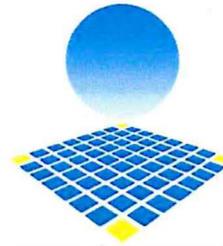


DK 542 494

BA - TH 1501



Unité de Service Enseignement
et Formation en Elevage
Campus de Baillarguet
TA A-71 / B
34 398 MONTPELLIER Cedex 5



UNIVERSITÉ MONTPELLIER II
UFR Sciences
Place Eugène Bataillon
34 095 MONTPELLIER Cedex 5

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

EVALUATION DU BILAN ENERGETIQUE
DES EXPLOITATIONS BOVINES
LAITIERES DE LA REUNION

Présenté par

Mathieu VIGNE

Réalisé sous la direction de : LECOMTE Philippe

Organisme et pays : CIRAD Réunion

Période du stage : du 03 avril au 31 août 2007

Date de soutenance : 23 septembre 2007

Année universitaire 2006-2007



000096543

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier **Monsieur Lecomte** pour m'avoir proposé ce stage et pour l'enthousiasme dont il a fait part pour ce sujet tout au long de l'étude.

Je remercie également l'ensemble des **membres de l'axe Elevage** qui par leur disponibilité, leur conseil et leur commentaire ont tous contribué à la réussite de leur stage.

Enfin, mes derniers remerciements vont aux **stagiaires et VCATs** rencontrés sur l'île et sans qui mon séjour n'aurait pas été si agréable. Il serait trop long ici de les citer tous mais les nombreuses soirées ou randonnées passées ensemble resteront des souvenirs mémorables. Ils auront contribué eux aussi à leur manière au bon déroulement de mon stage.

RESUME ET MOTS CLES

La notion d'agriculture durable est aujourd'hui largement présente dans notre société et l'activité d'élevage se doit de prendre en compte la dimension environnementale dans ses objectifs de développement, notamment sur l'île de La Réunion où l'utilisation d'énergies renouvelables est largement répandue. Cette étude a été réalisée à partir des résultats d'analyses de bilans énergétiques effectués selon la méthode PLANETE sur 31 exploitations réunionnaises en production laitière. Cette approche avait pour principal objectif d'établir un premier diagnostic des consommations énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre de la filière laitière. A La Réunion, ce serait en moyenne 26,15 équivalents litre de fioul (EQF) qui sont consommées et 2,29 équivalents tonne de CO₂ (teqCO₂) qui sont émis pour produire 100 litres de lait. Ces consommations, bien que supérieures à celles de la métropole, sont largement dépendantes de deux facteurs difficilement contournables qui sont la contrainte de la disponibilité faible en surfaces fourragères, et la nécessité de recourir à l'achat d'aliments hors exploitation. Ceux-ci principalement sous forme de concentrés, sont le poste de dépense énergétique majoritaire avec 55 % des entrées énergétiques. L'importation d'intrants depuis la métropole et le transport que cela nécessite représentent en moyenne 20 % des consommations énergétiques et 19 % des émissions de gaz à effet de serre. Cependant, les résultats obtenus sont très variables d'une exploitation à l'autre puisque les consommations d'énergies s'étendent de 17,59 à 40,70 EQF alors que les émissions de gaz à effet de serre peuvent varier de 1,47 à 3,86 teqCO₂. Cette variabilité ne peut être expliquée par les caractéristiques structurelles, les performances énergétiques n'étant étroitement reliées qu'à l'efficacité de réponse de la production laitière aux concentrés distribués. L'amélioration du bilan et de l'efficacité énergétique de la production locale de lait passerait donc dans un premier temps par une diminution raisonnée des consommations énergétiques, et ou, par l'amélioration de la performance de l'exploitation et de l'efficacité de la réponse de la production laitière aux quantités de concentrés distribués notamment grâce à l'amélioration de la qualité des fourrages distribués. La production d'énergie propre sur les exploitations via la méthanisation des effluents et l'électricité photovoltaïque représentent également des alternatives à considérer. Enfin, les consommations énergétiques étant fortement reliées aux pratiques agricoles de l'éleveur, la prise en compte de la dimension énergétique dans un modèle tel que GAMEDE, qui a pour but de quantifier les flux de biomasse de l'exploitation, permettra de cerner les pratiques les mieux adaptées au contexte de l'exploitation tout en cherchant à maintenir une productivité viable pour l'éleveur d'un point de vue économique.

Mots-clés : Ile de la Réunion, Elevage, Bovin lait, Bilan énergétique, Gaz à effet de serre, PLANETE, Environnement, Energie renouvelable, GAMEDE.

SIGLES ET ABBREVIATIONS

°C	degré Celsius
€	euro
%	pourcent
ADEME	Agence De l'Environnement Et de la Maîtrise de l'Energie
ARER	Agence Régionale de l'Energie Réunion
BR	Balle Ronde
CEDAPAS	Centre d'Etudes pour le Développement d'une Agriculture Plus Autonome et Solidaire
CEIPAL	Centre d'Etudes et d'Echanges Internationaux Paysans et d'Actions Locales
CETA	Communication Etude Technologies Assistance
CILAM	Compagnie Laitière des Mascareignes
CH₄	méthane
CH₄ent	méthane d'origine entérique
CIRAD	Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CO₂	dioxyde de carbone
CV	Coefficient de Variation
EBE	Excédent Brut d'Exploitation
EDF	Electricité De France
EQF	Equivalent litre de Fioul
ENES	Ecole Nationale d'Etude Supérieure
g	gramme
FRCA	Fédération Régionale des Coopératives Agricoles
GES	Gaz à Effet de Serre
h	heure
ha	hectare
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
INSEE	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
j	jour
kg	kilogramme
km	kilomètre
km²	kilomètre carré
ktep	kilotonne équivalent pétrole
kWc	kilowatt crête
kWh	kilowatt heure
L	litre
m	mètre
m²	mètre carré
m³	mètre cube
MG	Matière Grasse
MGLA	Matière Grasse Laitière Anhydre
MJ	Mégajoule
MVAD	Mission de Valorisation Agricole des Déchets
N₂O	protoxyde d'azote
PAC	Politique Agricole Commune (de l'Europe)
PAH	Plan d'Aménagement des Hauts
RMI	Revenu Minimum d'Insertion
SAU	Surface Agricole Utile
SFP	Surface Fourragère Principale
t	tonne
teqCO₂	tonne équivalent dioxyde de carbone
UFL	Unité Fourragère Lait
UGB	Unité Gros Bétail
UHT	Ultra Haute Température
URCOOPA	Union Réunionnaise des Coopératives Agricoles
VL	Vache Laitière

SOMMAIRE

RESUME ET MOTS CLES.....	3
SIGLES ET ABREVIATIONS.....	4
SOMMAIRE.....	5
LISTE DES FIGURES.....	6
LISTE DES TABLEAUX.....	7
INTRODUCTION.....	8
I. CONTEXTE.....	8
1.1. <i>Caractéristiques générales du milieu.....</i>	<i>8</i>
1.2. <i>Les Productions Animales à La Réunion.....</i>	<i>8</i>
1.3. <i>Contexte de la production laitière à La Réunion.....</i>	<i>9</i>
1.4. <i>Système de production actuel à la Réunion.....</i>	<i>10</i>
II. PROBLEMATIQUES ET OBJECTIFS.....	11
PARTIE I : Profils énergétiques des exploitations laitières à La Réunion.....	12
I. MATERIELS ET METHODES.....	12
1.1. <i>La Méthode PLANETE.....</i>	<i>12</i>
1.2. <i>Adaptation des coefficients au contexte réunionnais.....</i>	<i>13</i>
1.3. <i>Echantillon.....</i>	<i>15</i>
1.4. <i>Récolte des données.....</i>	<i>15</i>
1.5. <i>Traitement des données.....</i>	<i>16</i>
II. RESULTATS.....	16
2.1. <i>Performances énergétiques à La Réunion.....</i>	<i>16</i>
2.2. <i>Emissions de gaz à effet de serre.....</i>	<i>18</i>
III. ANALYSE DES RESULTATS.....	19
3.1. <i>Projection des données dans le référentiel métropolitain.....</i>	<i>19</i>
3.2. <i>Facteurs de variation des performances énergétiques des exploitations laitières à La Réunion.....</i>	<i>21</i>
3.3. <i>Production locale et importation de poudre de lait.....</i>	<i>27</i>
IV. DISCUSSION.....	29
4.1. <i>Déroulement de l'étude.....</i>	<i>29</i>
4.2. <i>Les solutions pour améliorer les performances énergétiques.....</i>	<i>31</i>
PARTIE II : Ajout d'une composante énergétique à GAMEDE, modèle de simulation des flux de biomasse dans l'exploitation bovin lait.....	35
I. MATERIELS ET METHODES.....	35
1.1. <i>Le modèle GAMEDE.....</i>	<i>35</i>
1.2. <i>Construction des équations.....</i>	<i>36</i>
II. RESULTATS.....	38
2.1. <i>Enrubannage (a1).....</i>	<i>38</i>
2.2. <i>Fauche en vert des prairies (a2).....</i>	<i>38</i>
2.3. <i>Fauche des cannes (a3).....</i>	<i>39</i>
2.4. <i>Changement de pâturage (a4).....</i>	<i>39</i>
2.5. <i>Achats de concentrés (a5).....</i>	<i>39</i>
2.6. <i>Vente de fourrages (a6).....</i>	<i>39</i>
2.7. <i>Achat de fourrages (a7).....</i>	<i>40</i>
2.8. <i>Distribution des rations (a8).....</i>	<i>40</i>
2.9. <i>Achats de génisses (a9).....</i>	<i>40</i>
2.10. <i>Vente de vaches de réformes (a10).....</i>	<i>41</i>
2.11. <i>Vente de veaux (a11).....</i>	<i>41</i>
2.12. <i>Traite (a12).....</i>	<i>41</i>
2.13. <i>Paillage (a13).....</i>	<i>41</i>
2.14. <i>Soin du troupeau (a14).....</i>	<i>42</i>
2.15. <i>Raclage du lisier (a15).....</i>	<i>42</i>
2.16. <i>Evacuation du fumier (a16).....</i>	<i>42</i>
2.17. <i>Achat d'engrais (a17).....</i>	<i>42</i>
2.18. <i>Epannage d'engrais minéraux (a18).....</i>	<i>43</i>
2.19. <i>Epannage de lisier (a19).....</i>	<i>43</i>
2.20. <i>Epannage de fumier (a20).....</i>	<i>43</i>
2.21. <i>Exportation d'engrais de ferme (a21).....</i>	<i>43</i>
III. DISCUSSION.....	44
CONCLUSION.....	45
BIBLIOGRAPHIE.....	47
ANNEXES.....	51

LISTE DES FIGURES

Figure 1. <i>Zonage isométrique et Pluviométrie annuelle à La Réunion)</i>	8
Figure 2. <i>Efficacité Energétique des exploitations enquêtées.....</i>	17
Figure 3. <i>Consommation d'énergie pour produire 100 l de lait (en EQF).....</i>	17
Figure 4. <i>Emissions de gaz à effet de serre pour les exploitations étudiées</i>	19
Figure 5a. <i>Résultats des analyses PLANETE effectués sur 200 exploitations en « bovin lait strict ».</i>	20
Figure 5b. <i>Comparaison des consommations énergétiques par poste entre la moyenne des exploitations réunionnaises et la moyenne des exploitations métropolitaines.....</i>	20
Figure 6. <i>Corrélation entre Efficacité Energétique et consommation d'énergie pour produire 100 litres de lait</i>	22
Figure 7. <i>Consommations d'énergies pour produire 100 l de lait en fonction du type technico-économique de l'exploitation.</i>	22
Figure 8. <i>Corrélation entre les performances énergétiques et la production laitière.....</i>	24
Figure 9. <i>Corrélation entre les performances énergétiques et le lait produit par kg de concentrés distribués.</i>	25
Figure 10. <i>Typologie des exploitations selon leurs performances énergétiques</i>	25
Figure 11. <i>Comparaison des exploitations étudiées avec le coût de la poudre de lait</i>	29

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. <i>Secteurs de l'élevage à la Réunion</i>	9
Tableau 2. <i>Production totale de lait de vache à La Réunion (source INSEE, 2006)</i>	10
Tableau 3. <i>Description géographique de l'échantillon (d'après Taché, 2001)</i>	15
Tableau 4. <i>Caractéristiques structurelles et performances énergétiques moyennes</i>	17
Tableau 5. <i>Profil énergétique moyen à La Réunion</i>	18
Tableau 6. <i>Sorties énergétiques moyennes par les exploitations laitières à La Réunion</i>	18
Tableau 7. <i>Emissions de gaz à effet de serre moyennes par les exploitations laitières à La Réunion</i>	19
Tableau 8. <i>Performances énergétiques moyennes en Métropole et à La Réunion</i>	21
Tableau 9. <i>Emissions de GES moyennes en Métropole et à La Réunion</i>	21
Tableau 10. <i>Effet des différentes caractéristiques structurelles sur les performances énergétiques</i> ..	23
Tableau 11. <i>Corrélation entre les postes de consommation et les performances énergétiques</i>	23
Tableau 12. <i>Typologie des profils de consommations énergétiques</i>	24
Tableau 13. <i>Caractéristiques moyennes des types énergétiques</i>	26
Tableau 14. <i>Coût énergétique de 100 litres de lait reconstitué</i>	28
Tableau 15. <i>Production estimée annuelle d'électricité selon différentes sources</i>	33
Tableau 16. <i>Liste des activités de l'exploitation en bovin lait</i>	36
Tableau 17. <i>Variables d'entrées du module énergétique</i>	37
Tableau 18. <i>Coefficients énergétiques pour l'utilisation des machines</i>	37
Tableau 19. <i>Simulation des coûts de travail, énergétiques et financiers de différentes modalités d'épandage</i>	44

INTRODUCTION

I. CONTEXTE

1.1. Caractéristiques générales du milieu

Située dans l'Océan Indien par 55°30' de longitude Est et par 21°50' de latitude Sud, au dessus du tropique du Capricorne, la Réunion est une île de formation volcanique qui forme avec l'île Maurice et l'île Rodrigue l'archipel des Mascareignes. Elle constitue à la fois un département et une région de l'Outre Mer français. Orientée dans la direction nord-ouest / sud-est, sur une longueur maximale de 70 km, elle occupe une superficie d'environ 2 500 km².

De par sa position, l'île est soumise au régime climatique général du sud de l'océan indien. Deux saisons se démarquent : l'hiver austral, saison fraîche et sèche, et l'été austral ou saison des pluies. L'hiver austral, de mai à octobre, est sous la dominance de l'anticyclone de l'Océan indien qui engendre un régime d'alizés frais avec des vents d'Est dominants. L'été austral, de décembre à avril, est caractérisé par un rapprochement des basses pressions équatoriales qui perturbent le flux d'alizés entraînant de fortes perturbations et des vents violents qui peuvent évoluer en cyclone.

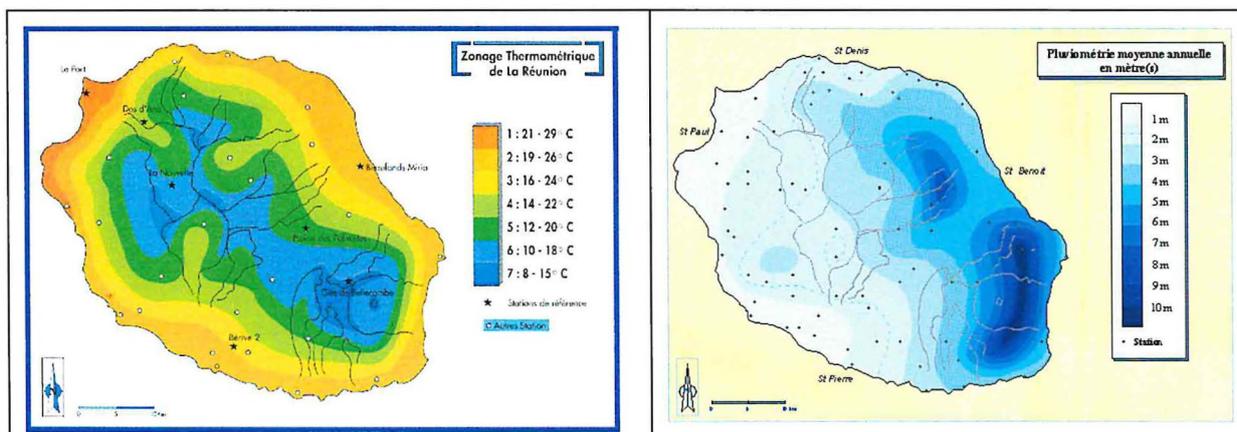


Figure 1. Zonage isométrique et pluviométrie annuelle à La Réunion (source : Météo France)

De même, certaines zones relèvent d'un climat plutôt tropical, d'autres, plutôt tempéré. Ces grandes tendances sont fortement liées au gradient altitudinal marqué qui entraîne une baisse de la température (Figure 1) et une augmentation de la pluviométrie et de l'humidité en altitude, entre 1000 et 3000 mètres. La zone tropicale se limite au littoral avec une température moyenne annuelle relativement élevée, de 23 à 26° C. La zone tempérée est de plus en plus marquée avec l'altitude, la température moyenne y est de 12 à 17° C entre 1000 et 2000 mètres d'altitude.

L'île est constituée de deux massifs accolés, le Piton de la Fournaise, volcan toujours en activité qui culmine à 2 631 mètres et le Piton des Neiges, massif le plus ancien. Cette topographie particulière tend à augmenter la diversité climatique entre les différentes zones.

On observe ainsi une forte opposition entre la côte Est dite « au vent », soumise au régime des vents d'Alizés et plus humide, et la côte Ouest dite « sous le vent » protégée par les reliefs élevés du centre et par conséquent beaucoup plus sèche.

1.2. Les Productions Animales à La Réunion

A la Réunion, l'élevage s'est développé depuis une vingtaine d'années dans le cadre du Plan d'Aménagement des Hauts dont l'objectif était de stabiliser la population des Hauts autour d'une activité agricole viable afin de ralentir la migration des populations vers les zones littorales (Reynaud, 1995). Ceci a permis à l'élevage réunionnais de passer d'un stade artisanal à la performance et à une intégration forte (Rakotomalala, 1999). L'élevage représentait ainsi en 2005 près de 30 % des productions agricoles de la Réunion (INSEE, 2006).

Le tableau 1 décrit le cheptel réunionnais ainsi que le nombre d'exploitants agricoles spécialisés dans l'activité d'élevage.

Tableau 1. Secteurs de l'élevage à la Réunion

Type d'élevage	Nombre de têtes	Nombre d'exploitant en 2000
Bovins viande	30 000	2 970
Bovins lait	8 600	150
Porcins	88 461	450
Ovins	1 180	24
Caprins	36 153	1 787
Equins	459	
Volailles	2 311 000	400
Lapins	200 000	67
Cervidés	3 210	14

(source AGRESTE)

Si les secteurs avicole et porcin restent les plus importants aujourd'hui, le secteur bovin s'est fortement accru ces dernières années. Bien qu'étant le plus souvent situés dans les Hauts, on observe une importante spatialisation des types d'élevages sur l'île. Dans le Cirque de Salazie par exemple, l'élevage hors-sol est dominant avec une filière porcine bien organisée et une filière avicole en plein essor (Reynaud, 1995) alors que la filière bovin viande y reste limitée aux « bœufs-fumier ». Dans les Hauts de l'Ouest, ce sont principalement les filières bovins lait et viande qui se sont développées ainsi que quelques élevages porcins et avicoles alors que l'élevage laitier est dominant dans les plaines d'altitude et les zones de piémont.

1.3. Contexte de la production laitière à La Réunion

Le véritable développement de l'élevage bovin trouve son origine dans les années 1970, dans le cadre du PAH (Plan d'aménagement des Hauts) qui répondait à un souci d'aménagement du territoire, d'autant plus nécessaire compte tenu du très faible taux d'auto-provisionnement en lait et en viande de l'île et du fort exode rural des Hauts vers les Bas, consécutif à la crise du géranium. Les principaux objectifs du PAH portaient sur :

- l'aménagement pastoral des surfaces en friche
- la lutte contre l'érosion particulièrement importante dans les cultures de géranium
- la création d'activité viable dans les Hauts.

En privilégiant les systèmes herbagers pour l'alimentation des animaux (Blanfort, 2000), l'élevage bovin paraissait alors l'activité la plus apte à remplir ces objectifs. Ne disposant pas des infrastructures nécessaires (routes, électricité, habitat, bâtiments d'élevages), l'élevage bovin est alors généralement préféré à l'élevage laitier mais à partir de 1980, d'importants moyens financiers locaux, nationaux et de la Communauté Européenne sont mobilisés et mis en œuvre par les collectivités pour désenclaver et mettre en valeur les surfaces des Hauts. La filière laitière organisée dès l'origine au sein de la SICALait puis structurée en aval en partenariat avec la CILAM (Compagnie Laitière des Mascareignes qui s'occupe de la transformation du lait), se développe alors. Elle est aidée notamment par la mise en place en 1984 d'une production industrielle d'aliments du bétail, avec l'URCOOPA, Union réunionnaise des coopératives agricoles. De nombreux producteurs s'installent alors, souvent dans des conditions précaires et avec des moyennes de production faibles, leur nombre culminant en 1985 à 285 éleveurs.

Cependant, à la fin des années 80, les réalités économiques (mise en place du RMI) et les modifications dans l'environnement de la filière (installation d'un deuxième transformateur, modification de l'interprofession, application des règles européennes) entraînent une crise, aggravée par la dermatose nodulaire contagieuse, qui tempèrent fortement les prévisions de croissance et d'extension des zones de production. Le nombre de producteurs diminue fortement et la production régresse. En 1992, pour enrayer cette crise et renouer avec le développement laitier, la Chambre d'Agriculture, l'Etablissement Départemental de l'Elevage et la SICALait élaborent un programme sectoriel baptisé plan de consolidation et de la production laitière qui s'étale de 1993 à 1997 qui a atteint voire dépassé ses objectifs puisque depuis, la production par vache et par exploitation n'a cessé d'augmenter (tableau 2) jusqu'à ce jour. La qualité s'est constamment améliorée ainsi que les équipements d'élevage tout cela appuyé par l'article 6 du plan POSEIDOM traitant de l'aide au développement de la production de lait de vache et dont bénéficient les éleveurs réunionnais depuis 1995.

Tableau 2. Production totale de lait de vache à La Réunion (source INSEE, 2006)

Année	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Production (en 10 ⁶ L)	19,7	20,3	21,9	22,8	22,5	24,5	24,3

Actuellement, la filière s'est stabilisée avec une production proche de 24 millions de litres et un nombre d'éleveurs avoisinant les 125 (SICALait, 2006).

1.4. Système de production actuel à la Réunion

Les particularités morphopédologiques de La Réunion ont fortement influencé la répartition de l'élevage bovin laitier puisque celui-ci se situe actuellement dans 4 zones principales (Blanfort, 2000) : Les Hauts de l'Ouest, la Plaine des Cafres, la Plaine des Palmistes et les Hauts de St Joseph. Dans tous les cas, le facteur climatique joue un rôle important puisque ces zones herbagères se situent entre 1000 et 2000 m d'altitude avec une très grande variabilité du type de végétation et de cultures possibles mais avec comme point commun une disponibilité limitée en surfaces fourragères mécanisables. Dans la majorité des cas, cette contrainte entraîne des chargements élevés ils sont supérieurs à 4 UGB par hectare et des apports en concentrés importants qui représentent plus de 50 % de la matière sèche des rations. Cette distribution est pour la plupart du temps égale en quantités pour toutes les vaches d'une même exploitation, quel que soit leur niveau ou leur stade de lactation.

On observe une uniformité comparable concernant la structure des élevages. Ils possèdent tous une aire d'alimentation abritée avec des cornadis ainsi qu'une aire d'exercice en terre non-couvertes. Pour le couchage les logettes se développent peu à peu. Les élevages étant de constitution récente, l'âge moyen des vaches (5,7 +- 0,4) est peu variable tout comme le rang de lactation (3,1 +- 0,4). La traite est entièrement mécanisée, les salles de traite avec transfert se substituant progressivement aux pots trayeurs. Le niveau génétique est lui aussi relativement uniforme. Tous les élevages sont constitués à partir de vaches importées de Métropole qui sont réparties dans les élevages par tirage au sort. Ainsi, les troupeaux sont constitués majoritairement de bovins de race Holstein (76 %) ou croisée Holstein (18 %).

Les exploitation diffèrent toutefois fortement selon les zones, le mode de conduite, les performances économiques. Dans une étude qui avait pour objectif initial de connaître les caractéristiques et les modes de fonctionnement des exploitations laitières ainsi que leur capacité d'adaptation Taché (2001) et Alary *et al.* (2002) proposent la typologie résumée ci après :

Le type 1 regroupe des exploitations relativement anciennes dotées d'un troupeau de 20 à 35 vaches laitières sur 9 ha en moyenne et qui recourent modérément aux concentrés (10 kg/VL/j) tout en maintenant des performances laitières entre 5 000 et 6 000 L/VL/an. Le mode d'affouragement est essentiellement basé sur la fauche en vert et l'ensilage de balles rondes enrubannées de chloris et parfois de brome lorsque ceci est possible.

Le type 2 représente des grandes exploitations ayant plus de 55 vaches laitières sur plus de 35 ha dont au moins un tiers en pâture. Le système fourrager est basé principalement sur des prairies de graminées tempérées dont une partie est ensilée et enrubannée en balles rondes et ces éleveurs pratiquent une forte complémentation (plus de 7000 kg/VL/an).

Le type 3 comprend des exploitations intermédiaires où le troupeau s'élève entre 35 et 55 vaches laitières sur 15 à 35 hectares. Ce sont des exploitations relativement récentes qui bien qu'autonome en matière d'affouragement ont recours à d'importantes quantités de concentrés (entre 10 et 13 kg/VL/j).

Le type 4 regroupe les exploitations comptant moins de 20 vaches laitières sur moins de 5 ha de terres. Ce sont des élevages quasiment hors-sol et très récents qui sont entièrement dépendantes de l'extérieur pour leur affouragement et qui recourent à plus de 13 kg de concentrés par vaches et par jour.

Le type 5 rassemble des exploitations en cours de constitution qui occupent peu de surface (inférieure à 5 ha). Ils ont recours à une gestion prudente des concentrés ce qui a pour principale conséquence un niveau limité de production laitière (4 500 litres par vache) alors que les apports fourragers sont essentiellement constitués d'une fauche quotidienne en vert. Ces éleveurs ont parfois également pour but de se tourner vers l'agrotourisme et ne recherchent pas tous à augmenter leur productivité.

Le type 6 comprend des exploitations dont le mode d'affouragement est principalement basé sur du pâturage en prairies naturelles de Kikuyu. Elles enregistrent des performances laitières limitées (moins de 5 000 L/VL/an) liées au système extensif sur pâturage et à la limitation de la complémentation en concentrés. Ces élevages ont recours de préférence au foin de chloris ou aux résidus de canne durant quasiment toute l'année.

II. PROBLEMATIQUES ET OBJECTIFS

Après une période de croissance soutenue durant les années 1990 à 2000, la filière laitière à La Réunion est aujourd'hui dans une phase de stabilisation et s'interroge sur les évolutions à concevoir tant sur le plan technique que économique pour répondre aux enjeux de l'avenir. Celui entre autre de faire face aux besoins grandissants en produits laitiers de la population, l'île a ainsi importé plus de 3 500 tonnes de poudre de lait en 2005 correspondant à approximativement 38 millions de litres de lait transformé. D'un point de vue économique, et jusqu'au début 2006, la poudre de lait détenait un avantage certain puisque son coût de production et de transport était bien inférieur à celui du lait produit localement. Les prélèvements effectués à l'importation de la poudre contribuaient à compenser le surcoût de la production locale. L'évolution spectaculaire des cours mondiaux de la poudre, laquelle a doublé entre 2005 et 2006 rend la production locale plus compétitive tout en reposant le problème de la réorganisation des mécanismes de soutien. De même les critères d'évaluation des systèmes agricoles ont largement évolué durant la récente décennie. Les indicateurs technico-économiques traditionnels sont aujourd'hui complétés par des critères agro-écologiques et prennent en compte l'évaluation de l'impact environnemental des systèmes locaux.

Tout comme pour les autres secteurs, que ce soit le transport ou encore l'industrie, l'environnement et en particulier les questions liées à l'énergie tient aujourd'hui une place à part entière en tant que facteur de durabilité au côté de l'aspect économique et technique. En France, la question de l'énergie en lien avec l'agriculture présente un intérêt grandissant du fait des orientations politiques actuelles définies à différents niveaux. Au niveau mondial, le protocole de Kyoto fixe à la France l'objectif de maintenir ses émissions de gaz à effet de serre en 2010 au niveau de celles de 1990. Au niveau européen, la réforme de la PAC constitue un véritable tournant pour l'agriculture, ces nouvelles mesures pouvant modifier fondamentalement les choix stratégiques des agriculteurs. De plus, L'Union Européenne a publié plusieurs directives en faveur de la maîtrise de l'énergie et des énergies renouvelables, que les états membres doivent retranscrire et appliquer. Enfin, la France a elle-même choisi de donner une nouvelle place à l'environnement dans ses politiques publiques puisqu'elle a pris l'engagement de produire 21 % de son électricité à partir d'énergies renouvelables en 2010 et de tripler la production des biocarburants.

Longtemps tenu comme responsable de dégradation des écosystèmes surtout via l'émission de méthane, l'agriculture a aujourd'hui les moyens d'entamer sa révolution énergétique dans l'optique d'un développement autonome et durable en passant par les économies d'énergie ou l'amélioration de l'efficacité énergétique, sans oublier les productions d'énergies renouvelables.

Dans un contexte d'insularité et d'éloignement important de la métropole et face à la diversité importante des conditions et des pratiques élevages, l'île de la Réunion présente un terrain d'étude intéressant pour aborder la question énergétique des exploitations laitières dans un milieu contraint. La présente étude avait donc pour objectif d'établir un diagnostic des consommations énergétiques des exploitations laitières à la Réunion et d'évaluer leur émission de gaz à effet de serre. Pour y parvenir, le travail effectué tente de répondre à un certain nombre de questions. Tout d'abord, quel est le bilan énergétique de la production de lait à la Réunion, quelle est la variabilité existante et quels facteurs induisent cette dernière ? Ensuite, quelles sont les voies d'amélioration possibles des bilans obtenus ? Son prix ayant doublé depuis un an, la poudre de lait n'a plus de compétitivité économique face au lait produit localement. On peut alors légitimement se demander où se situe d'un point de vue énergétique le lait reconstitué à partir de poudre de lait face à la production locale ? Enfin, comment grâce à la méthodologie mise en place, pourrait-on représenter dans un modèle les flux d'énergies résultant des activités de gestion de l'exploitation afin de cerner notamment les pratiques les plus consommatrices en énergies ?

PARTIE I : Profils énergétiques des exploitations laitières à La Réunion

I. MATERIELS ET METHODES

1.1. La Méthode PLANETE

La méthode choisie pour effectuer l'analyse énergétique est celle mise en place par le groupe PLANETE (constitué du CEIPAL, du CEDAPAS, du CETA, de Solagro et de l'ENES de Dijon) avec l'appui de l'ADEME et intitulée « méthode pour l'analyse énergétique de l'exploitation agricole et l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre ».

L'objectif de la méthode PLANETE est de quantifier à l'échelle de l'exploitation agricole les entrées et les sorties d'énergies, et d'évaluer les émissions de gaz à effet de serre liées à la consommation d'intrants et aux pratiques agricoles. Cette méthode est basée sur les analyses des cycles de vie, c'est à dire qu'elle prend en compte toute l'énergie consommée ainsi que les gaz émis d'un produit « du berceau à la tombe » (Bochu, 2002), ou plus concrètement de sa fabrication primaire à son utilisation finale en passant par son transport. Les cessions internes entre ateliers, les énergies renouvelables et l'énergie du travail humain quant à elles ne sont pas comptabilisées. En effet, selon Ferriere *et al.* (1997), certaines études auraient démontré qu'elles étaient d'importance quantitative négligeable.

Ainsi, les **flux d'énergies entrantes** à comptabiliser sont :

- les énergies **DIRECTES** consommées sur l'exploitation telles que les différents carburants (fioul, gazole,...), l'électricité fournie par le réseau EDF, l'eau de réseau collectif.
- les énergies **INDIRECTES**, c'est-à-dire les énergies non-renouvelables consommées lors du processus de fabrication et le transport des différents intrants de l'exploitation. Ces intrants considérés ici sont les engrais minéraux et organiques, les aliments achetés (concentrés, fourrages,...), les produits phytosanitaires (herbicides,...), les semences, le matériel et les machines (considérées amorties au bout d'un certain nombre d'années d'utilisation) et d'autres achats tels que les plastiques ou encore les produits vétérinaires.

Les **sorties d'énergies** quant à elles correspondent essentiellement à des productions alimentaires et sont calculées sur la base de leur valeur énergétique.

Pour les **émissions de GES**, l'approche est encore actuellement limitée dans PLANETE. Tous les intrants énergétiques ne sont pas considérés et ne sont estimés que les émissions pour le CO₂, le CH₄ et le N₂O. Ainsi, sont pris en compte le fioul, l'électricité, les engrais, les phytosanitaires, les semences, les plastiques, le matériel et les bâtiments pour le CO₂, alors que ne sont pris en compte pour le méthane que celui émis par les bovins et pour le N₂O, les engrais, le labour et le lisier stocké.

On dispose, pour quantifier énergétiquement et en terme d'émissions de GES ces entrées et ces sorties, de **coefficients énergétiques** (en MJ/unité) et de **coefficients d'émission de gaz à effet de serre** (en tonne de gaz par unité) affectés spécifiquement pour chaque type d'intrant. Ces coefficients permettent de transformer des quantités préalablement données en unités physiques (UGB, kilogramme, litre...) ou monétaires (€) en quantité d'énergie. Ces quantités d'énergies sont tout d'abord quantifiées en Mégajoule puis transformées en Equivalent Litre de Fioul (EQF), chacun se représentant facilement ce que l'on peut tirer d'un litre de fioul.

Par exemple, les tourteaux de tournesol ont un coefficient énergétique estimé à 3,7 MJ/kg. Les tourteaux sont des aliments achetés et correspondent à une entrée d'énergie indirecte. Ce coefficient correspond donc à l'énergie qui a été consommée pour la culture du tournesol puis pour la fabrication du tourteau et son conditionnement et enfin pour son transport jusqu'à l'exploitation.

Cependant ces coefficients ont tous été choisis pour leur rapprochement optimal aux conditions métropolitaines (Risoud et Théobald, 2002). Ainsi, si ceux-ci proviennent de sources parfois très variées puisqu'on retrouve des contributions françaises, allemandes, néerlandaises ou encore luxembourgeoises, ils se situent tous dans un contexte européen. Notamment parce qu'une grande

partie des intrants sont importés de Métropole, cette situation engendre une consommation d'énergies non-renouvelables non négligeable pour le transport. La recherche et l'optimisation de coefficients adaptés au contexte réunionnais s'est donc rapidement révélée nécessaire.

1.2. Adaptation des coefficients au contexte réunionnais

1.2.1. Coefficients énergétiques¹

Les coefficients concernant les **Achats d'animaux** et les **Sorties d'Animaux** ainsi que le **Lait vendu** (avec un taux protéique de 31,7 g/L et un taux butyreux de 39 g/L (Bony, 2005)) n'ont pas été modifiés car ils sont basés sur l'Energie Brute contenue dans ces produits et n'ont par conséquent aucune raison d'être différents dans le contexte réunionnais. Le coefficient pour l'**Eau** n'a également pas été modifié également mais pour des conditions différentes car il a été difficile d'évaluer le coût énergétique local de la production d'eau de réseau.

Les intrants en provenance de la Métropole se sont tous vus additionnés à leur coefficient initial d'un forfait de 2,6 MJ/kg pour un transport de 10 600 km en cargo entre la métropole et l'île. Ceci a été le cas également pour la totalité des **Engrais**, des **Produits phytosanitaires**, le **Matériel** et les **Bâtiments**.

Concernant le **Fioul** et le **Gasoil**, le coefficient utilisé en Métropole est identique et correspond à la quantité d'énergie nécessaire pour l'extraction, le raffinage, le transport, la distribution et l'entretien des réseaux. On estime que pour la Réunion, seul le coût de transport change car le pétrole n'est pas importé de métropole. Le coût de transport initial a donc été estimé puis substitué par un coût de transport s'effectuant depuis l'Australie et Singapour, le pétrole à La Réunion provenant sous forme de produits finis de ces pays (Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie, 2003).

Pour le poste **Electricité**, ce sont 2 269 kWh soit 195,2 ktep qui ont été livrés par les différentes centrales de production en 2005 pour la Réunion (ARER, 2006). Or pour produire cette énergie, l'île a consommé 523 ktep d'énergie non-renouvelable (sous forme de fioul et de charbon), ou renouvelable (biomasse via la bagasse, hydraulique, éolien et photovoltaïque). L'efficacité énergétique pour la production d'électricité s'élève donc à la Réunion à approximativement 0,37. Concrètement, pour produire 1 kWh à la Réunion, ce sont 2,68 kWh d'énergie qui ont été nécessaires. Sachant que 1 kWh équivaut à 3,6 MJ (Risoud et Théobald, 2002), le coefficient énergétique pour l'électricité s'élève à 9,6 MJ/kWh.

Concernant les **Concentrés**, ceux-ci sont produits sur l'île à partir de matières premières importées d'Argentine ou d'Europe (source URCOOPA) semblables à la métropole.

Pour les concentrés simples, les coefficients ont donc été calculés à partir des différents coûts énergétiques de production des matières premières (Risoud et Théobald, 2002) auxquelles ont été ajoutés le coût du transport jusqu'à l'île soit 2,6 MJ/kg (les distances étant approximativement égales) ainsi qu'un forfait de 0,08 MJ/kg pour le transport local. Si les matières premières ont été transformées sur l'île, comme pour le maïs broyé, on ajoute un coût de transformation de 0,144 MJ/kg (Risoud et Théobald, 2002).

Pour les aliments composés, on se base sur les compositions données par l'URCOOPA. Afin d'obtenir un coefficient pour chaque type de concentrés, les pourcentages de chaque matière première ont été multipliés par leur coefficient énergétique calculé précédemment puis un forfait de 0,629 MJ/kg de granulé pour le mélange a été rajouté (Risoud et Théobald, 2002).

Enfin pour les sous-produits, Solagro considère qu'on ne comptabilise que l'énergie non renouvelable nécessaire à leur élaboration spécifique au cours du processus de production (par exemple pour le bottelage de la paille) et à leur transport (Risoud et Théobald, 2002). On considère donc soit cette valeur si elle a été trouvée dans la bibliographie soit la valeur de 0,067 MJ/kg affectée aux sous-produits par convention par Risoud et Théobald (2002).

Pour les **Fourrages**, les coefficients sont basés sur les itinéraires techniques des différentes cultures provenant de sources bibliographiques différentes. Ainsi sont pris en compte pour ces calculs les coûts de création, de production et de récolte à l'exception de la bagasse et de la paille de canne que l'on considère comme des sous-produits de la canne à sucre, leur coefficient énergétique étant égal à l'énergie non renouvelable nécessaire à l'élaboration spécifique de ces produits. Si le coût de bottelage pour la paille de canne a pu être estimé à dire d'experts, nous n'avons pu avoir accès aux

¹ L'ensemble des coefficients et leurs calculs plus détaillés se trouve en Annexe I

informations concernant le coût de pressage. Le coefficient attribué à la bagasse est donc celui affecté par convention aux sous-produits soit 0,067 MJ/kg (Risoud et Théobald, 2002) auquel un coût de transport de 0,08 MJ/kg a été ajouté.

Pour le poste **Autres achats** et pour **l'Eau**, compte tenu de la difficulté pour obtenir les modalités exactes de calcul des coefficients pour la métropole, ceux-ci ont été conservés pour le contexte local.

Les **Semences** quant à elles proviennent de Métropole à l'exception des semences de graminées tropicales qui proviennent d'Australie. Le transport jusqu'à l'île a donc été rajouté selon leur provenance ainsi qu'un forfait de 0,08 MJ/kg pour le transport à l'intérieur de l'île.

La **Poudre de lait** à La Réunion étant produite à partir de lait provenant des exploitations laitières métropolitaines, notre coefficient comprend donc dans un premier temps la quantité d'énergie consommée sur les exploitations métropolitaines pour la production de lait, cette donnée étant tirée de résultats de bilans PLANETE effectués jusqu'ici sur les exploitations en Bovin Lait (Bochu, 2007). La part de ces consommations imputables à la poudre de lait a été estimée en fonction de la matière sèche contenue dans les sous-produits qui se trouvent être ici la crème crue, qui servira entre autres à la production de crème fraîche de consommation, et au lait écrémé qui est la base de la Poudre de Lait 0% MG utilisé par la CILAM (principal transformateur de produit laitier à La Réunion). Des coefficients énergétiques plus actualisés que ceux attribués par Brand et Melman (1993), qui est la référence utilisée dans la méthode PLANETE, ont ensuite été recherchés pour les différentes étapes du processus de fabrication dans l'industrie laitière. Enfin, les coûts énergétiques des différents transports locaux ou à plus grande échelle (de la métropole jusqu'à La Réunion) ont été estimés et ajoutés. Le calcul donne pour résultat une consommation énergétique de **50,74 MJ** par kilogramme de poudre de lait consommée à La Réunion.

1.2.2. Coefficients d'émission de GES

1.2.2.1. Emissions de CO₂

Concernant le fioul et les bâtiments, nous avons conservé les coefficients de la méthode PLANETE.

Pour l'électricité, les émissions de GES au cours du processus de production ont été estimées selon la même méthodologie que PLANETE mais en fonction du système de production à La Réunion lequel diffère fortement de la Métropole.

Pour les autres intrants, ces derniers provenant de la métropole, on considère alors les mêmes coefficients que PLANETE, à l'exception des émissions pendant le transport maritime qui ont été ajoutées à hauteur de 40 grammes par tonne transportée et par kilomètre parcouru (OCDE, 1997).

Enfin, les émissions de CO₂ pour la fabrication et le transport des aliments ne sont pas considérées dans la méthode PLANETE. Or, compte tenu des quantités de concentrés importées sur les exploitations à La Réunion, il nous est apparu intéressant de prendre en compte celles-ci. Au vu de la difficulté pour accéder aux émissions de GES par les usines de fabrication des aliments, nous avons essentiellement estimé les émissions lors de la fabrication des matières premières en affectant comme émissions de GES les résultats obtenues par les bilans PLANETE sur les systèmes de grandes cultures (Bochu, 2005).

1.2.2.2. Emissions de CH₄

On considère ici les équations données par Hacala *et al.* (2006) pour les émissions de méthane entérique (CH_{4ent}) par les bovins laitiers en fonction du pourcentage de concentrés dans la ration² (C) et des finalités de l'animal. L'estimation est assez large et pourrait être affinée dans l'avenir avec les coefficients plus précis qu'élabore actuellement Solagro.

$$\text{Lactation : } CH_{4ent} = 24 + 0,233C - 0,0037C^2$$

$$\text{Croissance ou entretien : } CH_{4ent} = 30,1 + 0,280C + 0,00354C^2$$

1.2.2.3. Emissions de N₂O

Nous avons considéré ici les coefficients reportés dans la grille PLANETE comme adaptés au contexte réunionnais.

² Le pourcentage moyen de concentrés dans la ration considéré ici est de 55 %.

1.3. Echantillon

La compilation des données a été effectuée à partir des cahiers des enquêtes qui ont été effectuées en 2000 sur 37 exploitations laitières (Taché, 2001) et sur la base de données Access® qui en avait résulté. Ces enquêtes, qui avaient pour objectif initial de connaître les caractéristiques et les modes de fonctionnement des exploitations laitières ainsi que leur capacité d'adaptation, ont été produites lors d'une étude menée par Taché (2001) qui a abouti à une typologie caractérisant les 6 types (Alary, 2004) décrits plus hauts. La typologie a été établie sur base de la combinaison d'une typologie structurelle et d'une typologie économique

L'échantillon choisi dans cette étude est donc identique à celui de l'étude typologique menée en 2000. A noter que 6 exploitations ont été retirées de l'étude par absence de dossier ou compte tenu de leur caractère totalement atypique. L'échantillon final se résume donc à 31 exploitations (tableau 3).

Tableau 3. Description géographique de l'échantillon (d'après Taché, 2001)

	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5	Type 6
Effectifs	13	5	4	4	3	3
Zone						
Plaine des Cafres	2	3	2	4	2	1
Plaine des Palmistes	1	0	1	0	0	0
Hauts de l'Ouest	3	1	0	0	0	0
St Pierre	1	0	0	0	0	0
St Joseph	2	1	0	0	0	1
Plaine des Grègues	4	0	1	0	1	1

1.4. Récolte des données

Les données pour l'année 1999, année de référence sur laquelle on se base, ont été compilées selon différentes modalités en fonction de leur disponibilité. Elles sont soit extraites directement des cahiers ou de la base de données Access® soit estimées avec la meilleure précision possible. Cependant, les chiffres disponibles étant parfois à caractère économique et l'étude ayant notamment pour base la recherche de données quantitatives, il a parfois été nécessaire d'effectuer un certain nombre d'approximations afin de transformer les valeurs économiques en quantités de produits sortants ou entrants.

Ainsi, plusieurs éléments étaient présents directement sur les cahiers d'enquêtes. Ce fût le cas pour le **Cheptel**, le **Lait vendu** (à la SICALait ou aux particuliers), les **Travaux effectués par des tiers**, les **Achats** et les **Ventes de fourrages**, les **Produits phytosanitaires**, les **Frais d'élevage** et **Frais vétérinaires** et le **Matériel** et les **Bâtiments** présents sur l'exploitation

Les **Achats** et la **Vente d'animaux** par l'exploitation étaient répertoriés dans la base Access®. Cependant, ces données correspondaient à des nombres d'individus et la feuille de calcul nécessitait des sommes totales en kg vif, nous avons estimés les poids moyens des différents animaux à l'aide de dires d'expert (Annexe I).

Les quantités de **Fioul** et de **Gasoil** étaient regroupées dans les cahiers d'enquête sous un même poste appelé « Carburants » correspondant au montant total de charges pour l'achat de carburant. Il a donc fallu dans un premier temps considéré la part de chacun dans ce montant. Lorsqu'ils achètent du gasoil pour l'exploitation, les éleveurs réunionnais peuvent récupérer une partie de la somme versée sous la forme d'une subvention appelée « Détaxe gasoil » à hauteur de 0,41 € par litre (Conseil Régional de la Réunion, 2007). Lorsque cette dernière était spécifiée dans les enquêtes, nous avons considéré que le montant indiqué divisé par le tarif de l'aide (0,41 €) correspondait à la quantité de gasoil achetée. Cette quantité a alors été multiplié par le prix du gasoil que nous avons arrêtés à 0,69 € par litre afin d'obtenir la part pour le poste « Carburants » représentés par le gasoil, le restant étant alors considéré comme de l'achat de fioul à 0,64 € par litre.

Pour les postes **Eau** et **Electricité**, ces deux charges étaient regroupées sous un même poste « Eau/Electricité » dans les cahiers d'enquête et dans la base de données. Deux cas de figures se présentaient alors. Lorsque l'on observe la présence d'une retenue collinaire dans la liste du matériel présent sur l'exploitation, le choix a été fait de reporter la totalité du montant sur le poste Electricité (soient 9 exploitations sur 32). Pour les autres exploitations les deux postes ont été séparés selon le ratio 27 % électricité et 73 % eau. Ce choix a été fait après avoir observé que parmi les 5 exploitations qui présentaient une séparation des 2 postes, le montant global était alors toujours réparti entre 26 à 29,5 % pour l'électricité et 74 à 70,5 % pour l'eau.

Des tarifs ont ensuite été arrêtés afin de convertir ces données économiques en quantités d'énergies consommées. Pour l'électricité, un montant de 12 €/mois pour l'abonnement soit 144 € a été ôté du montant global puis un tarif moyen de 0,08 €/kWh a été choisi. Concernant l'eau, le prix moyen choisi est différent selon la situation géographique de l'exploitation (annexe I).

Les quantités d'**Engrais** qui entrent sur les exploitations ont été obtenues grâce aux cahiers d'enquêtes sur lesquelles étaient indiqués l'assolement, les différents types de fertilisation et leur fréquence. Pour plus de précision, un montant total d'achats d'engrais a été calculé à partir des prix unitaires donnés par les fournisseurs (annexe I). Ce montant a alors été comparé avec le montant total de charge pour le poste Engrais indiqué sur les enquêtes ou sur la base de données.

Concernant les achats de **Concentrés** et de **Minéraux**, une méthode similaire aux engrais a été appliquée. N'étaient présents sur les enquêtes et la base de données que des rations quotidiennes et un montant total d'achats pour ces derniers, les quantités consommées ont été alors calculées à partir des rations puis comparées, grâce aux prix des différents concentrés et minéraux trouvés au fil des enquêtes (annexe), au montant total de charge pour les aliments inscrit sur les enquêtes ou sur la base de données.

Les quantités de **Semences** ont été calculées à partir des doses de semis conseillées par Barbet-Massin *et al.* (2004) pour la mise en place des différentes cultures présentes sur l'exploitation au moment de l'enquête, ces quantités étant divisées par le nombre d'années entre deux renouvellements (Barbet-Massin *et al.*, 2004) et ceci afin de répartir de façon homogène une consommation qui ne se fait que ponctuellement.

La **Poudre de lait** consommée par les veaux n'était pas notée séparément sur les enquêtes. On sait toutefois aux dires d'experts qu'elle est largement utilisée sur les exploitations en Bovin Lait. Les quantités ont alors été estimées à partir des rations conseillées par la SICALAIT pour un repas par jour et en fonction du nombre de veaux nés sur l'exploitation et du temps passé avant leur vente.

Tout comme pour la poudre de lait, les quantités de **Plastique** n'étaient pas indiquées mais est utilisé notamment sous forme de film pour les balles rondes. Les quantités inscrites correspondent donc au plastique contenues dans les balles rondes importées ou produites sur l'exploitation sachant que chaque balle en contient approximativement 800 g (Barbet-Massin *et al.*, 2004).

1.5. *Traitement des données*

Bien que les résultats de la méthode PLANETE se présentent sous différentes formes, nous nous sommes intéressés essentiellement à **l'efficacité énergétique** et à **l'énergie consommée par l'exploitation (en EQF) pour produire 100 litres de lait** concernant les aspects énergétiques et à la quantité de **tonne équivalent CO2 émis par l'exploitation pour produire 1 000 litres de lait** concernant les émissions de gaz à effet de serre. Ces données ont ensuite été traitées dans un tableur Excel® pour la partie « Résultats » puis en s'appuyant sur le logiciel de statistique Minitab® concernant la partie « Analyse des Résultats ».

II. RESULTATS

2.1. *Performances énergétiques à La Réunion*

2.1.1. *Diversité des exploitations*

L'efficacité énergétique des 31 exploitations étudiées a été reportée dans la figure 2.

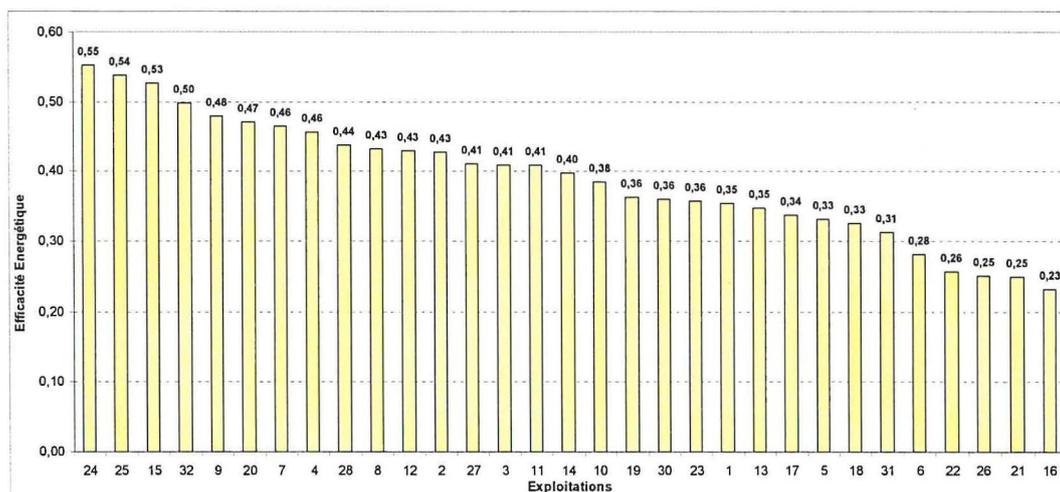


Figure 2. Efficacité Energétique des exploitations enquêtées

On s'aperçoit que les valeurs obtenues sont très variables puisqu'elle s'étendent de 0,23 pour l'exploitation n°16 à 0,55 pour l'exploitation n°24, soit une valeur environ deux fois plus élevée. De plus, les valeurs obtenues se répartissent de façon assez homogène entre ces deux valeurs. La figure 3 présente l'énergie totale consommée pour produire 100 litres de lait pour chaque exploitation.

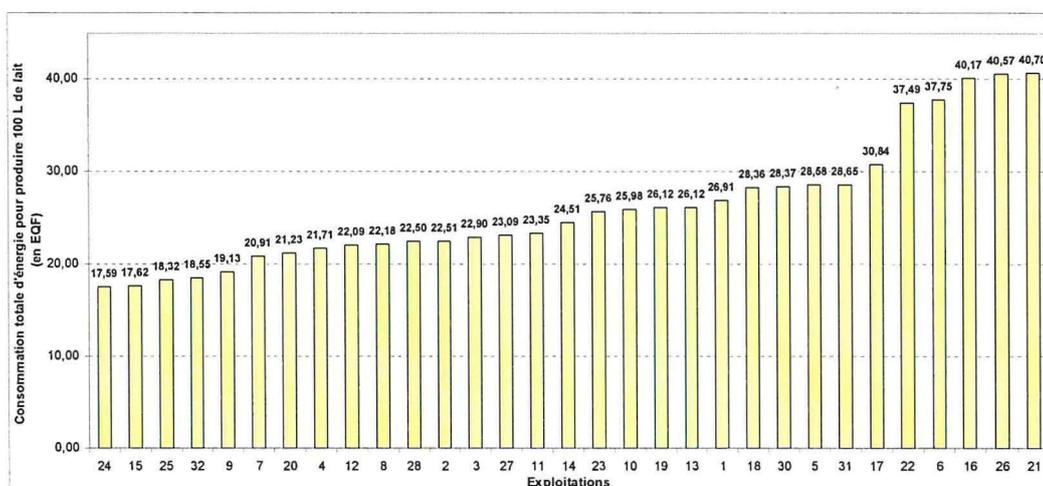


Figure 3. Consommation d'énergie pour produire 100 l de lait (en EQF)

L'énergie consommée pour produire 100 l de lait au sein des exploitations étudiées offre également une grande diversité de résultats. On remarque ainsi que cette valeur s'étend de 17,59 EQF pour l'exploitation n°24 à 40,70 EQF pour l'exploitation n°29. Si ces valeurs croissent de façon assez homogène jusqu'à l'exploitation n°17, on s'aperçoit que les exploitations n°22, 6, 16, 26 et 21 ont des valeurs beaucoup plus élevées.

2.1.2. L'exploitation moyenne

Toutes exploitations confondues, le tableau 4 montre les caractéristiques structurelles et les performances énergétiques moyennes des exploitations laitières à La Réunion.

Tableau 4 Caractéristiques structurelles et performances énergétiques moyennes

Caractéristiques	Moyenne	CV ³
SAU (en ha)	18,83	0,88
UGB	48,19	0,51
Altitude	1001	0,41
Efficacité Energétique	0,39	0,22
Consommation énergétique pour produire 100 l de lait (en EQF)	26,15	0,26

³ CV : Coefficient de Variation. Le coefficient de variation est le rapport de l'écart-type sur la moyenne.

L'exploitation moyenne s'étend sur une SAU de 18,83 et détient un nombre d'UGB s'élevant à 48,19 et est située à approximativement 1 000 mètres d'altitude. Son efficacité énergétique s'élève à 0,39 et elle consomme en moyenne 26,15 EQF pour produire 100 l de lait. On observe toutefois des coefficients de variation très élevés sur chacun des postes.

Le tableau 5 nous indique les consommations moyennes par les exploitations.

Tableau 5. Profil énergétique moyen à La Réunion

Postes	Consommation totale (en EQF)			Consommation totale (en EQF/100 L produits)		
	Moyenne	CV	%	Moyenne	CV	%
Carburants	6 552	0,66	14,3	3,72	0,43	14,2
Electricité :	2 682	0,51	5,8	1,82	0,55	7,0
Eau :	448	0,77	1,0	0,30	0,84	1,2
Alim :	26 179	0,64	56,9	15,18	0,38	58,1
Engrais :	4 835	1,15	10,5	2,18	0,68	8,3
Phytosanitaires :	58	0,85	0,1	0,04	0,76	0,1
Semences :	27	1,04	0,1	0,01	0,79	0,1
Achats animaux :	773	1,05	1,7	0,50	1,31	1,9
Matériels :	2 309	0,82	5,0	1,21	0,63	4,6
Bâtiments :	409	0,61	0,9	0,27	0,74	1,0
Autres Achats :	1 741	0,82	3,8	0,93	0,54	3,6
TOTAL ENTREES	46 014	0,61	100	26,15	0,27	100

On remarque ainsi que l'alimentation est le poste le plus consommateur en énergie puisqu'il représente une entrée de 26 179 EQF soit près de 57 % des entrées d'énergies. Le deuxième poste le plus consommateur est le poste Carburants avec 6 552 EQF, ce qui représente 14,3 % des entrées d'énergies. Le poste Engrais représente quant à lui la troisième source d'entrée d'énergies en terme d'importance puisqu'il s'élève à 4 835 EQF, soit 10,5 % des entrées. Les autres postes en entrées sont de moindre importance puisqu'ils représentent moins de 6 % des entrées énergétiques.

Concernant les sorties d'énergies, les valeurs moyennes sont représentées dans le tableau 6.

Tableau 6. Sorties énergétiques moyennes par les exploitations laitières à La Réunion

Postes	Consommation totale (en EQF)		
	Moyenne	CV	%
Lait	16 258	0,61	92,6
Animaux	1 303	0,87	7,4
TOTAL SORTIES	17 561	0,61	100

On observe que le lait représente en toute logique plus de 90 % des sorties énergétiques compte tenu que ce sont des exploitations laitières.

2.2. Emissions de gaz à effet de serre

2.2.1. Diversité des exploitations

Les émissions de gaz à effet de serre exprimées en tonne équivalent CO₂ ont été reportées dans la figure 4.

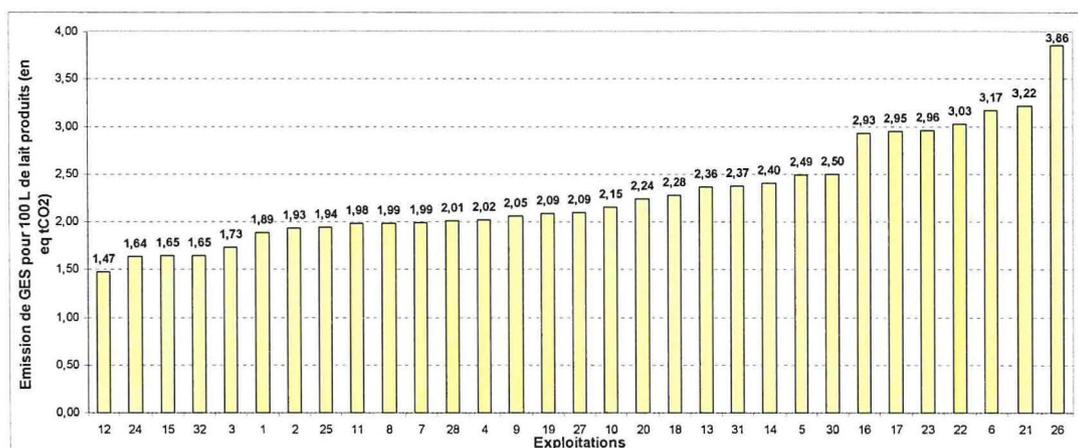


Figure 4. Emissions de gaz à effet de serre pour les exploitations étudiées

On observe ainsi une grande diversité de résultats puisque les valeurs obtenues varient de 1,47 teqCO₂ pour l'exploitation n°12 jusqu'à 3,86 teqCO₂ pour l'exploitation n°10.

2.2.2. L'exploitation moyenne

Le tableau 7 rassemble les émissions moyennes de gaz à effet de serre par les exploitations laitières à La Réunion.

Tableau 7. Emissions de gaz à effet de serre moyennes par les exploitations laitières à La Réunion

	Moyenne	CV	%
Emission annuelle de GES (en teqCO ₂)	389,9	0,24	100
dont CO ₂	175,5	0,10	45
dont CH ₄	109,2	0,11	28
dont N ₂ O	105,2	0,13	27
Emission de GES pour 1000 L de lait produit (en teqCO ₂)	2,29	0,56	

On remarque ainsi que les émissions annuelles moyennes s'élèvent à 389,9 teqCO₂ majoritairement sous forme de CO₂ (45 %). De même, les émissions moyennes rapportées à la production de 1000 L de lait s'élèvent à 2,29 teqCO₂ en moyenne.

III. ANALYSE DES RESULTATS

3.1. Projection des données dans le référentiel métropolitain⁴

3.1.1. Les consommations énergétiques

Selon le rapport qui vient d'être publié par Solagro (Bochu, 2007) et dont les paragraphes suivants reprennent la synthèse concernant les bilans Planète en exploitation bovin lait strict, il faut en moyenne 12.2 EQF/par 100L de lait produits sur l'exploitation.

La base « refPLANETE2006 » comprend 200 exploitations « bovin lait strict » dont la seule production est le lait de vache avec la viande associée. La SAU moyenne des exploitations de bovin lait strict est de 61 ha avec 42 vaches laitières et 68 UGB herbivores. Les productions s'élèvent à 230 000 litres de lait vendus par an avec 10 tonnes de viande en vif (poids des animaux). L'assolement comprend souvent une part d'herbe importante : en moyenne 82% de la SAU est occupé par les prairies permanentes ou temporaires, les 18% restant de la sole étant en cultures annuelles dont la moitié en céréales intraconsommées. Ces moyennes varient fortement selon les exploitations, avec par exemple des exploitations à 10 000 litres par vache et plus de 50% de maïs ensilage dans la SFP.

⁴ Les résultats métropolitains proviennent des bilans PLANETE effectués jusqu'ici (Bochu, 2007)

La consommation moyenne d'énergie des exploitations « bovin lait strict » s'élève à 12,2 EQF pour 100 litres de lait vendus. Le fioul est le premier poste de consommation d'énergie (22%) devant les achats d'aliments (19%), l'électricité et l'irrigation (19%), la fertilisation et l'amortissement énergétique des matériels. Les autres postes (17%) recouvrent principalement l'amortissement énergétique des bâtiments, les autres achats (plastiques, frais d'élevage) et les autres produits pétroliers.

Tout comme à la Réunion la variabilité entre exploitations est tout aussi importante, la figure 5a illustre les variations sur les EQF et les tonnes de CO₂ consommés et émis /1000l de lait.

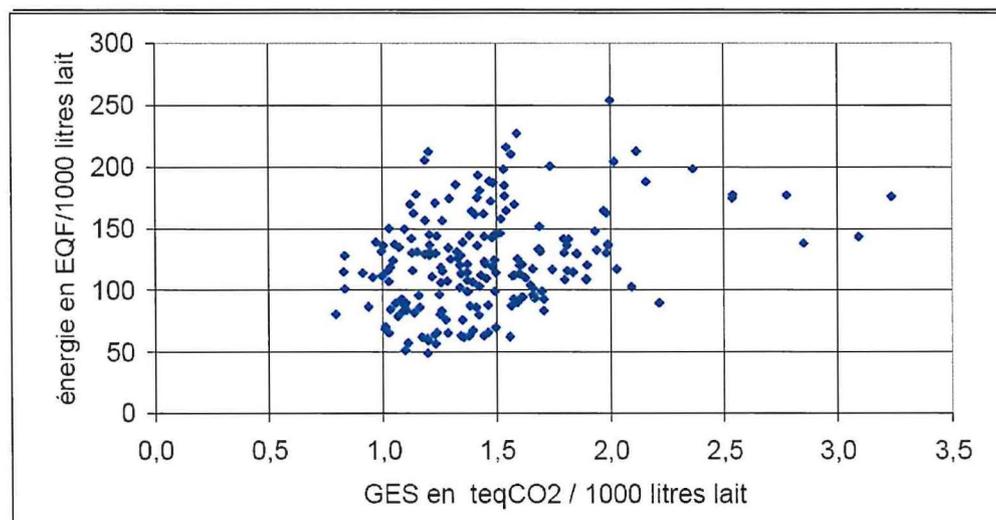


Figure 5a. Résultats des analyses PLANETE effectués sur 200 exploitations en « bovin lait strict »

On voit ainsi que en métropole la plage de consommation s'étend entre 5 et 25 EQF par 100 l de lait

La figure 5b permet de situer les profils moyens de consommation à la Réunion et en métropole.

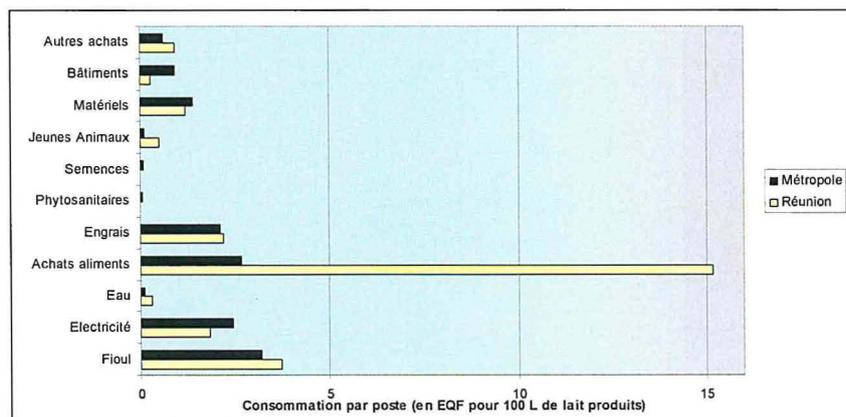


Figure 5b. Comparaison des consommations énergétiques par poste entre la moyenne des exploitations réunionnaises et la moyenne des exploitations métropolitaines

Dans la part des EQF moyens par 100 litres, on remarque que le poste Aliments est plus de 5 fois supérieur sur l'île, ce qui est facilement explicable du fait de la part importante d'aliments importé dans la ration à La Réunion alors qu'en métropole les fourrages et céréales produits sur les surfaces de l'exploitation couvrent une part nettement plus élevée des besoins alimentaires des animaux. Les engrais tiennent également une part plus importante à La Réunion, sans doute à cause de leur utilisation plus importante du fait de la potentialité de croissance de l'herbe plus élevée. D'autres postes, malgré leur importance moindre sur le bilan énergétique, sont aussi plus élevés sur l'île. C'est le cas de l'eau qui, probablement compte tenu de son faible coût, est utilisée en grande quantité, les phytosanitaires, l'achat de jeunes animaux, qui résultent probablement du fait qu'un grand nombre des exploitations enquêtées étaient en phase d'accroissement de leur cheptel, et les autres achats.

Si certains postes comme le Fioul et le Matériel sont relativement semblables, d'autres font l'objet de consommations énergétiques inférieures sur l'île. L'électricité en est un exemple. Du fait du climat,

l'électricité n'est nécessaire qu'au fonctionnement de la salle de traite et du tank à lait et n'est pas utilisée pour la ventilation ou le chauffage des bâtiments. Les Semences représentent également un poste moins consommateur malgré le fait qu'elles soient importées, les conditions climatiques permettant un renouvellement tous les 6 à 7 ans. Enfin les bâtiments, de par leur faible emprise, représentent également un coût inférieur.

Le tableau 8 situe la performance énergétique moyenne des exploitations laitières métropolitaines et réunionnaises.

Tableau 8. Performances énergétiques moyennes en Métropole et à La Réunion

	Métropole	Réunion
Efficacité Énergétique	0,94	0,39
Consommation pour 100 litres de lait produit (en EQF)	12,2	26,2

On remarque ainsi que les performances énergétiques réunionnaises sont inférieures aux performances métropolitaines. Cependant, il convient ici de rappeler que le transport des intrants depuis le reste du monde est une entrée énergétique supplémentaire pour les exploitations réunionnaises. Ce coût pour l'importation d'intrants introuvables sur l'île représente entre 14 et 32 % des entrées énergétiques totales sur les exploitations. Ainsi, si ce coût n'existait pas, les consommations s'étalerait de 15,05 à 29,45 EQF pour produire 100 litres de lait, la moyenne ne s'élèverait plus alors qu'à 20,57 EQF.

3.1.2. Les émissions de GES

Le tableau 9 montre les émissions de GES moyennes pour les exploitations laitières métropolitaines et réunionnaises.

Tableau 9. Emissions de GES moyennes en Métropole et à La Réunion

	Métropole	Réunion
Emission de GES pour 1000 L de lait produit (en teqCO₂)	1,40	2,29
dont CO₂ (en %)	17	45
dont CH₄ (en %)	51	28
dont N₂O (en %)	32	27

On remarque ainsi que les émissions pour les exploitations métropolitaines sont très inférieures aux exploitations réunionnaises puisque l'on observe un écart de 0,89 teqCO₂. On observe également que la répartition des différents gaz à effet de serre diffère puisqu'à La Réunion, du fait d'une moindre part de fourrages grossiers dans l'alimentation, la part du méthane joue un rôle moindre au détriment du dioxyde de carbone alors qu'il est l'émission principale des exploitations métropolitaines.

Cependant, ici aussi le transport des intrants représente une part non négligeable de ces émissions (16 % en moyenne des émissions totales). De plus, il est important de rappeler ici que les émissions de GES via la fabrication et le transport des aliments achetés ne sont pas compris dans PLANETE mais le sont dans notre calcul. Or ces émissions représentent en moyenne 19 % du total des émissions.

Ainsi si l'on calcule les émissions par les exploitations laitières à La Réunion sans ces deux facteurs, on obtient une valeur moyenne de 1,49 teqCO₂ beaucoup plus proche de la moyenne métropolitaine.

3.2. Facteurs de variation des performances énergétiques des exploitations laitières à La Réunion

Pour simplifier les calculs on recherche la variable qui soit la plus pertinente pour qualifier les performances énergétiques des exploitations. Etant dans un système laitier strict, la consommation d'énergie totale pour produire 100 litres de lait semble la plus adaptée. La figure 6 indique la relation entre cette variable et l'Efficacité énergétique.

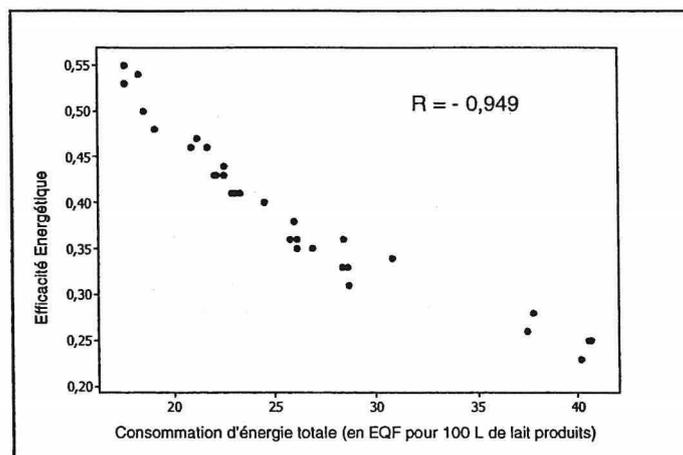


Figure 6. Corrélation entre Efficacité Énergétique et consommation d'énergie pour produire 100 litres de lait

On observe ainsi une forte corrélation ($R = -0,949$) entre ces deux variables ce qui semble logique puisque la majeure partie des sorties énergétiques (92 %) dans les exploitations se font sous forme de lait.

3.3.1. Comparaison avec la typologie technico-économique (Alary et al., 2002)

Les données étant tirées d'enquêtes ayant pour but la constitution d'une typologie technico-économique, il serait intéressant que les résultats énergétiques obtenus suivent cette dernière. Cela permettrait d'utiliser des échantillons plus récents et construits sur des bases économiques afin de valider les résultats obtenus précédemment. La figure 7 montre la variation des valeurs obtenues pour chaque type concernant la consommation totale d'énergie pour produire 100 litres de lait.

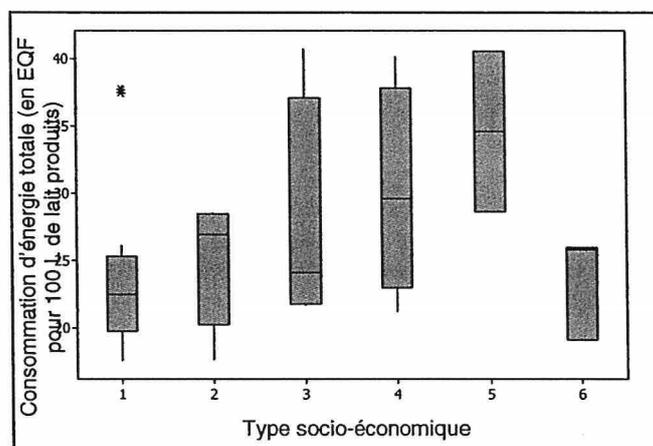


Figure 7. Consommations d'énergies pour produire 100 l de lait en fonction du type technico-économique de l'exploitation.

On observe ici qu'on peut difficilement conclure sur une relation significative entre les performances énergétiques et le type de l'exploitation tant la variabilité intra-type est grande ($p\text{-value} = 0,289$).

Par ailleurs, il n'existe aucune relation entre les résultats financiers de l'exploitation et ses performances énergétiques que l'on considère l'EBE ($R = -0,109$) ou la marge brute ($R = -0,36$).

3.3.2. Corrélation avec les caractéristiques structurelles

Le tableau 10 représente les corrélations entre les caractéristiques structurelles des exploitations et leurs performances énergétiques.

Tableau 10. Effet des différentes caractéristiques structurelles sur les performances énergétiques

	Energie pour 100 l de lait	
	R	p-value
Altitude	0,162	0,383
SAU	- 0,060	0,749
UGB	- 0,083	0,657
Chargement	0,168	0,366
Année de Démarrage	0,186	0,316
Zone géographique	-	0,554

Les coefficients de corrélation sont faibles, il n'y a aucune relation significative entre ces différentes données et les performances énergétiques.

3.3.3. Corrélation avec les postes de consommations énergétiques

Dans un premier temps, on analyse les corrélations individuelles entre les postes de consommations et les performances énergétiques (tableau 11).

Tableau 11. Corrélation entre les postes de consommation et les performances énergétiques

Postes	Energie pour 100 l de lait	
	R	p-value
Fioul	0,372	0,039
Electricité	0,541	0,002
Eau	0,278	0,130
Achats d'Aliments	0,926	0,000
Engrais	0,068	0,716
Phytoprotecteurs	- 0,122	0,513
Semences	0,066	0,723
Achats d'Animaux	0,384	0,033
Matériels	0,067	0,719
Bâtiments	0,436	0,014
Autres Achats	0,047	0,803

On remarque ainsi que seul le poste Achats d'aliments semble montrer une corrélation significative ($R = 0,926$). Ceci confirme que le poste Achats d'aliments est un poste majeur dans les consommations énergétiques des exploitations laitières à La Réunion (voir Résultats).

Nous avons recherché à construire des profils énergétiques en fonction des différents types de consommations et plus particulièrement en fonction du pourcentage que représente chaque poste de consommation. Nous nous sommes plus particulièrement intéressés ici aux postes qui représentaient en moyenne plus de 5 % des consommations totales (voir tableau Résultats).

Nous avons dans un premier temps effectué une analyse en composante principale grâce au logiciel Minitab® afin de construire statistiquement des groupes. Mais face à la difficulté pour obtenir une classification significative, nous nous sommes tournés vers une typologie hiérarchique par rapprochement des caractéristiques à l'aide d'un dendrogramme. Le tableau 12 montre la classification obtenue.

Tableau 12. Typologie des profils de consommations énergétiques

Type	Effectif	Part de chaque poste dans la consommation totale d'énergie (en %)					
		Carburant	Electricité	Aliments	Engrais	Matériels	Autres
7	4	9,5	5,0	73,0	3,0	5,3	7,8
6	3	13,0	9,0	62,3	7,0	8,7	6,0
9	4	11,3	5,5	61,8	6,3	19,8	7,5
10	3	18,7	6,3	60,3	3,7	9,0	7,0
8	2	7,5	5,5	60,0	17,0	9,5	6,5
2	3	13,3	4,7	54,3	14,7	12,7	7,7
5	2	23,0	5,5	51,5	3,5	17,0	10,0
1	2	10,0	11,0	51,5	14,0	5,0	12,0
3	3	14,3	12,7	48	7,7	22,0	9,0
4	5	21,6	6,4	45,2	12,4	13,6	8,6
Moyenne		15	7	57	8	13	8
Significativité		***	**	***	***	**	NS

On peut ainsi distinguer 10 profils différents si l'on considère la part que représente les postes Fioul, Electricité, Aliments, Engrais et Matériels dans la consommation d'énergie totale. Il existe par conséquent une grande diversité des profils énergétiques. Toutefois, la variation des performances intragroupes est très élevée. Ainsi les performances énergétiques ne sont pas liées à des profils de consommation particuliers (p-value = 0,596).

3.3.4. Corrélation avec les performances zootechniques

La performance énergétique n'étant pas reliée à un profil particulier de consommations énergétiques, nous avons recherché si cette dernière était influencée par les sorties énergétiques, et par conséquent les productions animales représentées principalement par la production de lait. La figure 8 montre la corrélation entre la production laitière et la consommation d'énergie pour produire 100 litres de lait.

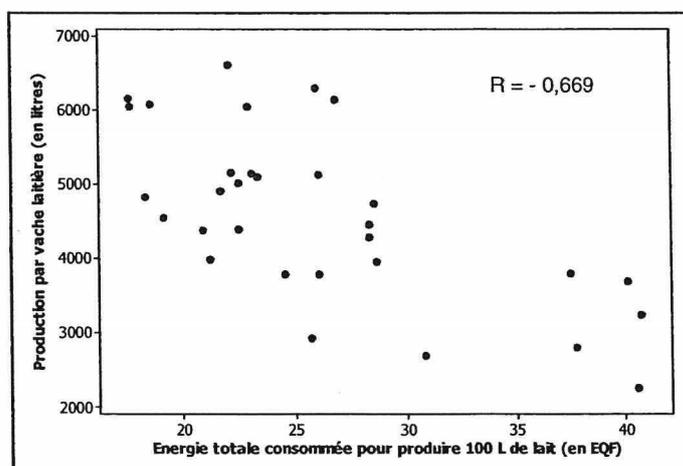


Figure 8. Corrélation entre les performances énergétiques et la production laitière

Si il semble bien exister une corrélation négative entre la production laitière par vache et l'énergie totale consommée ($R = -0,669$), on observe tout de même que pour une production donnée les quantités peuvent fortement varier.

Or, cette production n'est pas directement reliée à la quantité de concentrés distribués ($R = 0,098$) qui est pourtant un facteur d'intensification compte tenu du peu de surfaces fourragères disponibles.

On se propose alors d'observer la corrélation entre l'efficacité de transformation des concentrés et les performances énergétiques (figure 10).

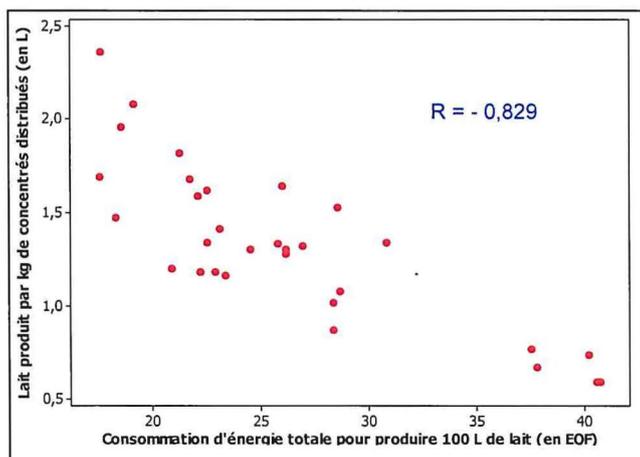


Figure 9. Corrélation entre les performances énergétiques et le lait produit par kg de concentrés distribués.

On remarque ainsi qu'il existe une forte corrélation entre la quantité de lait produit par kilogramme de concentrés et les performances énergétiques des exploitations ($R = -0,829$). On peut donc penser que c'est la capacité des exploitations à transformer le concentré distribué directement en lait qui est la principale cause de l'absence de corrélation entre les quantités de concentrés distribués et les performances énergétiques, les exploitations produisant une quantité supérieure de lait étant les plus performantes.

Ceci semble également expliquer en partie la grande variabilité observée sur la figure 8 entre des exploitations ayant la même production laitière mais avec des performances énergétiques différentes. Car des exploitations valorisant au mieux leur ressources fourragères internes selon leur disponibilité et ayant une transformation plus efficace des concentrés vont donc avoir acheté moins d'aliments pour une production identique, ce qui entraînera par conséquent des entrées énergétiques inférieures et donc des performances énergétiques plus élevées.

3.3.5. Typologie des exploitations selon leurs performances énergétiques

Nous avons donc observé qu'il est malaisé de trouver des facteurs responsables de la variation des performances énergétiques. Celles-ci sont principalement reliées au poste Aliments et à la capacité des exploitations à transformer cette quantité d'Aliments achetés qui se présente majoritairement sous forme de concentrés. Afin de rechercher d'autres facteurs, l'approche individuelle a alors été remplacée par une approche plus hiérarchique. La figure 11 présente une classification énergétique des exploitations en fonction de leurs performances grâce au rapport de l'efficacité énergétique sur les consommations totales d'énergies.

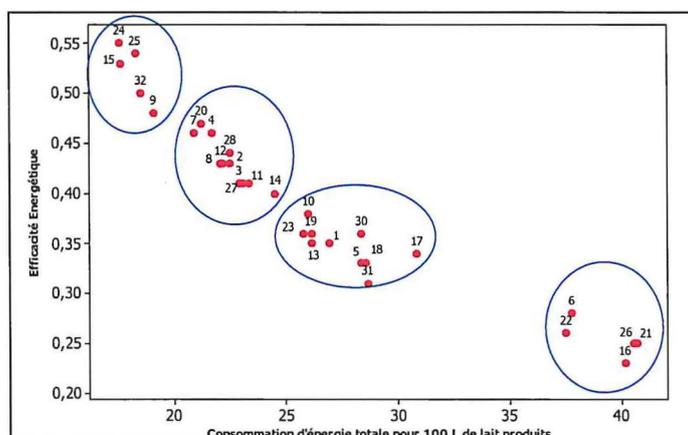


Figure 10. Typologie des exploitations selon leurs performances énergétiques

On remarque donc que l'on peut classer ces exploitations en 4 groupes. Les différentes caractéristiques de ces groupes et les corrélations avec différents facteurs sont reportées dans le tableau 13.

Tableau 13. Caractéristiques moyennes des types énergétiques.

Classe Effectifs % de l'effectif total	1 5 16	2 11 36	3 10 32	4 5 16	Signif. (1)
Efficacité énergétique	0,52	0,43	0,35	0,25	***
Consommation pour 100 l de lait (EQF)	18,24	22,45	27,57	39,34	***
Consommation énergétique par poste (EQF/100 l de lait)					
Fioul	2,97	3,53	3,87	4,55	NS
Electricité	0,81	1,89	1,77	2,77	**
Achats Aliments	9,39	12,63	15,32	26,30	***
Achats Animaux	0,24	0,29	0,73	0,77	NS
Engrais	1,80	1,72	3,1	1,73	*
UGB	46,9	44,0	58,2	38,84	NS
SAU	15,5	19,1	22,2	14,8	NS
Chargement (UGB/SAU)	3,54	3,76	3,6	4,7	NS
Altitude (m)	750	1009	1088	1060	NS
Année de démarrage	1986	1992	1985	1992	NS
Situation géographique ⁵					NS
Plaine des Cafres	7.7 %	23.1 %	46.2 %	23.1 %	
Plaine des Palmistes	0 %	100.0 %	0 %	0 %	
Hauts de l'Ouest	0 %	50.0 %	25.0 %	25.0 %	
Grand Sud	40 %	40.0 %	20.0 %	0 %	
Plaine des Grègues	28.6 %	26.0 %	8.7 %	2.2 %	
Production laitière (L)	5528	4956	4440	3156	**
Concentré par vache laitière (kg/l)	8,2	9,9	10,0	13,2	*
Lait par concentré (L/kg)	1,91	1,41	1,27	0,67	***
Marge Brute	438 610	480 206	475 906	178 140	NS

La classe 1 regroupe les exploitations les plus performantes énergétiquement, c'est-à-dire, celles qui consomment moins de 20 EQF et supérieures ou égale à 0,47. Leur consommation électrique est faible (0,80 EQF/100 L de lait) et les achats d'engrais moyens (1,80 EQF/100 L de lait). Ces exploitations ont une entrée d'Aliments faible mais suffisantes compte tenu de leur capacité à transformer les concentrés (1,91 L/kg distribué) pour obtenir une bonne production laitière qui s'élève en moyenne approximativement à 5 500 litres par vache.

Les exploitations de la classe 2 correspondent aux exploitations qui consomment entre 20 et 25 EQF pour 100 litres de lait et dont l'efficacité énergétique se situent entre 0,39 et 0,47 incluses. Les consommations électriques et les achats d'engrais sont moyens comparés aux autres types puisqu'ils s'élèvent respectivement à 1,89 et 1,72 EQF pour 100 L de lait produits. Ces exploitations ont un poste d'Aliments relativement faible et une capacité de transformation assez élevée ce qui leur permet d'avoir une production laitière par vache proche des 5 000 litres.

La classe 3 correspond aux exploitations qui présentent des consommations supérieures à 25 EQF mais inférieures à 35 EQF et donc l'efficacité énergétique s'étend de 0,31 à 0,38. Si leur consommation électrique est relativement moyenne (1,77 EQF/100 L de lait), les achats d'engrais sont élevés puisque ce poste s'élève à 3,1 EQF pour 100 litres de lait produits. Le poste d'Achats d'aliments est légèrement supérieur (15,32 EQF) alors que la capacité de transformation du concentré est un peu plus faible (1,27 L/kg distribué) ce qui explique que la production laitière n'atteigne qu'approximativement 4 500 litres par vaches.

Les exploitations de la classe 4 sont celles qui sont les moins performantes énergétiquement. Elles consomment plus de 35 EQF et possèdent une efficacité énergétique inférieure à 0,30. Si la consommation d'électricité est plus élevée que pour les autres types (2,77 EQF/100 L de lait), le poste Engrais est moyen et proche des types 1 et 2 puisqu'il s'élève à 1,73 EQF pour 100 litres de lait produits. Leur entrée énergétique importante sous forme d'aliments (26,30 EQF) et leur faible capacité à transformer le concentré à lait (0,67 L/kg distribué) leur confère une faible production laitière puisque celle-ci ne s'élève qu'à un peu plus de 3 000 litres par vache laitière.

⁵ Pourcentage de l'effectif de chaque type

Enfin, quelque soit les performances énergétiques moyennes, les caractéristiques structurelles ne sont pas significativement reliées au type énergétique. C'est ainsi que, quelque soit le type énergétique, on retrouve des élevages de taille très différentes et de zones géographiques différentes. Ceci nous indique donc que les moyennes obtenues pour les caractéristiques corrélées significativement peuvent être utilisées comme objectif pertinent et réaliste et peuvent être appliquée à toutes les exploitations quelque soit leur lieu d'implantation, leurs surfaces disponibles ou encore quelque soit la taille de leur cheptel.

3.3. Production locale et importation de poudre de lait

3.3.1. Calcul du coût énergétique de l'importation de poudre de lait

Dans l'optique d'effectuer les bilans énergétiques, un coefficient a déjà été préalablement arrêté par la méthode planète à **50,74 MJ/kg**. Toutefois, les publications trouvées sur ce sujet dénotent d'une grande diversité tant au niveau des processus utilisés dans les différentes industries laitières que des consommations énergétiques. Il ne semblerait pas pertinent de situer ici la production locale face à un coût d'importation qui pourrait varier fortement. C'est pourquoi on se propose, afin de le caractériser aussi précisément que possible de recalculer ce coefficient en fonction de sources variées trouvées dans la bibliographie, tout en conservant la méthodologie de calcul initialement utilisé pour le premier coefficient.

La séparation des coûts de production du lait en métropole a été effectuée sur la base de la matière sèche contenue dans les deux co-produits du lait que sont le lait écrémé et la crème crue. Or dans leur calcul, Brand et Melman (1993) donne une valeur de 43,29 MJ/kg basée sur la valeur financière des produits qui si l'on y ajoute les différents coûts de transport pour l'acheminement jusqu'à La Réunion s'élève alors à **46,11 MJ/kg**. Si l'on effectue la même répartition en considérant que le lait en entrée du processus permet de fabriquer 1 kg de poudre de lait 0 % et 0,527 kg de beurre et connaissant les prix pour le beurre et la poudre de lait 0 % destinée à la consommation humaine⁶, ce sont 72 % des coûts initiaux qui sont imputables à la poudre de lait soit un coût énergétique recalculé de la poudre de lait qui s'élève à **51,70 MJ/kg**. Si on considère maintenant la méthodologie PLANETE qui consiste à attribuer des coûts de production entre deux co-produits en fonction de leur énergie brute, cette répartition s'effectue alors pour 57,3 % au lait écrémé et 42,7 % à la crème crue⁷ ce qui donne un coût énergétique recalculé de la poudre de lait de **43,72 MJ/kg**.

Si l'on s'intéresse aux consommations énergétiques propres à l'usine, celle-ci s'élève à 11,64 MJ pour traiter 11,597 litres de lait brut dans notre calcul. Or pour cette étape, Ramirez *et al.* (2005) donne une valeur de 11,1 MJ alors que pour les industries canadiennes (Office de l'efficacité énergétique du Canada, 2001) cette valeur s'élève à 7,7 MJ. Si on considère ces deux valeurs, le coefficient pour la poudre de lait serait alors respectivement de **50,13** et **46,13 MJ/kg**.

Pour l'étape de séchage par atomisation, nous avons considéré une consommation de 4,3 MJ/kg d'eau évaporé. Or selon les sources, cette valeur peut s'élever à 4,49 MJ/ (Baker et McKenzie, 2005), 4,9 MJ (Bimbenet *et al.*, 2002) et à 4,5 MJ ((Office de l'efficacité énergétique du Canada, 2001). Les valeurs recalculées pour le coefficient de la poudre de lait vont alors s'élevait respectivement à **50,95 MJ/kg**, **51,40 MJ/kg** et **50,96 MJ/kg**.

Pour la partie évaporation /séchage, la consommation pour notre calcul s'élève à 7,22 MJ/kg d'eau évaporé. Selon Brand et Melman (1993), cette valeur s'élève à 11,3 MJ. Le coefficient de la poudre de lait serait alors **54,98 MJ/kg**.

On remarque donc que le coût énergétique nécessaire à la fabrication de 1 kg de poudre de lait s'échelonne selon les calculs entre 43,72 et 54,98 MJ/kg.

3.3.2. Calcul du coût énergétique de 100 l de lait reconstitués à partir de poudre de lait importée

Pour pouvoir calculer le coût énergétique de 100 l de lait fabriqué à partir de la poudre de lait importé il est donc nécessaire de tenir compte de tous les ingrédients incorporé dans le lait. Selon les

⁶ source ONILAIT

⁷ On se base ici sur une valeur énergétique pour le lait écrémé et la crème crue de 35 et 282 kcal/100

données techniques collectées auprès de la CILAM, principal transformateur de lait sur l'île, la recette pour 1 000 litres de base de lait UHT demi écrémé se décompose comme ceci :

- 91,77 kg de poudre 0 %
- 15,70 kg de MGLA
- 923,9 l d'eau

Si l'on connaît le coût énergétique de la poudre (voir précédent) et de l'eau (Risoud et Théobald, 2002), il est nécessaire d'estimer le coût énergétique de la MGLA.

3.3.2.1. Coût énergétique de la MGLA

La Matière Grasse Laitière Anhydre, ou plus communément Beurre concentré contient au minimum 99,8 % de matière grasse et est incorporé à la poudre de lait afin d'en standardiser la teneur en matière grasse, selon le produit que l'on veut obtenir. Il existe deux procédés pour la fabrication de la MGLA (FAO, 1998) :

- le procédé indirect qui consiste à faire fondre du beurre qui sera ensuite centrifugé.
- Le procédé direct qui consiste à faire subir une double centrifugation à de la crème à 35-45 % de MG.

Le procédé direct semble aujourd'hui le plus répandu car il bénéficie d'une dépense thermique moindre. Le calcul du coefficient énergétique comprend dans un premier temps les coûts de production du lait nécessaire à la fabrication de la crème, matière première du processus de fabrication de la MGLA. Puis sont considérées les consommations énergétiques par l'usine pour la transformation de la crème en MGLA. Le coût énergétique s'élève alors à **40,97 MJ/kg**.

3.3.2.2. Coût énergétique de 100 L de lait reconstitués

La recette donné par la CILAM et précédemment citée permet de fabriquer du lait demi écrémé à 1,57 % de matière grasse. Or le lait produit sur les exploitations réunionnaises contient en moyenne 3,87 % de matière grasse. Or pour pouvoir comparer le lait reconstitué avec le lait produit localement, il est nécessaire de comparer des produits qui ont les mêmes compositions et par conséquent les mêmes caractéristiques énergétiques. On se propose donc ici de rajouter une quantité de MGLA supérieure afin d'obtenir un lait reconstitué à 3,87 % de MG.

Le tableau 14 détaille les coûts énergétiques comptabilisés pour la reconstitution de 100 litres de lait à partir de poudre de lait importé et en considérant les coefficients maximal et minimal pour la poudre de lait calculé précédemment.

Tableau 14. Coût énergétique de 100 litres de lait reconstitué

Produits	Quantité	Coût unitaire (en MJ)	Coût total (en MJ)
Poudre 0 %	9,177 kg	43,72	401,22
		54,98	504,55
Eau	92,39 litres	0,014	1,29
MGLA	3,87 kg	40,97	158,55

Par conséquent, l'énergie consommée pour la production de 100 l de lait élaborée à partir de poudre de lait s'élève au maximum à 664,39 MJ et au minimum à 561,06 MJ. Nous allons donc considérer que 100 litres de lait reconstitués à partir de poudre de lait importé représente une consommation d'énergie qui s'échelonne selon les modes de calcul **de 14,59 à 17,27 EQF**.

3.3.3. Situation des coûts de production à la Réunion face à l'importation de la poudre de lait

Nous avons vu précédemment que 100 litres de lait produit sur les exploitations réunionnaises ont en moyenne un coût de production énergétique de 26,15 EQF. Si l'on considère un transport moyen en camion de 100 km pour le livrer à l'usine de transformation soit un coût énergétique de 0,25 EQF, le lait livré à l'usine représente donc une consommation énergétique de **26,40 EQF**.

La figure 11 permet de situer les coûts énergétiques maximal et minimal d'un lait reconstitué à partir de poudre de lait (en rouge sur la figure) confrontés au coût énergétique de production du lait dans les exploitations étudiées.

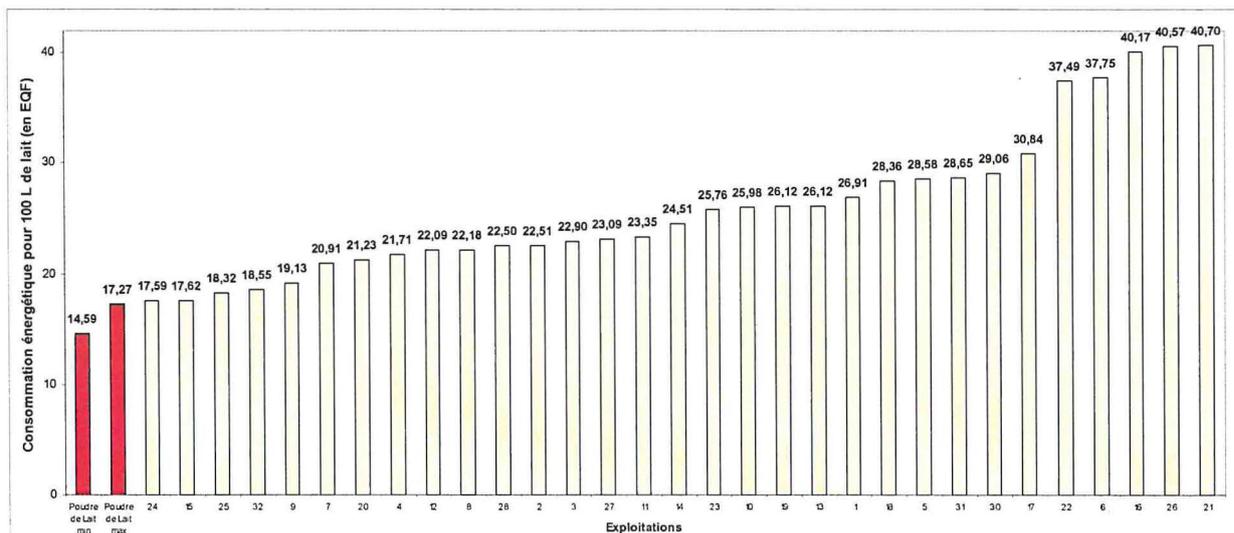


Figure 11. Comparaison des exploitations étudiées avec le coût de la poudre de lait

Ainsi si dans les conditions d'élevage échantillonnées en 2000, la consommation énergétique moyenne de la production de lait sur les exploitations réunionnaises apparaît supérieure à celle du lait reconstitué, les exploitations les plus performantes sont très proches de la valeur attribuable au lait reconstitué à partir de poudre et MGLA importés.

IV. DISCUSSION

4.1. Déroulement de l'étude

Choix de la méthode PLANETE

Il existe différentes méthodes pour produire l'analyse de cycle de vie d'un produit. De nombreux logiciels tels que TEAL ou WIZARD (site Ecobilan) sont aujourd'hui disponibles mais demandent une connaissance précise des différentes étapes du cycle de vie des intrants. Dans la même optique, des bases de données normalisées du type Ecoinvent (site Ecoinvent) proposent des résultats pour un large éventail de produits mais demandent un investissement financier important pour se les procurer.

De la même manière, il existe un nombre important de méthodes de diagnostic environnemental des exploitations agricoles. En France par exemple, on peut citer cinq grandes méthodes qui font appel à différents types d'indicateurs environnementaux (site de Geotraceagri) : la méthode IDEA (Indice de Durabilité des Exploitations Agricoles), la méthode Indigo® mise en place par l'INRA, DIALECTE (pour Diagnostic Agri-environnemental Liant Environnement et CTE) qui a été construite par l'association Solagro, DIAGE (Diagnostic Global d'Exploitation) qui est commercialisée par la FRCA Centre ou encore Arbore qui provient de l'association Trame.

Cependant, outre son accessibilité aisée et gratuite, la méthode PLANETE présente l'intérêt de constituer à la fois une base de données contenant les résultats d'analyse de cycle de vie de différents intrants et de permettre d'effectuer le diagnostic environnemental de l'exploitation. Elle est également aujourd'hui utilisée par de nombreux organismes de développement agricole en France ce qui en fait une méthode connue et légitimée sur le plan scientifique.

De plus, elle représente sans doute actuellement la méthode la plus complète concernant les aspects énergétiques puisqu'elle constitue une approche plus globale de l'énergie en prenant en compte l'énergie directe et indirecte.

Enfin, la principale contrainte de la méthode PLANETE provient de la collecte de données qui représente un travail de longue durée, d'autant plus que la liste des exploitations à enquêter est importante. La présence de la base de données a toutefois rapidement compensé ce biais de la méthode.

Diagnostic des performances énergétiques

En matière de représentativité de l'étude, on pourrait bien sûr s'interroger sur l'ancienneté des données récoltées qui datent comme précédemment indiqué de l'année 1999. Le choix de cet échantillon provient du fait qu'il avait été préalablement entièrement raisonné pour offrir une diversification aussi représentative que possible de la situation régionale tant sur le plan des performances zootechniques, que sur les caractéristiques structurelles et sur la répartition géographique. Il offre ainsi une base de données riche et relativement complète qui a permis avant tout une économie de temps certain en évitant un nouveau travail d'enquêtes et un travail supplémentaire de vérification des données obtenues auprès des différents organismes de gestion ou coopératives afin de s'assurer de la validité des informations obtenues. De plus, cet échantillon a permis d'avoir une vision relativement large de la diversité des situations énergétiques dans les exploitations de l'île puisque les exploitations utilisées pour notre travail représentent près d'un cinquième des exploitations recensées par la SICALait à l'époque (Taché, 2001).

Ainsi bien que les données obtenues proviennent parfois de larges estimations, la justification de la méthode de récolte de données provient des objectifs initiaux qui étaient d'obtenir rapidement un diagnostic global de la filière. Les résultats obtenus ont permis de cerner les points forts et les points faibles et de pouvoir ainsi émettre des solutions ou des alternatives censées et justifiées tout en situant les marges de progrès en matière de consommation. De plus, la venue durant une semaine au CIRAD St Pierre de Jean-Luc BOCHU, collaborateur de SOLAGRO et co-concepteur de la méthode, a permis de valider la méthode de récolte des données et les coefficients nouvellement calculés ainsi que l'adéquation entre les choix faits pour l'étude et les objectifs globaux de la méthode PLANETE.

Les coefficients calculés sont ainsi fortement dépendants de la méthodologie PLANETE. Il existe un certain nombre d'incertitude sur les consommations énergétiques en amont du processus de fabrication des intrants. Mais cette incertitude est identique à la méthode PLANETE. Les coefficients ont été calculés avec autant de précision que possible. La pertinence de leur utilisation réside dans le fait que ceux-ci sont identiques d'un bilan à un autre et que la comparaison entre exploitations se fait selon un même référentiel.

Pendant les coefficients énergétiques ne concernent ici que les intrants pour une exploitation en bovin lait. Leur utilisation sur d'autres filières de production ne pourrait se faire sans des recherches complémentaires pour des intrants non utilisés dans les exploitations laitières. La méthodologie présentée en annexe représente tout de même une excellente base dans la démarche à adopter pour cela.

Analyse des résultats

Les comparaisons des résultats obtenus avec les résultats métropolitains sont à relativiser. Nous avons ainsi remarqué que les systèmes d'élevages réunionnais étaient très peu comparables aux systèmes métropolitains à cause principalement du manque de surface utilisable qui entraîne des distributions de concentrés en quantités. De plus, l'importation d'intrants venant de métropole est en défaveur des exploitations réunionnaises. C'est pourquoi la comparaison n'a été utilisée que pour justifier les chiffres obtenus selon la connaissance des pratiques réunionnaises.

Le coefficient de la poudre de lait prend différentes valeurs au cours de l'étude. On remarque que dans un premier temps, afin d'effectuer les bilans énergétiques des 31 exploitations, cette valeur a été arrêtée à 46,76 MJ/kg, la poudre de lait étant un intrant des exploitations. Or, nous proposons ensuite pour la comparaison entre les consommations énergétiques pour la production locale de lait et le coût énergétique d'importation de la poudre de lait, une fourchette s'étalant de 43,72 à 54,98 MJ/kg. Si le premier coefficient se situe bien entre ces deux valeurs, le second choix provient de la difficulté d'estimer avec précision l'ensemble de ces coûts, les portes de l'industrie laitière étant relativement fermées concernant la diffusion d'informations sur leurs consommations énergétiques. On peut cependant penser que la fourchette que nous proposons ici est pertinente au vu des nombreuses références bibliographiques que nous avons recoupées bien que les coûts de réhydratation n'ont pas été pris en compte dans les calculs tout comme le coût d'amortissement des bâtiments de la CILAM.

4.2. Les solutions pour améliorer les performances énergétiques

4.2.1. Réduire les consommations énergétiques

4.2.1.1. En diminuant les entrées énergétiques sur l'exploitation : substituer l'utilisation d'engrais organiques à l'achat de minéraux

Les exploitations laitières réunionnaises détiennent via le lisier une ressource fertilisante organique non négligeable et pourtant peu utilisée ou tout au moins comptabilisée quant à sa capacité fertilisante. Cet élément est souvent perçu comme un déchet par les éleveurs alors qu'il peut représenter une économie substantielle pour eux.

On se propose donc de simuler l'économie énergétique que représenterait l'utilisation optimale des effluents produits via leur épandage sur les cultures d'herbe de l'exploitation. Nous avons donc calculé pour chaque exploitation les productions moyennes d'engrais organiques via le lisier et le fumier selon les éléments décrits par Vayssières (2007). Nous avons alors considéré que ces effluents étaient épandus sur les cultures et permettaient donc de couvrir une partie des besoins en azote des cultures⁸. Si l'apport d'engrais organique ne suffit pas à couvrir les besoins des surfaces⁹, nous estimons alors que l'exploitation doit recourir à des achats d'engrais minéraux. Ces achats simulés ont alors été comparés aux achats réels et la différence correspond à l'économie réalisable par l'exploitation dans le cas d'une utilisation optimale de la fertilisation organique. Si certaines exploitations ne semblent pas présenter d'excédents azotés sur les cultures, il semblerait que d'autres pourraient éviter une entrée énergétique de plus de 10 000 EQF. En moyenne, la consommation d'énergie pour produire 100 litres de lait diminuerait alors de 0,84 EQF pour atteindre 25,33 EQF. Cette économie pourrait même être de 2,60 EQF.

4.2.1.2. En augmentant les sorties énergétiques : améliorer l'efficacité d'utilisation des concentrés

Un grand nombre de facteurs peuvent être responsables d'une mauvaise performance laitière de l'exploitation : des facteurs d'utilisation de la ration, de reproduction ou encore de bien-être de l'animal.

Il apparaît difficile ici de déterminer quels sont les facteurs en jeu à la Réunion. Cependant, certains apparaissent en premier lieu plus pertinent. D'un point de vue alimentaire et selon Delaby *et al.* (2003), Les facteurs de variations de la réponse à la complémentation pour une vache laitière s'organisent autour de 3 facteurs que sont la vache, le concentré et l'herbe.

Le facteur « vache » peut différer de par sa race, son stade de lactation ou son potentiel génétique. Or à la Réunion, la race principalement présente est la Prim'Holstein puisque celle-ci représente près de 80 % du cheptel réunionnais. De plus, si elle est plus ou moins présente dans les élevages, la race ne semble pas être un facteur de variation de réponse au concentré tout comme il n'y aurait pas de différences significatives entre les primipares et les multipares (Delaby *et al.*, 2003). Pour ce facteur, le stade de lactation semble être la seule caractéristique réellement corrélée avec l'efficacité de réponse au concentré. Une distribution du concentré à des moments stratégiques de la lactation pourrait permettre une utilisation économe pour des performances égales. Ainsi, le concentré peut être plus particulièrement utile en début de lactation afin de favoriser l'ingestion des animaux qui ont un appétit limité ainsi qu'en fin de lactation afin de permettre aux vaches d'améliorer leur état corporel en vue d'une lactation future, un animal sous alimenté énergétiquement en début de lactation ou qui n'aura pas reconstitué toute ses réserves n'exprimant pas son potentiel en lait.

Le concentré lui-même de par sa nature ou la quantité distribué pourrait être un facteur de variation. Les quantités distribuées observées au cours de notre étude s'échelonnent approximativement entre 7 et 14 kg de concentré par jour et par vache laitière et la proportion des différents types diffèrent selon l'exploitation puisque certaines distribuent par exemple principalement des produits riches en pulpes de betterave alors que d'autres utilisent principalement des concentrés riches en maïs. Dans le contexte européen, la synthèse bibliographique menée par Delaby *et al.* (2003) et les travaux de Colin-Schoellen *et al.*, (1995) semblent attester que ces deux facteurs ne sont pas responsables de variation.

⁸ Les besoins des prairies et des cultures ont été estimés par dire d'experts.

⁹ Nous avons considéré ici que 50 % de l'azote des effluents sont disponibles par les cultures (MVAD, 2007)

A l'inverse, l'herbe est un facteur important de l'efficacité de réponse au concentré de par sa qualité et sa quantité. Selon Delaby *et al.* (2003), la production laitière augmente avec l'accroissement des quantités d'herbe offertes jusqu'à un certain seuil. Or, Hassoun *et al.* (2000) ont montré que les systèmes d'alimentation des élevages laitiers à La Réunion reposaient sur des fourrages de nature et de qualités très différentes et surtout des niveaux d'apport conditionnés avant tout par les disponibilités saisonnières très variables. Il est fort probable que dans certains cas les fourrages distribués ne permettent pas aux animaux de satisfaire leur simple besoin énergétique d'entretien. Le concentré est alors utilisé en partie dans certains élevages pour combler ces dépenses et est plus ou moins utile à la production laitière.

Au vue des caractéristiques de la classe 1, on peut toutefois raisonnablement donner comme objectif une valorisation des concentrés à hauteur de 1,91 litres de lait par kilogramme de concentré distribué. Cette valeur est pertinente comme objectif si on considère qu'il faut approximativement 0,44 UF/L de lait et que la valeur en UFL des concentrés distribués se situe au minimum à 0,80 par kilogramme, ce qui donne donc un potentiel de production de 1,82 L/kg. Ainsi, si l'on simule une telle efficacité de transformation sur l'ensemble du référentiel utilisé, les consommations d'énergies totales se situent alors entre 13,95 et 23,25 EQF pour 100 litres de lait produits pour une moyenne de 18,08 EQF. L'augmentation de la production laitière ainsi obtenue permettrait de diminuer de plus de 30 % les consommations énergétiques nécessaires à la production de 100 litres de lait sur l'île.

Concernant les émissions de GES, celles-ci seraient réduites également de près de 30 % puisque la moyenne diminuerait jusqu'à atteindre 1,61 teqCO₂ par 1000 L de lait produit alors qu'elle s'élève actuellement à 2,29 eq tCO₂.

Dans tous les cas, on remarque que globalement, tant sur des aspects sanitaires que sur l'utilisation des fourrages disponibles, l'efficacité de réponse aux concentrés aborde une dimension plutôt liées aux pratiques de conduite de l'exploitation. Or dans un contexte tropical comme celui de la Réunion et avec de tels niveaux de complémentation, on peut se demander quelles sont les limites de validité des connaissances développées au Nord s'arrêtant par exemple dans les recommandations de INRATON à un maximum de 50 % de concentrés dans les rations, d'où la nécessité de rechercher ces facteurs pour le contexte réunionnais.

4.2.2. Produire de l'énergie propre sur les exploitations : Valoriser l'activité agricole sur un plan environnemental

4.2.2.1. Le biogaz

La technique de méthanisation présente des intérêts sur trois secteurs d'activités que sont l'environnement, l'agriculture et l'énergie. Ce procédé permet de produire des déchets stables entraînant beaucoup moins de pollution par les nitrates et les phosphores des cours d'eau et rivières et évite le rejet massif de CO₂ dans l'atmosphère, 400 g de CO₂ par kWh produit en moins par rapport à une centrale thermique au charbon (Sylvestre, 2003). De plus, il aboutit à la production d'un amendement organique égal aux effluents et désodorisé et permet une valorisation de l'activité agricole par la production d'une énergie propre, qui est alors aussi un atout pour la filière énergétique. Cette technique pourrait ainsi apparaître comme une solution parmi d'autres face aux problèmes posés par les effluents d'élevages dans certaines régions de l'île.

A La Réunion, Le lisier est le substrat majoritairement produit par les exploitations laitières Ce type d'effluent est bien adapté au processus de méthanisation notamment grâce à sa facilité de manipulation (ADEME, 2006). Cependant, cette technique est influencée par un grand nombre de procédé qui doivent être contrôlés afin d'assurer une bonne décomposition de la matière organique. De plus, les caractéristiques physico-chimiques du lisier lui confère un faible pouvoir méthanogène : 16 m³ de biogaz par mètre cube de lisier sans ajout de co-substrats selon SOLAGRO (2005) qui permettent dans des conditions mésophiles et en cogénération, la technique la mieux adaptée au contexte réunionnais car la mieux référencée et la mieux maîtrisée, de produire approximativement 30 kWh électrique et 50 kWh thermique.

Compte tenu du prix d'achat actuel par EDF (au minimum 10,6 c€/kWh vendu (Journal Officiel, 2006)), la réinjection de la totalité de la production est une alternative plus intéressante économiquement que la consommation directe. Un mètre cube de lisier rapporterait 3,3 € et représenterait une sortie d'énergie de 240 MJ via la production d'électricité. Si l'on considère ainsi une production moyenne de lisier avoisinant les 1 700 m³ calculée grâce aux données du CRAAQ (2003), cette alternative peut représenter une source de revenu proche de 5 600 € sans comptabiliser les frais d'entretien et d'amortissement, et une sortie énergétique de 12 180 EQF, ce qui représente près de 70 % des

sorties énergétiques actuelles. De plus, l'effluent produit en sortie de méthanisation conserve tout l'azote initial et améliore la part qui se trouve sous forme minérale ce qui garde à l'effluent toute sa capacité fertilisante originelle.

A noter cependant que pour tirer un potentiel de production réellement rentable en fonction du coût important de l'installation, trois facteurs sont à prendre en compte.

Tout d'abord, selon l'ADEME, la rentabilité économique d'une telle installation passe par le traitement d'au minimum 300 t de MS digestibles, uniquement pour le lisier. Pour cela, une exploitation réunionnaise devrait produire au moins 4 300 m³ de lisier brut à 7% de MS alors que comme indiqué précédemment la production moyenne estimée s'élève à 1 700 t. Il devient alors nécessaire pour les éleveurs de se regrouper, ce qui va ajouter un coût financier et énergétique pour le transport des effluents depuis l'exploitation jusqu'à l'unité. D'un point de vue énergétique, s'il est difficile d'évaluer la distance, une étude au cas par cas étant plus pertinente, on peut tout de même considérer que le transport sera effectué soit par l'exploitant lui-même en tracteur avec sa tonne à lisier soit en camion, grâce à l'organisation d'un ramassage collectif. Or, le coût énergétique du transport en camion s'élève à 0,85 MJ par kilomètre parcouru et par tonne transporté contre 3,2 MJ pour le transport en tracteur. Ainsi, on remarque que le transport collectif, outre son gain de temps indiscutable pour l'exploitant, possède un coût énergétique largement inférieur quelque soit la distance, d'autant plus important si l'on considère qu'il permet de transporter des quantités supérieures à chaque voyage.

De plus, l'ajout de co-substrats au lisier est largement répandu dans les installations déjà en place en Europe (EDEN, 2007) afin de traiter une quantité importante de déchets. La liste de ces co-substrats peut être très variable selon la zone d'implantation. Ainsi pour les exploitations proche des aéroports de Pierrefonds et St Denis, ceci pourrait avoir la forme de tontes de pelouses provenant de ces derniers. Pour les exploitations proche des zones de productions cannières, la paille de canne pourrait se révéler fortement adaptés. Les drêches de brasserie ainsi que la bagasse provenant des productions industrielles se révéleraient également des co-substrats intéressants.

Enfin, il est nécessaire tout de même de tirer profit aussi efficacement que possible de la production de chaleur. Excepté pour réchauffer l'eau pour le lavage, cette chaleur serait peu utilisée dans les élevages. C'est pourquoi, l'installation d'une unité en commun pourrait permettre de produire de la chaleur pour des bâtiments publics dans un village ou pour d'autres activités. Cela pourrait passer également par le séchage des fourrages. Dans tous les cas il paraît important de trouver une issue pour cette chaleur.

4.2.2.2. L'électricité photovoltaïque

Le contexte climatique de l'île confère à La Réunion une capacité élevée pour l'énergie photovoltaïque. La région tire déjà fortement parti de cette ressource puisque il existe plus de 77 000 m² de panneaux solaires à La Réunion pour une puissance installée de 425 kWc (ARER, 2007) représenté notamment par les chauffe-eaux solaires qui sont largement développés. La production d'électricité photovoltaïque non secouru est la plus courante à La Réunion et permet de produire indifféremment pour son usage domestique ou pour revente sur le réseau. Pour l'amortissement rapide de l'installation, il est préférable de vendre la totalité de l'énergie produite (au tarif de 0,40 € au minimum selon l'ADEME) et consommer une énergie distribuée par le réseau public (au tarif d'environ 0,09 €).

Bien que l'énergie solaire reçue ne soit pas homogène sur tout le territoire (MétéoFrance, 2007), 10 m² de toiture permettent en moyenne selon l'ARER l'installation de 1 kWc pour une production d'énergie à La Réunion de 1 400 kWh/an. Des simulations pour l'installation de 1 kWc à La Réunion ont été réalisées sur le site internet de la Commission Européenne et grâce au logiciel RETScreen® et ont donné des résultats proches qui sont reportés dans le tableau 15.

Tableau 15. Production estimée annuelle d'électricité selon différentes sources

Outil de simulation	Caractéristiques techniques	Surface (en m ²)	Production annuelle (en kWh)
Site internet de la commission européenne	1 kWc 900m d'altitude inclinaison de 20°C		1 415
RETScreen	Polycristallin silicium 1 kWc	9 m ²	1 270
RETScreen	Monocristallin silicium 1 kWc	12,8 m ²	1 352

On se propose cependant de retenir ici comme valeur moyenne pour l'installation de 1 kWc la surface de 10 m² et la production de 1 300 kWh électrique par an. Pour chaque mètre carré installé, la production électrique représente donc une sortie d'énergie de 1 040 MJ.

Dans les exploitations agricoles, les toits des bâtiments d'élevages offrent ainsi des surfaces solaires pour les panneaux solaires. Pour exemple, un éleveur réunionnais qui mettrait à sa disposition 100 m² de toiture afin d'y installer la même surface en panneaux photovoltaïques (soit 10 kWc installés) pourrait produire près de 13 000 kWh par an. Cette production lui rapporterait approximativement 5 200 € par an. Le coût d'installation (dans des conditions d'installation normale) se situant approximativement à 10 000 € par kWc (ARER, 2007), cette installation lui coûterait 100 000 € et le retour sur investissement sans aide s'effectuerait alors sur 19 ans. D'un point de vue énergétique, cette installation représenterait ainsi une sortie de 104 000 MJ soit 2 704 EQF ce qui représente en moyenne un peu plus de 15 % des sorties énergétiques actuelles des exploitations réunionnaises.

Il est important de noter ici que la couverture des toits par les panneaux solaires tend à diminuer la température à l'intérieur des bâtiments, ce qui peut s'avérer un atout pour la productivité.

4.2.2.3. *Les autres énergies*

D'autres énergies renouvelables pourraient être développées sur l'île. C'est le cas par exemple de l'énergie éolienne. La côte Est soumise aux vents d'alizés pourrait s'avérer un terrain d'implantation efficace pour les éoliennes. L'apparition d'éolienne aux abords des champs de cultures fourragères pourrait être étudiée.

Il ne faut pas oublier également que la Réunion est une île volcanique. Son sol regorge d'un potentiel calorifique non négligeable très utile dans le cas de l'énergie géothermique.

Cependant, le potentiel éolien et géothermique dépend énormément de la localisation géographique de l'exploitation sur l'île. De plus, l'implantation d'éolienne sur une unité demande un investissement important et peu abordable pour les éleveurs réunionnais et la géothermie est encore une technique peu référencée.

PARTIE II : Ajout d'une composante énergétique à GAMEDE, modèle de simulation des flux de biomasse dans l'exploitation bovin lait

Nous avons vu précédemment que à travers l'efficience de l'alimentation ou les consommations d'électricité ou d'engrais, ce sont les pratiques de conduite générale de l'exploitation qui influencent la performance énergétique. Or, GAMEDE pourrait s'avérer comme un outil intéressant pour mettre en lumière les choix de l'éleveur et les pratiques les plus consommatrices énergétiquement ou à l'inverse les plus économes.

L'initiative de ce travail est née de trois opportunités simultanées. Tout d'abord, la thèse en cours sur la modélisation des flux de biomasse, en relation avec les pratiques décisionnelles (Vayssières, 2007) étant actuellement en phase de finalisation, ceci a permis l'accompagnement et la validation du travail par le concepteur de la méthode. De plus, la présence de Véronique Slegten, qui dans le cadre de son stage devait ajouter une composante économique au modèle, a permis de disposer d'une première base d'équations qui ont donc facilité la conception du module en s'appuyant sur ces résultats. Enfin, la première partie de mon travail a permis de construire les coefficients nécessaires à l'ajout d'un facteur énergétique pour les différentes activités. Ce travail s'est développé au cours de l'étude et s'est révélé être une première opportunité de valorisation du travail effectué jusque là.

I. MATERIELS ET METHODES

1.1. Le modèle GAMEDE

Ce modèle, construit à l'aide du logiciel Vensim est avant tout un modèle biophysique de flux de matière qui simule les pratiques journalières des éleveurs. Il comporte deux composantes, le **système décisionnel** qui prend en compte 19 activités et le **système biophysique** qui comporte 6 modules :

- le Module de Production de Fourrages verts (MPF) : concernant aussi bien les prairies que les cultures de canne à sucre ;
- le Module de Conditionnement des Fourrages (MCF) ;
- le Module de Productions Animales (MPA) : concernant la production de lait, de viande et d'effluents ;
- le Module de Démographie du troupeau (MD) ;
- le Module d'Emission Azotée (MEA) simulant le devenir des effluents d'élevages au cours de leur manipulation et de leur conditionnement ;
- enfin le Module de Pâturage (MP) qui offre la possibilité de court-circuiter le cycle de Biomasse.

Afin de récolter les données nécessaires à l'élaboration du modèle, des enquêtes approfondies ont été réalisées par Vayssières dans six exploitations laitières représentant les cinq différentes zones d'élevage, les différents types de fonctionnement identifiés dans la typologie de Vayssières (2007) et les différents types technico-économiques (Alary *et al.*, 2002). Tout d'abord, une « enquête-immersion » (Vayssières, 2007) d'une semaine en tant qu'ouvrier agricole dans chacune des 6 exploitations a été réalisée suivies d'enquêtes ponctuelles qui avaient lieu tous les deux mois pendant 2 ans. Ces enquêtes ont permis d'obtenir des données précises sur les pratiques de gestion des éleveurs, de quantifier dynamiquement les flux de biomasses sur une base hebdomadaire et de décrire 21 activités (tableau 16).

Tableau 16. Liste des activités de l'exploitation en bovin lait

Ateliers	Activités	N°
Gestion des surfaces fourragères	Enrubannage	a1
	Fauche en vert prairies	a2
	Fauche en vert canne à sucre	a3
	Changement de pâturage	a4
Gestion des aliments	Achat de concentrés	a5
	Vente de fourrage	a6
	Achat de fourrage	a7
Gestion du troupeau	Distribution des rations	a8
	Achat de génisses	a9
	Vente de veaux	a10
	Réforme d'animaux	a11
	Traite	a12
	Paillage	a13
	Soin du troupeau	a14
Gestion des fertilisants	Raclage du lisier	a15
	Evacuation du fumier	a16
	Achat d'engrais minéraux	a17
	Epannage d'engrais minéraux	a18
	Epannage de lisier	a19
	Epannage de fumier	a20
	Exportation d'engrais de ferme	a21

(source : Slegten, 2007 d'après Vayssières, 2005)

Ces activités, décrites comme des opérations à réaliser sur une entité biophysique par un opérateur (Slegten, 2007), peuvent générer d'importants flux énergétiques ou être quasiment neutres. Malgré cela, le même séquençage des activités a été maintenu afin de faciliter l'implémentation du module énergétique dans le modèle. De plus, les enquêtes effectuées ont permis de détailler les différentes modalités observables dans les exploitations pour chaque activité donnée.

1.2. Construction des équations

La méthodologie s'inspire des travaux de Slegten (2007) qui avaient pour but la construction et l'ajout d'un module économique au modèle GAMEDE. La construction des équations a tout d'abord nécessité de connaître les différents flux d'entrées (E_{ax}) et de sorties d'énergies (S_{ax}) qui ont lieu lors des 21 activités. Pour cela, on s'appuie sur la description des activités donnée par Vayssières (2007). Ces flux, qu'ils soient directs, c'est-à-dire sous forme d'intrants ou de produits, ou indirects, sous la forme d'utilisation du matériel ont des coûts énergétiques qui leur ont été attribués grâce aux coefficients énergétiques calculés précédemment pour les analyses énergétiques (Partie I).

On retrouve ainsi dans les équations trois types de variables :

- Les **variables d'entrées du module énergétique** qui varient d'une exploitation à une autre. Leurs valeurs ne sont pas arrêtées et peuvent prendre une infinité de modalités
- Les **coefficients énergétiques** qui sont des constantes et ne varient donc pas quelle que soit l'activité. Ils se présentent sous la forme C_x avec x étant l'intrant ou le produit énergétique.
- Des variables qui sont les **paramètres de description de la modalité** choisie par l'éleveur. Ces variables sont définies selon des modalités extraites des travaux de Slegten (2007).

1.2.1. Variables d'entrées du module énergétique

Ces variables correspondent aux sorties du modèle GAMEDE. Elles sont donc soumises au contexte environnemental et socioéconomique de l'exploitation et vont fortement varier. Le tableau 17 liste ces variables ainsi que l'activité dans lesquelles on les retrouve.

Tableau 17. Variables d'entrées du module énergétique

Variable	Définition	Activité
BR	Nombre de balles rondes enrubannées	a1
Bh _{a2}	Biomasse fauchée en vert (en tonne brute)	a2
Bc _{a3}	Biomasse fauchée en canne à sucre (en tonne brute)	a3
Bcf _{a3}	Biomasse fauchée en canne fourragère (en tonne brute)	a3
SP	Surface pâturée (en ha)	a4
AC _j	Quantité de concentré j achetée (en kg)	a5
VF _j	Quantité de fourrage j vendue (en tonne brute)	a6
AF _j	Quantité de fourrage j achetée (en tonne brute)	a7
Bj _{a8}	Quantité de fourrage j manipulée (en tonne)	a8
Bcc _{a8}	Quantité totale de concentrés manipulée (en tonne)	a8
Bmé _{la8}	Quantité de mélasse manipulée (en tonne)	a8
lcc _{a8}	Proportion mécanisée de la distribution de concentrés	a8
lmé _{la8}	Proportion mécanisée de la distribution de mélasse	a8
ler _{a8}	Proportion de l'eau de réseau dans l'eau totale consommée	a8
NbA	Nombre de bovins sur l'exploitation	a8
G	Quantité de génisses achetées (en tonne vif)	a9
VA _{vr}	Quantité de vaches de réforme vendues (en tonne vif)	a10
VA _j	Quantité de veaux âgés de moins de 18 mois vendue (en tonne vif)	a11
VA _t	Quantité de veaux mâles de plus de 18 mois vendue (en tonne vif)	a11
V _{Laît}	Quantité de lait vendue (en litre)	a12
nbVL	Nombre de vaches laitières	a12/a14
Bpdc _{a13}	Quantité de paille utilisée (en tonne brute)	a13
Bl _{a15}	Quantité de lisier manipulé (en tonne)	a15
Bf _{a16}	Quantité de fumier manipulé (en tonne)	a16
AE _j	Quantité d'engrais j achetées (en tonne)	a17
Be _{a18}	Quantité d'engrais organique épandue (en tonne)	a18
Bl _{a19}	Quantité de lisier épandue (en tonne)	a19
Bf _{a20}	Quantité de fumier épandue (en tonne)	a20
Vef _j	Quantité d'effluent j exporté (en tonne)	a21

1.2.2. Coefficients énergétiques¹⁰

Face à l'apparition d'une nouvelle contrainte représentée par l'utilisation en heures du matériel, les coefficients énergétiques qui étaient dans un premier temps donné en MJ/ha ou par année d'utilisation ont dû être recalculés. Pour cela, ces coefficients ont été calculés sur le modèle d'un amortissement par heure en divisant la quantité totale d'énergie représentée par la fabrication du matériel donné par le nombre d'années d'amortissement et par le nombre d'heures d'utilisation annuelle¹¹. Le tableau 18 montre ces coefficients nouvellement calculés.

Tableau 18. Coefficients énergétiques pour l'utilisation des machines

Matériel utilisé	Valeur énergétique totale (en MJ)	Amortissement (en années)	Utilisation annuelle (en h)	Nouveau Coefficient (en MJ/h)
4x4	100 200	12	730	11,44
Barre de coupe	124 020	10	160	77,51
Presse	228 960	10	200	114,48
Remorque	133 560	15	200	44,52
Matériel de traite	47 700	8	1 095	5,45
Mélangeuse	361 620	6	730	82,56
Silo rafleur	143 100	10	200	71,55
Tank à lait	95 400	12	1 825	4,36
Epandeur léger	42 930	10	600	7,16
Tonne à lisier	248 040	10	480	51,68
Epandeur lourd	238 500	12	300	66,25

Cependant les autres coefficients utilisés sont tous issus des analyses énergétiques réalisées en premier lieu lors de cette étude et sont par conséquent adaptées le plus précisément possible au contexte réunionnais. Les coefficients utilisés sont listés dans le tableau suivant.

¹⁰ Les coefficients utilisés par le module énergétique sont listés en Annexe III

¹¹ Toutes ces données ont été trouvées sur la feuille de calcul Excel® de la méthode PLANETE

1.2.3. Paramètres des modalités

Ce type de variable peut être séparé en 4 groupes en fonction de leurs caractéristiques :

- Des variables de durée sous différentes formes :
 - $H_p X_{ax}$ = durée de l'activité x par unité de biomasse X
 - HT_{ax} = Durée du transport dans l'activité x
- Les variables sous la forme Q_j représentant une quantité d'intrant j consommée.
- Des facteurs d'utilisation d'un matériel qui se présentent sous la forme ω_i et qui ne peuvent prendre que 2 modalités : 0 pour « le matériel i n'est pas utilisé » et 1 pour « le matériel i est utilisé ».
- Des proportions de mécanisation d'une activité x sous la forme \square_{ax} ou de provenance d'un intrant j sous la forme \square_j

II. RESULTATS

Le module énergétique est donc composé de 42 équations mathématiques soient deux équations par activités : une équation correspondant aux flux d'entrées énergétiques et une équation correspondant aux entrées énergétiques. Ne sont présentés ici que ces équations. Enrubannage (a1)

$$S_{a1} = 0 \quad (1)$$

$$E_{a1} = BR * (Q_{pf} * C_{pf} + H_p BR_{a1} * (Q_{tr} * (C_{tr} + C_{M_{a1}} * C_c) + C_p + C_{bc}) \quad (2)$$

avec :

BR = nombre de balles rondes

$H_p BR_{a1}$ = Durée de l'activité par balles rondes (en h/BR)

Q_{tr} = nombre de tracteurs utilisés

Q_{pf} = Quantité de plastiques et ficelles (en kg/BR)

C_{bc} = Coefficient énergétique de la barre de coupe (en MJ/h)

C_c = Coefficient énergétique du carburant (en MJ/L)

C_p = Coefficient énergétique de la presse (en MJ/h)

C_{pf} = Coefficient énergétique du plastique (en MJ/kg)

C_{tr} = Coefficient énergétique pour l'utilisation du tracteur (en MJ/h)

$C_{M_{a1}}$ = Consommation en carburants du (des) tracteur(s) (en L/h)

2.1. Fauche en vert des prairies (a2)

$$S_{a2} = 0 \quad (3)$$

$$E_{a2} = B_{h_{a2}} * (H_p B_{h_{a2mec}} * (C_{tr} + C_r + C_s + C_{M_{a2(f)}} * C_c) + \square_{f_p} * C_{f_p}) + H_p B_{h_{a2man}} * (C_d + C_{M_{a2(f)}} * C_c) + HT_{a2} * (\omega_{tr} * (C_{tr} + C_r) + \omega_v * C_v + C_c * C_{M_{a2(t)}}) \quad (4)$$

avec :

$B_{h_{a2}}$ = Biomasse fauchée en vert (en Tonne brute)

$H_p B_{h_{a2mec}}$ = Durée de la coupe mécanique (en h/t)

$H_p B_{h_{a2man}}$ = Durée de la coupe manuelle (en h/t)

HT_{a2} = Durée d'un transport (en h)

C_c = Coefficient énergétique du carburant (en MJ/L)

C_d = Coefficient énergétique pour l'utilisation de la débroussailleuse (en MJ/h)

C_{f_p} = Coefficient énergétique des fourrages de prairies fauchés en vert (en MJ/t)

C_{tr} = Coefficient énergétique pour l'utilisation du tracteur (en MJ/h)

C_r = Coefficient énergétique de la remorque (en MJ/h)

C_s = Coefficient énergétique pour l'utilisation du silo-raffleur (en MJ/h)

C_v = Coefficient énergétique pour l'utilisation du véhicule (en MJ/h)

ω_{tr} = Transport en tracteur (oui = 1 ou non = 0)

ω_v = Transport en 4x4 (oui = 1 ou non = 0)

\square_{f_p} = Proportion de biomasse fauchée sur une autre exploitation

$C_{M_{a2(f)}}$ = Consommation en carburant du matériel utilisé pour la fauche (en L/h)

$CM_{a2(t)}$ = Consommation en carburant du matériel utilisé pour le transport (en L/h)

2.2. Fauche des cannes (a3)

$$S_{a3} = 0 \quad (5)$$

$$E_{a3} = (Bcs_{a3} + Bcf_{a3})/0,25 * HT_{a3} * (\omega_t * Ctr + \omega_v * Cv + CM_{a3(t)} * Cc) + \lambda_{ch} * (Bcs_{a3} + Bcf_{a3}) * Cf_{pdc} \quad (6)$$

avec :

Bcs_{a3} = Biomasse de canne à sucre fauchée en vert (en t)

Bcf_{a3} = Biomasse de canne fourragère fauchée en vert (en t)

λ_{ch} = Proportion de choux de canne dans la biomasse totale coupée

HT_{a3} = Durée d'un transport (en h)

Cc = Coefficient énergétique du carburant (en MJ/L)

Cf_{pdc} = Coefficient énergétique pour la paille de canne

Ctr = Coefficient énergétique pour l'utilisation du tracteur (en MJ/h)

Cv = Coefficient énergétique pour l'utilisation du véhicule (en MJ/h)

ω_{tr} = Transport en tracteur (oui = 1 ou non = 0)

ω_v = Transport en 4x4 (oui = 1 ou non = 0)

$CM_{a3(t)}$ = Consommation en carburant du véhicule utilisé pour le transport (en L/h)

2.3. Changement de pâturage (a4)

$$S_{a4} = 0 \quad (7)$$

$$E_{a4} = (400 * SP * Qclôt * Cclôt) / 6 \quad (8)^{12}$$

avec :

SP = Surface de pâturage (en ha)

$Qclôt$ = Quantité de clôtures (en kg/m)

$Cclôt$ = Coefficient énergétique des clôtures (en MJ/kg)

2.4. Achats de concentrés (a5)

$$S_{a5} = 0 \quad (9)$$

$$E_{a5} = \sum (AC_j * Ccc_j) + (\sum AC_j) / 1000 * Qtt * Ctt \quad (10)$$

avec :

AC_j = Quantité de concentré j achetées (en t)

Qtt = Transport par tiers (en km)

Ccc_j = Coefficient énergétique du concentré j (en MJ/t)

Ctt = Coefficient énergétique pour le transport par tiers en camion (en MJ/km.t)

2.5. Vente de fourrages (a6)

$$S_{a6} = \sum (VF_j * Cf_j) \quad (11)$$

$$E_{a6} = 0 \quad (12)$$

avec :

VF_j = Quantité de fourrage j vendues (en tonne brute)

Cf_j = Coefficient énergétique du fourrage j (en MJ/T)

¹² Les clôtures étant changées tous les 6 ans, on divise donc le coût énergétique par 6 pour le répartir uniformément.

2.6. Achat de fourrages (a7)

$$S_{a7} = 0 \quad (13)$$

$$E_{a7} = \square (AF_j * Cf_j) + (\square AF_j) * Qtt * Ctt + HT_{a7} * (Cv + CM_{a7(t)} * Cc) \quad (14)$$

avec :

AF_j = Quantité de fourrages j achetée (en tonne brute)

HT_{a7} = Durée du transport par l'éleveur (en h)

Qtt = Transport par tiers (en km)

Cc = Coefficient énergétique du carburant

Cf_j = Coefficient énergétique du fourrage j (en MJ/t)

Ctt = Coefficient énergétique du transport par tiers en camion (en MJ/km.t)

Cv = Coefficient énergétique pour l'utilisation du véhicule

$CM_{a7(t)}$ = Consommation en carburant par le véhicule utilisé pour le transport (en L/h)

2.7. Distribution des rations (a8)

$$S_{a8} = 0 \quad (15)$$

$$E_{a8} = (\Sigma (B_{ja8} * Hp_{B_{ja8}}) * \square_{ja8} * (Ctr + CM_{a8j} * Cc + Cmg)) + \\ (Bcc_{a8} * Hp_{B_{jes}} * \lambda_{a8cc} * (Ctr + CM_{a8autres} * Cc + Cmg)) + \\ (Bmél_{a8} * Hp_{B_{mél}} * \lambda_{a8mél} * (Ctr + CM_{a8autres} * Cc + Cmg)) + NbA * Qeau * \lambda_{er} * Cer \quad (16)$$

avec :

B_{ja8} = Quantité de biomasse manipulée du fourrage j (en t)

Bcc_{a8} = Quantités de concentrés manipulés (en t)

$Bmél_{a8}$ = Quantités de concentrés manipulés (en t)

$\lambda_{cc_{a8}}$ = Proportion de la distribution des concentrés qui est mécanisée

$\lambda_{mél_{a8}}$ = Proportion de la distribution de la mélasse qui est mécanisée

$\lambda_{er_{a8}}$ = Proportion de l'eau de réseau dans l'eau totale consommée

NbA = Nombre d'animaux sur l'exploitation

$Hp_{B_{ja8}}$ = Durée de distribution du fourrage j (en h/t)

$Hp_{Bcc_{a8}}$ = Durée de distribution des concentrés (en h/t)

$Hp_{Bmél_{a8}}$ = Durée de distribution des de la mélasse (en h/t)

$Qeau$ = Eau du réseau consommée par animal (en m3)

Cc = Coefficient énergétique du carburant

Cer = Coefficient énergétique de l'eau réseau

Cmg = Coefficient énergétique pour l'utilisation de la mélangeuse

Ctr = Coefficient énergétique pour l'utilisation du tracteur

\square_{ja8} = Proportion de la distribution des fourrages qui est mécanisée

$CM_{a8(j)}$ = Consommation en carburants des véhicules utilisés pour la distribution des fourrages (en L/h)

$CM_{a8(autres)}$ = Consommation en carburants des véhicules utilisés pour la distribution des autres aliments (en L/h)

2.8. Achats de génisses (a9)

$$S_{a9} = 0 \quad (17)$$

$$E_{a9} = AG * (Cg + Qtm * Ctm + Qtt * Ctt + Qbe * Cbe) \quad (18)$$

avec :

AG = Quantité de génisses (en tonne vif)

Qbe = Distance du transport (en km)

Qtm = Transport maritime (en km)

Qtt = Quantité de transport par tiers (en km)

Cbe = Coefficient énergétique pour le transport en bétailière

Cg = Coefficient énergétique d'une génisse

Ctm = Coefficient énergétique du transport maritime

Ctt = Coefficient énergétique du transport par tiers en camion

2.9. Vente de vaches de réformes (a10)

$$S_{a10} = VA_{vr} * C_{vr} \quad (19)$$

$$E_{a10} = 0 \quad (20)$$

avec :

VA_{vr} = Quantité de vaches de réforme vendue (en kg vif)

C_{vr} = Coefficient énergétique pour les vaches de réforme

2.10. Vente de veaux (a11)

$$S_{a10} = VA_j * C_j + VA_t * C_t \quad (21)$$

$$E_{a10} = 0 \quad (22)$$

avec :

VA_j = Quantité de veaux vendue (en kg vif)

VA_t = Quantité de veaux mâles de plus de 18 mois vendue

C_j = Coefficient énergétique pour les veaux

C_t = Coefficient énergétique pour les veaux mâles de plus de 18 mois

2.11. Traite (a12)

$$S_{a12} = V_{Lait} * Clait \quad (23)$$

$$E_{a12} = Q_{elec} * C_{elec} + Q_{er} * C_{er} + Q_{pd} * C_{fe} + nbVL * HpVL_{a12} * \omega_{mt} * C_{mt} + Q_{tk} * C_{tk} \quad (24)$$

avec :

V_{Lait} = Quantité de lait vendu (en L)

$nbVL$ = Nombre de vache laitière

$HpVL_{a12}$ = Durée de l'activité (en h/VL)

Q_{elec} = Consommation électrique totale (en kWh)

Q_{er} = Consommation d'eau du réseau (en m³)

Q_{pd} = Produits désinfectants utilisés (en €)

Q_{tk} = Fonctionnement du tank à lait (en h)

C_{elec} = Coefficient énergétique pour l'électricité

C_{er} = Coefficient énergétique de l'eau de réseau

$Clait$ = Coefficient énergétique du Lait vendu

C_{mt} = Coefficient énergétique pour le matériel de traite

C_{pd} = Coefficient énergétique des produits désinfectants

C_{tl} = Coefficient énergétique pour le tank à lait

ω_{mt} = Proportion du coût énergétique du matériel de traite

2.12. Paillage (a13)

$$S_{a13} = 0 \quad (25)$$

$$E_{a13} = B_{pdc_{a13}} * Hp_{pdc_{a13}} * \square_{a13} * (C_{tr} + CM_{a13} * C_c) \quad (26)$$

avec :

$B_{pdc_{a13}}$ = Quantité de paille utilisée (en t)

$Hp_{pdc_{a13}}$ = Durée de l'activité (en h/t)

C_{tr} = Coefficient énergétique pour l'utilisation du tracteur

C_c = Coefficient énergétique du carburant

\square_{a13} = Proportion du paillage qui est mécanisé

CM_{a13} = Consommation de carburant par le véhicule utilisés

2.13. Soins du troupeau (a14)

$$S_{a14} = 0 \quad (27)$$

$$E_{a14} = (nbVL * Qfe * Cfe) / 365 \quad (28)$$

avec :

nbVL = nombre de vaches laitières

Qfe = frais d'élevage (en €)

Cfe = Coefficient énergétique des frais d'élevage

2.14. Raclage du lisier (a15)

$$S_{a15} = 0 \quad (29)$$

$$E_{a15} = Bl_{a15} * HpBl_{a15} * \square_{a15} * (Ctr + CM_{a15} * Cc) \quad (30)$$

avec :

Bl_{a15} = Biomasse de lisier manipulé (en tonne)

HpBl_{a15} = Durée de l'activité (en h/t)

Cc = Coefficient Énergétique pour le carburant

Ctr = Coefficient énergétique du tracteur

□_{a15} = Proportion du raclage qui est mécanisé

CM_{a15} = Consommation en carburant des véhicules utilisés

2.15. Evacuation du fumier (a16)

$$S_{a16} = 0 \quad (31)$$

$$E_{a16} = Bf_{a16} * HpBf_{a16} * \square_{a16} * (Ctr + CM_{a16} * Cc) \quad (32)$$

avec :

Bf_{a16} = Biomasse de lisier manipulé (en t)

HpBf_{a16} = Durée de l'activité (en h/t)

Cc = Coefficient Énergétique pour le carburant

Ctr = Coefficient énergétique du tracteur

□_{a16} = Proportion du raclage qui est mécanisé

CM_{a16} = Consommation en carburant des véhicules utilisés

2.16. Achat d'engrais (a17)

$$S_{a17} = 0 \quad (33)$$

$$E_{a17} = \square (AE_j * Ce_j) + HT_{a17} * (Cv + CM_{a17(t)} * Cc) + (\square AE_j) * Qtt * Ctt \quad (34)$$

avec :

AE_j = Quantité d'engrais j achetées (en t)

Ce_j = Coefficient énergétique de l'engrais j

HT_{a17} = Transport par l'éleveur (en h)

Qtt = Transport par tiers (en km)

Cc = Coefficient énergétique du carburant

Ctt = Coefficient énergétique pour le transport par des tiers

Cv = Coefficient énergétique pour l'utilisation du véhicule

CM_{a17(t)} = Consommation en carburant du véhicule utilisé pour le transport (en L/h)

2.17. Epandage d'engrais minéraux (a18)

$$S_{a18} = 0 \quad (35)$$

$$E_{a18} = Be_{a18} * HpBe_{a18} * (Ctr + CM_{a18} * Cc + Cep) + wcs * HT_{a18} * (Ctr + CM_{a18} * Cc) \quad (36)$$

avec :

- Be_{a18} = Quantité d'engrais minéraux épandus sur les prairies (en t)
 $HpBe_{a18}$ = durée de l'activité d'épandage sur prairies (en h)
 wcs = Epandage sur les parcelles de canne à sucre (oui=1 ou non=0)
 HT_{a18} = Durée du transport jusqu'à la parcelle de canne à sucre
 Cc = Coefficient énergétique du carburant
 Cep = Coefficient énergétique de l'épandeur (en MJ/h)
 Ctr = Coefficient énergétique du tracteur
 CM_{a18} = Consommation en carburant du véhicule utilisé (en L/h)

2.18. Epandage de lisier (a19)

$$S_{a19} = 0 \quad (37)$$

$$E_{a19} = Bl_{a19} * HpBl_{a19} * (Ctr + CM_{a19} * Cc + Ctl) + wcs * HT_{a19} * (Ctr + CM_{a19} * Cc) \quad (38)$$

avec :

- Bl_{a19} = Quantité de lisier épandu sur les prairies (en t)
 $HpBl_{a19}$ = durée de l'activité d'épandage sur prairies (en h)
 wcs = Epandage sur les parcelles de canne à sucre (oui=1 ou non=0)
 HT_{a19} = Durée du transport jusqu'à la parcelle
 Cc = Coefficient énergétique du carburant
 Ctl = Coefficient énergétique de la tonne à lisier (en MJ/h)
 Ctr = Coefficient énergétique du tracteur
 CM_{a19} = Consommation en carburant du véhicule utilisé (en L/h)

2.19. Epandage de fumier (a20)

$$S_{a20} = 0 \quad (39)$$

$$E_{a20} = Bf_{a20} * HpBf_{a20} * (Ctr + CM_{a20} * Cc + Cel) \quad (40)$$

avec :

- Bf_{a20} = Quantité de lisier épandu sur les prairies (en t)
 $HpBf_{a20}$ = durée de l'activité d'épandage sur prairies (en h)
 Cc = Coefficient énergétique du carburant
 Cel = Coefficient énergétique de l'épandeur lourd (en MJ/h)
 Ctr = Coefficient énergétique du tracteur
 CM_{a20} = Consommation en carburant du véhicule utilisé pour l'épandage (en L/h)

2.20. Exportation d'engrais de ferme (a21)

$$S_{a21} = VEf_j * Cef_j \quad (41)$$

$$E_{a21} = HT_{a21} * (Ctr + CM_{a21(t)} * Cc) + VEf_j * HpVEf_j * (Ctr + CM_{a21(e)} * Cc + Ctl) \quad (42)$$

avec :

- VEf_j = quantité d'effluent j exporté
 HT_{a21} = Durée du transport par l'éleveur (en h)
 $HpVEf_j$ = Durée de l'épandage de l'effluent j (en h/t)
 Cef_j = Coefficient énergétique de l'effluent j
 Ctl = Coefficient énergétique pour l'utilisation de la tonne à lisier
 Ctr = Coefficient énergétique d'utilisation du tracteur

C_c = Coefficient énergétique du carburant

$CM_{a21(e)}$ = Consommation en carburant du véhicule utilisé pour l'épandage (en L/h)

$CM_{a21(t)}$ = Consommation en carburant du véhicule utilisé pour le transport (en L/h)

III. DISCUSSION

Bien que n'ayant pas encore été implémentées au modèle, les équations permettront dans un premier temps d'évaluer le coût énergétique des différentes modalités choisies par l'éleveur pour chaque activité et ainsi d'évaluer les pratiques les plus coûteuses énergétiquement.

De plus, associé aux flux de biomasse déjà pris en compte dans le modèle et aux flux financiers qui seront pris en compte après l'implémentation du module économique, le modèle sera alors un outil complet qui permettra d'évaluer les pratiques agricoles sous les trois aspects de la durabilité que sont l'économie, l'environnement et la dimension sociale.

Une première simulation des coûts énergétiques, financiers et sociaux pour épandre 350 unités d'azote sur 1 hectare selon différentes modalités a été effectuée. Les résultats sont représentés dans le tableau 19.

Tableau 19. Simulation des coûts de travail, énergétiques et financiers de différentes modalités d'épandage

	Engrais minéral type 33-11-06	Engrais minéral type 15-12-24	Lisier
Biomasse (t/ha/an)	1,05	2,35	145,4
Travail (h/ha/an)	5,3	11,7	24,3
Energie (EQF/ha/an)	780	1 250	1 230
Euros (€/ha/an)	530	990	340

On observe ainsi que l'épandage d'un engrais de type 33-11-06 est l'activité qui engendre le moins de temps de travail et qui est la moins coûteuse énergétiquement. Cependant, compte tenu du prix de l'engrais, cette modalité est la plus coûteuse financièrement pour l'éleveur.

On remarque également que l'engrais minéral de type 15-12-24 est une modalité plus coûteuse en temps de travail, en terme d'énergie et financièrement que l'épandage de 33-11-06.

Enfin, l'épandage de lisier entraîne plus de temps de travail pour l'éleveur que les autres modalités. Cependant, si la consommation énergétique est élevée, le coût financier est faible.

On remarque donc que si l'épandage de 33-11-06 et de lisier ont tous deux leur avantage, en terme de temps de travail pour l'un ou d'un point de vue financier pour l'autre, le 15-12-24 est la modalité la moins avantageuse pour l'éleveur puisque si son coût en terme de travail est moyen, ses consommations énergétiques et son coût financier sont les plus élevés des 3 modalités.

Comme entrevu dans l'exemple suivant, l'ajout du module énergétique aura pour but d'élargir le diagnostic des différentes pratiques agricoles en offrant un nouveau critère d'évaluation. Cependant, il est aisé de comprendre que les résultats énergétiques ne pourront influencer de façon prioritaire les choix de l'éleveur. Malgré un coût énergétique inférieur, une pratique aura peu de chance d'être choisie par l'éleveur si elle représente une charge de travail ou un coût financier supérieur.

CONCLUSION

L'étude montre donc que dans le contexte insulaire et fortement contraint de La Réunion, la production locale de lait entraîne une forte consommation énergétique ainsi que des émissions de gaz à effet de serre élevées, notamment en comparaison de la métropole et de l'importation de poudre de lait. Ces consommations sont majoritairement le fait des quantités importantes d'aliments importées sur l'exploitation qui témoigne d'une faible autonomie alimentaire due à un manque de surface. Cependant, malgré ce facteur commun, on observe également une grande variabilité entre les différentes exploitations étudiées. Peu de facteurs semblent être responsables de cette variation. Parmi ceux étudiés, seule l'efficacité de la réponse de la production laitière au concentré distribué semble influencer significativement les performances. Ceci tend donc à démontrer que les consommations énergétiques des exploitations laitières à la Réunion sont fortement influencées par les pratiques agricoles de l'éleveur. Les différents bilans PLANETE effectués en métropole affichent le même constat, et ceci quelque soit la filière étudiée.

On remarque toutefois que des améliorations importantes sont envisageables, notamment concernant les économies d'énergies. Les premières estimations effectuées ici laissent à penser qu'en considérant une utilisation raisonnée des engrais minéraux et en améliorant l'efficacité des rations tout en donnant une place aux énergies renouvelables au sein des exploitations, la production locale pourrait se placer parfaitement en concurrence sur un point de vue environnementale face à l'importation de poudre de lait.

Dans tous les cas, l'activité d'élevage à la Réunion et notamment la production laitière est et sera toujours fortement dépendante de conditions géographiques et socio-économiques particulières. La saturation en surfaces fourragères est une contrainte au développement en autosuffisance des exploitations et entraîne irrémédiablement des importations d'intrants élevées. De plus, l'activité d'élevage reste aujourd'hui un secteur primordial de l'économie réunionnaise qui a permis la mise en valeur de zones reculées et la stabilisation de population autour d'une activité économiquement viable, vers laquelle nombre de réunionnais se sont tournés pour faire face au déclin d'autres activités agricoles.

Ainsi, malgré des résultats qui a priori pourraient apparaître en défaveur de l'élevage en bovin lait, cette étude montre implicitement tous les enjeux qu'il y aurait de lui donner une place certaine face aux notions environnementales qui sont avec les dimensions économiques et techniques les piliers de la durabilité des systèmes agricoles. Le contexte climatique et les valeurs « environnement » déjà bien ancrées dans les mentalités réunionnaises peuvent faire face au frein que représente l'insularité pour le développement. Via la production d'énergies renouvelables et la diminution des intrants notamment, l'agriculture réunionnaise se doit de s'engager dans une démarche environnementale justifiée par les premières simulations des solutions à mettre en place lesquelles tendent à démontrer les économies conséquentes qui peuvent être faites.

Cependant, des études de cas plus précises, effectuées par des personnes compétentes dans le domaine sont nécessaires aujourd'hui afin d'évaluer la faisabilité de ces propositions. De plus, les consommations énergétiques étant fortement corrélées aux pratiques de l'éleveur et par conséquent au facteur humain, une recherche plus approfondie sur les caractéristiques des exploitations les plus performantes énergétiquement devraient être mise en place afin de comprendre qu'elles sont les pratiques qui peuvent au mieux expliquer cette diversité. En ce sens, l'ajout de la composante énergétique dans un modèle tel que GAMEDE est une première démarche qui permettra de cerner les pratiques les plus consommatrices et les plus économes en énergie.

L'analyse effectuée sur la filière laitière peut aujourd'hui servir d'exemple aux autres filières agricoles réunionnaises. La base de données, contenant les coefficients énergétiques adaptées au contexte réunionnais, et la méthodologie mise en place peuvent constituer les piliers de prochaines analyses sur d'autres filières afin d'établir d'autres diagnostics. Le regroupement des filières sous une même perspective environnementale pourrait ainsi permettre à l'agriculture réunionnaise de devenir un exemple de développement durable où la productivité va de pair avec le respect de l'environnement.

Enfin, l'île est aujourd'hui fortement dépendante des importations de poudre de lait car la production locale n'est plus suffisante pour couvrir les besoins des consommateurs réunionnais. Au vu du prix de la poudre qui ne cesse de croître, ces importations vont représenter un coût de plus en plus important pour l'île. Face à la demande croissante, l'île va donc devoir faire un choix entre continuer d'importer de la poudre de lait à un prix élevé ou développer sa filière laitière en améliorant sa productivité. Dans ce cas, quand on sait que le prix du lait produit localement sera sans doute prochainement inférieur à celui du lait reconstitué à partir de poudre de lait, la valorisation environnementale de la production locale ne serait-elle pas un argument supplémentaire en faveur de la filière laitière réunionnaise ?

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME, AILE, SOLAGRO, TRAME**, 2006. *La méthanisation à la ferme* [On Line]. [03/08/2007].
<URL : <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?id=38550&p1=1&ref=12441>>
- AGRESTE**, 2002. *Beaucoup d'eau à la Réunion*. in : Agreste Dom, 5, 4 pages.
- AGRESTE**, 2007. *Réunion : Mémento régional* [On Line]. [07/05/2007].
<URL : <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/D97406C01.pdf>>
- ALARY V., MESSAD S., TACHE C., TILLARD E.**, 2002. *Approche de la diversité des systèmes d'élevage laitiers à La Réunion*. In : Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire en pays Tropical, 55. pp 285-97.
- ALARY V.**, 2004. *Modélisation des systèmes d'exploitation laitière à La Réunion. Juin 2000-Septembre 2004*. Rapport de synthèse. Opération ELE 105. Pôle Elevage La Réunion. CIRAD-EMVT, SICALAIT. 132 p. + annexes.
- ARER**, 2006. Observatoire Energie Réunion, Bilan énergétique de la Réunion 2005 [On Line]. [22/06/2007]. <URL : http://www.arer.org/download/Observatoire/bilan_energetique_reunion.pdf>
- ARER**, 2007. La filière PV [On line]. [09/08/2007].
<URL : <http://www.arer.org/endur/filtech/soleil/run.php?fiche=PV&archive=>>>
- BAKER C. G. J., MCKENZIE K. A.**, 2005. *Energy consumption of industrial spray driers*. In : Drying Technology, 2005, 23. pp 365-386.
- 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 REUNION Pôle Elevage. 99 p.
- BIMBENET J.-J., SCHUCK P., ROIGNANT M., BRULE G., MEJEAN S.**, 2002. *Heat balance of a multistage spray-dryer : principles and example of application*. In: Lait 82 (2002). INRA, EDP Sciences. pp 541-551
- BLANFORT V.**, 2000. *Le contexte écologique*. In : L'élevage bovin à La Réunion : Synthèse de quinze ans de recherche. Montpellier, CIRAD, 2000. pp 19-34.
- BOCHU J.-L.**, 2002. *PLANETE : Méthode pour l'analyse énergétique de l'exploitation agricole et l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre*. Texte colloque SOLAGRO Octobre 2002. 10 pages.

- BOCHU J.-L.**, 2007. *Synthèse 2006 des bilans PLANETE. Consommations d'énergie et émissions de GES des exploitations agricoles ayant réalisé un bilan PLANETE*. Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par SOLAGRO. 28 p.
- BONY J., CONTAMIN V., GOUSSEF M., METAIS J., TILLARD E., JUANES X., DECRUYENAERE V., COULON J.-B.**, 2005. *Facteurs de variation de la composition du lait à La Réunion*. INRA Productions Animales, 2005, 18 (4), pp 255-263.
- BRAND R.A., MELMAN A.G.**, 1993. *Energie-inhoudnormen voor de veehouderij, dell 1 en 2*. TNO-Rapporten. Zit Van Dasselaar, A. und Pothoven R. : Energiverbruik in de nedelandense landbow. Vergelijking van verschillende bemestingsstrategien. NMI 1994. Non numéroté
- CONSEIL REGIONAL DE LA REUNION**, 2007. *Note d'information : aide de la région en faveur de la détaxe gazole à usage agricole*. Mail du 23/07/2007.
- DELABY L., PEYRAUD J.-L., DELAGARDE R.**, 2003. *Faut-il compléter les vaches au pâturage ?* In : INRA Productions Animales, 2003, 16. pp 183-195.
- EDEN**, 2007. *Le Biogaz. Le biogaz est du gaz naturel renouvelable ou GNR*. [On Line]. [21/07/2007]. <URL : http://www.eden-enr.org/spip/article.php?id_article=2>
- FAO**, 1998. *Le lait et les produits laitiers dans la nutrition humaine*. Chapitre 8 : Matière grasse. [On Line]. [12/07/2007]. <URL : <http://www.fao.org/docrep/T4280F/T4280F0i.htm>>
- FERRIERE J.M., FAUVEAU C., CHABANET G., STOLL J., HOFFMANN M., RISOU B., FARRUGGIA A., FORTIN G.**, 1997. *L'analyse énergétique à l'échelle de l'exploitation agricole. Méthodes, apports et limites*. in : Fourrages, 151, pp 331-350.
- HACALA S., RESEAUX D'ELEVAGE, LE GALL A.**, 2006. *Emissions de gaz à effet de serre en élevages bovins : évaluations, perspectives d'atténuation et compensation par le stockage du carbone dans les sols prairiaux*. Journées AFPP – Prairies, élevages, consommations d'énergies et GES, 27-28 mars 2006. [On Line]. [22/06/2007]. <URL : http://www.inst-elevage.asso.fr/html1/IMG/pdf/3706-Emissions_gaz_effet_serre_en_elev_bov.pdf>
- INSEE**, 2006. *TER : Le tableau économique de La Réunion*. 221 pages.
- METEO FRANCE**, 2007. *Atlas climatique de La Réunion*. [On Line]. [14/05/2007]. <URL : http://www.meteo.fr/temps/domtom/La_Reunion/atlas_clim/essai2.htm>
- MEYER C., DUTEURTRE G.**, 1998. *Equivalents lait et rendements en produits laitiers : modes de calculs et utilisation*. Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux, 1998, 51 (3). Pp 247-257.
- MINISTERE DE L'ECONOMIE, DES FINANCES ET DE L'INDUSTRIE**, 2003. *La réglementation spécifique des prix des hydrocarbures dans les D.O.M*. Extrait du rapport annuel de la DGEMP pour 2003. [On Line]. [28/05/2007]. <URL : Voir <http://www.industrie.gouv.fr/energie/petrole/ra03-prix-dom.htm>>
- MINISTERE DE L'ECONOMIE, DES FINANCES ET DE L'INDUSTRIE**, 2006. *Arrêté du 10 juillet 2006 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations qui valorisent le biogaz*. Décrets, arrêtés, circulaires, Textes Généraux, Journal officiel de la République Française, Texte 22 sur 150. 4 pages.
- MVAD**, 2007. *Guide de la fertilisation organique* [On line]. [26/07/07]. <URL : <http://www.mvad-reunion.org/-Guide-de-la-Fertilisation> >
- OCDE**, 1997. *Les incidences sur l'environnement du transport de marchandises*. [On Line]. [27/07/2007]. <URL : <http://www.oecd.org/dataoecd/14/6/2386739.pdf>>
- OFFICE DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE DU CANADA**, 2001. *Rapport indicateur de rendement énergétique : usines produisant du lait de consommation*. Préparé pour le conseil nationale de l'industrie laitière du Canada. [On Line]. [14/06/2007]. <URL : http://www.oeenrcan.gc.ca/Publications/industriel/usine-lait-consommation/BenchmLatiere_f.pdf>
- RAMIREZ C.A., PATEL M., BLOK K.**, 2005. *From fluid milk to milk powder Energy use end energy efficiency in the European dairy industry*. In : Energy, 31 (2006). Pp 1984-2004

- RAKOTOMALALA L.**, 1999. *Etude de la gestion de la matière organique en productions végétales dans le sud de l'île de La Réunion - Analyse des pratiques et constitution d'un modèle d'action*. Mémoire de stage DESS Gestion des systèmes agro sylvo pastoraux en zones tropicales. Université Paris XII. Val de Marne. Faculté des Sciences. 60 p.
- REYNAUD S.**, 1995. *Diagnostic des pratiques agricoles pour une meilleure compréhension des transferts d'effluents d'élevage*. Mémoire de DEA. INA Paris Grignon, 1995. 58 p.
- RISOUD B., THEOBALD O.**, 2002. *Référentiel pour l'analyse énergétique de l'exploitation agricole et son pouvoir de réchauffement global. Annexe au document « Analyse énergétique d'exploitations agricoles et pouvoir de réchauffement global. Méthode et résultats sur 140 fermes françaises »*. ENESAD de Dijon, ADEME. 43 p.
- SLEGTEN**, 2007. *Construction d'un modèle d'évaluation économique des pratiques de gestion à l'échelle de l'exploitation : cas de l'élevage bovin laitier à La Réunion*. Mémoire de fin d'études Economie et Développement. Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux. 86 p.
- SOLAGRO**, 2005. *La méthanisation « à la ferme »*. 10 p.
- SYLVESTRE B.**, 2003. *Biogaz de fermes d'élevage et de bâtiments d'exploitation*. Projet de fin d'études. Environmental Technology and Management, Hogeschool Brabant, Breda, Pays-Bas. 37 p.
- TACHE C.**, 2001. *Diagnostic des exploitations laitières de l'île de La Réunion*. Mémoire de fin d'études. ISTOM, Institut d'Agro-Développement International. Cergy-Pontoise, France. 96 p. + annexes.
- VAYSSIERES J.**, 2007. *Modelling farmers' action : decision rules capture methodology and formalisation structure : a case of biomass flow operations in dairy farms of a tropical island*. Animal 1. pp 716-733.

ANNEXES

ANNEXE I : Données générales utilisées pour la récolte des données

Poids moyen des bovins à La Réunion

Type d'animal	Poids unitaire (en kg vif)
Veaux à 8 jours	45
Veaux à 12 jours	50
Veaux à 80 jours	100
Génisses à 6 mois	200
Génisses à 1 an	310
Génisses à 15 mois	380
Génisses à 2 ans (gestante)	600
Vaches de réforme	585

(Source SICALait)

Prix moyen estimé en € par m3 de l'eau réseau à la Réunion

Zone Géographique	Prix TTC (en €/m3)
Plaine des Palmistes	0,92
Plaine des Cafres	1,08
St Joseph	0,92
St Pierre	0,92
Hauts de l'Ouest	1,49
Plaine des Grègues	0,92

(D'après Agreste, 2002)

Prix moyen des engrais (en F/kg)

Type d'engrais	Prix (en F/tonne)
Ammonitrate	2400
Urée	2600
Chaux	2080
30 10 10	2625
15 12 24	2475
18 07 30	2345
33 11 06	2450

(Source URCOOPA)

Prix moyen des concentrés et minéraux

Type de Concentrés	Prix	Type de Minéraux	Prix
B80	1,50 F/kg	Floréal	3,50 F/kg
B45	1,54 F/kg	Oligo-bloc	18,75 F/bloc
Pulco	1,45 F/kg	Physio	3,50 F/kg
Maïs broyé	1,92 F/kg	Carbonate de Ca	1,25 F/kg
Tourteaux de soja	1,84 F/kg	PhysioBloc	180 F/bloc
Tonienergie	1,46 F/kg	Sel de Mer	1 F/kg
Sandilait	1,57 F/kg	Cristalensil	4 F/kg
Sandienergie	1,50 F/kg	Primex	3,50 F/kg
Pulpe de betterave	1,40 F/kg		

(Source URCOOPA)

ANNEXE II : Adaptation de la méthode PLANETE au contexte réunionnais

L'adaptation des coefficients présentés dans la méthode PLANETE au contexte réunionnais constitue un travail de recherche et de synthèse important qui a abouti à la constitution d'une base de données contenant 50 coefficients énergétiques et 37 coefficients d'émissions de gaz à effet de serre. La base de données et la méthodologie détaillée permettant de la construire représente un outil de travail original qui pourra servir de base pour des analyses énergétiques futures d'exploitations en bovin lait ou d'autres filières réunionnaises.

C'est pourquoi, en accord avec Mr Bochu, co-concepteur de la méthode PLANETE, et Mr Lecomte, le choix a été fait de restreindre la diffusion et l'utilisation de ces coefficients à l'axe Elevage du CIRAD Réunion.

Annexe III : Détail de la construction des équations du module énergétique

Enrubannage (a1)

Modalités rencontrées à La Réunion pour l'activité d'enrubannage

Origine du matériel	Modalité
Matériel et services d'un ouvrier loués à une AFP	(A) "Chantier à 2" (l'éleveur + l'ouvrier)
Matériel possédé en commun dans le cadre d'une CUMA ou d'une AFP	(B) "Chantier à 3 sans épandage de mélasse" (l'éleveur + 2 autres adhérents)
	(C) "Chantier à 3 avec épandage de mélasse" (l'éleveur + 2 autres adhérents)
Matériel possédé individuellement	(D) "Chantier à 2 " (l'éleveur + son associé)

Valeurs des paramètres en fonction des différentes modalités d'enrubannage

Modalité	Qpf	HpBR _{a1}	nbT	CM _{a1}
A	0,8	0,1	2	11
B		0,06	3	
C		0,11	3	
D		0,12	2	

Fauche en vert des prairies (a2)

Modalités rencontrées à La Réunion pour l'activité de fauche en vert des prairies

modalité	matériel nécessaire	Lieu de récolte
manuelle	débrousailluse à fil avec un véhicule de transport (4x4)	(A) Sur l'exploitation
		(B) Hors exploitation ¹³
mécanisée	au silo-raffleur + tracteur + remorque butée	(C) Sur l'exploitation
		(D) Hors exploitation ⁷

Valeurs des paramètres en fonction des différentes modalités de fauche en vert des prairies

Modalité	HpBh _{a2mec}	HpBh _{a2man}	CM _{a2(t)}	CM _{a2(t)}	HT _{a2}	ω_r	ω_v	$\square f_p$
A	0	4	0,7	0	0	0	1	0
B	0	4	0,7	3,6	0,5	0	1	1
C	2	0	13,2	0	0	1	0	0
D	2	0	13,2	8,8	0,5	1	0	1

Fauche des cannes (a3)

Modalités rencontrées à La Réunion pour l'activité de fauche en vert des prairies

modalité	Type de coupe	matériel nécessaire
A) cannes fourragères et cannes à sucre entières	manuelle	au sabre à canne avec un véhicule de transport (tracteur + griffe)
B) Choux de canne ¹⁴	manuelle	au 4x4

¹³ On considère que la biomasse coupée hors de l'exploitation l'est toujours chez un autre exploitant

Valeurs des paramètres en fonction des différentes modalités de fauche des cannes

Modalité	HT _{a3}	ω_{tr}	ω_v	CM _{a3(t)}
A	0,25	1	0	8,8
B	0,5	0	1	3,6

Changement de pâturage (a4)

On ne trouve ici qu'une seule modalité qui consiste à changer les clôtures tous les 6 ans. De plus, on considère que Qcl est égale à 1,586 kg par mètre linéaire de clôture¹⁵ dans toutes les exploitations et que la clôture est en fer.

Achats de concentrés (a5)

On observe une seule modalité, les concentrés achetés par l'éleveur étant ici livrés par la coopérative d'Aliments directement sur l'exploitation. Cependant, le transport par tiers varie ici en fonction de la localisation géographique de l'exploitation et donc de la distance qui la sépare de la coopérative d'Aliments. Des distances moyennes ont été estimées en fonction des 4 grandes zones géographiques de production laitière et sont reportées dans le tableau suivant.

Distance du transport par tiers des concentrés selon la zone géographique

Zone géographique	Qtt
Hauts de l'Ouest	40
Plaine des Cafres	75
Plaine des Palmistes	80
Hauts de St Joseph	85

Vente de fourrages (a6)

Il n'existe qu'une seule modalité ici. La vente de fourrages bien qu'assez rare à La Réunion chez les exploitants laitiers, s'effectue le plus souvent en cas de surplus et pour rendre service à un autre éleveur. Dans ce cas, l'acquéreur se charge alors du transport.

Achat de fourrages (a7)

L'achat de fourrages peut s'effectuer selon 2 modalités. Soit l'éleveur se fait livrer les fourrages en gros sur l'exploitation et dans ce cas là les entrées énergétiques sur l'exploitation se font via le coût énergétique des fourrages et du transport par un tiers en camion que l'on a estimé à 50 km quelque soit la situation géographique de l'exploitation. Soit l'éleveur transporte lui-même les fourrages sur l'exploitation et on considère alors des entrées énergétiques sous forme de l'utilisation du matériel, du carburant qu'ils consomment et via le coût énergétique des fourrages achetés. A noter que le transport est ici estimé à 40 minutes aller-retour en 4x4 (Slegten, 2007) soit 26,5 km.

Valeurs des paramètres en fonction des différentes modalités d'achats de fourrages

Modalité	Qtt	HT _{a7}	CM _{a7(t)}
A	50	0	0
B	0	0,67	0,66

¹⁴ On considère que les choux de canne sont toujours coupés hors de l'exploitation. Son coût énergétique est alors égal à celui de la paille de canne.

¹⁵ Valeurs décrites par l'UAFP : 1 poteau en fer de 3,774 kg tous les 3 mètres et 5 brins de fil de fer barbelé (bobine de 250 mètres pesant 16,4 kg)

Distribution des rations (a8)

Modalités rencontrées à La Réunion pour l'activité de distribution des rations

Modalité	Description
Distribution manuelle (A)	manipulation à la brouette et au seau et répartition à la fourche ou manuellement
Distribution semi-mécanisée (B)	Manipulation au tracteur avec fourche attelée et répartition manuelle à la fourche
Distribution mécanisée (C)	Manipulation au tracteur et à la fourche attelée et répartition à la mélangeuse ou désileuse ¹⁶

Achats de génisses (a9)

Les génisses achetées par l'éleveur sont généralement pleines. On considère alors comme entrée la valeur énergétique en poids vif des génisses. Cependant, va être rajouté à ce coût le coût énergétique en fonction de l'origine de la génisse ce qui donne alors 3 modalités :

- Les génisses sont importées par la SICALait depuis la Métropole puis livrée sur l'exploitation (modalité A). Dans ce cas le coût du transport comprend le transport maritime en cargo plus un transport par tiers en camion.
- Les génisses sont élevées par la SICALait et sont également livrés à l'exploitant (modalité B). Le coût de transport n'est représenté ici que par le transport par tiers en camion.
- Les génisses sont achetées chez un particulier et c'est l'éleveur qui se charge du transport grâce à une bétailière de l'EDE (modalité C). Le transport comprend ici l'utilisation de la bétailière plus la consommation en carburant de celle-ci.

Valeurs des paramètres de durée en fonction des différentes modalités d'achats de génisses

Modalité		Qtm	Qtt	Qbe
A	Hauts de l'Ouest	10 800	40	0
	Plaine des Cafres	10 800	75	0
	Plaine des Palmistes	10 800	80	0
	Hauts de St Joseph	10 800	85	0
B	Hauts de l'Ouest	0	60	0
	Plaine des Cafres	0	5	0
	Plaine des Palmistes	0	25	0
	Hauts de St Joseph	0	40	0
C		0	0	25

Vente de vaches de réformes (a10)

Il n'existe qu'une seule modalité : les vaches de réforme sont vendues à la SICARevia, la coopérative assurant le ramassage des animaux.

Vente de veaux (a11)

Les veaux vendus ont différentes destinations selon leur type. Ainsi, si la capacité d'accueil des bâtiments de l'exploitation ne permet pas de les garder, les veaux femelles sont confiés à la SICALait. Les veaux mâles sont quant à eux vendus à la SICARevia. Dans tous les cas, le ramassage est ici aussi assuré par les coopératives.

Traite (a12)

La traite est biquotidienne quelque soit l'exploitation. Cependant cette activité diffère en fonction du cheptel de l'exploitation, ce qui va influencer le matériel utilisé. On distingue ainsi trois modalités qui sont la traite au pot (A), la traite en salle ne possédant qu'un quai (B) et la traite dans une salle avec deux quais (C).

¹⁶ On considère dans ce cas là que le matériel est utilisé durant toute l'activité.

Valeurs des paramètres en fonction des différentes modalités de traite

Modalité	Qelec	Qer	Qpd	HpVL _{a12}	Qtk	ω_{mt}
A	10	2,25	7,5	0,2	3	0,25
B	26,1	5,535	10	0,1	6	0,5
C	52,2	8,775	17	0,07	12	1

Paillage (a13)

Le paillage s'effectue selon deux modalités qui dépendent de la quantité de paille manipulée. Si cette dernière est supérieure à 1/3 d'une botte, l'éleveur utilise un tracteur pour le transport des bottes jusqu'à l'aire de paillage (B). Si la quantité manipulée est inférieure, le paillage est réalisé manuellement (A).

Valeurs des paramètres en fonction des différentes modalités de paillage

Modalité	HpBpdc _{a13}	\square_{a13}	CM _{a13}
A	1	0	0
B	0,5	0,1	8,8

Soin du troupeau (a14)

Il n'existe qu'une seule modalité pour l'activité de soin du troupeau. Les soins du troupeau sont considérés ici comme des frais d'élevages qui s'effectuent manuellement et n'engendrent aucune consommation énergétique directe sur l'exploitation. Le coût énergétique n'est donc ici représenté que par leur charge financière qui est estimé comme fixe par vache laitière et par an et qui s'élève à 274 € selon Slegten (2007). Ce coût énergétique qui apparaît de façon ponctuelle est réparti sur l'année.

Raclage du lisier (a15)

Dans les exploitations réunionnaises, les effluents produits sont principalement produits sous forme de lisier dans les élevages laitiers du fait du faible approvisionnement en paille. Le raclage s'effectue soit manuellement (modalité A) soit mécaniquement avec un tracteur et un rabet (modalité B) en fonction de la surface des logettes et donc de la possibilité pour le tracteur de manœuvrer.

Valeurs des paramètres en fonction des différentes modalités de raclage du lisier

Modalité	HpBl _{a15}	\square_{a15}	CM _{a15}
A	0,33	0	8,8
B	0,2	1	

Evacuation du fumier (a16)

Tout comme pour le raclage du lisier (activité a15), les modalités de l'évacuation du fumier sont influencé par la structure des bâtiments. On observe ainsi un raclage mécanique (B), un raclage manuel (A) et il est possible d'observer ici une troisième modalité (C) où l'évacuation est effectuée par un tiers. En contrepartie ce dernier récupère la totalité du fumier.

Valeurs des paramètres en fonction des différentes modalités d'évacuation du fumier

Modalité	HpBf _{a16}	\square_{a16}	Qc
A	0,33	0	8,8
B	0,2	1	
C	0	0	

Achat d'engrais (a17)

Il existe deux modalités qui correspondent à deux types de transport :

- Les engrais sont livrés sur l'exploitation (A). On ne considère alors que le coût énergétique du transport par un tiers en camion.
- L'éleveur va chercher lui-même les engrais (B) ce qui engendre un coût énergétique pour l'utilisation du véhicule et sa consommation en carburant. On considère ici que le transport s'effectue avec un 4x4 sur une courte distance représentant un trajet de 10 minutes (Slegten, 2007) sur 6,7 km.

Valeurs des paramètres en fonction des différentes modalités d'achats d'engrais

Modalité		HT _{a17}	CM _{a17(t)}	Qtt
A	Hauts de l'Ouest	0	8,8	40
	Plaine des Cafres	0		75
	Plaines des Palmistes	0		80
	Hauts de St Joseph	0		85
B		0,17		0

Epannage d'engrais minéraux (a18)

L'activité d'épandage d'engrais minéraux comprend tout d'abord le transport jusqu'à la parcelle puis l'épandage réel. Les entrées d'énergies sont donc ici représentées tout d'abord par l'utilisation du matériel utilisé qui se compose dans tous les cas d'un tracteur puis d'un épandeur léger. On considère également comme entrée énergétique le carburant consommé par le tracteur au cours de l'activité en considérant que la consommation est identique durant le transport et l'épandage. Or il existe ici deux modalités : les parcelles sont proches (modalité A), c'est-à-dire située à moins d'un kilomètre soit elles sont éloignées (modalité B), donc situées à plus d'un kilomètre.

Valeurs des paramètres en fonction des différentes modalités d'épandage d'engrais minéraux

Modalité	HpBe _{a18}	HT _{a18}	CM _{a18}
A	4	0	11
B	5	0,1	

Epannage de lisier (a19)

L'activité d'épandage de lisier est identique à l'exception du matériel d'épandage qui est ici une tonne à lisier. De plus, on considère ici une troisième modalité (C) qui est un épandage effectué par un ouvrier avec son propre matériel.

Valeurs des paramètres en fonction des différentes modalités d'épandage de lisier

Modalité		HpBl _{a19}	HT _{a19}	CM _{a18}
A	Lisier de bovin	0,1	0	13,2
	Lisier de porc	0,1	0	
B	Lisier de bovin	0,17	0,1	
	Lisier de porc	0,17	0,1	
C	Lisier de bovin	0,1	0	0
	Lisier de porc	-	0	

On observe que les modalités sont ici séparées en fonction de la nature du lisier (bovin ou porcin). Cependant, les variables ne diffèrent que dans le cas de la modalité C car l'épandage de lisier de porc n'est jamais effectué par un ouvrier agricole.

Epannage de fumier (a20)

L'activité d'épandage de fumier est identique à l'activité de lisier car on y retrouve les trois mêmes modalités (A, B, C). Cependant le matériel utilisé est ici un épandeur lourd.

Valeurs des paramètres en fonction des différentes modalités d'épandage de fumier

Modalité	HpBf _{a20}	CM _{a20}
A	0,03	15,4
B	0,05	
C	0,0125	0

Exportation d'engrais de ferme (a21)

L'exportation d'engrais de ferme s'effectue selon différentes modalités en fonction du type de demande, ce qui va entraîner des consommations énergétiques différentes :

- Le demandeur recherche un fumier plutôt pailleux et va organiser lui-même le raclage et le transport (A). Cette modalité n'entraîne aucune consommation énergétique pour l'éleveur.

- Le demandeur est peu exigeant sur la qualité de l'effluent qu'il récupère après que l'éleveur l'est évacué (B). Les consommations énergétiques ayant été comprise dans l'activité a15 ou a16, elles sont nulles, le demandeur se chargeant du transport.
- Le demandeur est prêt à payer pour un fumier de qualité et livré (C). Les consommations énergétiques sont donc représentés par le transport et plus précisément par l'utilisation d'une benne et du tracteur et de sa consommation en carburant.
- Le demandeur attend une livraison d'une faible quantité de lisier qui sera épandu par l'éleveur (D). En plus du coût du transport on considère également ici le coût pour l'épandage (Matériel et consommation en carburants).

Valeurs des paramètres en fonction d'exportation d'engrais de ferme

Modalité	HT _{a21}	HpVEf _j	CM _{a21(t)}	CM _{a21(e)}
A	0	0	15,4	0
B	0	0		0
C	0,67	0		8,8
D	0,67	0,1	13,2	8,8