Brachiaria brizantha* (1ère coupe) + *Stylosanthes guianensis* (1ère coupe) et de 12,91 Kg MS de Tourteau de soja 48 + Maïs grain.

L'excédent est de 1 055,31 g pour le PDIN, et de 1 039,93g pour le PDIE.

Apports énergétique de la ration (UFL): 20,62

Vérification du bon fonctionnement du rumen:

- $Rmic = (PDIN - PDIE)/UF = 0,75$ g.
- SeuilPDI = -8,00

Rmic est acceptable. On peut garder la solution proposée.

Alimentation en Calcium et Phosphore:

- Apport de la ration en Ca abs = 15,51 g.
- Apport de la ration en P abs = 39,40 g.
- Déficit en Ca abs = 23,84 g.
- Excédent en P abs = 10,30
- Rapport du déficit (Ca abs/P abs) = 2,31 g.
- Rapport du déficit (Ca/P) = 3,77 g.
- Il faut choisir un aliment qui apporte environs 3,77 fois plus de calcium que de phosphore.

Le choix de minéral d'équilibre s'est porté sur du :

Tricalcique. Valeurs par Kg de matière sèche:

- Valeur énergétique: 0,00 UFL
- Valeur azotée: PDIE = 0,00 g, PDIN = 0,00 g.
- Valeur minérale: Ca abs = 120,00 g, P abs = 104,00 g.

Il faut apporter 0,20 g par animal et par jour de Tricalcique pour combler les déficits en minéraux.

- Apport du minéral d'équilibre en Ca abs = 23,84 g.
- Apport du minéral d'équilibre en P abs = 20,66 g.

Récapitulation :

Au final, la ration est composée de 10,11 Kg MS de *Brachiaria brizantha* (1ère coupe) + *Stylosanthes guianensis* (1ère coupe) (*Brachiaria brizantha* : 4,92 Kg MS, *Stylosanthes guianensis* : 5,19 Kg MS), de 12,91 Kg MS de Tourteau de soja 48 + Maïs grain (*Tourteau de soja 48* : 2,84 Kg MS, *Maïs grain* : 10,07 Kg MS), et de 0,20 g de Tricalcique. La ration apporte:

- 20,62 UFL.
- PDIN = 2 615,41 g.
- PDIE = 2 600,03 g.
- Ca abs = 39,35 g.
- P abs = 60,06 g.

21 – 11 Rotation culturale

Culture précédente	Culture suivante
Brachiaria brizantha	Stylosanthes guianensis
Lablab purpureus	Brachiaria brizantha
Lablab purpureus	Zea mays
Lablab purpureus	Zea mays ensilage
Lablab purpureus	Oryza Sativa
Stylosanthes guianensis	Brachiaria brizantha
Stylosanthes guianensis	Zea mays
Stylosanthes guianensis	Zea mays ensilage
Vigna unguiculata	Brachiaria brizantha
Vigna unguiculata	Zea mays
Vigna unguiculata	Zea mays ensilage
Vigna unguiculata	Oryza Sativa

21 – 12 Troupeaux

Races : prim'Holstein	Taux de mortalité des veaux : 0%
Type de stabulation : Stabulation libre	Taux butyreux du lait : 40g/Kg
Coût d'une vache : 3.000.000 Ariary	Taux protéique du lait : 32g/Kg
Poids vifs primipares : 500 kg	Durée de la lactation : 305 jours
Poids vifs multipares : 550 kg	Production de lait potentielle primipare : 20 Kg/jour
Intervalle vêlage-insémination fécondante : 110 jours	Production de lait potentielle multipare : 27 Kg/jour
Durée de la gestation : 280 jours	Prix du lait : 1200 Ariary/Kg
Taux de fécondité des primipares : 100 %	GMQ jeune vache : 900 g/jour
Taux de fécondité des multipares : 100 %	Production de fumiers – vaches : 65,9 kg/jour/1000Kg P.V
Taux de mortalité des vaches : 100%	Production de fumiers – Génisse : 67,5 kg/jour/1000Kg P.V
Sex-ratio des velles : 50%	Production de fumiers – Taurillon : 58 kg/jour/1000Kg P.V
Date de vêlage moyen : 01/05/2014	Effectif initial – Vache en deuxième lactation : 20
Poids du veau : 40 Kg	Effectif initial – Vache en troisième lactation : 20
Prix Veau/Velles : 1.000.000 Ariary	

Charges directes liées au troupeau (par UGB)

Désignations	Unité	Prix Unitaire	Quantité	Valeur
Alfamec	u	6 000,00	1,00	6 000,00
Bicharcoli	u	1 000,00	1,00	1 000,00
ComplexB	u	3 000,00	1,00	3 000,00
Enregistrement (Fokontany)/tête	u	100,00	1,00	100,00
interdouves	u	3 000,00	1,00	3 000,00
Oxytétracycline	u	4 000,00	1,00	4 000,00

Mains d'œuvre par saisons/UGB

Désignations	Unité	Prix unitaire	Quantité	Valeurs
Mains d'oeuvre_S1	Heures	334,00	1 200,00	400 800,00
Mains d'oeuvre_S2	Heures	334,00	1 200,00	400 800,00
Mains d'oeuvre_S3	Heures	334,00	1 200,00	400 800,00
Mains d'oeuvre_S4	Heures	334,00	1 200,00	400 800,00
Mains d'oeuvre_S5	Heures	334,00	1 200,00	400 800,00
Mains d'oeuvre_S6	Heures	334,00	1 200,00	400 800,00
Mains d'oeuvre_S7	Heures	334,00	1 200,00	400 800,00
Mains d'oeuvre_S8	Heures	334,00	1 200,00	400 800,00
Mains d'oeuvre_S9	Heures	334,00	1 200,00	400 800,00
Mains d'oeuvre_S10	Heures	334,00	1 200,00	400 800,00
Mains d'oeuvre_S11	Heures	334,00	1 200,00	400 800,00
Mains d'oeuvre_S12	Heures	334,00	1 200,00	400 800,00

21 – 13 Immobilisations*Bâtiments d'élevage*

Durée d'amortissement : 10 ans

Modèle utilisé : D-Algo

Désignations	Unités	Prix (Ariary)
Ferrailleur	Heure	400
Fil recuit	Kg	2 400,00
Gravillon 15/25	m ³	25 000,00
Poutrelles H à larges ailes HE 180 A (L = 12 m)	u	368 271,00
Poutrelles H à larges ailes HE 200 AA (L = 12 m)	u	409 653,00
Poutrelles H à larges ailes HE 220 AA (L = 12 m)	u	477 652,00
Poutrelles H à larges ailes HE 300 AA (L = 12 m)	u	825 337,00
Poutrelles H à larges ailes HE 300 C (L = 12 m)	u	2 089 417,00
Poutrelles H à larges ailes HE 340 AA (L = 12 m)	u	958 514,00
Maçon	Heure	400
Manœuvre	Heure	400
Moellons	m ³	30 000,00
Monteur (Charpentes métalliques et Cornadis)	Heure	400
Peintre	Heure	400
Peinture glycérophtalique anti-oxyde	Kg	5 000,00
Peinture glycérophtalique teintée	Kg	5 000,00
Plats (l = 50 mm; e = 10 mm; L = 12 m)	u	38 200,00
Pointes	Kg	2 000,00
Plafonds en Polyuréthane avec 1 face alu.	m ²	67 500,00
Porte en Aluminium (2 m x 2,1 m)	u	800 000,00

Désignations	Unités	Prix (Ariary)
Porte (3 m x 2,1 m)	u	900 000,00
Porte (4 m x 2,1 m)	m ³	950 000,00
Sable de rivière	m ³	11 000,00
Tube carré (TCAR 100 x 10; L = 12 m)	u	312 757,00
Tube carré (TCAR 120 x 3,2; L = 12 m)	u	132 224,00
Tube carré (TCAR 120 x 5; L = 12 m)	u	202 872,00
Tube carré (TCAR 140 x 3,6; L = 12 m)	u	171 234,00
Tube carré (TCAR 140 x 6,3; L = 12 m)	u	288 943,00
Tube carré (TCAR 150 x 4; L = 12 m)	u	203 553,00
Tube carré (TCAR 150 x 6; L = 12 m)	u	297 902,00
Tube carré (TCAR 180 x 3,6; L = 12 m)	u	216 027,00
Tube carré (TCAR 180 x 6,3; L = 12 m)	u	384 426,00
Tube carré (TCAR 180 x 8; L = 12 m)	u	470 383,00
Tube carré (TCAR 200 x 5; L = 12 m)	u	340 200,00
Tube carré (TCAR 35 x 2,5; L = 12 m)	u	23 134,00
Tube carré (TCAR 40 x 2,5; L = 12 m)	u	28 674,00
Tube carré (TCAR 40 x 2,7; L = 12 m)	u	30 229,00
Tube carré (TCAR 55 x 2,5; L = 12 m)	u	40 046,00
Tube carré (TCAR 80 x 3,2; L = 12 m)	u	74 260,00
Tube rectangulaire (TREC 200 x 100 x 4; L = 12 m)	u	330 200,00
Tube rectangulaire (TREC 200 x 150 x 5; L = 12 m)	u	333 600,00
Tube rectangulaire (TREC 300 x 100 x 6; L = 12 m)	u	335 000,00
Tube rond (D = 21,3 mm; e = 2,3 mm; L = 12 m)	u	10 498,00
Tube rond (D = 30 mm; e = 2,5 mm; L = 12 m)	u	16 524,00
Tube rond (D = 40 mm; e = 2,5 mm; L = 12 m)	u	22 453,00
Tôle ondulée galvanisée (L = 2,75 m; l = 0,9 m)	u	41 811,00
Tôle ondulée galvanisée (L = 3 m; l = 0,9 m)	u	45 612,00
Tôle ondulée galvanisée (L = 3,5 m; l = 0,9 m)	u	53 214,00
Tôle ondulée galvanisée (L = 4 m; l = 0,9 m)	u	60 816,00

21 – 14 Autres immobilisations

Pour une exploitation de 40 vaches laitières :

Désignations	Unité	Durée de vie (année)	Prix (Ariary)	Quantité
Semoir rollosem	u	10	19 440 000,00	1
Epandeur d'engrais	u	10	1 080 000,00	1
Tank à lait (540100 CVG 800)	u	10	18 189 100	1
Bidons 20L inox	u	5	348 759,00	20
Chariot-trayeur MP 200 électrique	u	10	4 828 194,00	3
Kit Hoof sets	u	10	164 890,00	1
Décorneurs électrique	u	10	163 900,00	2
Gyrobroyeur	u	10	1 458 000,00	1
Charrue cover-crop	u	10	8 100 000,00	1
Autres matériels et outillages	fft	5	800 000,00	5
Faucheuse à herbe	u	10	297 000,00	1
Tracteur 90 ch Massey-Ferguson	u	10	148 500 000,00	1
Brouette	u	5	80 000,00	2
Installations électrique	fft	10	600 000,00	1

Pour une exploitation de 30 vaches laitières :

Désignations	Unité	Durée de vie (année)	Prix (Ariary)	Quantité
Autres matériels et outillages	fft	5	800 000	5
Bidons 20L inox	u	5	348 759	15
Brouettes	u	5	80 000	2
Chariot-trayeur MP200 électrique	u	10	4 828 194	2
Charrue cover-crop	u	10	8 100 000	1
Décorneurs électriques	u	10	163 900	2
Epandeur d'engrais	u	10	1 080 000	1
Faucheuse à herbe	u	10	297 000	1
Gyrobroyeur	u	10	1 458 000	1
Installations électriques	fft	10	600 000	1
Kit Hoof sets	u	10	164 890	1
Semoir en ligne	u	10	8 100 000	1
Tank à lait (540100 CVG 800)	u	10	18 189 100	1
Tracteur 3455S 90ch	u	10	82 800 000	1

Pour une exploitation de 10 et 20 vaches laitières :

Désignations	Unité	Durée de vie (année)	Prix (Ariary)	Quantité
Autres matériels et outillages	fft	5	800 000	5
Bidons 20L inox	u	5	348 759	10
Brouettes	u	5	80 000	2
Chariot-trayeur MP200 électrique	u	10	4 828 194	1
Charrue	u	10	945 000	1
Décorneurs électriques	u	10	163 900	2
Epandeur d'engrais	u	10	1 080 000	1
Faucheuse à herbe	u	10	297 000	1
Installations électriques	fft	10	600 000	1
Kit Hoof sets	u	10	164 890	1
Motoculteur Kubota	u	5	7 500 000	1

21 – 15 Financement des immobilisations

On supposera qu'on va contracter un emprunt, dont le montant est de 25% du montant total des investissements réalisés en première année. Le taux d'intérêt sera fixé à 10% et la durée de remboursement à 5 ans.

21 – 16 Autres charges d'exploitation

Désignations	Unité	Prix unitaire (Ariary)	Quantité Année1	Quantité Année2	Quantité Année3	Quantité Année4	Quantité Année5	Quantité Année6	Quantité Année7	Quantité Année8	Quantité Année9	Quantité Année10
Actes de vente	u	1 000,00	40,00	40,00	40,00	60,00	60,00	40,00	40,00	40,00	40,00	60,00
Bottes de pailles (litières)	u	4 000,00	1 200,00	1 200,00	1 200,00	1 200,00	1 200,00	1 200,00	1 200,00	1 200,00	1 200,00	1 200,00
Cahier de zébus	u	8 000,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Certificat d'origine sur ventes	u	5 000,00	40,00	40,00	40,00	60,00	60,00	40,00	40,00	40,00	40,00	60,00
Charges sociales (cnaps 5%) (16 salariés permanents)	%	19 238 400,00	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Eau et électricité	fft	400 000,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Entretiens bâtiment	fft	500 000,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Entretiens tracteur	fft	400 000,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Insémination artificielle	u	30 000,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00
Passeport sur ventes	u	1 000,00	40,00	40,00	40,00	60,00	60,00	40,00	40,00	40,00	40,00	60,00
Produits de nettoyage (Détergent, etc.)	fft	500 000,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Produits vétérinaire	fft	40 000,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00
Ristournes sur ventes de vaches	u	2 000,00	0,00	0,00	0,00	20,00	20,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,00
Ristournes sur ventes de veaux et velles	u	2 000,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00
Vignette charrue	u	500,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00