

MÉMOIRE

Présenté par : *DIAKITE Zakary Rodrigue*

Dans le cadre du **Master recherche** :

Master Economie du Développement Durable, de l'Environnement et de l'Energie (EDDEE) Mention Economie de l'Environnement, de l'Energie et des Transports (EEET) Option ENVIRONNEMENT.

Stage effectué du : 01/04/2015 au 30/09/2015

À :

INRA UMR Sol, Agro et hydrosystème, Spatialisation, 65 Rue de Saint Briec, 35042 Rennes FRANCE

Sur le **thème** :

Modélisation dynamique de scénarios d'innovation des exploitations laitières : Analyse des scénarios de réduction d'énergie indirecte.

Pour l'obtention du :
DIPLOME NATIONAL DE MASTER RECHERCHE
D'AGROPARISTECH

Responsable du Master : Jean-Christophe BUREAU

Enseignants-tuteurs responsables de stage : Gabriel LANG / Stéphane DE CARA

Maîtres de stage : Aurélie WILFART / Michael CORSON

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements sont à l'endroit de Aurélie WILFART et Michael CORSON, mes tuteurs de stage à l'INRA Rennes UMR 1069 SAS qui m'ont permis de faire ce stage. Nos échanges m'ont été d'une aide précieuse tout le long du projet et dans la rédaction de ce rapport. Je remercie particulièrement mes tuteurs pédagogiques, partant de Gabriel LANG à Stéphane DE CARA, sans oublier Elisabeth SAMSON, l'économiste de l'UMR SAS, et le responsable de ma formation Jean-Christophe BUREAU. Ils ont été d'un soutien remarquable et m'ont surtout permis à réussir cette étude. Merci à l'équipe entière de l'UMR, stagiaires, thésards, chercheurs ou techniciens pour leur accueil et leur gentillesse.

Un grand merci à tous mes enseignants d'AgroParisTech et du Master EEET- EDDEE de qui je tiens des compétences techniques et scientifiques qui m'ont beaucoup servies.

Je tiens à remercier particulièrement la famille DIAKITE pour son soutien moral depuis la Côte surtout ma mère CAMARA Madama sans qui je ne serai arrivé à ce stade.

RESUME

L'augmentation de la population occasionne une forte demande en produits animaux dont les produits laitiers. Leur production mobilise d'importantes ressources telles que l'énergie et des intrants. Dans le même temps les exploitations laitières se trouvent face à des coûts de production élevés vu l'intensification de leur production. Cela est dû à l'augmentation des prix des intrants et des moyens de production qu'elles sollicitent. Face à cette situation, le développement des exploitations laitières qui minimisent leur consommation énergétique et leurs impacts environnementaux devient important pour assurer leur durabilité. C'est dans ce cadre que s'inscrit le projet DIESEL (Diminuer l'Energie en Système Laitier), avec pour objectif d'identifier des leviers pour réduire la consommation d'énergie indirecte dans les exploitations laitières. En effet, l'énergie indirecte constitue plus de la moitié de l'énergie totale sollicitée pour leur fonctionnement (de 57 % à 70 %, selon la source). Des travaux précédents du projet ont consisté à identifier les postes de consommation d'énergie indirecte, établir une typologie des exploitations laitières à partir de leurs caractéristiques, mettre en évidence des leviers d'actions pour réduire la consommation d'énergie indirecte, rassembler ces leviers dans des scénarios innovants, et estimer des impacts environnementaux de ces scénarios avec l'outil EDEN (Evaluation de la Durabilité des Exploitations), basé sur l'Analyse du Cycle de Vie. Notre étude a consisté à utiliser le simulateur IFSM (Integrated Farm System Model) pour analyser les scénarios innovants élaborés, explorer les pistes d'amélioration des exploitations et identifier des leviers applicables à toutes exploitations en vue de permettre l'élaboration de scénario générique. Cette étude s'est axée sur 4 exploitations laitières (dénombrées 13, 14, 15, 18), chacune représentant un groupe d'exploitations dans la typologie, avec une production de lait relativement forte (>6000 l lait/ha de surface fourragère principale (SFP)) et la part de maïs dans la SFP relativement élevée (20-40 % pour 3 groupes, >40 % pour 1 groupe). La méthode a consisté à utiliser EDEN comme une base de données qui ont été traduites en données d'entrées d'IFSM. Ces données ont été complétées avec des données bibliographiques. IFSM a ensuite été calibré dans le but d'établir l'adéquation entre les représentations faites par IFSM et EDEN. L'interprétation des simulations s'est focalisée sur les différences relatives entre les scénarios de référence et d'innovation pour la consommation d'énergie (directe et indirecte), les émissions des gaz à effet de serre (GES) et les valeurs économiques (revenus, coûts). Les prédictions ont été exprimées selon deux unités fonctionnelles (par exploitation, par litre de lait) pour comparer les scénarios. À propos des résultats de simulation, pour l'exploitation 13,

les impacts environnementaux (énergie indirecte et GES) ont diminué à l'échelle exploitation mais moins par litre de lait. Pour l'exploitation 14, l'énergie indirecte n'a pas diminué dans le scénario SC14, mais un scénario SC14Bis (remplacement de la race Prim'Holstein par la race Normande, l'alimentation à base de fourrage, les achats de concentrés ont été réduits de 2,4 kg/VL/j max au lieu de 6,25 kg/VL/j, l'augmentation des surfaces avec légumineuses (de 23 à 35,5 ha), la suppression du maïs ensilage au profit des surfaces en herbe et suppression de l'utilisation de fertilisants minéraux) a réduit la consommation d'énergie indirecte (-1%) à l'échelle exploitation et augmenté par 8 % le revenu. Le scénario innovant pour l'exploitation 15 a montré une réduction de consommation d'énergie indirecte de 36 % et d'émissions de GES (de 28 %, 31 % et 46 % respectivement de pour le CH₄, CO₂ et N₂O) avec des baisses des coûts de production tant à l'échelle exploitation que par litre de lait. La comparaison de profits montre une augmentation de revenu de 27 % pour une réduction d'énergie indirecte de 36 %. Pour l'exploitation 18, un scénario extensif était avantageux sur le plan environnemental alors qu'un scénario intensif était moins coûteux par litre de lait comparé au scénario de référence. Une analyse de sensibilité de l'exploitation 13 a montré que les prédictions des productions sont sensibles à la variabilité climatique des années, contrairement aux coûts si on n'intègre pas à ces derniers les fluctuations des prix qui viendront amplifier les variations des coûts. Les leviers d'action qui s'avèrent commun à toutes les exploitations étaient de se tourner vers les races mixtes à forte capacité de valorisation des surfaces fourragères, d'opter pour l'autoconsommation et l'autosuffisance, tout en prenant en compte la capacité de production et les contraintes climatiques et agronomiques de l'exploitation.

SUMMARY

The increase of population causes a strong demand for animal products such as dairy products. Their production mobilizes significant resources such as energy and agricultural inputs. At the same time dairy farms are in front of high production costs because of their practices of intensification. This is due to the increase in input prices and how they are produced. In front of this situation, the development of livestock production systems such as dairy farms, which minimize their energy consumption and environmental impacts, becomes important to preserve their sustainability. It is in this context that the DIESEL (Decrease Dairy Energy System) project is made with the objective of reduction of indirect energy consumption in dairy farms. The indirect energy constitutes over half of the total energy requested for their operation (from 57% to 70 %, depending on the source). Previous work of the project consisted of identifying processes consuming indirect energy, developing a typology of farms based on their characteristics, identifying mechanisms to reduce indirect energy consumption, combining mechanisms into innovation scenarios, and estimate their environmental impacts with the environmental analysis tool EDEN (Evaluation of Farm Sustainability), based on Life Cycle Assessment. Our study consists of using the model IFSM (Integrated Farm System Model) to analyze the innovation scenarios developed and explore ways to improve operations and identify the mechanisms that can be applied to all farms and develop a generic scenario. This study focused on 4 reference farms (13, 14, 15 and 18), each representing a group of farms in the typology, with relatively high milk production (>6000 l/ha of forage area) and a percentage of maize silage in the forage area that was relatively high (20-40% for 3 groups, >40% for 1 group). The method consisted of using EDEN as a database that was translated into IFSM inputs. These data were supplemented with bibliographic information. IFSM was then calibrated to render as similar as possible the representations made by IFSM and EDEN. Interpretation of simulations focused on the relative differences between scenarios (innovation - reference) for energy consumption (direct and indirect) emissions of greenhouse gases (GHGs) and economic values (profits-costs). The predictions were expressed according to two functional units (per farm, per liter of milk) to compare the scenarios. In the results, for reference farm 13, GHG emissions decreased at the farm level, but less per liter of milk sold. For reference farm 14, indirect energy consumption did not decrease for scenario SC14, but scenario SC14Bis (replacement of Holstein race by the Normande race, forage-based diet, concentrates purchases were reduced by 2.4 kg / cow / day max instead of 6.25 kg / cow / day , increase in area with legumes (from 23

to 35.5 ha) , the removal of maize silage in favor of grasslands and elimination of the use of mineral fertilizers) reduced indirect energy consumption by 1% at the farm scale and increased profit by 8%. The innovative scenario for reference farm 15 had lower consumption of indirect energy (by 36%) and lower GHG emissions (by 28%, 31% and 46% respectively for CH₄, CO₂ and N₂O) and lower costs at both the farm scale and per liter of milk. However, a comparison of profits showed an increase in revenue of 27%. For farm 18, compared to the reference scenario, an extensive scenario had lower GHG emissions, while an intensive scenario had lower costs per liter of milk. Sensitivity analysis of farm 13 showed that predictions of milk and crop products were more sensitive to climatic variability over several than costs. However, IFSM does not consider price fluctuations, which would increase variability in costs. The mechanisms common to all farms were to turn to mixed breeds with a high capacity to benefit from forage to focus on self-sufficiency and consumption of crops produced on-farm, while taking into account the production capacity and the climatic and agronomic constraints of the farm.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	1
RESUME	2
SUMMARY	4
TABLE DES MATIERES	6
FIGURES, TABLEAUX, ILLUSTRATIONS	8
SIGLES ET ABREVIATIONS	13
INTRODUCTION	15
DEMARCHE DU PROJET DIESEL	17
CHAPITRE 1: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	20
I. Le secteur laitier Français	20
II. L'utilisation d'énergie par des exploitations laitières	21
I.1 Problèmes énergétiques	21
I.2 Postes de consommation et leviers de réductions pour l'énergie indirecte	23
III. Outils d'évaluation des pratiques agricoles dans les exploitations laitières.....	25
CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES	27
I. Travaux préalables	27
I.1 Typologie des exploitations, évaluation environnementale et scenarios Exploitations 27	
II. INTEGRATED FARM SYSTEM MODEL	32
I.1 Présentation et description- composantes et fonctionnement.....	32
III. PARAMETRES UTILISES POUR LES SIMULATIONS AVEC IFSM	39
I.1 Situation temporelle.....	39
I.2 Paramètres techniques	39
I.3 Données Agronomiques.....	39
IV. Mise en évidence des suppléments, calibration et validation du modèle de simulation	43
I.1 Vérification des suppléments.....	43
I.2 Calibration d'IFSM.....	43
V. ANALYSE DES PREDICTIONS D'IFSM	44
VI. Analyse de sensibilité des productions et des coûts sous variabilité climatique.....	46
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION	47

I.	Vérification des supplémentations, calibration et validation du modèle de simulation....	47
I.1	Supplémentations.....	47
I.2	Calibration et validation du modèle de simulation	50
I.3	Exploitation 13.....	53
I.4	Exploitation 14.....	58
I.5	Exploitation 15.....	63
I.6	Exploitation 18.....	67
I.7	Comparaison des différences relatives des revenus nets entre les scénarios (innovation – référence) pour les différentes exploitations étudiées	73
II.	Analyse de sensibilité des productions et des coûts par rapport à la variabilité climatiques.....	74
I.1	Production.....	74
I.2	Coûts	75
	DISCUSSION GÉNÉRALE	76
	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	80
	BIBLIOGRAPHIE	81
	ANNEXES	I

FIGURES, TABLEAUX, ILLUSTRATIONS

FIGURES

Figure 1 : Démarche du projet DIESEL.....	18
Figure 2 : Postes et facteurs influençant la consommation énergétique d'une exploitation laitière moyenne en France.....	23
Figure 3 : Interface d'IFSM.....	33
Figure 4: Systèmes intégrés dans le modèle IFSM.	34
Figure 5 : Algorithme du modèle IFSM (Rotz <i>et al.</i> , 2012).....	37
Figure 6: Comparaison des prédictions d'IFSM avec les données d'entrée d'EDEN pour l'exploitation 13.	47
Figure 7: Comparaison des prédictions d'IFSM avec les données d'entrée d'EDEN pour l'exploitation 14.	48
Figure 8: Comparaison des prédictions d'IFSM avec les données d'entrée d'EDEN pour l'exploitation 15.	48
Figure 9: Comparaison des prédictions d'IFSM avec les données d'entrée d'EDEN pour l'exploitation 18.	49
Figure 10: Comparaison des consommations d'énergie indirecte et des émissions de GES et à l'échelle exploitation dans les scénarios de référence et d'innovation pour l'exploitation 13.	53
Figure 11: Comparaison des consommations d'énergie indirecte et des émissions de GES par litre de lait vendu dans les scénarios de référence et d'innovation pour l'exploitation 13.	54
Figure 12: Influence de la réduction de la consommation d'énergie indirecte sur les coûts de production à l'échelle exploitation pour l'exploitation 13. Les valeurs sont sur une échelle relative (ligne bleu = 100 %).	55
Figure 13 : Comparaison des coûts de fonctionnement, des consommations d'énergie indirecte entre exploitation de référence 13 et les scénarios correspondants par litre de lait vendu.....	56
Figure 14: Comparaison des consommations d'énergie indirecte et des émissions de GES entre référence et scénarios à l'échelle exploitation pour l'exploitation 14.	58
Figure 15: Comparaison des consommations d'énergie indirecte et des émissions de GES entre référence et scénarios par litre de lait vendu pour l'exploitation 14.	59
Figure 16: Comparaison des coûts de fonctionnement, des consommations d'énergie indirecte entre exploitation de référence 14 et les scénarios innovants à l'échelle exploitation.	60
Figure 17 : Comparaison des coûts de fonctionnement, des consommations d'énergie indirecte entre exploitation des référence 14 les scénarios correspondants par litre de lait vendu.....	61
Figure 18: Comparaison des consommations d'énergie indirecte et des émissions de GES entre référence et scénarios à l'échelle exploitation pour l'exploitation 15.....	63

Figure 19: Comparaison des consommations d'énergie indirecte et des émissions de GES entre référence et scénarios par litre de lait vendu pour l'exploitation 15.	64
Figure 20: Comparaison des coûts de fonctionnement, des consommations d'énergie indirecte entre exploitation des référence 15 les scénarios correspondants à l'échelle exploitation.	65
Figure 21: Comparaison des coûts de fonctionnement, des consommations d'énergie indirecte entre exploitation de référence 15 et les scénarios correspondants par litre de lait vendu.....	66
Figure 22: Comparaison des consommations d'énergie indirecte et des émissions de GES entre référence et scénarios à l'échelle exploitation pour l'exploitation 18.....	67
Figure 23: Comparaison des consommations d'énergie indirecte et des émissions de GES entre référence et scénarios par litre de lait vendu pour l'exploitation 18.	69
Figure 24 : Comparaison des coûts de fonctionnement, des consommations d'énergie indirecte entre exploitation des référence 18 les scénarios correspondants à l'échelle exploitation	70
Figure 25: Comparaison des coûts de fonctionnement, des consommations d'énergie indirecte entre exploitation des référence 18 les scénarios correspondants par litre de lait vendu.	71
Figure 26: Comparaison des valeurs relatives des revenus entre scénarios de référence et scénarios innovants correspondant pour l'exploitation 13, 14, 15 et 18.	73
Figure 27 : Représentation des coefficients de variations des coûts sur 10 années	75
Figure 28: Les indices de prix des intrants dans le secteur du lait de vache en France	75

TABLEAUX

Tableau 1 : Répartition des exploitations du réseau ETRE dans chaque groupe de la typologie	28
Tableau 2 : Groupes d'exploitations et la moyenne de leurs principales caractéristiques. Ei = énergie indirecte	29
Tableau 3: Tableau récapitulatif des scénarios innovants des groupes d'exploitations	31
Tableau 4: Les sections d'IFSM.....	35
Tableau 5 : Paramètres utilisées pour les différentes analyses.....	45
Tableau 6 : Sorties d'IFSM pour l'exploitation 13 après calibration (avec la différence d'IFSM par rapport à EDEN).....	51
Tableau 7: Sorties d'IFSM pour l'exploitation 14 après calibration aux sorties d'EDEN (avec la différence d'IFSM par rapport à EDEN).....	51
Tableau 8: Sorties d'IFSM pour l'exploitation 15 après calibration aux sorties d'EDEN (avec la différence d'IFSM par rapport à EDEN).....	51
Tableau 9: Sorties d'IFSM pour l'exploitation 18 après calibration aux sorties d'EDEN (avec la différence d'IFSM par rapport à EDEN).....	52
Tableau 10: Production annuelle d'aliments pour une analyse sur 10 ans dans une ferme laitière avec 47 vaches laitières dont un effectif total 56 animaux sur 54 hectares de surface.	74

ANNEXES

ANNEXE 1: Comparaison des prédictions relatives d'IFSM calibrées pour l'exploitation 13 par rapport aux données d'entrée d'EDEN. I

ANNEXE 2: Comparaison des prédictions relatives d'IFSM calibrées pour l'exploitation 14 par rapport aux données d'entrée d'EDEN. I

ANNEXE 3: Comparaison des prédictions relatives d'IFSM calibrées pour l'exploitation 15 par rapport aux données d'entrée d'EDEN.II

ANNEXE 4: Comparaison des prédictions relatives d'IFSM calibrées pour l'exploitation 18 par rapport aux données d'entrée d'EDEN.II

ANNEXE 5: Estimations des principaux paramètres biophysiques pour l'exploitation 13..... III

ANNEXE 6: Résumé des émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'échelle exploitation et par litre de lait vendu pour l'exploitation 13 III

ANNEXE 7: Evaluation du changement climatique pour l'exploitation 13..... III

ANNEXE 8: Coûts de fonctionnement et consommation d'énergie indirecte par litre de lait vendu pour l'exploitation 13. IV

ANNEXE 9: Coûts de fonctionnement, consommation d'énergie, et production à l'échelle exploitation au niveau des scénarios de l'exploitation 13 IV

ANNEXE 10: Résumé des émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'échelle exploitation et par litre de lait vendu pour l'exploitation 14 V

ANNEXE 11: Evaluation du changement climatique pour l'exploitation 14..... V

ANNEXE 12: Coûts de fonctionnement et consommation d'énergie indirecte par litre de lait pour l'exploitation 14 V

ANNEXE 13: Coûts de fonctionnement, consommation d'énergie, et production à l'échelle exploitation au niveau des scénarios de l'exploitation 14..... VI

ANNEXE 14: Résumé des émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'échelle exploitation et par litre de lait vendu pour l'exploitation 15 VI

ANNEXE 15: Evaluation du changement climatique pour l'exploitation 15..... VI

ANNEXE 16: Coûts de fonctionnement, consommation d'énergie, et production à l'échelle exploitation au niveau des scénarios de l'exploitation 15 VII

ANNEXE 17: Coûts de fonctionnement et consommation d'énergie indirecte par litre de lait pour l'exploitation 15 VII

ANNEXE 18: Résumé des émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'échelle exploitation et par litre de lait vendu pour l'exploitation 18 VIII

ANNEXE 19: Evaluation du changement climatique pour l'exploitation 18..... VIII

ANNEXE 20: Coûts de fonctionnement et consommation d'énergie indirecte par litre de lait pour l'exploitation 18 VIII

ANNEXE 21: Valeurs relatives des revenus nets en pourcentage entre scénarios de références et scénarios innovants correspondants pour l'exploitation 13, 14, 15 et 18.....	IX
ANNEXE 22: Représentation des coefficients de variations des différents produits sur 10 années	IX
ANNEXE 23: Les coûts de production annuelle pour une analyse de 10 ans dans une ferme laitière avec 47 vaches laitières dont un effectif total 56 animaux sur 54 hectares de surface.	IX
ANNEXE 24: Comparaison des valeurs relatives des coûts de production du litre de lait des différents scénarios exprimées en pourcentage (%).	X
ANNEXE 25: Tableau récapitulatif des différents prix utilisés pour paramétrer IFSM.....	XI
ANNEXE 26: Feuille de sortie "INPUT PARAMETERS" d'IFSM.....	XIV
ANNEXE 27 : Feuille de sortie "SAMMARY OUTPUT" d'IFSM	XXV

SIGLES ET ABREVIATIONS

ACV : Analyse du Cycle de Vie

ARS : Agricultural Research Service

BDD : Base De Données

DIESEL : Diminuer l'Energie en Système Laitier

EDEN : Evaluation de la Durabilité des ExploitationNs

EIA : Environmental Investigation Agency

EQF: EQuivalent litre de Fioul

FAO: Food and Agriculture Organization

GES: Gaz à effet de serre

GJ: Giga Joules

Ha: hectare

IFSM: Integrated Farm System Model

INRA : Institut National Agronomique

ITK : Itinéraire Technique

KWh : Le kilowattheure

MJ : Mégajoules

MS : Matière sèche

N : Azote

OGM : Organisme Génétiquement Modifié

PAC: Politique Agricole Commune

PSWMRU: Pasture Systems and Watershed Management Research Unit

SAU : Surface Agricole Utile

SFP : Surface Fourragère Principale

t MS : Tonne de Matière Sèche

TPA : Traite Par l'Arrière

UE27: Union européenne des vingt-sept

UGB: Unité Gros Bovin

USDA: United States Department of Agriculture

VL: Vache Laitière

WFM: Whole Farm Model

INTRODUCTION

Avec l'augmentation de la population mondiale, qui atteindra 9,6 milliards d'ici 2050 (Nations Unies, 2012), la consommation de lait, aliment riche en éléments minéraux (Desjeux, 1993), en matière grasse et protéique (38 g/L de matière grasse et 32 g/L de matière protéique) (Chatellier *et al.*, 2013), devrait augmenter de 57 % entre 2000 et 2030 (FAO, 2012). Cependant, la majeure partie du lait consommée de nos jours est issue de l'élevage de vache laitière qui sollicite des ressources telles que des produits pétroliers, l'électricité, des produits végétaux et des fertilisants minéraux. Ces ressources en plus de l'énergie de procédé sont responsables de 90 % des dépenses en énergie en élevage laitier (Institut de l'élevage, 2011). Une augmentation de la demande en lait (la production de lait de l'Union européenne devrait augmenter de 6 % entre 2010 et 2021 (Chatellier *et al.*, 2013)) serait donc synonyme de hausse de consommation d'énergie. C'est surtout le fioul et l'électricité (Galan *et al.*, 2007), donc pour la plupart des énergies non renouvelables, qui constituent les principales énergies utilisées pour la production de lait. La majeure partie de l'énergie utilisée pour la production de lait porte sur les intrants, avec 12 % alloué aux fertilisants et 22 % aux aliments achetés (Risoud, 2002). Ces énergies sont considérées comme de l'énergie indirecte, qui est l'énergie utilisée pour la production ou fabrication des intrants, leur acheminement sur l'exploitation, et la production d'outils de travail et d'infrastructures agricole. Cette énergie indirecte représente 57 % à 70 % de l'énergie totale nécessaire à la production de lait (57 %, (Institut de l'élevage, 2006); 65 %, (Dia'Terre, 2010); 70 %, (Meul *et al.*, 2007)). Cependant le moindre coût des intrants par rapport aux prix des terres à l'époque a conduit à des méthodes d'intensification dans l'objectif d'augmenter la production des exploitations laitières. Ces méthodes, qui pour la plupart consistent à augmenter le nombre d'animaux par unités de surface, ne sont pas toujours efficaces, et les exploitations laitières sont fortement dépendantes d'aliments commerciaux et d'intrants. Par contre, ces pratiques ont augmenté la production et souvent la rentabilité des exploitations. Cette tendance a parallèlement engendré la dégradation de l'environnement et une forte consommation d'énergie fossile, donc d'émissions de GES. La nécessité de déterminer des moyens qui minimisent l'utilisation de l'énergie dans les exploitations laitières s'impose vu la demande mondiale de l'énergie qui ne cesse de croître (37 % d'ici 2040 (EIA, 2014)). Cela permettra d'avoir des systèmes de production énergétiquement et économiquement efficaces pour satisfaire les populations.

Une grande partie de l'énergie consommée dans les exploitations laitières étant caractérisée comme énergie indirecte, il est particulièrement intéressant d'analyser les consommations d'énergie indirecte afin de concevoir et proposer des innovations biotechniques et des modes de gestion pour les diminuer, sans augmenter significativement la quantité totale d'énergie consommée, c'est-à-dire augmenter la part de l'énergie directe (énergie utilisée pour les travaux agricoles, le fonctionnement des tracteurs, le chauffage des bâtiments, l'éclairage ...). Cela devrait se faire sans modifier la productivité ni le revenu, et sans dégrader les performances environnementales des exploitations en question. La consommation d'énergie indirecte est essentiellement liée à l'utilisation d'intrants; parallèlement, les prix des intrants sont influencés par ceux des énergies. La réduction de l'énergie indirecte dans les exploitations laitières a ainsi des répercussions tant sur le plan économique qu'environnemental. Sur le plan économique, le prix des intrants et des moyens de production utilisés dans les systèmes de production laitiers en plus d'être indexé par les coûts des énergies a augmenté de 35 % en moyenne entre 2005 et fin 2012 en France (Chatellier *et al.*, 2013). Ces prix ne cessent de varier alors que le prix du lait devrait baisser suite à l'augmentation de la production de lait dans les exploitations laitières et la suppression des quotas laitiers dans l'Union Européenne. Sur le plan environnemental, le dioxyde de carbone (CO₂), le protoxyde d'azote (N₂O) et le méthane (CH₄) sont les principaux gaz rejetés à l'atmosphère lors d'activités agricoles. Ces gaz issus de l'utilisation de l'énergie, des opérations intermédiaires et des activités de production contribuent à l'effet de serre de la planète. Une réduction de l'énergie indirecte dans le fonctionnement des exploitations laitières serait synonyme de réduction des émissions des gaz à effet de serre (GES). En effet, 65 % des GES de l'élevage sont issus des élevages bovins (Gerber *et al.*, 2013). Pour arriver à réduire la consommation d'énergie indirecte, une régulation convenable de l'utilisation des intrants ou l'utilisation de substituts moins énergivores est nécessaire. Ainsi, la conception de scénarios innovants pour une utilisation efficace de l'énergie, en particulier l'énergie indirecte, s'avère particulièrement intéressante. Aussi, le resserrement des marges de profit et l'augmentation des contraintes environnementales rendent la gestion des exploitations laitières de plus en plus difficile. La maîtrise de la consommation d'énergie indirecte s'avère ainsi importante pour assurer la durabilité des exploitations laitières. Pour cela, il faut mettre en place des modes de gestion efficaces à l'aide d'outils capable de représenter les exploitations avec leurs différentes spécificités afin d'évaluer leurs impacts environnementaux et performances économiques. D'où l'objectif du projet DIESEL (Diminuer l'Energie en Système Laitier)

(2012-2015) de définir des scénarios innovants énergiquement efficaces (énergie indirecte) avec moins d'impacts sur l'environnement et économiquement efficaces des exploitations laitières.

DEMARCHE DU PROJET DIESEL

Le projet DIESEL (basé sur une approche enquêtes, modélisation et analyse environnementale, (Figure 1) permet une analyse comparée des pratiques d'exploitations laitières de niveaux d'intensification contrastés, afin de déterminer les relations entre les différents composants du système de production. Il a pour objectif de déterminer des leviers d'action pour diminuer la consommation énergétique en contrôlant les autres facteurs associés (balance de l'azote (N), production globale, ...). Le projet est centré sur la consommation d'énergie indirecte en exploitations laitières vu sa part importante dans la consommation de l'énergie totale dans ces exploitations et ses liens avec les coûts de fonctionnement et leurs impacts sur l'environnement. Les données des enquêtes ont ainsi pour objectif de mettre en évidence des leviers d'actions et des pistes d'innovation afin d'établir des scénarios d'innovation qui seront évalués par analyse environnementale avec l'outil EDEN (Evaluation de la Durabilité des Exploitations), basé sur l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), et par modélisation dynamique avec le logiciel IFSM (Rotz, 2008). Mon stage s'effectue dans le cadre de ce projet, avec pour but d'évaluer via des simulations les voies de réduction de la consommation d'énergie indirecte des exploitations laitières tant sur le plan économiques qu'environnementale à partir d'un panel d'exploitations laitières.

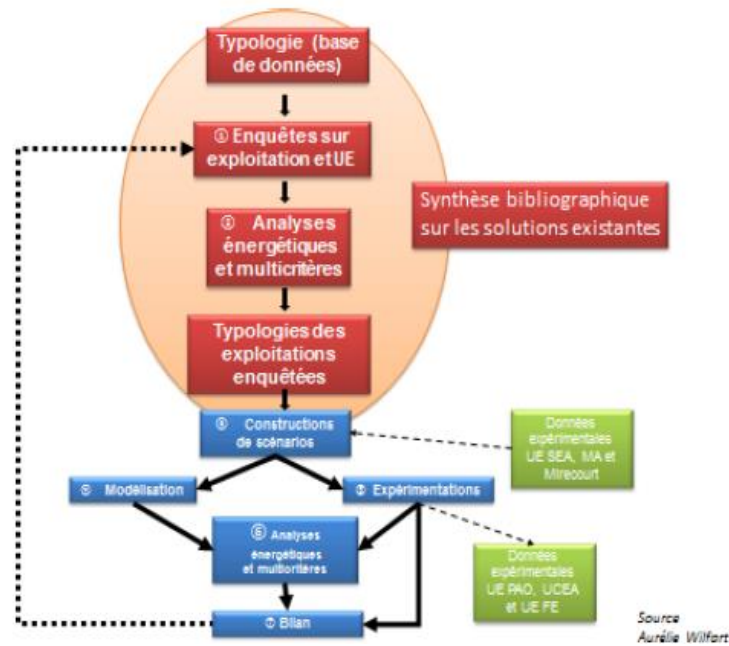


Figure 1 : Démarche du projet DIESEL.

Source : d'après A. Wilfart, communication personnelle

▪ Objectif du stage

Le stage, axé sur la partie modélisation du projet, a pour objectif principal de simuler des scénarios innovants afin d'évaluer leurs consommation d'énergie, leurs impacts environnementaux, et leur efficacité économique et proposer des solutions d'amélioration des exploitations laitières au regard de leur performance énergétique, mais aussi des pistes d'élaboration d'un scénario générique applicable aux exploitations laitières indépendamment de leur typologie en suivant les étapes ci-dessous :

- Maîtriser le fonctionnement d'IFSM,
- Exploiter la base de données de l'outil d'évaluation multicritère EDEN pour en tirer les données d'entrée d'IFSM,
- Compléter les données (manquantes) depuis la littérature ou des données agronomiques, biologiques, et pédoclimatiques nécessaires pour alimenter la modélisation,
- Vérifier qu'IFSM simule les exploitations correctement (étape d'adaptation et de calibration),
- Simuler avec IFSM des exploitations laitières identifiées dans leur typologie dans des scénarios de référence et d'évolution,

- Comparer les sorties des simulations des scénarios pour évaluer l'efficacité des pratiques des scénarios d'innovation en termes de réduction de consommation d'énergie indirecte et des émissions de GES,
- Comparer les sorties des simulations des scénarios pour évaluer l'effet des pratiques des scénarios d'innovation sur les coûts de fonctionnement,
- Identifier les pratiques des scénarios d'innovation qui sont les plus intéressants sur les plans environnemental et économique,
- Faire des propositions d'amélioration à partir des pratiques intéressantes déterminées.

CHAPITRE 1: SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

I. Le secteur laitier Français

En 2011 la production de lait en France a atteint 23,9 milliards de litres de lait vu la diversité des territoires, des systèmes de production et des produits laitiers sur le territoire (Chatellier *et al.*, 2013). Le secteur laitier Français contribue à environ 3% de la consommation mondiale de lait et de produits laitiers assurant ainsi 16,1% de la production laitière européenne. La consommation de lait par personne en France est plus de trois fois supérieure à la moyenne mondiale avec 105 kg équivalent lait par habitant par année (Chatellier *et al.*, 2013). Mais le niveau de production étant élevé avec une faible croissance démographique (soit une population de 0,9 % de la population mondiale en 2010), le secteur laitier Français est plus exportateur (deuxième rang de l'Union européenne des vingt-sept (UE27)) ce qui procure à la France une place importante dans la production de lait en Europe. Occupant ainsi la deuxième place européenne en termes de balance commerciale du secteur laitier avec 3,4 milliards en 2011 (Chatellier *et al.*, 2013). Le secteur laitier Français est d'une importance capitale pour l'économie Française et la région de Bretagne procure à elle seule 10% du cheptel avec une production de 22% de la production nationale de lait en 2013 (INSEE, 2013). Notre échantillon d'exploitation est issu de la région de Bretagne qui se présente comme la première région productrice de lait en France (agrimétiers, 2010). Cependant la production de lait nécessite d'importantes ressources en énergie soit une moyenne de 83 EQF¹ pour la production de 1000 litres de lait (Galan *et al.*, 2007). Il est ainsi important de regarder de près la consommation d'énergie dans le secteur laitier vu la raréfaction des ressources énergétiques et la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES).

¹ Équivalent litre de Fioul (1 EQF = 35,8 MJ)

II. L'utilisation d'énergie par des exploitations laitières

I.1 Problèmes énergétiques

La suppression du système des quotas laitiers dans l'Union Européenne, dont la conséquence serait d'augmenter la production de lait dans les exploitations laitières et la baisse du prix du lait (Bouamra-Mechemache *et al.*, 2008), éveille les consciences sur la réduction des coûts dont la consommation d'énergie dans les exploitations laitières. En France, le coût de l'énergie impacte fortement les revenus des exploitations laitières, qui consomment environ 11 Mtep² par an (rapport ADEME, 2011). Pour l'ensemble de ces exploitations laitières, les dépenses en énergie représentent 8 % des consommations intermédiaires pour les équipements motorisés, 22 % pour l'alimentation du bétail, et 13 % pour la fertilisation (Comptes nationaux de l'agriculture, 2009). Le pourcentage des coûts dû aux équipements motorisés entre 2005 et 2008 peut être élevé selon le type de production : 67 % pour les aliments achetés en élevage granivore, 23 % pour les engrais et amendements pour les céréales et oléo-protéagineux (Comptes nationaux de l'agriculture, 2009). Les coûts de production d'une exploitation dépendent des modes de gestion.

En effet, l'énergie occupe une place primordiale dans le fonctionnement des activités agricoles, notamment l'élevage bovin. Cette importance se situe aussi bien dans le fonctionnement technique que dans les coûts de production des exploitations. En effet, le poste énergie a été évalué à hauteur de 10 % des coûts de production d'un litre de lait en 2004 (Galan *et al.*, 2007). Et cela est d'autant plus important puisque depuis 2003, le prix du fioul à l'échelle mondiale a augmenté de 70 % et celui des engrais azotés de 40 %. Ainsi s'intéresser à la réduction de la consommation d'énergie s'avère intéressant pour anticiper un problème économique. Parallèlement au problème économique, le problème du changement climatique devient de plus en plus préoccupant. Aussi l'optimisation de la consommation d'énergie en élevage bovin permet d'agir sur 35 à 40 % des postes d'émission de GES de la planète (Galan *et al.*, 2007).. Cela pourrait diminuer les poids des émissions de GES françaises engendré par le secteur agricole, qui s'estime à 19,4 % (Dollé *et al.*, 2009). Ce pourcentage est reparti entre trois activités dont l'élevage pour 8,9 %, les sols pour 9,1 % et l'énergie consommée en agriculture pour 1,4 % (Dollé *et al.*, 2009).

²Tonne équivalent pétrole, unité de comptabilité de la consommation d'énergie (1 tep = 11 628 kWh).

Concernant la réduction de la consommation d'énergie dans les exploitations laitières, les études s'appuient sur quatre postes qui représentent environ 80 % des consommations d'énergie d'un élevage laitier (Risoud, 2002) et 90 % de la consommation d'énergie totale en élevage (Institut de l'Élevage, 2006). Ce sont les produits pétroliers, l'électricité, la fertilisation minérale et l'alimentation. Il s'avère qu'environ 80 % de l'énergie électrique consommée en exploitation laitière est indirecte (Upton *et al.*, 2013), sans compter les parts d'énergie indirecte des carburants, de l'alimentation, et des fertilisants minéraux. En effet, La fertilisation azotée minérale est un des postes de consommation d'énergie indirecte les plus importants dans les exploitations laitières. Il faut 55 MJ pour la production et valorisation de 1 kg d'azote minéral (Institut de l'Élevage, 2009). Malgré le poids important de l'énergie indirecte dans la consommation d'énergie des exploitations laitières, peu d'études sont menées sur cette question. Une étude menée sur des exploitations laitières en Irlande a porté spécifiquement sur la réduction de la consommation d'électricité pendant des périodes de forte demande (Upton *et al.*, 2013). Cette consommation d'électricité représente 25 % de l'énergie consommée par ces exploitations laitières. Au total, presque 32 MJ d'énergie sont nécessaires pour produire 1 kg de lait, dont 20 % d'utilisation directe et 80 % d'utilisation indirecte (Upton *et al.*, 2013). Cela confirme l'importance de l'énergie indirecte dans le fonctionnement des exploitations laitières.

I.2 Postes de consommation et leviers de réductions pour l'énergie indirecte

1. Postes de consommation

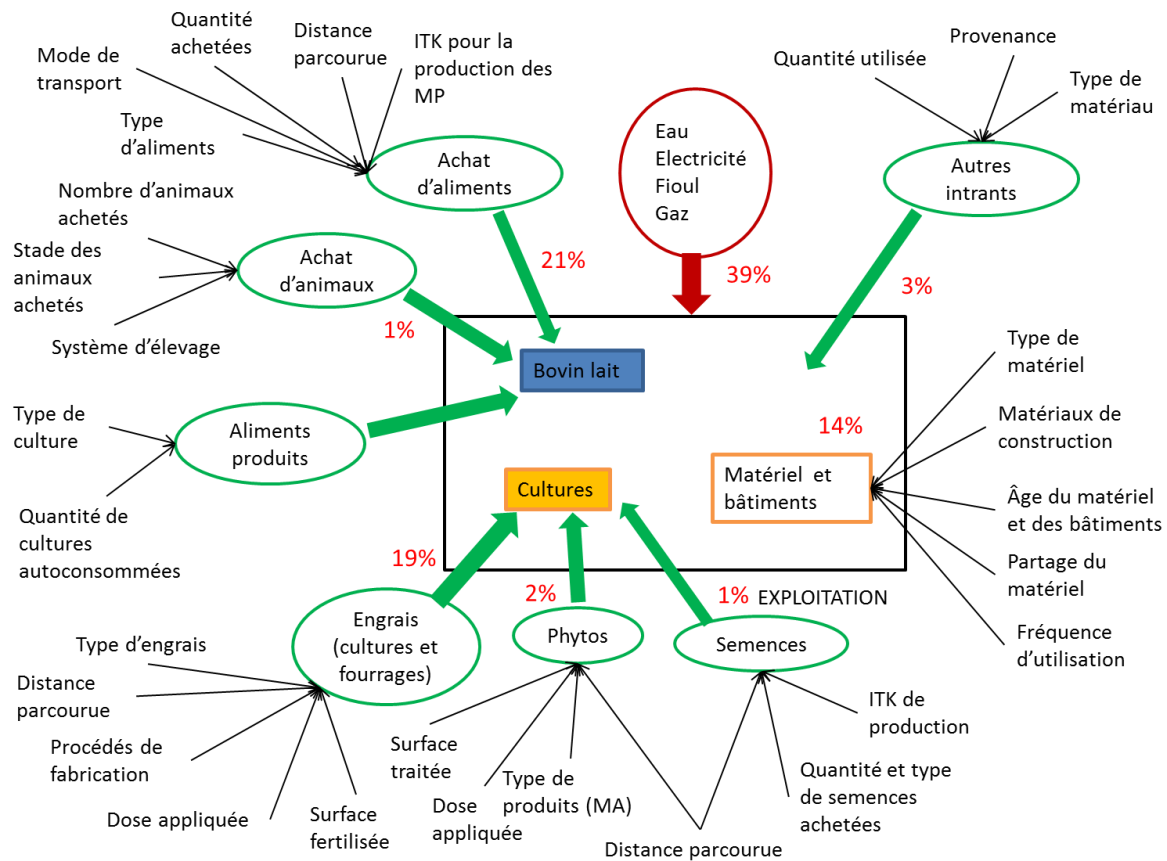


Figure 2 : Postes et facteurs influençant la consommation énergétique d'une exploitation laitière moyenne en France.

Cercles verts : énergie indirecte ; **cercles rouges :** énergie directe. Les valeurs indiquent la contribution de chaque poste à la consommation d'énergie. D'après Bourlet (2013).

L'analyse des postes de consommation de l'énergie (Figure 2) démontre que les fertilisants et l'alimentation sont les postes de consommation d'énergie indirecte les plus importants, avec respectivement 21 % et 19 % de la consommation d'énergie totale (Bourlet, 2013). Un potentiel d'économie d'énergie de 20 % lié à l'optimisation du fonctionnement est valable pour tout type d'exploitation, le poste alimentation présentant la forte marge de réduction d'énergie avec 40 % du total d'énergie (Beguin *et al.*, 2008). Des leviers de réduction ont été définis à partir de ces deux principaux choix directement liés à ces principaux poste de consommation

2. Leviers de réductions de la consommation d'énergie indirecte

Les leviers de réductions d'énergie indirecte ont été définis à partir de deux principaux choix à savoir les leviers définis pour l'alimentation animale et les leviers dans le système de production et gestion du pâturage.

– Les leviers définis pour l'alimentation animale.

Les concentrés de par leur teneur importante en nutriments et énergie sont particulièrement sollicités dans l'alimentation du bétail pour équilibrer les rations à base de fourrages. Cependant, il existe une grande variété de concentrés permettant des possibilités de réduction d'énergie indirecte par substitution de concentrés énergivores (tourteaux de soja, déshydratés...) par des concentrés plus économes en énergie (tourteaux de colza, céréales...) (Beguin *et al.*, 2008) ou une réduction des quantités utilisées. On pourrait également se tenir à utiliser les concentrés moins énergivores disponibles sur les territoires à proximité des exploitations. L'adaptation de la taille des troupeaux à la surface fourragère et aux cultures de l'exploitation pourrait réduire l'importation des fourrages, même si ceux-ci sont moins consommateurs d'énergie que les autres aliments (Mosnier *et al.*, 2012).

La génétique des troupeaux est importante dans des systèmes laitiers reposant sur la valorisation des surfaces fourragères et la réduction de l'utilisation de concentrés. La race Normande serait appropriée à cette situation vu sa forte capacité de valoriser l'herbe sans être lésée par la réduction de concentré dans la ration alimentaire (Delaby and Peyraud, 2009). Cependant la race Normande a une faible capacité de production (6786 kg/VL) que les Prim'Holstein (8347 kg/VL) pour une ration équivalente (Delaby and Peyraud, 2009). De même des stratégies de vêlage consistant à faire coïncider les vêlages des troupeaux avec les périodes de pousse d'herbe seraient particulièrement intéressantes. Dans cette situation, on serait en mesure de procurer aux animaux des ressources en herbe importantes aux périodes de forte lactation (Le Gall *et al.*, 2001).

– **Les leviers dans le système de production et gestion du pâturage.**

La maîtrise de la fertilisation est un enjeu central, tant au niveau de la consommation d'énergie indirecte qu'au niveau des émissions de GES. Il faudrait choisir des fertilisants moins énergivores ou diminuer les quantités utilisées. Par exemple, la réduction d'un excès de bilan azoté de 30 kg/ha permet d'économiser 50 EQF/ha, soit environ 10 % de l'énergie initialement nécessaire (Bochu, 2007). Cependant, cela pourrait impacter les rendements. Une gestion optimale des fertilisants minéraux avec favorisation de la fertilisation organique est ainsi nécessaire pour réduire la consommation d'énergie sans affecter les rendements. Aussi la valorisation des pâturages permet de limiter la consommation d'énergie liée aux activités de récolte, d'épandages et de gestion des fourrages à travers la consommation directe de l'herbe par les animaux. Ces derniers contribuent dans ce cas à la fertilisation via leurs déjections et évitent les consommations d'énergie liées aux activités de récolte et de conditionnement (Peyraud *et al.*, 2010). Une diversification des cultures avec l'introduction de légumineuses favorise la réduction de l'utilisation des fertilisants (Peyraud *et al.*, 2010). De plus l'association de légumineuses et de graminées permettra la production de fourrages de bonne qualité alimentaire. En effet les fourrages issus de ces associations conservés comme ensilage constituent de bon compléments d'ensilage de maïs car ils sont riches en protéine permettant ainsi la réduction d'apport de concentré (Peyraud *et al.*, 2010).

III. Outils d'évaluation des pratiques agricoles dans les exploitations laitières

Ces outils d'évaluation sont basés sur des modèles représentant les processus existants dans une exploitation laitière (production des cultures, récoltes, stockage, alimentation, production de lait et de viande, manutention du fumier, établissement des cultures et le retour des éléments nutritifs au sol). Ce sont ici des modèles permettant l'évaluation *in silico* des modes de gestion sans avoir à faire des expériences sur le terrain qui pourraient être coûteuses ou risquées pour les exploitations en cas de mauvaise conduite des expérimentations. Un grand nombre permettent d'évaluer la rentabilité des exploitations laitières en maintenant ou en réduisant les impacts négatifs à long terme sur l'environnement. Ces outils peuvent également être utilisés pour estimer la consommation d'énergie des exploitations. Dotés de l'automatisme, la capacité à prendre en compte de nombreux paramètres, la robustesse et la rapidité dans les calculs. Les modèles sont souvent utilisés pour étudier les performances du

système sur plusieurs années. La simulation intègre des modèles basés sur les processus élaborés et validés par des données expérimentales.

De nombreux modèles de simulation permettent d'évaluer les pratiques agricoles et la variabilité du climat sur la performance agricole, environnementale et parfois économique des exploitations. Ce sont des modèles tels que WFM (Whole Farm Model), développé en Nouvelle-Zélande (Beukes *et al.* 2008; Wastney *et al.*, 2002), IFSM, développé au Etats-Unis (Rotz *et al.*, 2012), et MELODIE, développé en France par l'INRA (Faverdin *et al.*, 2011). Il existe également des modèles statiques d'évaluation des pratiques agricoles tels que EDEN, un outil d'aide à la décision (van der Werf *et al.*, 2009a) et INDIGO, une méthode qui calcule des indicateurs agro-environnementaux (Bockstaller and Girardin, 2003).

IFSM et EDEN ont été choisis pour réaliser les simulations du projet DIESEL. IFSM a la capacité de simuler les exploitations laitières en tenant compte des détails de leurs spécificités et fournit une vaste gamme de résultats. EDEN, lui, permet à la fois d'effectuer des analyses multicritères et des bilans économiques. Cependant, dans cette partie du projet EDEN est considéré comme une base de données pour alimenter IFSM.

CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES

I. Travaux préalables

I.1 Typologie des exploitations, évaluation environnementale et scenarios Exploitations

1. Typologie des exploitations étudiées

L'étude est axée sur 69 exploitations laitières du réseau ETRE de la Chambre d'Agriculture de Bretagne, réparties sur les quatre départements de la Bretagne. L'échantillon est composé à 22 % d'exploitations en agriculture biologique, le reste étant en agriculture conventionnelle. Les données d'enquêtes ont permis d'établir des typologies d'exploitations laitières selon leur profil énergétique. Les exploitations ont ainsi été réparties dans 18 sous-groupes (Tableau 1). En croisant les achats liés aux aliments et aux engrais des différentes bases, des seuils pour une typologie ont pu être identifiés, à savoir :

- Production de lait (< ou > à 6 000 litres/ha de Surface Fourragère Pâturée (SFP) : ce seuil marque une rupture entre les exploitations biologiques et conventionnelles,
- Pourcentage de maïs fourrage dans la SFP « élevage intensif ou extensif » (fourchettes définies par l'Institut de l'Élevage puis modifiées selon l'avis du Réseau Agricole Durable),
- Consommation d'énergie indirecte pour les aliments par ha de SAU (< ou > à 6 000 MJ),
- Consommation d'énergie indirecte > 50 % pour l'alimentation ou pour les engrais.

Les impacts environnementaux et les consommations d'énergie dans les exploitations ont été ainsi évalués avec l'outil EDEN (van der Werf *et al.*, 2009b) à partir des variations de stocks, cultures, production animale, itinéraires Techniques (ITK), et données économiques (pour l'allocation des impacts entre les productions de l'exploitation. Quatre exploitations en agriculture biologique ont été exclues de l'échantillon car elles n'importaient ni aliment, ni engrais. Il n'y avait pas d'énergie indirecte à diminuer dans ces exploitations biologiques car elles consomment la grande partie de leur énergie sous forme directe.

Tableau 1 : Répartition des exploitations du réseau ETRE dans chaque groupe de la typologie

Lait (l/ha SFP)	% maïs fourrage sur SFP	MJ énergie indirecte des aliments/ha Surface Agricole Utile (SAU)	Énergie indirecte alim. + engrais	Groupe	Effectif
< 6000	< 10 %	> 6000	-	1	3
		< 6000	> 50 % aliment	2	6
			> 50 % engrais	3	1
	10-20 %	> 6000	-	4	1
		< 6000	> 50 % aliment	5	3
			> 50 % engrais	6	5
	> 20 %	> 6000	-	7	0
		< 6000	> 50 % aliment	8	7
			> 50 % engrais	9	5
> 6000	< 20 %	> 6000	-	10	0
		< 6000	> 50 % aliment	11	1
			> 50 % engrais	12	1
	20-40 %	> 6000	-	13	2
		< 6000	> 50 % aliment	14	5
			> 50 % engrais	15	10
	> 40 %	> 6000	-	16	6
		< 6000	> 50 % aliment	17	4
			> 50 % engrais	18	5

Le choix des exploitations a fait partie du travail préalable. Dans le cadre d'un stage du projet, les contraintes de temps ont amenées le stagiaire à se focaliser sur un sous-échantillon des exploitations (groupes 13 à 18). Le stagiaire s'est ainsi penché sur les exploitations produisant plus de lait (> 6000 l/ha SFP) avec moins 20 % de maïs dans le SFP. Pour la modélisation avec IFSM, il fallait un sous-échantillon plus restreint vu le temps nécessaire pour la calibration. Nous nous sommes ainsi focalisé sur les groupes 13, 14, 15 et 18. Les exploitations 13 et 14 ont été choisies comme exploitation de références respectives des groupes 13 et 14 car elles sont dotées d'une surface fourragère de maïs entre 20-40 % sur la SFP. L'exploitation 13 consomme plus de 6000 MJ d'énergie indirecte à travers l'alimentation à l'hectare de SAU et moins de 50 % d'énergie indirecte due à l'alimentation (pareille pour sa consommation d'énergie indirecte due à l'utilisation d'engrais). Cependant l'exploitation 14 a plus de 50 % de sa consommation d'énergie indirecte due à l'alimentation. Quant aux exploitations 14 et 18, en plus de consommer plus de 6000 MJ d'énergie indirecte à travers l'alimentation à l'hectare de SAU, plus de 50 % de leur consommation d'énergie indirecte est due à l'utilisation des d'engrais. L'exploitation 15 a un pourcentage de maïs par surface fourragère compris entre 20 et 40 % sur la SFP alors que le pourcentage correspondant de

l'exploitation 18 est inférieure à 40 % sur la SFP. Les exploitations choisies respectent ainsi tous les critères pour bien représenter leurs groupes respectifs.

2. Caractéristiques des exploitations laitières étudiées

Le Tableau 2 ci-après donne un récapitulatif des exploitations étudiées avec leur caractéristiques détaillées.

Tableau 2 : Groupes d'exploitations et la moyenne de leurs principales caractéristiques.

Ei = énergie indirecte

Groupe	Rappel des caractéristiques des groupes				SAU moyenne (ha)	SFP moyenne (ha)	UGB moyenne	Ei totale moyenne (GJ/ha SAU)	Ei aliment moyenne (GJ/ha SAU)	Ei engrais moyenne (GJ/ha SAU)
	Litres lait/ha SFP	% maïs / SFP	MJ d'Ei aliment/ha SAU	> 50 % aliment ou engrais						
13	> 6000	20-40	> 6000	-	40,98	36,99	53,82	16,55	6,3	2,15
14	> 6000	20-40	< 6000	> 50 % aliment	48,26	34,32	52,96	13,64	4,02	2,78
15	> 6000	20-40	< 6000	> 50 % engrais	42,13	37,73	59,27	11,91	2,39	3,36
18	> 6000	> 40	< 6000	> 50 % engrais	83,4	48,7	63,6	14,4	2,66	5,4

Le stage "Evaluation environnementale" décrit à la suite inclue des exploitations en plus. Mais la complexité et la longueur de temps nécessaire à l'exploration des exploitations par modélisation avec IFSM nous ont amené à nous limiter le nombre d'exploitation à étudier à 4.

3. Evaluation environnementale "Stage en parallèle"

Le stage intitulé évaluation environnementales a été effectué en parallèle avec notre travail. Une évaluation environnementale des scénarios innovants élaborée a été effectuée dans le cadre de ce stage à avec l'outil EDEN.

– Evaluation de la Durabilité des Exploitations

L'outil EDEN est un outil d'évaluation multicritère développé de 2003 à 2006 dans le cadre du GIS Agro-transfert Bretagne (partenariat INRA – Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne) pour l'évaluation multicritère de la durabilité des systèmes de production bovins en Bretagne (van der Werf *et al.*, 2009a). Il réalise des ACV des exploitations laitières en France afin d'évaluer leur durabilité environnementale. Des indicateurs de la durabilité

économique et sociale de l'exploitation sont aussi intégrés à l'outil. EDEN évalue l'activité pendant une année, ce qui est conforme à la méthodologie ACV et aux exercices comptables. L'outil EDEN fonctionne dans un tableur Microsoft Excel® et comporte trois parties principales :

- 3 feuilles de saisie de données,
 - Données structurales** : Cet onglet regroupe toutes les données relatives à la structure en terme de superficie, Unité Gros Bovin (UGB), conduite du troupeau, alimentation, production laitière, assolement, achats et ventes d'engrais, de matières première ou d'aliments pour les animaux, consommation de produits phytosanitaires... ;
 - Matériel** : il récence tous les machines agricoles présent sur l'exploitation ;
 - Données économiques et sociales** : on y trouve un petit nombre de données économiques (prix des produits, aides et subventions, charges, qualité de vie, implications sociales, qualité du travail), car les utilisateurs d'EDEN sont surtout focalisés sur les analyses environnementales.
- 4 feuilles de références (coefficients, facteurs d'émission et facteurs de caractérisation),
- 15 feuilles de calcul et de présentation de résultats.

Une fois les trois feuilles de saisie remplies, l'utilisateur passe directement à l'analyse et à l'interprétation des résultats, qui permettent de situer chaque exploitation évaluée par rapport à une moyenne des exploitations de systèmes similaires. Les agriculteurs sont encouragés à s'appuyer sur ces analyses pour entreprendre des actions de réduction des impacts environnementaux liés à leurs activités, aux pratiques ou aux intrants utilisés (van der Werf *et al.*, 2009a). Le stage en parallèle a consisté à définir des leviers de réduction d'énergie dans les exploitations laitières selon leur typologie. Le stagiaire s'est focalisé sur les postes les plus consommateurs d'énergie, à savoir les achats d'aliments et d'engrais. La création de scénarios innovants pour la réduction de la consommation d'énergie indirecte en exploitation laitières s'est axée sur ces deux postes. Les leviers de réduction d'énergie ont ainsi été définis à partir de deux principaux choix : soit acheter pour la même quantité/qualité d'un produit qui consomme moins pour être fabriqué/produit, soit changer son système de production pour diminuer l'utilisation de produits consommateurs d'énergie indirecte. Une fois les leviers définis, les scénarios d'innovation ont été élaborés à partir des exploitations de références sélectionnées. L'élaboration des scénarios c'est fait en tenant compte des typologies des

exploitations avec pour objectif principal de réduire la consommation d'énergie indirecte et les impacts des exploitations sur l'environnement ont été évalués avec EDEN. Les données utilisées pour l'analyse multicritère avec EDEN sont toutes issues de l'agriculteur, pour l'essentiel tirées de ses documents, réglementaires ou non, tels que la comptabilité, le bilan de campagne du contrôle laitier, le plan de fumure, et le plan d'épandage. Notre travail s'inscrit dans la phase suivante du projet, qui consiste à simuler les scénarios innovants afin d'évaluer leurs efficacité énergétique, économique et leurs impacts sur environnement et proposer des solutions d'amélioration de chaque scénario et des pistes pour l'élaboration d'un scénario générique.

4. Scénarios

Les scénarios sont récapitulés dans les tableaux ci-après avec les leviers qui ont permis de les définir.

Tableau 3: Tableau récapitulatif des scénarios innovants des groupes d'exploitations

Scénario	Leviers
13	<ul style="list-style-type: none"> • Diversification des cultures utilisées pour les concentrés pour les vaches laitières(VL), (introduction de blé et d'orge en plus du maïs grain déjà existant, mais suppression du triticale), • Suppression du maïs ensilage au profit des surfaces en herbe, • Apport de concentré réduit été comme hiver (2,4 kg/VL/j max), • Normande remplace la race Prim'Holstein pour une meilleure valorisation de l'herbe, • Augmentation des surfaces avec légumineuses (de 23 à 35,5 ha)
13 BIS	Ce scénario fonctionne selon les mêmes principes que scénario SC 13 sans utilisation des fertilisants minéraux, et les apports des fertilisants organiques ne changent pas.
14	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution de la surface de maïs ensilage (de 15,6 à 6,6 ha), • Augmentation de la surface en herbe (de 24,6 à 29,8 ha), permettant d'augmenter le nombre de jours au pâturage, • Apport en concentré allant de 2,4 à 3,4 kg/VL/j selon la période de l'année, • Production de blé, orge, maïs grain et pois sur l'exploitation qui servent entre autre à nourrir le bétail, • Implantation de légumineuses dans les prairies temporaires (de 0 à 18 ha avec légumineuses).
14 BIS	<ul style="list-style-type: none"> • Les mêmes principes que le scénario 14, mais la surface de maïs égale celle du blé : 13,2 ha, • L'herbe est cultivée en association de 50 % de légumineuses, • Les doses de fertilisant ne changent pas pour les différentes cultures à part la non utilisation d'engrais minéraux sur l'herbe, • Les animaux restent dehors toute la journée pendant la saison de pâturage.
15	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution des achats de concentrés pour les animaux, • Diminution des effectifs, • Diminution d'utilisation des engrais minéraux (N, P et K), notamment de l'ammonitrate

	<ul style="list-style-type: none"> avec une réduction de 80 %, • Augmentation de la surface avec légumineuses (de 7,5 à 14,82 ha), • Réduction de 2 ha des surfaces en maïs ensilage.
18A	<ul style="list-style-type: none"> • Apports en concentrés importants (+53 %), • Alimentation basée sur le maïs ensilage (augmentation des surfaces qui passent de 23,9 à 30,8 ha), • Pas d'herbe pâturée car VL en bâtiment toute l'année, mais apport de fourrages autre que le maïs ensilage (foin + paille), • Orge, maïs grain et colza en grande culture en plus du blé • Mise en place de CIPAN.
18B	<ul style="list-style-type: none"> • Quantité de concentrés dans la ration des VL équivalente au scénario de référence ($\approx 1450 \text{ kg/VL/an}$), • Diminution de plus de moitié de la surface de maïs ensilage (de 23,9 à 10 ha), • Augmentation des surfaces en grande culture avec orge, maïs grain et colza en plus du blé, • Une rotation permettant l'autoconsommation (maïs ensilage, maïs grain, orge, foin), • Une seconde rotation en culture de vente, • Culture de pois en dérobé, • Mise en place de méteil.

II. INTEGRATED FARM SYSTEM MODEL

I.1 Présentation et description- composantes et fonctionnement

1. Présentation et description

Le modèle de simulation IFSM (Rotz *et al.*, 2012), fruit de 25 années de recherche, est un modèle de simulation d'une exploitation laitière prenant en compte la récolte des cultures et la production de lait ou de viande bovine. En simulant les modes de gestion d'une exploitation, le modèle permet d'explorer des alternatives pour rendre sa gestion optimale et durable. Le modèle évalue des impacts environnementaux (par ex., émissions de GES) et économiques des modes de gestion de l'exploitation sous la variabilité climatique (Jégo *et al.*, 2014). IFSM a été développé par l'Agricultural Research Service de l'United States Département of Agriculture (ARS-USDA). IFSM simule toutes les principales opérations d'une exploitation. Ceci permet la représentation des principales interactions entre les nombreux processus biologiques et physiques dans les exploitations.

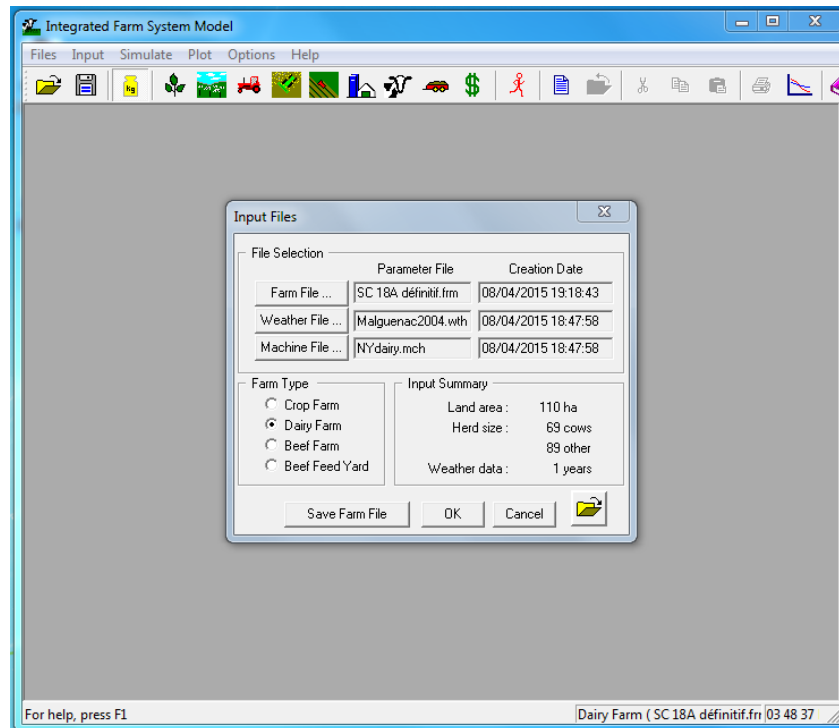


Figure 3 : Interface d'IFSM

Pour simuler une exploitation, l'information est acheminée dans le modèle à partir de trois fichiers : machines, météo et exploitation. Deux des trois fichiers sont modifiés par l'interface d'IFSM où des sections (Tableau 4) sont représentées sous forme de formulaires.

– Fichier machines

Le fichier machine est composé des différentes machines de l'exploitation, avec leur taille, les coûts initiaux, âges, facteurs d'opération et les facteurs de réparation. Il contient pour la plupart des machines américaines, qui sont plus puissantes (et donc plus consommatrices d'énergie) que celles utilisées en France.

– Fichier météorologique

Le fichier météorologique contient des données météorologiques pour plusieurs années pour une localisation donnée. Le fichier contient des données journalières sur le rayonnement solaire (MJ/m^2), la température moyenne ($^{\circ}\text{C}$), la température maximale ($^{\circ}\text{C}$), la température minimale ($^{\circ}\text{C}$), la précipitation totale (mm), et la vitesse du vent (m/s) (Rotz *et al.*, 2012).

– Fichier de l'exploitation

Le fichier de paramètres d'exploitation contient des données décrivant l'exploitation, tels que les différentes cultures et surfaces cultivées (ha), caractéristiques du sol, les équipements et les structures utilisées, le nombre d'animaux les différentes catégories d'âge (vaches allaitantes, plus d'un an, moins d'un an), la récolte, le travail du sol, le manutention du fumier, et les prix des entrées et sorties agricoles (Rotz *et al.*, 2012).

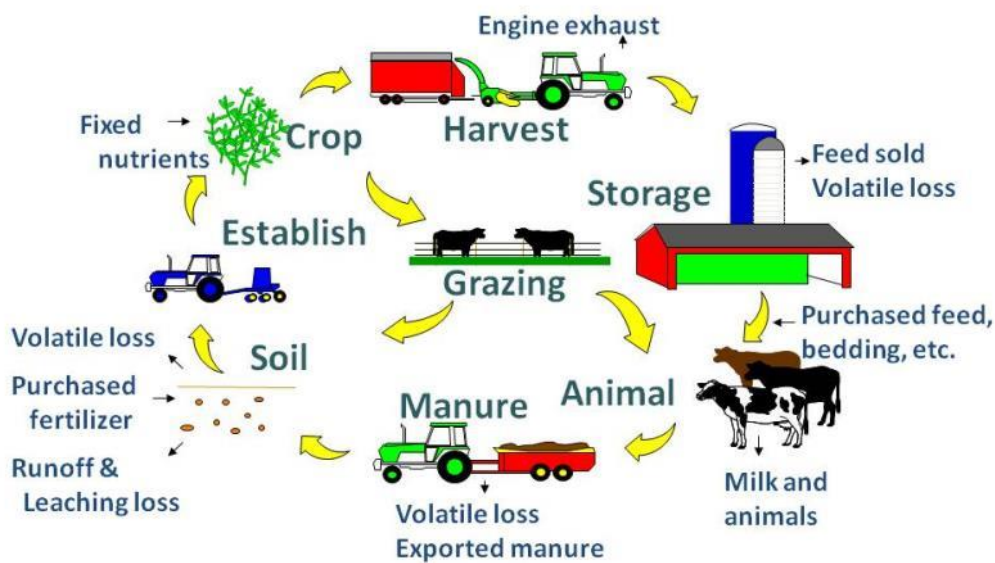


Figure 4: Systèmes intégrés dans le modèle IFSM.

Source : (Rotz, 2008)

Les systèmes intégrés dans IFSM (Figure 4) sont paramétrés à partir des sections répertoriées dans le tableau 4.

Tableau 4: Les sections d'IFSM

Section	Description
Cultures et sol	<p>Culture : La surface occupée par la luzerne, l'herbe, le maïs, les céréales, et le soja, ainsi que la surface louée et possédée par l'agriculteur sont définie dans cette section</p> <p>Sol : Il s'agit ici de définir la profondeur du sol, son acidité, sa teneur en phosphore, en argile et en limon. Des options de choix pour la qualité et des d'intervalles existent dans le formulaire pour définir ces paramètres.</p>
pâturage	Sert à définir les surfaces pâturées et fauchées à différentes périodes de l'année.
machines	Offre des choix d'équipements et de moteur. Pour moteurs essence et diesel, la consommation de carburant (litres/h) est une fonction de la taille du tracteur ou du moteur utilisé et la charge sur le moteur.
Travail du sol, d'ensemencement	Sert à définir les dates de semis des cultures avec les travaux du sol. Les éléments relatifs à l'ITK sont renseignés dans la rubrique labour et planification, et la rubrique Récolte (rubriques « Tillage and planning » et « Harvest ») d'IFSM.
Récoltes	Sert à définir les dates de récoltes des cultures
Stockage des récoltes	IFSM utilise un modèle de silo complet qui comprend cinq phases du processus d'ensilage : pré-étanchéité, la production d'effluents, fermentation, infiltration, feed-out. Cette section sert à sélectionner les dispositifs de stockage et définir leurs dimensions et aussi les paramètres de traitement et de conservation des productions.
Animaux et alimentation	<p>Les effectifs des différentes catégories d'animaux sont ici définis (le nombre de vaches allaitantes, les animaux de moins d'une année, les animaux de plus d'un an), la race des troupeaux, la stratégie de vêlage, le taux de renouvellement des troupeaux avec le nombre de litre de lait produit par vache à l'année.</p> <p>Les types d'équipements utilisés pour la traite et les rations alimentaires (chaque composante de la ration est représentée par son pourcentage dans la constitution de la ration)</p>
Fumiers	Les types de fumier est défini avec ses caractéristiques, la capacité du dispositif de stockage, le temps de stockage, la quantité de fumier importé
Economique	Sert à définir les prix des ressources, produits et équipements

2. Composantes d'IFSM

– Sous modèles

IFSM a neuf principaux sous-modèles :

- Cultures et sol,
- pâturage,
- machinerie,
- travail du sol et la plantation,
- récolte,
- stockage des récoltes,
- troupeaux et l'alimentation,
- manutention du fumier,
- analyse économique

Ces sous modèles représentent les principaux systèmes intégrés en interaction (Figure 4).

– Algorithme et fonctionnement d'IFSM

L'algorithme du modèle se présente comme suit :

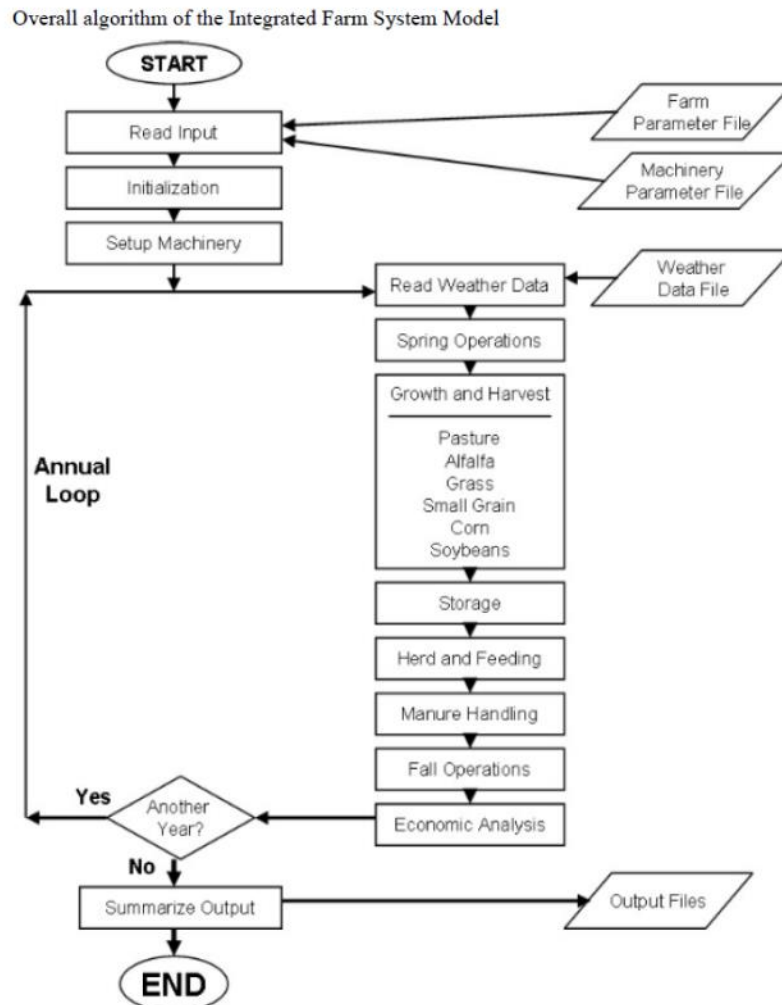


Figure 5 : Algorithme du modèle IFSM (Rotz *et al.*, 2012)

L'algorithme fonctionne de manière séquentielle : dans un premier temps les informations des fichiers « exploitation » et « machines » (Figure 5) constituent les données d'entrée. Ces informations sont initialisées afin de d'identifier les modes d'action adaptés aux différentes données de l'exploitation et aux activités définies. Après cette étape, les données climatiques sont prises en compte avant d'actionner les sous modèles « culture ». Les étapes de récolte et de stockage terminent la modélisation de l'atelier cultural avant la prise en compte des activités d'élevage. Les sous-modèles « troupeau », « alimentation » et « manutention de fumier » sont actionnés en interaction.

L'étape qui suit est celle du fauchage du foin et des fourrages destinés à l'alimentation des animaux. Le modèle économique termine la simulation annuelle de l'exploitation. IFSM

stocke les résultats de l'année et passe à la simulation de l'année suivante. Après plusieurs itérations, IFSM donne les résultats moyennés sur le nombre d'années à travers quatre fichiers de sortie (facultatifs):

- **Tables de paramètres (INPUT PARAMETERS)**

Elle résume les données d'entrée utilisées pour une simulation. Ces données sont regroupées par grandes sections de l'entrée de modèle (ANNEXE 26).

- **Résumé (SUMMARY OUTPUT)**

Cette page fournit des informations sommaires sur le rendement des cultures, les aliments achetés et vendus, le fumier produit, la ventilation de la production d'aliments, la manutention du fumier, les charges d'exploitation et la rentabilité de l'exploitation. Les valeurs sont données pour la moyenne et l'écart-type sur toutes les années simulées (ANNEXE 27).

- **Rapport complet (FULL OUTPUT)**

Cette page donne les valeurs de production, d'émissions, économique et de consommation d'énergie correspondantes à chacune des années simulées ainsi que la moyenne et la variance au cours de ces années.

- **Sortie en option (OPTIONAL OUTPUT)**

Elle permet d'observer les détails les plus complexes d'une simulation. On y trouve des informations détaillées sur les opérations concernant la croissance des cultures, le travail du sol, les opérations de récolte de fourrage, les détails annuels sur les machines, le carburant, l'utilisation de la main-d'œuvre, la ventilation et les rations alimentaires.

III. PARAMETRES UTILISES POUR LES SIMULATIONS AVEC IFSM

I.1 Situation temporelle

La période d'exercice des données dans EDEN couvre les années 2004 et 2005 selon les exploitations. Nous avons utilisé des données de la station météorologique de Malguénac (Morbihan) (Météo France) pour les années d'exercice, pour toutes les simulations. L'utilisation d'un seul jeu de données météo pour simuler les 4 exploitations bretonnes semblait suffisant, étant donnée leur localisation proche et l'aspect comparatif des scénarios.

I.2 Paramètres techniques

Le nombre de machines, les types et leurs caractéristiques sont définis en fonction de la particularité de chaque exploitation de la base de données EDEN. Les capacités et les puissances des machines agricoles ont été ajustées pour correspondre aux matériels français. Certaines activités nécessitant des machines non définies dans la BDD, des machines à caractéristiques proches ont été paramétrées pour permettre les prédictions. Les facteurs de sélections reposaient sur le poids et la puissance. Dans certaines situations, nous avons été obligés d'ajouter des machines pour éviter les messages d'erreurs (Rotz *et al.*, 2012).

I.3 Données Agronomiques

Les données agronomiques représentent la plupart les caractéristiques du sol, les itinéraires techniques cultureux et des caractéristiques d'occupation du terrain.

1. Le sol

Pour représenter des sols bretons, nous avons choisi un sol limoneux profond (120 cm) avec un pH entre 4 et 6 (Environnement en Bretagne, 2008). Les options de choix pour ces différentes caractéristiques (profondeur, composition du sol, niveau de phosphore) ont directement été sélectionnées dans la section d'IFSM servant au paramétrage du sol.

2. Itinéraires techniques cultureux

Les différents ITK ont été définis selon les recommandations du Syndicat Agricole (2011), en tenant compte des associations de cultures et des rotations définies dans les scénarios, pour formuler nos hypothèses et choisir les données utilisées pour représenter les exploitations dans IFSM.

– **Mais**

- **Labour** : à partir du 1^{er} décembre.
- **Ameublissement de la terre et élimination de mauvaises herbes**: fixé à partir du 15 décembre.
- **Conditionnement/cultivateur de champ** : fixé au 20 décembre.
- **Semis** : fixé au 20 avril.
- **Récolte d'ensilage de maïs** : à partir du 15 septembre.
- **Récolte grain de haute humidité** : 1^{er} octobre.
- **Récolte grain de maïs** : 15 octobre.
- **Hauteur de coupe de l'ensilage** : 10 cm.

– **Luzerne**

- **Labour** : à partir du 25 décembre.
- **Ameublissement de la terre et élimination de mauvaises herbes**: fixé à partir du 1^{er} janvier.
- **Conditionnement/cultivateur de champ** : fixé au 10 avril.
- **Semis** : fixé au 25 avril.
- **Récolte** : 4 coupes espacées de 45 jours chacune, chacune considérée comme de l'ensilage sauf la deuxième, qui est du foin récolté sous forme de balle.
 - **Coupes** : le 2 juin, le 17 juillet, le 31 août, le 15 octobre.

– **Prairie (herbe)**

- **Labour** : à partir du 15 septembre.
- **Ameublissement de la terre et élimination de mauvaises herbes**: fixé à partir du 31 décembre.
- **Conditionnement/cultivateur de champ** : fixé au 20 janvier.
- **Semis** : fixé au 10 février.
- **Récolte se fait en 4 coupes espacées de 45 jours chacun** :
 - **Coupes** : le 1^{er} avril, le 16 mai, le 30 juin, le 14 novembre.

– **Céréales (orge, avoine, blé et seigle)**

- **Labour** : à partir du 10 août

- **Ameublement de la terre et élimination de mauvaises herbes:** fixé à partir du 25 août.
- **Conditionnement/cultivateur de champ :** fixé au 20 ou 26 septembre selon les exploitations.
- **Semis :** fixé au 10 novembre.
- **Récolte d'ensilage :** fixé à partir du 1^{er} juillet.
- **Récolte grain de haute humidité :** fixé au 21 juillet.
- **Récolte grain de maïs :** fixé au 22 juillet.

3. Le stockage : Structure des dispositifs de stockage

Il n'y a pas assez d'informations sur les dispositifs de stockage des récoltes dans EDEN ; or, IFSM a besoin des caractéristiques des dispositifs de stockage sur l'exploitation pour effectuer les simulations. IFSM peut représenter cinq types de dispositif : silo étanche, silo de soute, silo-tour, sac pressé, et ensilage en balle. Les dimensions de ces dispositifs sont ajustables en fonction de la qualité nutritionnelle et physico-biologique à maintenir, le volume maximum de récolte et du type de récolte (par exemple, le grain ou le foin est mieux stocké dans un silo, l'ensilage est stocké dans des sacs pressés ou en balles d'ensilage). Cependant, selon les exploitations, des dispositifs supplémentaires et/ou assez surdimensionnés sont nécessaires pour faire les simulations avec IFSM.

– **Traitement de préservation:**

Les exploitations étudiées n'utilisaient pas de traitement pour la préservation. Or, dans IFSM, la dégradation des produits stockés est une fonction du dispositif de stockage, de la qualité initiale des produits, du temps et du traitement appliqué aux produits. Ce dernier étant un paramètre important, pour mieux adapter IFSM (configuré aux exploitations américaines) aux conditions météo bretonnes, nous avons inclus un traitement de préservation pour garantir le maintien des récoltes.

– **Alimentation des animaux**

IFSM simule les pratiques de l'exploitation pour atteindre un niveau de production du lait défini en litres/vache/année. En effet, les simulations visent un objectif de production du lait sous contraintes climatiques et de production. Les paramètres considérés sont :

- La production de lait exprimée en kg/vache/an dans EDEN a été convertie en l/vache/an en divisant par 1,033.
- Le taux de renouvellement a été fixé à 30 %. Dans la littérature ce taux se situe entre 20 à 35 % (Peyraud *et al.*, 2010) .
- Les catégories d'animaux : le nombre de vache allaitantes, génisses et mâles laitiers 0-1 an, et génisses et mâles laitiers +2 ans.
- La stratégie de vêlage : par défaut on considère un vêlage par vache et par an
- Le type de salle de traite : On utilise les valeurs d'IFSM par défaut. Correspond dans la bibliographie à une salle de traite de 2 x 20 soit 40 vaches - un pas de 0.70 m traite par l'arrière (TPA) ligne basse double équipement
- La composition de la ration est issue d'EDEN, et les composants sont exprimés en pourcentage afin de les renseigner dans IFSM, les paramètres pris en compte sont les suivant :
 - ✓ Foin sec minimum dans la ration des vaches
 - ✓ Niveau de phosphore
 - ✓ Niveau de protéines
 - ✓ Ratio de grain/fourrage
 - ✓ Complément azoté

Les méthodes d'alimentation ont été définies par le stagiaire chargé d'élaborer les scénarios innovants.

- Données économiques

Les prix initialement renseignés par défaut dans IFSM sont des prix américains. Nous avons réalisé une recherche bibliographique afin de se rapprocher des prix des produits et des activités agricoles en France; pour certains nous avons fait des estimations en fonction des prix mondiaux (ANNEXE 25).

IV. Mise en évidence des suppléments, calibration et validation du modèle de simulation

I.1 Vérification des suppléments

IFSM a tendance à réguler les productions par des importations et des exportations pour atteindre les objectifs de production laitière. Lorsque les productions de cultures et de fourrages ne sont pas suffisantes pour atteindre cet objectif, le modèle compense par des achats d'aliments. Les surplus de production sont mis sur le marché en fin d'année pour faire le bilan annuel. Les suppléments sont particulièrement observés pour les produits suivants :

- **les grains.** Nous avons regroupé la production de céréales et de maïs car lors de la supplémentation IFSM considère les productions de grain comme une seule entité. De plus, le processus de production privilégie la production d'ensilage à celle des grains de maïs. Cela fait intervenir souvent des achats de grains dans les résultats.
- **le foin.** Il s'agit ici du foin consommé par les animaux durant les périodes de prairie en plus des achats des foin effectués pour les nourrir en bâtiment.
- **la paille, le foin et l'ensilage.** Nous avons regroupés ces trois produits pour aborder l'effet de suppléments dans IFSM.

Les estimations de ces catégories sont comparées aux données EDEN pour vérifier les effets de suppléments d'IFSM.

I.2 Calibration d'IFSM

Les prédictions d'IFSM doivent coïncider avec les données d'entrée d'EDEN afin qu'IFSM puisse représenter chaque exploitation aussi bien que possible. Nous avons donc calibré les simulations d'IFSM jusqu'à ce que leurs prédictions correspondent aux données EDEN. Le but de cette étape est d'établir l'adéquation entre les représentations faites par IFSM et EDEN, chacun étant une représentation du système réel. Le grand nombre de processus représentés par IFSM et EDEN a nécessité que la calibration d'IFSM se focalise sur les paramètres les plus importants pour les objectifs de l'étude à savoir :

- **la consommation d'énergie indirecte**
- **la consommation d'énergie directe**
- **la consommation totale d'énergie**
- **la production nette de grains**
- **les vitamines et minéraux**
- **les tourteaux de soja achetés**
- **la quantité de foin consommée**
- **la production nette de paille et de foin et d'ensilage.**

Pour calibrer IFSM, nous avons fait varier les paramètres de contrôle (par exemple, facteurs d'ajustement de rendement, dates de semis et/ou de récolte, les capacités et les types de dispositifs de stockage). Le taux d'humidité maximum avant récolte a été également ajusté pour l'herbe et le foin afin de maximiser leurs rendements. On a augmenté/réduit les surfaces fauchées mais aussi le nombre d'équipements afin d'augmenter ou réduire les rendements de fourrages. IFSM étant composé de plusieurs sous modèles, la calibration a été particulièrement minutieuse et a nécessité du temps.

La fin du processus de calibration, a été initiée une fois qu'au moins 5 des 8 paramètres choisis différaient de moins de 55 % des valeurs respectives d'EDEN.

V. ANALYSE DES PREDICTIONS D'IFSM

Une fois IFSM calibré pour le scénario de référence de chaque exploitation, les scénarios d'innovation ont été simulés sur leur année d'exercice respective. Bien que le temps d'évaluation soit d'une année, il est possible de simuler plusieurs années avec IFSM. Les mesures sont ainsi déterminées pour chaque année climatique, et une moyenne globale est calculée sur l'ensemble des années simulées. Les analyses se sont appuyées sur les paramètres de sortie répertoriés dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Paramètres utilisées pour les différentes analyses

PARTIE DE LA FEUILLE DE RESULTAT	PARAMETRES
Émissions quotidiennes et annuelles de composés gazeux importants	<input type="checkbox"/> Méthane (CH ₄) <input type="checkbox"/> Protoxyde d'azote (N ₂ O) <input type="checkbox"/> Dioxyde de carbone (CO ₂)
Coûts de production annuels	<input type="checkbox"/> Coûts du matériel <input type="checkbox"/> coûts des installations <input type="checkbox"/> coûts des énergies <input type="checkbox"/> coût du travail des salariés <input type="checkbox"/> coût des opérations par tiers <input type="checkbox"/> coût des intrants <input type="checkbox"/> coût net de la nourriture et de la litière achetée <input type="checkbox"/> achat des animaux d'élevage et les différents frais <input type="checkbox"/> coût du transport du lait et les frais de marketing <input type="checkbox"/> taxes foncières <input type="checkbox"/> revenus de ventes de lait
Production annuelle d'aliments	<input type="checkbox"/> Quantité de lait vendue
Empreinte environnementale	<input type="checkbox"/> Energie directe consommée (somme de toutes les énergies de la partie sauf l'énergie non allouée à la production de lait et l'énergie de production d'intrants) <input type="checkbox"/> Energie indirecte consommée (énergie pour la production d'intrants) <input type="checkbox"/> Energie totale consommée (somme de l'énergie directe et de l'énergie indirecte consommées)

Pour les analyses, nous nous sommes focalisés sur les différences relatives entre les scénarios (innovation – référence) pour la consommation d'énergie (directe et indirecte), les émissions de GES et les valeurs économiques (revenus-coûts). Pour comparer les scénarios, nous avons exprimé les prédictions selon deux unités : pour l'exploitation entière et par litre de lait produit. Pour terminer, des solutions d'amélioration des scénarios ont été proposées pour les exploitations étudiées.

L'analyse économique s'intéresse généralement au revenu de l'exploitation mais IFSM ne permet pas d'explorer cet aspect. Cependant IFSM permet d'évaluer les coûts. Cependant notre analyse est faite dans le but d'avoir des informations sur les différences de coûts de production entre scénario innovants et scénarios de référence correspondant.

VI. Analyse de sensibilité des productions et des coûts sous variabilité climatique

Pour analyser la sensibilité des productions et des coûts à la variabilité climatique, nous avons simulé l'exploitation 13 pendant dix années consécutives avec des paramètres climatiques de la station météo de Malguénac de 1997 à 2006.

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

I. Vérification des suppléments, calibration et validation du modèle de simulation

I.1 Supplémentations

La supplémentation s'explique par le fait qu'IFSM achète des produits quand il prédit que l'exploitation n'en produit assez.

1. Exploitation 13

La production de fourrage (108 t MS dans IFSM) est complétée par des achats de 55 t MS, soit une différence de 23 t MS avec la quantité de fourrage issue de l'exploitation qui est de 186 t MS. Le foin et l'ensilage (pris comme une même production) ont des quantités qui diffèrent de 34 t MS, la valeur prédite par IFSM étant plus petite (226 t MS). La faible production de grain dans IFSM est complétée par un achat pour donner 124 t MS, ce qui se rapproche de la production de grain réelle (111 t MS), dont une partie est destinée au marché.

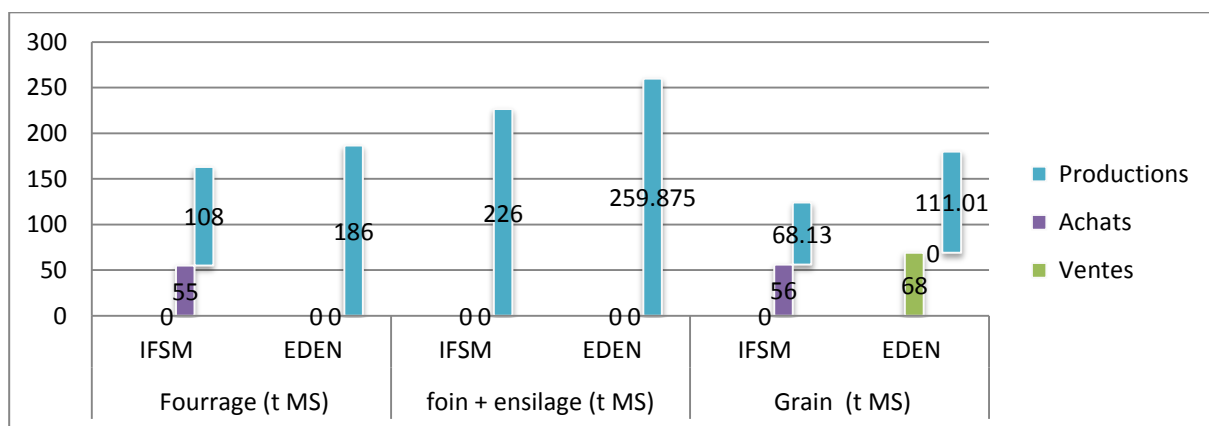


Figure 6: Comparaison des prédictions d'IFSM avec les données d'entrée d'EDEN pour l'exploitation 13.

2. Exploitation 14

La production de fourrage, prédite à 36 t MS, est complétée par des achats de 87 t MS. L'ensemble se rapproche de la quantité de fourrage d'EDEN (129 t MS). Le foin et l'ensilage pris comme un seul produit a des quantités réelles produites (EDEN) et estimée (IFSM) qui diffèrent par 107 t MS. La faible production de grain dans IFSM (101 t MS) est complétée par

des achats pour rapprocher la production d'EDEN (210 t MS). Toutefois, une partie de la production estimée par IFSM est mise en vente (toutes les céréales étant considérées comme grains, les grains vendus ne sont pas identiques aux grains achetés). On a ainsi une différence entre valeur estimée par IFSM et valeur d'EDEN de 60 t MS.

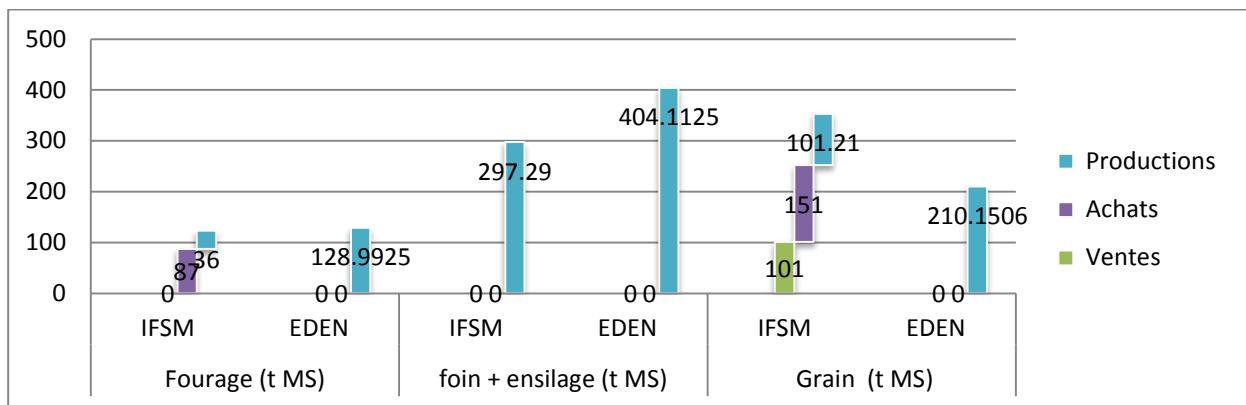


Figure 7: Comparaison des prédictions d'IFSM avec les données d'entrée d'EDEN pour l'exploitation 14.

3. Exploitation 15

Les entités fourrage, foin plus ensilage et grains ont des différences entre valeurs estimées par IFSM et valeur réelle issues d'EDEN respectives de 136, 40 et 68 t MS. La particularité de cette exploitation est d'avoir plusieurs cultures, d'où la difficulté d'apprécier la tendance de supplémentation d'IFSM.

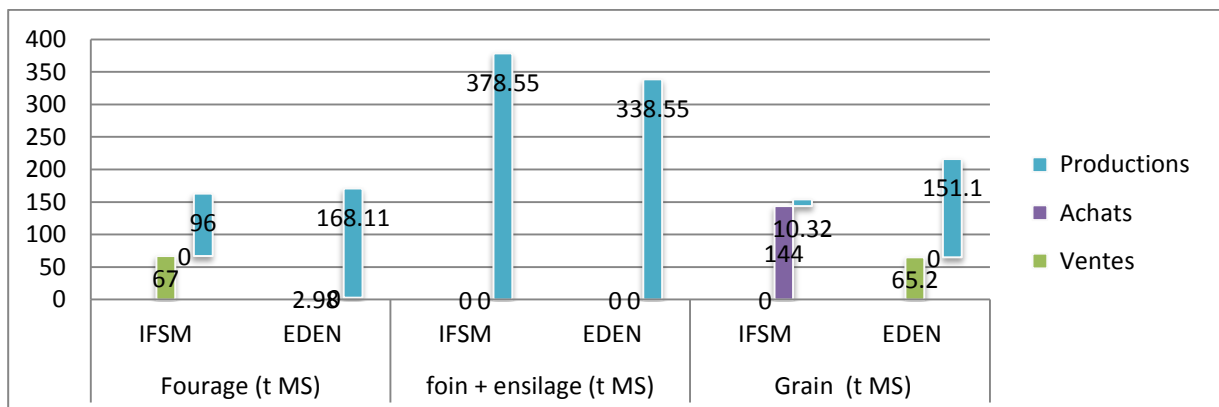


Figure 8: Comparaison des prédictions d'IFSM avec les données d'entrée d'EDEN pour l'exploitation 15.

4. Exploitation 18

Après la vente d'une partie du fourrage produit, la production de fourrage est prédite à 65 t MS pour IFSM ; par contre, EDEN donne une quantité de fourrage produite de 149 t MS. Le foin et l'ensilage pris comme un seul produit ont des quantités totales produites proches dans les deux cas, soit une différence de 21 t MS, alors que la plus petite production est celle estimée par IFSM (809 t MS). La production de grains dans IFSM est plus petite que celle dans EDEN par 178 t MS. Cependant, des ventes de 31 t MS dans IFSM et 214 t MS dans EDEN ramènent cette différence à 5 t MS ; la production dans EDEN est légèrement plus élevée.

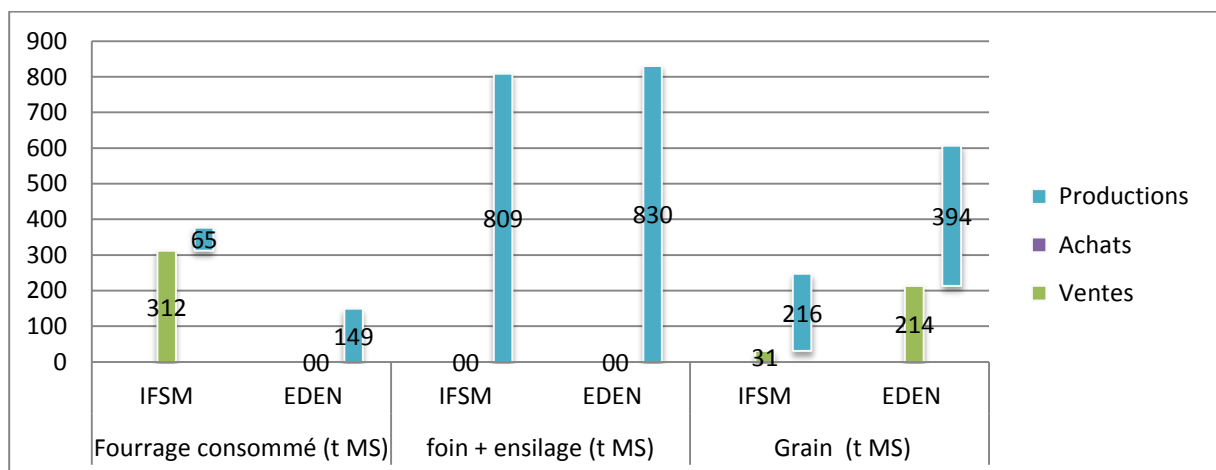


Figure 9: Comparaison des prédictions d'IFSM avec les données d'entrée d'EDEN pour l'exploitation 18.

5. Conclusion pour la supplémentation

IFSM a tendance à privilégier la production des fourrages et des ensilages à celle des grains, d'où les différences dans la production de grains (exploitation 14). La particularité des exploitations 14 et 18 étant la présence plusieurs cultures sur l'exploitation, on a des difficultés à percevoir la tendance de supplémentation d'IFSM pour ces exploitations. Toutefois, on perçoit une tendance globale de supplémentation d'IFSM, qui permet d'apprécier les différences de production entre IFSM et EDEN. Cependant cette tendance de supplémentation influence les consommations d'énergie indirecte dans les cas où IFSM n'arrive pas à produire autant qu'EDEN, on enregistre des achats de grain. D'où l'augmentent l'énergie indirecte mais aussi du coût de nourriture par rapport à la valeur d'EDEN.

I.2 Calibration et validation du modèle de simulation

Nous observons à cette étape des différences importantes dans la consommation d'énergie directe de 105 % pour l'exploitation 13 (Tableau 6) et dans la consommation d'énergie indirecte de 93 % pour exploitation 14 (Tableau 7) et de 56 % pour l'exploitation 18 (Tableau 9). L'énergie consommée lors de l'utilisation d'équipements (énergie directe) pour des opérations culturales et l'application des pesticides, (par exemple 275 MJ/kg d'ingrédient actif sont nécessaire pour la pulvérisation (Rotz *et al.*, 2012)) est à l'origine de ces forte variations. Les doses de pesticides et les équipements associés à leur application sont agrégés dans IFSM. Cela rend impossible de tenir compte des réductions de produits phytosanitaires dans les simulations donc de la réduction d'énergie indirecte due à l'utilisation de pesticides. Concernant, la consommation d'énergie électrique qui constitue une partie de l'énergie directe, les données EDEN sont issues des données exploitations (données réelles), alors que pour IFSM, les facteurs d'utilisation d'énergie électrique ont été obtenus à partir d'un sondage réalisé par Ludington et Johnson (2003). Ainsi la consommation d'électricité due à l'éclairage dans les bâtiments d'élevage dans IFSM se fait en fonction du nombre de vaches (80 kWh/vache/an) (Rotz *et al.*, 2012), cela n'est pas le cas dans EDEN, où la consommation d'électricité a été renseignée directement par les exploitants. L'utilisation de l'énergie dépend aussi des types d'installation dont les paramètres ne sont pas directement modifiables dans d'IFSM.

Aux niveaux des productions il n'y a pas d'achat de tourteau de soja 48 % pour l'exploitation de 15 (Tableau 8). Il n'y a également pas d'achat de mix de vitamines et minéraux dans l'exploitation 18 (Tableau 9). La forte différence dans le mix de vitamines et minéraux pour l'exploitation 14 (Tableau 7) est due à la faible quantité utilisée (7,2 t MS), tandis qu'IFSM a prédit 2 t MS (soit -72 %). Les autres grandes différences se trouvent dans l'exploitation 15, où IFSM prédit plus de grain utilisée (+93 %) (Tableau 8), et dans l'exploitation 18, où IFSM prédit moins de foin consommé (-56 %) (Tableau 9). Ces différences sont pour la plupart due à la tendance de supplémentation d'IFSM.

Tableau 6 : Sorties d'IFSM pour l'exploitation 13 après calibration (avec la différence d'IFSM par rapport à EDEN).

Paramètres	EDEN	IFSM	Diff. (%)
Quantité d'énergie indirecte utilisée (GJ)	1124,2	1122,9	-0,1
Quantité d'énergie directe utilisée (GJ)	353,3	722,6	104,5
Énergie totale utilisée (GJ)	1477,6	1845,5	24,9
Quantité de grain utilisée sur l'exploitation (t MS)	111,0	68,1	-38,6
Quantité de tourteau de soja achetée (t MS)	45,6	49,0	7,4
Quantité du mix de vitamines et minéraux achetée (t MS)	2,8	3,0	7,1
Production de paille, de foin et d'ensilage sur l'exploitation (t MS)	259,8	226,3	-12,8
Quantité de foin consommée sur l'exploitation (t MS)	186,3	163	-12,5

Tableau 7: Sorties d'IFSM pour l'exploitation 14 après calibration aux sorties d'EDEN (avec la différence d'IFSM par rapport à EDEN).

Paramètres	EDEN	IFSM	Diff. (%)
Quantité d'énergie indirecte utilisée (GJ)	757,4	1463,3	93,2
Quantité d'énergie directe utilisée (GJ)	388,30	265,89	-31,5
Énergie totale utilisée (GJ)	1145,69	1729,16	50,9
Quantité de grain utilisée sur l'exploitation (t MS)	210,15	101,21	-51,8
Quantité de tourteau de soja achetée (t MS)	15,80	16,0	1,3
Quantité du mix de vitamines et minéraux achetée (t MS)	7,23	2,0	-72,3
Production de paille, de foin et d'ensilage sur l'exploitation (t MS)	404,11	297,29	-26,4
Quantité de foin consommée sur l'exploitation (t MS)	128,99	123,0	-4,7

Tableau 8: Sorties d'IFSM pour l'exploitation 15 après calibration aux sorties d'EDEN (avec la différence d'IFSM par rapport à EDEN).

Paramètres	EDEN	IFSM	Diff. (%)
Quantité d'énergie indirecte utilisée (GJ)	1060,22	1598,60	50,78
Quantité d'énergie directe utilisée (GJ)	437,06	305,22	-30,17
Énergie totale utilisée (GJ)	1497,28	1903,82	27,15
Quantité de grain utilisée sur l'exploitation (t MS)	151,10	10,32	-93,17
Quantité du mix de vitamines et minéraux achetée (t MS)	1,50	2,00	33,33
Production de paille, de foin et d'ensilage sur l'exploitation (t MS)	338,55	378,55	11,82
Quantité de foin consommée sur l'exploitation (t MS)	168,11	96	-42,89

Tableau 9: Sorties d'IFSM pour l'exploitation 18 après calibration aux sorties d'EDEN (avec la différence d'IFSM par rapport à EDEN).

Paramètres	EDEN	IFSM	Diff. (%)
Quantité d'énergie indirecte utilisée (GJ)	1802,47	791,97	-56,06
Quantité d'énergie directe utilisée (GJ)	506,11	347,63	-31,31
Énergie totale utilisée (GJ)	2308,59	1139,60	-50,64
Quantité de grain utilisée sur l'exploitation (t MS)	393,59	216,12	-45,09
Quantité de tourteau de soja achetée (t MS)	6,00	4	-33,33
Production de paille, de foin et d'ensilage sur l'exploitation (t MS)	830,22	808,88	-2,57
Quantité de foin consommée sur l'exploitation (t MS)	149,26	65	-56,45

Les divergences de fonctionnement de certains sous-modèles d'IFSM avec les pratiques bretonnes, ajouté aux différents processus agrégés et à la tendance de supplémentation d'IFSM, nous permettent d'avoir des résultats plus ou moins proches. L'hypothèse de validation étant respectée pour toutes les exploitations (Tableaux 6, 7, 8, 9), nous avons été en mesure de procéder à la simulation des scénarios innovants.

I.3 Exploitation 13

1. Comparaisons des consommations d'énergie et des émissions de GES

– A l'échelle exploitation

A l'échelle exploitation, la consommation d'énergie indirecte au niveau des scénarios SC13 et SC13Bis sont respectivement réduites de 5 % et 8 % par rapport au scénario de référence. On observe également des réductions de GES (CH₄, CO₂ et N₂O) d'au moins 10 % pour chacun des gaz au niveau des deux scénarios par rapport au scénario de référence. Cela est dû à une baisse des engrais minéraux azotés et phosphatés (-10 % et -50 % respectivement) et de concentrés dans la ration (-60 %).

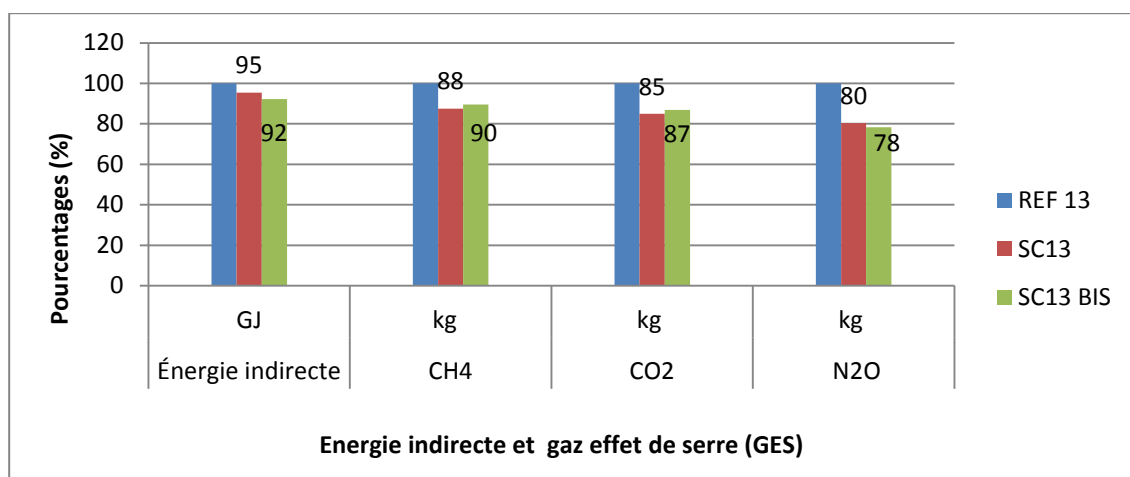


Figure 10: Comparaison des consommations d'énergie indirecte et des émissions de GES et à l'échelle exploitation dans les scénarios de référence et d'innovation pour l'exploitation 13.

Les baisses de consommation d'énergie indirecte s'expliquent par la réduction de la quantité de lait destinée au marché de 30 % par rapport au scénario de référence avec l'introduction de la race Normande. En effet la productivité de la race Normande étant moindre comparé au Prim'Holstein (Delaby *et al.*, 2009) on passe désormais moins de temps à traire. Les scénarios d'innovation émettent moins de CO₂. Cela est dû à la baisse de consommation d'énergie directe de 89 % pour les deux scénarios (ANNEXE 5) due à la réduction des activités énergivores (travaux du sol de récolte et de stockage) sur l'exploitation. La faible quantité de production et l'alimentation à base de fourrage entraîne de faibles émissions de CH₄ issue de la fermentation entérique. En effet la production de méthane

par fermentation entérique des vaches par litre de lait décroît avec l'augmentation de la productivité des vaches et est fonction de l'alimentation. Ainsi une vache d'un niveau de production laitière de 6500 kg/an rejette 161 m³ de méthane par année alors qu'une vache d'un niveau de 4500 kg/an rejette 147 m³ de méthane par année (Vermorel, 1995).

A l'aide des Pouvoir de Réchauffement Global à 100 ans (PRG) des principaux GES tels que définis par le GIEC (2007) soit 1 pour le CO₂, 25 pour CH₄ et 298 pour N₂O (Pachauri and Reisinger, 2008). On estime le changement climatique (mesuré en kg éq. CO₂, à partir des émissions de CH₄, CO₂, et N₂O) à l'échelle exploitation à 434723 kg éq. CO₂ pour le scénario de référence avec respectivement 368590 kg éq. CO₂ et 370775 kg éq. CO₂ pour les scénarios SC13A et SC13Bis (ANNEXE7). Les scénarios élaborés ont ainsi moins d'impact sur l'environnement que le scénario de référence à l'échelle exploitation. Cependant, la quantité de lait vendue est en baisse de 30 % comparée à la quantité vendue pour l'exploitation de référence d'où une analyse par litre de lait vendu.

– Par litre de lait vendu

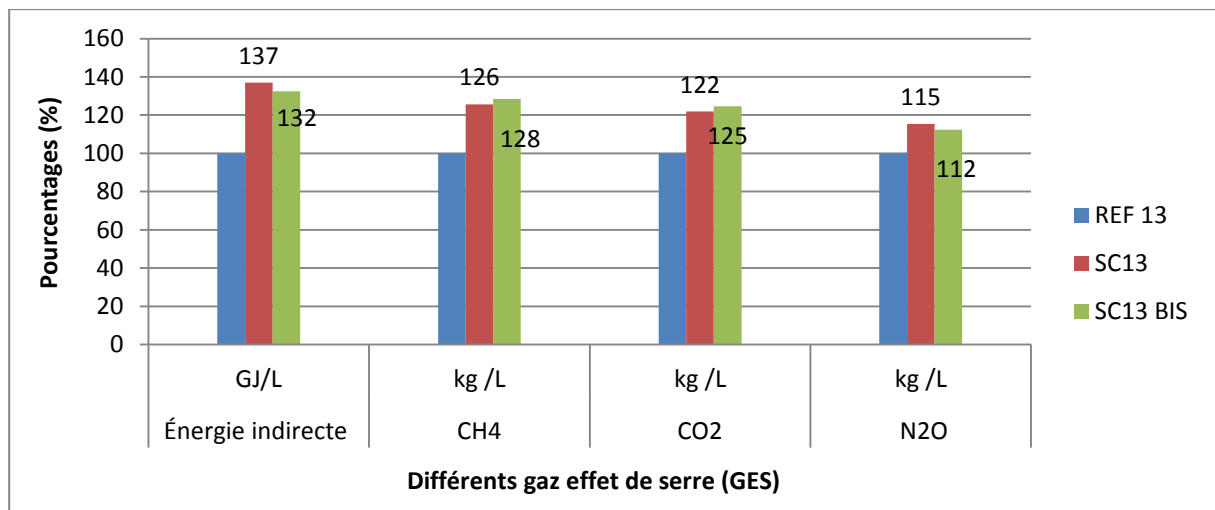


Figure 11: Comparaison des consommations d'énergie indirecte et des émissions de GES par litre de lait vendu dans les scénarios de référence et d'innovation pour l'exploitation 13.

Les consommations d'énergie indirecte au niveau des scénarios SC13 et SC13bis sont en hausse respectivement de 37 et 32 % par litre de lait vendu. Les scénarios SC13 et SC13bis ont des augmentations respectives de 26 et 28 % pour le CH₄, 22 et 25 % pour le CO₂ et 15 et 12 % pour le N₂O. Cette augmentation de la consommation d'énergie et d'émissions par litre de lait est due à la baisse de la production entraînée par l'introduction de la race Normande, qui valorise plus l'herbe mais a une production laitière moindre comparé aux Prim'Holstein pour une ration équivalente (Delaby and Peyraud, 2009). Le changement climatique par litre de lait donne 1,38 kg éq. CO₂ pour le scénario de référence avec respectivement 1,68 kg éq. CO₂ et 1,69 kg éq. CO₂ pour les scénarios SC13A et SC13bis (ANNEXE 7). Le changement climatique étant supérieur pour les scénarios d'innovation, ces derniers ont plus d'impact sur l'environnement par litre de lait produit que le scénario de référence.

2. Analyse des coûts de production

– Influence de la réduction de la consommation d'énergie indirecte sur les coûts de production à l'échelle exploitation

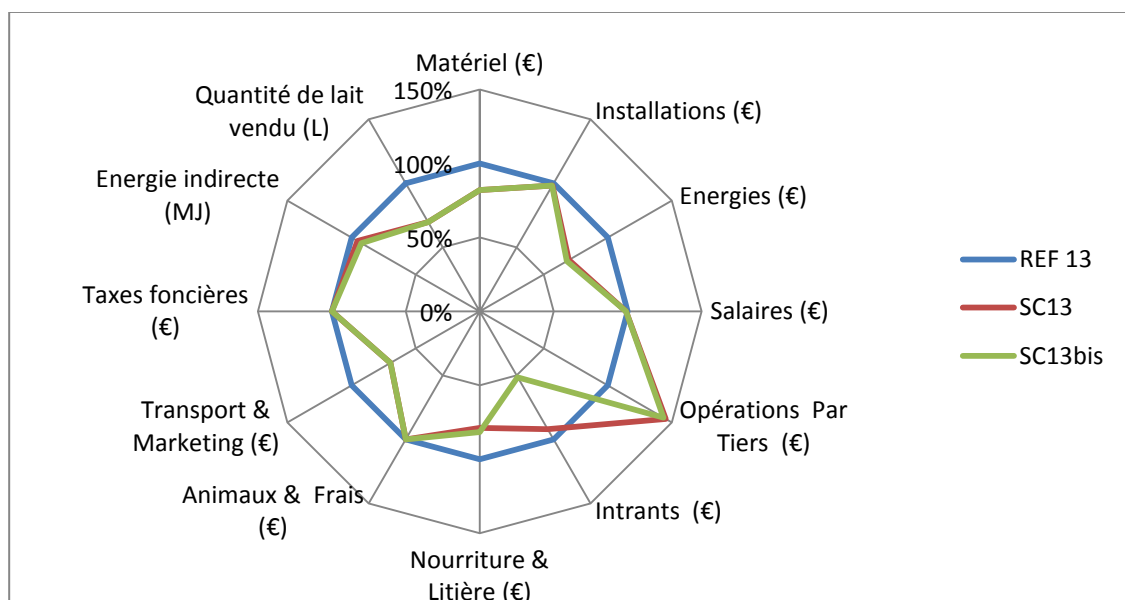


Figure 12: Influence de la réduction de la consommation d'énergie indirecte sur les coûts de production à l'échelle exploitation pour l'exploitation 13. Les valeurs sont sur une échelle relative (ligne bleu = 100 %).

Les dépenses en matériel, en aliments et en intrants sont réduites dans les scénarios innovants. Cela est dû à l'introduction de la race Normande, qui a la capacité de mieux valoriser les fourrages tout en étant moins demandeuse concentrés protéiques (Delaby and Peyraud, 2009). L'objectif de réduction de l'énergie indirecte est ainsi atteint dans les différents scénarios à l'échelle exploitation. De plus, on a moins de produit (avec l'introduction de la race Normande moins productive, soit une capacité de production de 6786 kg/VL/an (Delaby *et al.*, 2009)) à transporter, d'où une baisse du coût du transport. Par contre, les coûts des opérations par tiers augmentent (de 109 et 106 % respectivement pour les scénarios SC13et SC13Bis) avec la réduction de l'occupation des surfaces par les céréales en faveur du foin, qui entraine des coûts supplémentaires pour les fauches.

– **Analyse des coûts de production par litre de lait vendu**

La quantité de lait vendue au niveau des scénarios étant en baisse de 30 % par rapport à celle de la référence, l'appréciation des dépenses par unité de lait vendu est privilégiée pour juger de l'efficacité des scénarios élaborés.

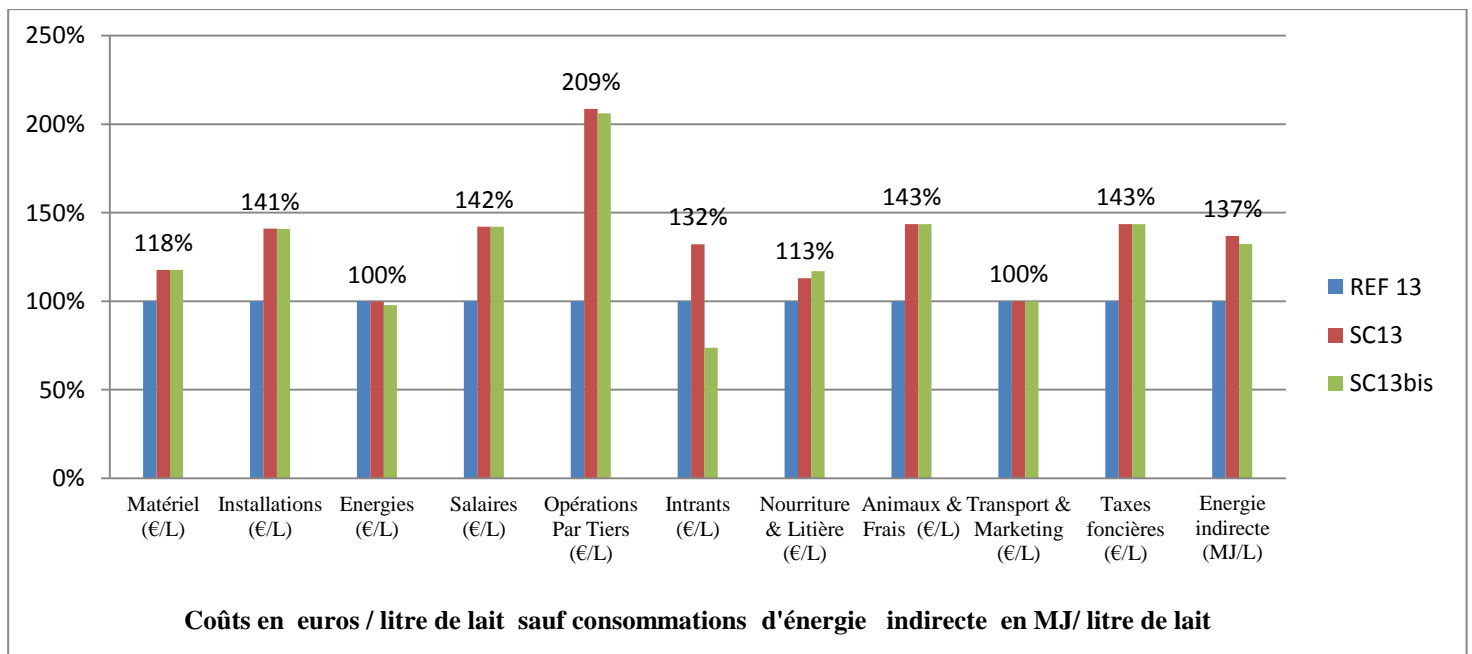


Figure 13 : Comparaison des coûts de fonctionnement, des consommations d'énergie indirecte entre exploitation de référence 13 et les scénarios correspondants par litre de lait vendu

Pour l'élaboration des scénarios, les surfaces avec légumineuses ont été augmentées de 23 à 35,5 ha pour favoriser la réduction d'utilisation de fertilisants soit une réduction de 49 %. La race Prim'Holstein a été remplacée par la race Normande pour une meilleure valorisation de l'herbe (Delaby and Peyraud, 2009). De plus, les achats de concentrés ont été réduits de 2,4 kg/VL/j max au lieu de 6,25 kg/VL/j. On se retrouve tout de même avec une augmentation de la consommation d'énergie indirecte mais aussi de la majorité des coûts de production par litre de lait vendu comparé au scénario de référence. Par contre, les coûts du transport restent fixes par litre de lait vendu. L'augmentation des coûts de production par litre de lait vendu est due à la baisse de la quantité de lait destinée au marché. Les scénarios s'avèrent ainsi moins intéressants en termes de coûts de production du litre de lait comparés au scénario de référence.

3. Conclusion pour l'exploitation 13

Les scénarios définis sont moins consommateurs d'énergie et moins pollués à l'échelle exploitation mais moins avantageux si les consommations d'énergie et les émissions et les coûts sont considérées par litre de lait vendu. Il est intéressant de se tourner vers les races mixtes à forte capacité de valorisation des surfaces fourragères (Delaby *et al.*, 2009). L'alimentation des troupeaux ainsi basée sur la consommation de fourrages a pour conséquence une moindre utilisation de concentré et de fertilisants minéraux donc moins de dépenses. Cependant il faudrait en plus de cela mettre en place des stratégies de regroupement des vèlages en vue de maximiser la production des vaches. En effet un regroupement de vèlage aux périodes de repousse de l'herbe permet d'avoir assez de ressource en herbe pour les animaux à leur période de forte productivité donc d'être autosuffisant (Le Gall *et al.*, 2001). De plus les scénarios pourraient être intéressants (à l'échelle exploitation et par quantité de lait vendues) et bénéfiques pour l'environnement si l'on augmente le nombre d'animaux. Il faudrait pour cela tenir compte de la capacité de production de l'exploitation. Toutefois, le débat se situe au niveau de la qualité de lait produit dans les différents cas.

I.4 Exploitation 14

1. Analyse des consommations d'énergie et des émissions de GES

– Echelle exploitation

A l'échelle exploitation, la consommation d'énergie indirecte du scénario SC14A surpasse de 15 % celle de la référence et les émissions de CH₄ et de N₂O augmentent respectivement de 6 % et 1 %. Les émissions de CO₂ baissent de 16 % à cause de la réduction de la diminution de la surface en maïs (de 15,6 à 6,6 ha) et l'apport de concentrés en hiver et en période estivale à des valeurs respectives de 2,4 et 0,6 kg.

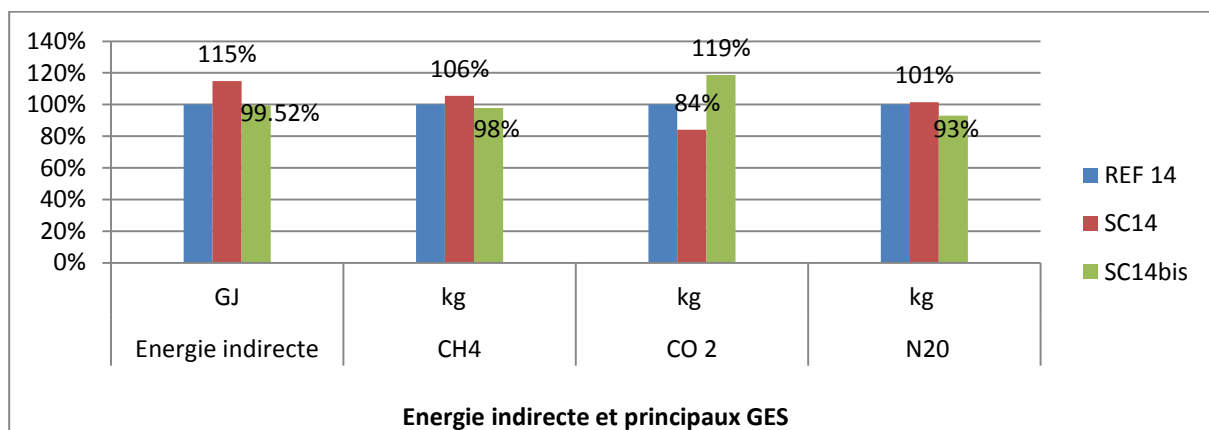


Figure 14: Comparaison des consommations d'énergie indirecte et des émissions de GES entre référence et scénarios à l'échelle exploitation pour l'exploitation 14.

Au niveau du scénario SC14Bis, la consommation d'énergie indirecte et les émissions de CH₄ et de N₂O sont légèrement en baisse, avec une baisse maximum de 7 % (pour N₂O). Cela est dû à l'association de l'herbe avec 50 % de légumineuses qui permettent la réduction de l'usage de fertilisant vue la capacité des légumineuses à préserver de façon optimale la fertilité du sol en fixant de l'azote lorsqu'ils sont introduits dans les rotations de cultures (Pikuła and Rutkowska, 2014). La conséquence étant l'exclusion de l'utilisation de fertilisants minéraux pour la culture du fourrage. Cependant, une augmentation des émissions de CO₂ de 18 % est prédite à cause de l'augmentation de la surface destinée aux légumineuses et au blé, qui nécessitent des travaux supplémentaires du sol, de récolte et de fauche. L'évaluation du changement climatique à l'échelle exploitation donne 408204 kg éq. CO₂ pour le scénario de référence avec respectivement 421508 kg éq. CO₂ et 394293 kg éq. CO₂ pour les scénarios

SC14 et SC14Bis (ANNEXE 11). Comparé au scénario de référence le scénario SC14 a plus d'impact sur l'environnement contrairement au scénario SC 14 Bis à l'échelle exploitation.

– **Par litre de lait vendu**

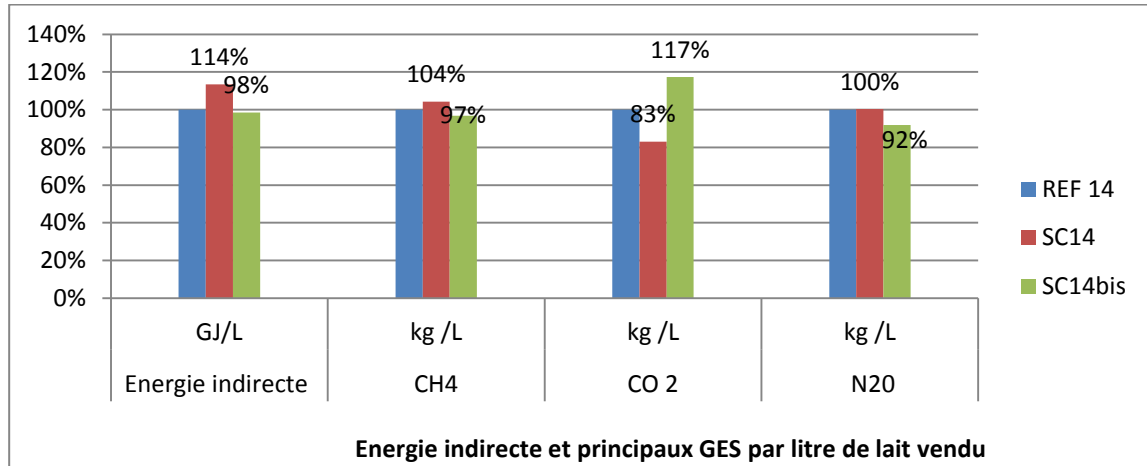


Figure 15: Comparaison des consommations d'énergie indirecte et des émissions de GES entre référence et scénarios par litre de lait vendu pour l'exploitation 14.

La quantité de lait vendu au niveau des scénarios varie très peu, soit une augmentation de 1,1 % par rapport à la référence, Cela est dû au fort apport de concentrés au troupeau de Prim'Holstein durant les périodes de pâturage. Cette augmentation n'étant pas significative, on observe les mêmes tendances au niveau des GES par litre de lait vendue. En effet, comparé aux variations à l'échelle exploitation, les variations d'énergie indirecte et de GES (par litre de lait) par rapport au scénario de référence baissent d'environ 2 % vu l'association d'herbe et de légumineuses qui réduisent les besoins en fertilisants minéraux, et l'introduction du maïs ensilage, du maïs grain, du blé et du triticale pour éviter l'achat de concentré, voire en vendre. Le changement climatique par litre de lait s'estime 1,27 kg éq. CO₂ pour le scénario de référence avec respectivement 1,30 kg éq. CO₂ et 1,21 kg éq CO₂ pour les scénarios SC14 et SC14Bis (ANNEXE 11). Comparé au scénario de référence, le scénario SC14 a plus d'impact sur l'environnement contrairement au scénario SC14Bis par litre de lait.

2. Analyse des coûts de production

Nous nous focalisons sur l'analyse des coûts de production du scénario SC14Bis dont la consommation d'énergie indirecte a baissé d'environ 1 % à l'échelle exploitation.

– A l'échelle exploitation

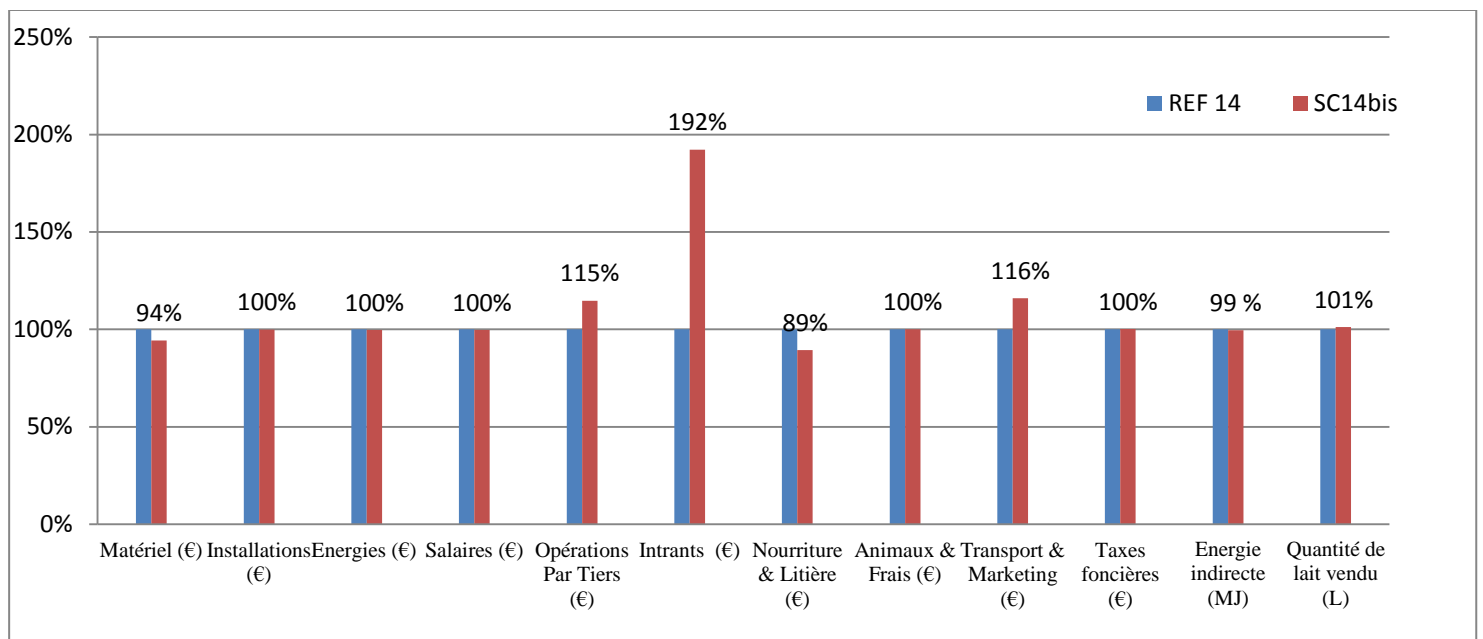


Figure 16: Comparaison des coûts de fonctionnement, des consommations d'énergie indirecte entre exploitation de référence 14 et les scénarios innovants à l'échelle exploitation.

A l'exception des dépenses destinées à l'opération par tiers, aux intrants, et au transport, tous les autres coûts sont inférieurs à leur correspondant dans l'exploitation de référence à l'échelle exploitation. Les coûts qui excèdent leur correspondants de l'exploitation de référence sont dus aux ajouts de cultures (maïs ensilage, CIPAN, trèfle) qui nécessitent pour leur récolte plus d'opération par tiers. Aussi l'introduction de maïs ensilage en monoculture entraîne une augmentation des coûts des intrants de 92 %. Les coûts du transport augmentent de 16 % vu la légère augmentation de la quantité de lait destinée au marché, soit de 1,1 %. Toutefois, le scénario SC14bis est partiellement intéressant à l'échelle exploitation ; cependant, pour mieux apprécier son efficacité, il faut analyser les dépenses mobilisées par unité de lait vendu.

– Par litre de lait vendu

Au niveau du scénario SC14Bis, seules les dépenses destinées aux opérations par tiers, aux intrants, au transport excèdent les dépenses correspondantes dans le scénario de référence de respectivement de 13 % ; 90 % et 15 %. C'est trois postes nécessitent plus de dépenses par litre de lait. Cependant le coût de production total par litre de lait est inférieur de 0,2 % comparé au coût production total au niveau du scénario de référence (ANNEXE 24). Le scénario SC14Bis est ainsi légèrement intéressant économiquement par rapport au scénario de référence.

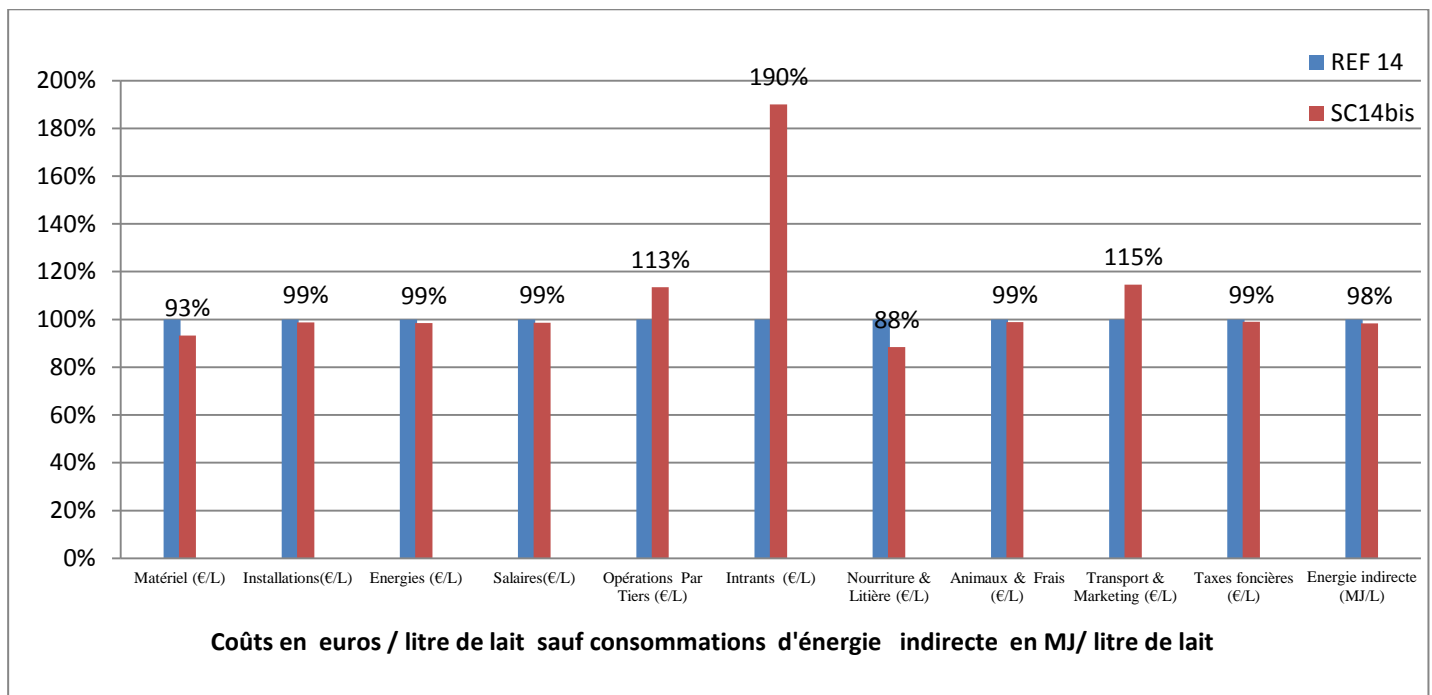


Figure 17 : Comparaison des coûts de fonctionnement, des consommations d'énergie indirecte entre exploitation des référence 14 les scénarios correspondants par litre de lait vendu

3. Conclusion pour l'exploitaion 14

Pour favoriser une réduction significative de la consommation d'énergie indirecte, les cultures nécessitant moins d'intrant, telles que les prairies avec introduction de légumineuses, sont à privilégier. En effet, les prairies dans les systèmes fourragères permettent d'éviter les activités de récolte, d'épandage et même de fertilisation à travers leur consommation directe par les troupeaux et les déjections laissées sur place servent de fertilisants. Les consommations d'énergie liées aux activités de récolte, épandage, et conditionnement se trouvent ainsi réduites (Peyraud *et al.*, 2010). De plus les émissions de GES passent de 1,15 à 1,00 kg eq-CO₂/kg lait dans les systèmes associant prairie et légumineuses comparées aux graminées fertilisées, vu la réduction des émissions N₂O (Peyraud *et al.*, 2010). Opter pour la valorisation directe de l'herbe permettrait aussi de réduire les coûts de l'opération par tiers. On tendra ainsi vers une efficacité économique tout en minimisant les émissions de GES.

I.5 Exploitation 15

1. Analyse des consommations d'énergie et des émissions de GES

– Echelle exploitation

A l'échelle exploitation la consommation d'énergie indirecte, les émissions de CH₄, CO₂ et N₂O sont respectivement réduites de 36,4 % ; 28 % ; 31 % et 45,8 % relativement aux valeurs du scénario de référence. La baisse des émissions de CO₂ et de N₂O est due à la diminution de la surface de maïs ensilage de 15,6 à 6,6 ha et l'augmentation des surfaces en prairie (qui doublent), mais aussi la réduction de concentrés dans la rotation. Ces actions permettent une baisse d'utilisation de fertilisants minéraux à l'origine des émissions de N₂O mais aussi un moindre usage de machines sur l'exploitation, d'où la réduction d'émissions de CO₂. La réduction d'émission de CH₄ est due à la baisse des effectifs de 17 %. Toutes ces actions contribuent à la baisse de 36 % de la consommation d'énergie indirecte.

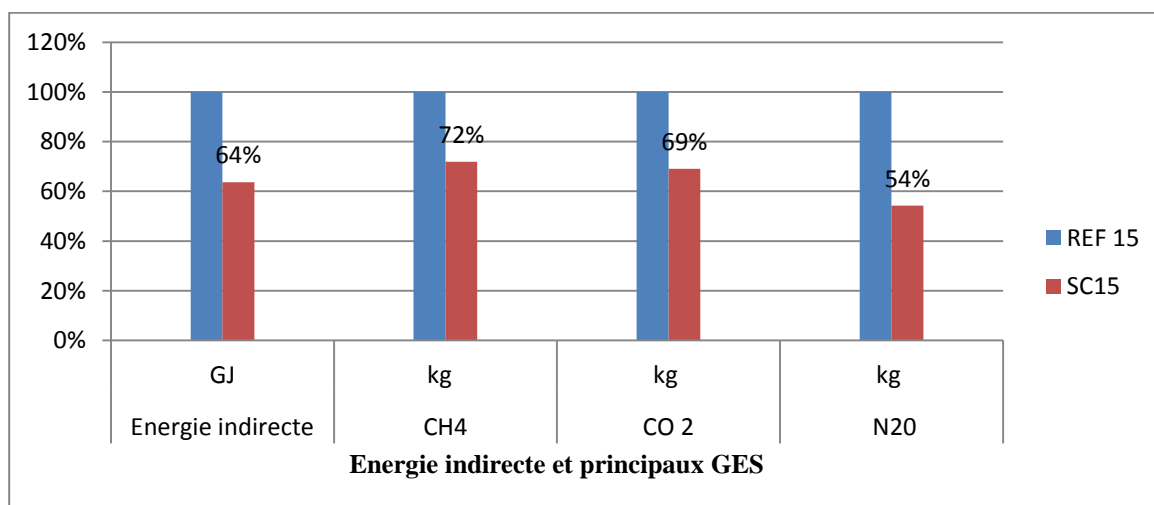


Figure 18: Comparaison des consommations d'énergie indirecte et des émissions de GES entre référence et scénarios à l'échelle exploitation pour l'exploitation 15.

La production de blé, d'orge, de maïs grain et de pois sur l'exploitation réduit les achats de concentré e 19 %. D'où la réduction de la consommation d'énergie indirecte de 36 %. La réduction du cheptel de 115 (dont 45 allaitantes) à 92 (dont 40 vaches allaitantes) soit de 17 % est à l'origine de la réduction de la quantité de lait destinée au marché mais aussi des émissions de CH₄ issues de la fermentation entérique. L'exploitation du scénario SC15 consomme ainsi moins d'énergie indirecte et émet moins de GES. Le changement climatique

à l'échelle exploitation s'estime à 435793 kg éq. CO₂ pour le scénario de référence et 277109 kg éq. CO₂ pour le scénario SC15 (ANNEXE 15). Le scénario SC15 est ainsi plus respectueux de l'environnement à l'échelle exploitation. Cependant, la quantité de lait ayant baissée de 11 %, qu'en est-il de son efficacité par litre de lait produit ?

– Par litre de lait vendu

Par litre de lait vendu, on constate également des baisses de consommation d'énergie indirecte et d'émissions de GES.

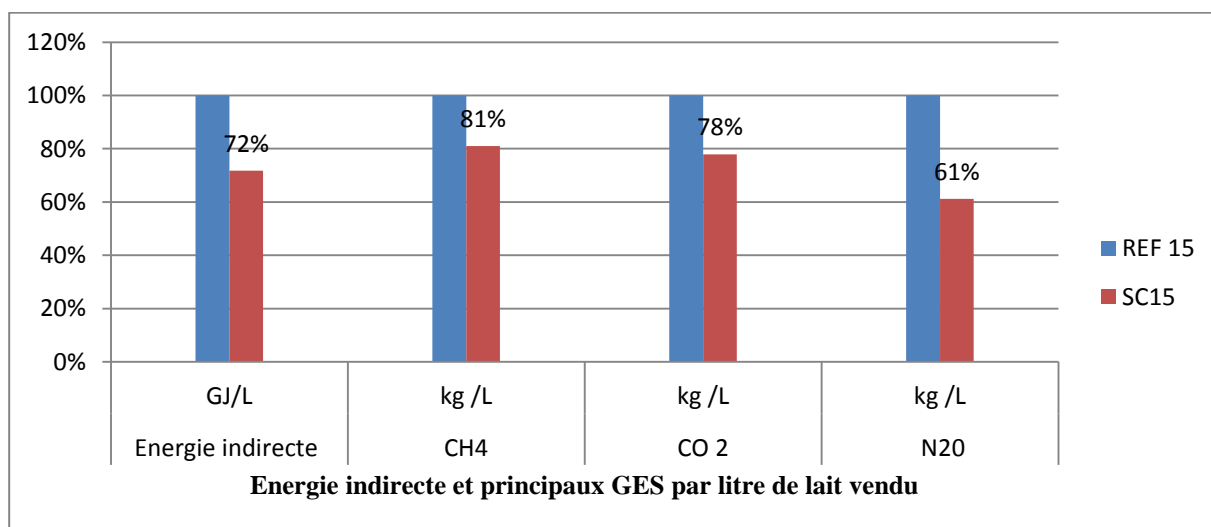


Figure 19: Comparaison des consommations d'énergie indirecte et des émissions de GES entre référence et scénarios par litre de lait vendu pour l'exploitation 15.

Les diminutions s'estiment à 28 % pour la consommation d'énergie indirecte, 19 % pour les émissions de CH₄, 22 % pour les émissions de CO₂ et de 39 % pour les émissions de N₂O. Les changements dans le mode de gestion pré-décrit sont à l'origine de ces différents effets. Egalement le changement climatique par litre de lait donne 1,64 kg éq. CO₂ pour le scénario de référence et 1,18 kg éq. CO₂ pour le scénario SC15 (ANNEXE 15). Le scénario SC15 est bien plus respectueux de l'environnement par rapport au scénario de référence par litre de lait vendu.

2. Analyse des coûts de production

– A l'échelle exploitation

A l'échelle exploitation, tous les coûts de productions sont inférieurs aux coûts de production de l'exploitation de référence. Le scénario SC15 est ainsi moins couteux que l'exploitation de référence à l'échelle exploitation.

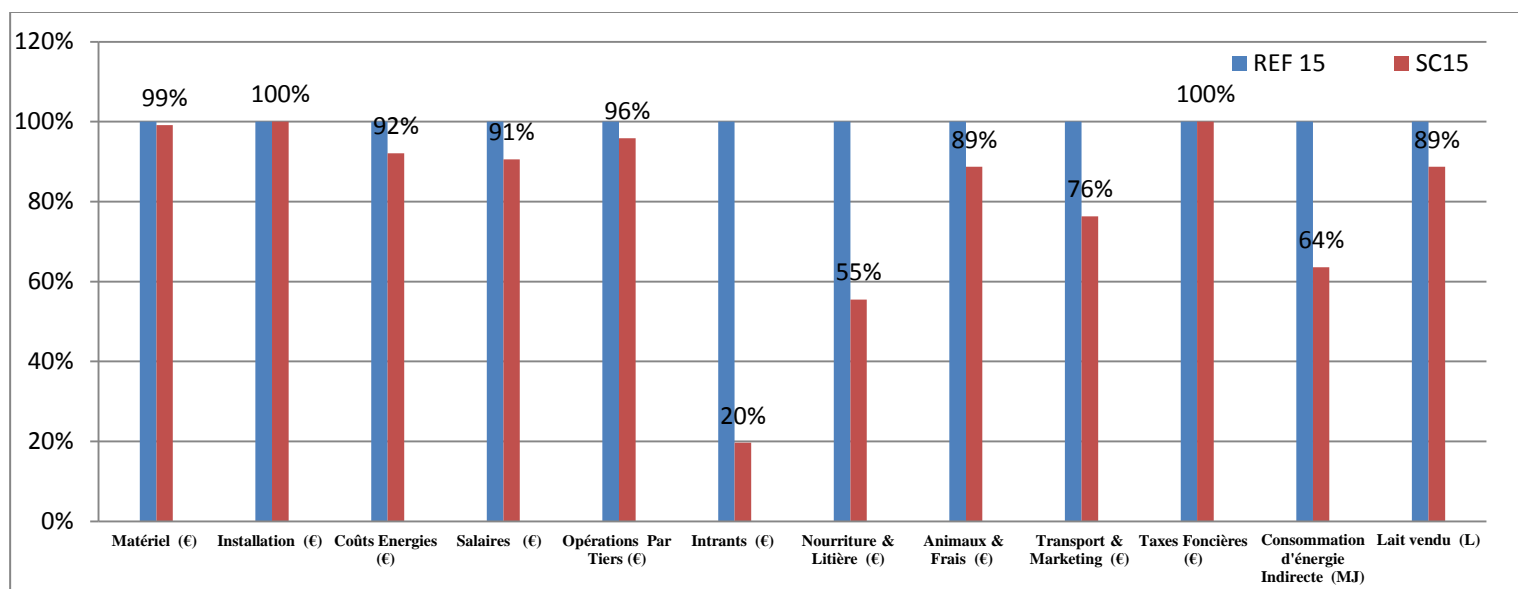


Figure 20: Comparaison des coûts de fonctionnement, des consommations d'énergie indirecte entre exploitation des référence 15 les scénarios correspondants à l'échelle exploitation.

– Par litre de lait vendu

Par unité de lait vendue, la plupart des coûts sont en hausse de 2 à 13 %, à l'exception des coûts des intrants, de la nourriture, et du transport, qui sont respectivement en baisse de 78 % ; 37 % ; et 14 %. Cependant, le coût global de production du litre de lait est en baisse de 15,8 % par rapport au scénario de référence.

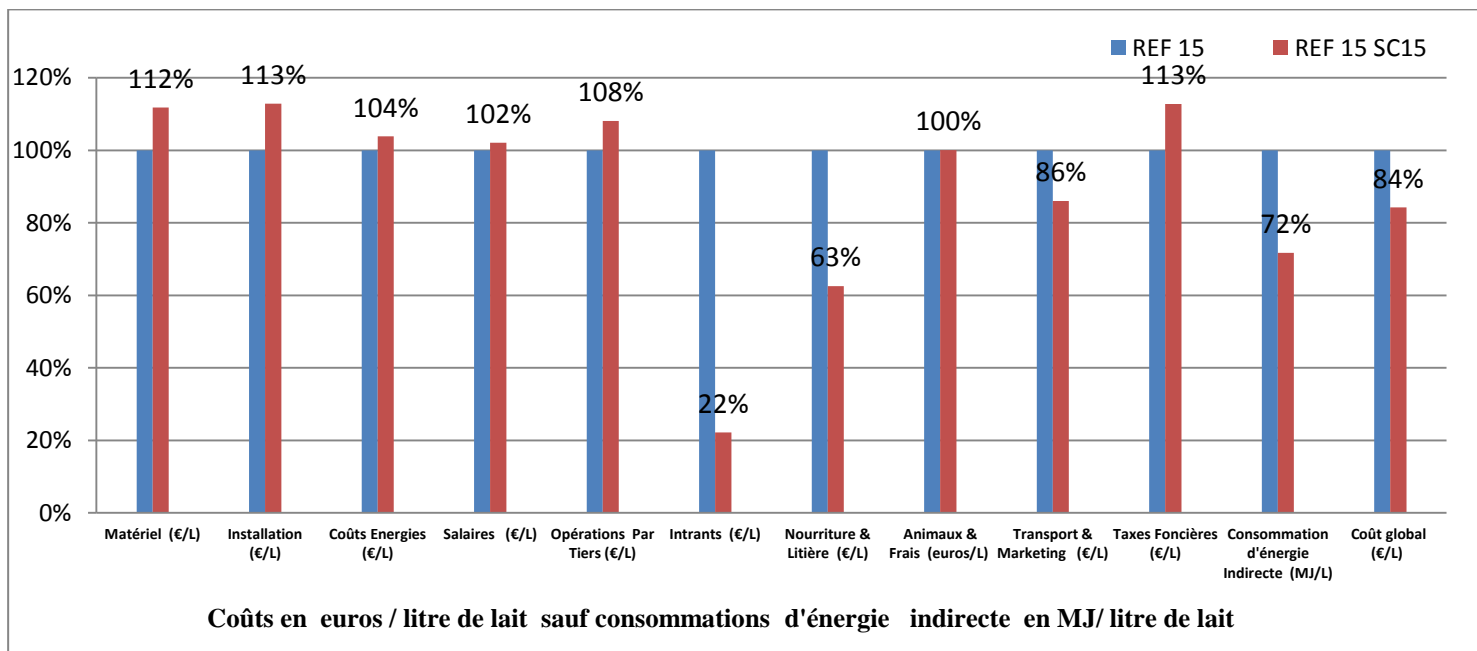


Figure 21: Comparaison des coûts de fonctionnement, des consommations d'énergie indirecte entre exploitation de référence 15 et les scénarios correspondants par litre de lait vendu

3. Conclusion pour l'exploitaion 15

De tous les scénarios élaborés jusqu'ici, le scénario SC15 est le plus respectueux de l'environnement et énergiquement efficient (énergi indirecte) . La forte réduction d'utilisation d'intrants à la faveur des cultures fourragères et des légumineuses ont permis de réduire les émissions de N₂O et les travaux du sols donc de la consommation d'énergie indirecte et des émissions de CO₂. La mise en place de céréales a également permis de réduire les consommations d'énergie indirectes. L'adaption de la production avec la réduction de l'effectif du cheptel entraine une baisse des émissions de CH₄. L'ensemble a contribué à la réduction des différents coûts de production pour rendre l'exploitaion économiquement efficace tant à l'échelle exploitaion que par litre de lait produit.

I.6 Exploitation 18

Il s'agissait ici d'évaluer deux scénarios, un scénario d'intensification (scénario SC18A) et un scénario d'extensification (scénario SC18B).

1. Comparaisons des consommations d'énergie et des émissions de GES

– Echelle exploitation

A l'échelle exploitation, la consommation d'énergie au niveau des scénarios SC18A (Figure 22) et SC18B sont respectivement en hausse de 223 % et 29 % par rapport au scénario de référence. La hausse importante pour le scénario SC18A est due au non valorisation des surfaces fourragères, qui nécessitent plus d'activités motorisées pour les activités de récolte et de conditionnement. En effet, une augmentation le nombre d'UGB de 68 à 118 (+63 % de VL) et le fait de maintenir les animaux toute l'année dans les bâtiments avec un apport accru en concentré expliquent l'augmentation de la consommation d'énergie indirecte.

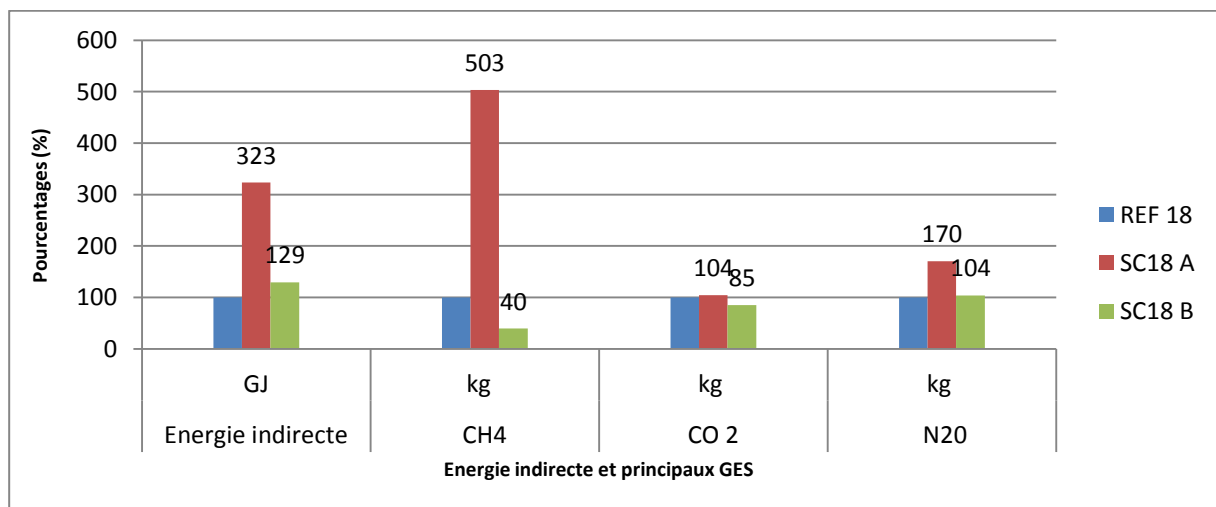


Figure 22: Comparaison des consommations d'énergie indirecte et des émissions de GES entre référence et scénarios à l'échelle exploitation pour l'exploitation 18.

On observe également des hausses de GES de 403 % pour le CH₄ à cause de la fermentation entérique due à l'augmentation de l'effectif et du maintien des animaux dans le bâtiment toute l'année, 4 % pour le CO₂ et de 70 % pour le N₂O. L'augmentation de ce dernier est due à la culture de maïs grain, maïs ensilage et blé sur 42 ha lors de la première rotation qui est suivie d'une seconde rotation composée de colza, blé, maïs ensilage et d'orge, sur une superficie de

59,5 ha. Toutes ces cultures ont besoin des fertilisants azotés, à l'origine de la hausse d'émission de N_2O . Les augmentations du scénario SC18A sont dues à l'intensification avec un apport important de concentré, soit 53 % de plus par rapport à la référence. A contrario, on enregistre pour le scénario SC18B des baisses d'émissions de CH_4 et le de CO_2 respectives de 60 % et 15 %, les émissions de N_2O sont quant à elles en haussent de 4 %. Le scénario extensif émet moins par rapport au scénario intensif car il a le même effectif, les mêmes apports de concentrés et le même temps de pâturage que le scénario de référence. Aussi la mise en place de méteil (mélange de céréales ici composée de blé, avoine et vesce) pour éviter la pousse des adventices et de cultures en dérobées (culture sans labour) dans la rotation réduisent les émissions de CO_2 avec la réduction des travaux du sol et de désherbage. Cependant, les émissions de N_2O augmentent à cause de l'augmentation des surfaces en grandes cultures donc des besoins en fertilisants. La quantité de lait vendu est en hausse de 67 % pour le scénario intensif et stable pour le scénario extensif. Aussi le changement climatique s'estime à 248600 kg éq. CO_2 pour le scénario de référence avec respectivement 620531 kg éq. CO_2 et 211702 kg éq. CO_2 pour les scénarios SC18A et SC18B (ANNEXE 19). Les deux scénarios sont plus énergivores comparé au scénario de référence, le scénario intensif étant plus émetteur de GES à l'échelle exploitation. Cependant le scénario extensif s'avère légèrement plus respectueux de l'environnement comparé au scénario de référence à l'échelle exploitation.

– Par litre de lait vendu

Pour le scénario intensif (18A) (Figure 27), l'augmentation de l'effectif et le maintien des animaux dans le bâtiment toute l'année a augmenté la quantité de lait par 68 %. On enregistre des hausses de la consommation d'énergie indirecte (+92 %) et d'émission de GES par litre de lait vendu, à l'exception du CO_2 . Les GES ont des variations respectives de 200 %, -38 % et 1 % respectivement pour le CH_4 le CO_2 et le N_2O . La légère augmentation des émissions de N_2O est due à la besoin de plus de fertilisants azotés pour les cultures des deux rotations.

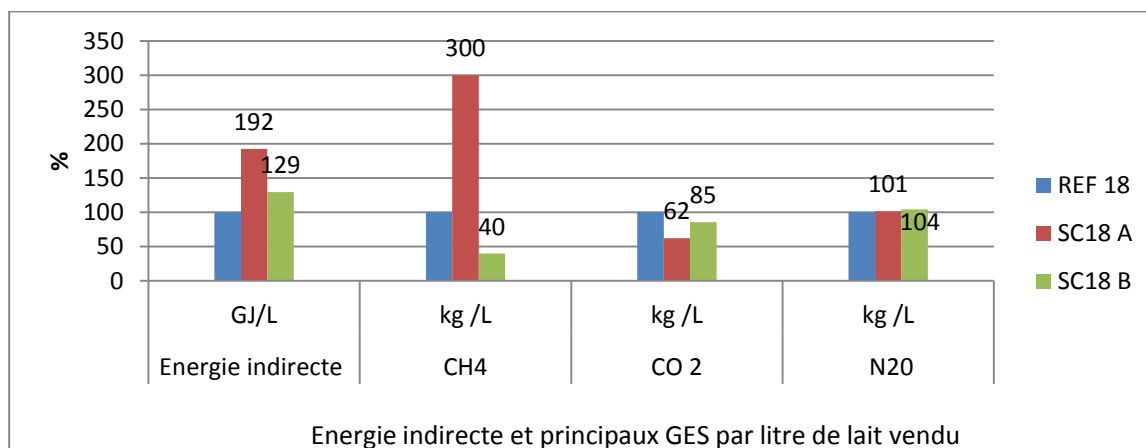


Figure 23: Comparaison des consommations d'énergie indirecte et des émissions de GES entre référence et scénarios par litre de lait vendu pour l'exploitation 18.

Pour le scénario extensif (SC18B) (Figure 23), on a une hausse de consommation d'énergie indirecte de 29 % et d'émission de N₂O de 4 % par litre de lait vendu. Cependant, les émissions baissent : CO₂ de 38 % et CH₄ de 60 %. La réduction de CH₄ issu de la fermentation entérique est due à l'alimentation à base de concentré. D'après un essai de Martin (2009), une ration à base de foin engendre des émissions de CH₄ par fermentation entérique de 19 g de CH₄/kg de lait alors que cette valeur pour une ration à base d'ensilage de maïs est de 14g de CH₄/kg de lait (Doreau et al 2011). Aussi le changement climatique au litre de lait vendu s'estime à 0,65 kg éq. CO₂ pour le scénario de référence avec respectivement 0,96 kg éq. CO₂ et 0,55 kg éq. CO₂ pour les scénarios SC18A et SC18B (ANNEXE 19). Les deux scénarios sont plus énergivores comparé au scénario de référence, le scénario intensif étant plus émetteur de GES au litre de lait vendu. Cependant le scénario extensif est légèrement plus respectueux de l'environnement comparé au scénario de référence.

2. Analyse des différents coûts

– A l'échelle exploitation

Pour les scénarios SC18A (intensif) et SC18B (extensif) (Figure 24), IFSM prédit des augmentations des différents coûts à l'échelle exploitation. Cela est dû pour le scénario intensif à l'augmentation de l'effectif (+63 % de VL), le maintien des animaux dans le bâtiment et l'achat d'intrants pour les cultures des deux rotations.

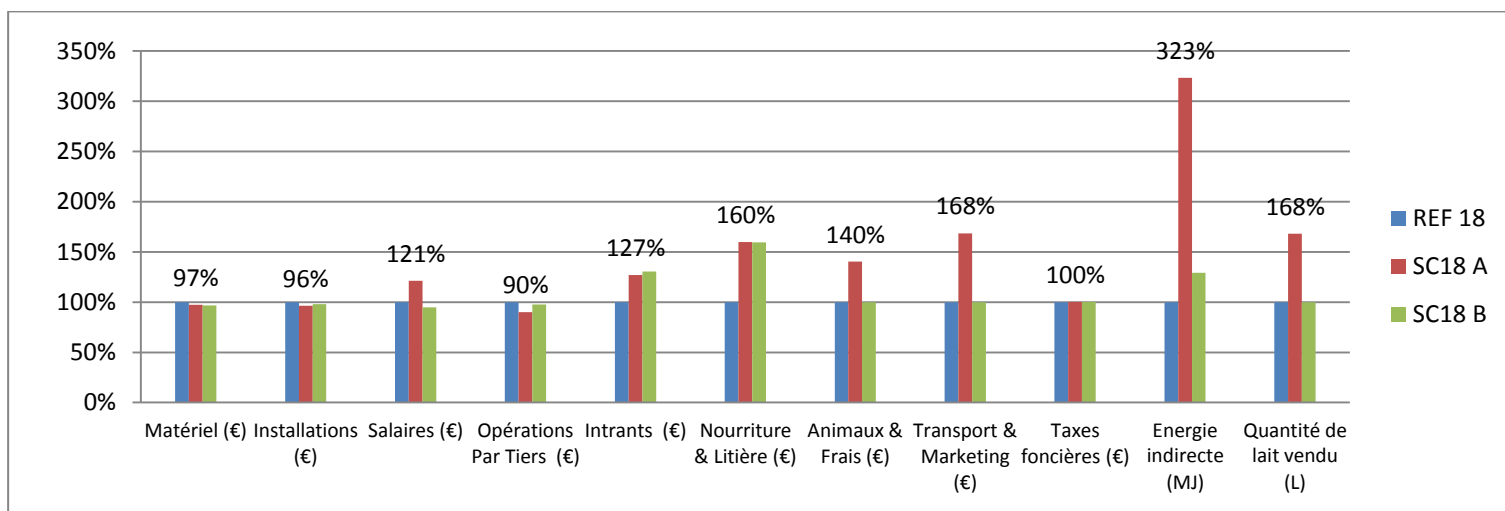


Figure 24 : Comparaison des coûts de fonctionnement, des consommations d'énergie indirecte entre exploitation des référence 18 les scénarios correspondants à l'échelle exploitation

Il existe des coûts très peu variables tels que les taxes, les opérations par tiers, les installations et le matériel, qui pourraient être considérés comme fixes. On observe plus de dépenses pour le scénario intensif dû à la mobilisation de plus d'intrants (+27 %), d'aliment (+60 %), de main d'œuvre (+21 %), qui augmentent la production de lait (+68 %). L'augmentation des coûts du transport de 68 % est due à cette augmentation de la production car on a plus de lait à transporter. Aussi le nombre d'animaux ayant augmenté, les coûts vétérinaires et d'achat d'animaux augmentent de 40 %. Pour le scénario extensif, les hausses de coûts se font plus sentir au niveau de la nourriture et des intrants, avec des augmentations respectives de 59 % et 30 %. Cela est dû aux besoins des cultures des deux rotations.

– Par litre de lait vendu

Pour le scénario intensif (Figure 25), l'augmentation de l'effectif, donc de la quantité de lait destinée au marché, ramène tous les coûts de production par litre de lait à des valeurs inférieurs à leur correspondant dans le scénario de référence. Cependant, la consommation d'énergie indirecte reste en hausse par litre de lait vendu (+92 %). Cela est dû à l'augmentation des surfaces de grandes cultures de 23,9 à 30,8 ha, qui n'nécessitent plus d'intrants (donc d'énergie indirecte) pour les rotations. De plus, le maintien des animaux en bâtiment toute l'année nécessite une forte consommation d'énergie indirecte due à l'alimentation et au confort des animaux.

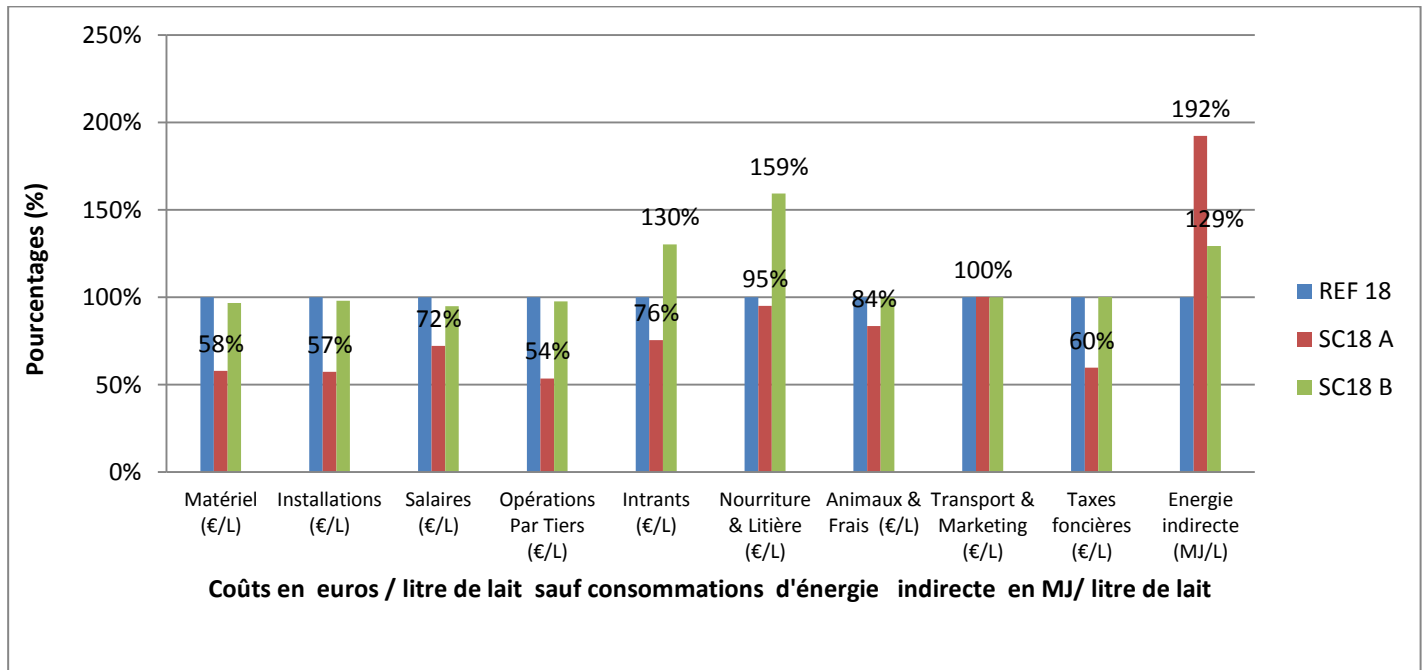


Figure 25: Comparaison des coûts de fonctionnement, des consommations d'énergie indirecte entre exploitation des référence 18 les scénarios correspondants par litre de lait vendu.

D'autre part, tous les autres coûts par litre de lait pour le scénario extensif sont égaux à ceux du scénario de référence, à part les coûts d'intrants et de nourriture, qui augmentent respectivement de 30 % et 59 %. Ces coûts augmentent à cause du plus grand besoin de l'exploitation en fertilisants, vu l'augmentation des surfaces. Le scénario SC18B est moins intéressant économiquement puisque pour une même production on a des surplus de coûts pour certaines entités (intrants, nourriture ...) comparé au scénario de référence. Néanmoins, le scénario SC18A est économiquement intéressant car les dépenses par litre de lait vendu sont globalement inférieures aux dépenses correspondantes dans le scénario de référence. Cependant, les deux scénarios restent plus énergivores par litre de lait comparés au scénario de référence (Figure 25).

3. Conclusion pour l'exploitation 18

Le scénario extensif (SC18B) est plus ou moins respectueux de l'environnement à l'échelle exploitation et par litre de lait produit. Cependant, l'objectif de réduction d'énergie indirecte n'est pas atteint, et les émissions de N₂O sont supérieures à celles du scénario de référence. Il faudrait s'appuyer encore plus sur les postes de consommation d'énergie liés à la fertilisation pour atteindre une efficacité énergétique et atténuer les émissions. Aussi, le scénario extensif (SC18B) n'est pas intéressant sur le plan économique car il nécessite plus de dépenses que le scénario de référence tant à l'échelle exploitation que par litre de lait produit. C'est le contraire pour le scénario intensif (SC18A), qui est moins coûteux (par litre de lait vendu) mais énergivore et moins respectueux de l'environnement. Il faudrait trouver un mixte entre ces deux scénarios pour élaborer un scénario énergétiquement efficace (en énergie indirecte) et durable. Cela serait possible en optant pour un scénario semi-intensif s'appuyant sur la réduction d'énergie indirecte liée à l'alimentation et à la fertilisation, notamment par la réduction d'intrants, à la faveur des cultures fourragères et des légumineuses pour réduire les travaux du sol (et donc de la consommation d'énergie indirecte et les émissions de GES). Dans la valorisation directe des prairies, les consommations d'énergie liées aux activités de récolte, épandage, et conditionnement sont réduites car ces activités sont effectuées en partie par les animaux eux-mêmes (Peyraud *et al.*, 2010). De plus, il faudrait prendre en compte dans la définition du scénario l'adaptation de la production avec la réduction de l'effectif du cheptel, qui entraînera une baisse d'émissions de CH₄. Opter pour un mode de gestion faisant intervenir l'autoconsommation et l'autosuffisance. Toutefois, il faudrait tenir compte de la typologie de l'exploitation et de l'origine des émissions pour élaborer des scénarios compatibles à la structure de l'exploitation.

I.7 Comparaison des différences relatives des revenus nets entre les scénarios (innovation – référence) pour les différentes exploitations étudiées

Les différences relatives des revenus nets exprimées en pourcentage entre scénarios de références et scénarios innovants correspondants pour l'exploitation 13, 14, 15 et 18 sont répertoriées sur la Figure 26.

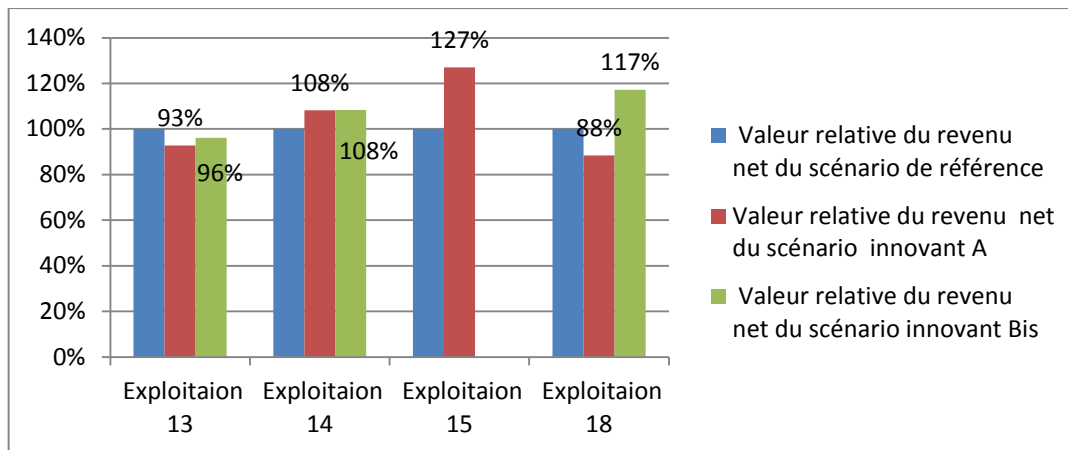


Figure 26: Comparaison des valeurs relatives des revenus entre scénarios de référence et scénarios innovants correspondant pour l'exploitation 13, 14, 15 et 18.

Au niveau de l'exploitation, le scénario SC15 engendre 27 % de profit de plus par rapport à son scénario de référence. Les scénarios de l'exploitation 14 sont également plus rentables que leur scénario de référence avec un surplus de profit de +8%. Cependant, les autres scénarios engendrent moins de profit que leur scénario de référence respectifs, à part le scénario extensif (SC18B) qui fait 17% de plus de profits que son scénario de référence. Malgré la non prise en compte des aides et subvention instaurées par la PAC (Politique Agricole Commune) en France (Chatellier, 2006), des fluctuations de coûts et du besoin de « suréquiper » les exploitations pour le bon fonctionnement du modèle. Les tendances des profits estimés par IFSM donnent des informations semblables à celles tirées de l'analyse des coûts pour toutes les exploitations à l'exception de l'exploitation 18. En effet le revenu du scénario SC18A est en baisse de 18%. Cette estimation survient du fait que en réalité les exploitations en mesure de produire plus de lait sont plus dépendantes des aides (Chatellier, 2006).

II. Analyse de sensibilité des productions et des coûts par rapport à la variabilité climatiques

I.1 Production

Les résultats de l'analyse de sensibilité (Tableau 10) viennent directement des prédictions d'IFSM.

Tableau 10: Production annuelle d'aliments pour une analyse sur 10 ans dans une ferme laitière avec 47 vaches laitières dont un effectif total 56 animaux sur 54 hectares de surface.

Entités	Moyenne de production	Ecart type	Coefficient de variation %
Foin de haute qualité (t MS)	39	9	23,0
Foin de basse qualité (t MS)	1	2	200,0
Ensilage de céréales (t MS)	113	39	34,5
Céréales (t MS)	53	5	9,4
Paille (t MS)	20	3	15,0
Lait (t MS)	7835	0	0,0
Graisses et de protéines de lait (L/vache)	7464	0	0,0

La production de foin de basse qualité est la plus sensible à la variation des années, avec un coefficient de variation de 200 %. Cela s'explique par les aléas climatiques tels que la répartition annuelle de pluies convenables ou non à la production de foin. La production d'ensilage de céréales a un coefficient de variation de 35 %. Les produits comme le foin de haute qualité, les céréales et les pailles ont des coefficients de variation respectifs de 23,1 %, 9,4 % et 15,0 %. Cependant, la production de lait, des graisses et protéines de lait ont des productions stables au cours des années de simulation dus au non prise en compte des risques de maladies et la baisse de productivité des animaux par le modèle. Les produits agricoles et la production de lait sont ainsi sensibles à la variabilité climatique. Cela peut être pris en compte dans l'application des scénarios pour juger un scénario par rapport à un autre.

I.2 Coûts

Les simulations donnent des coefficients de variation inférieurs à 6 % pour tous les coûts qui entrent dans le fonctionnement global de l'exploitation laitière (ANNEXE 23). Les coûts sont peu sensibles à la variabilité climatique des années (Figure 27). Cette variabilité n'explique pas bien la variation des coûts en fonction des années puisque les fluctuations de prix ne sont pas prises en compte par IFSM. Une étude intégrant les indices de variation des prix (Figure 28) pourrait nous donner une idée claire de la variabilité des coûts, qui pourrait être amplifiée.

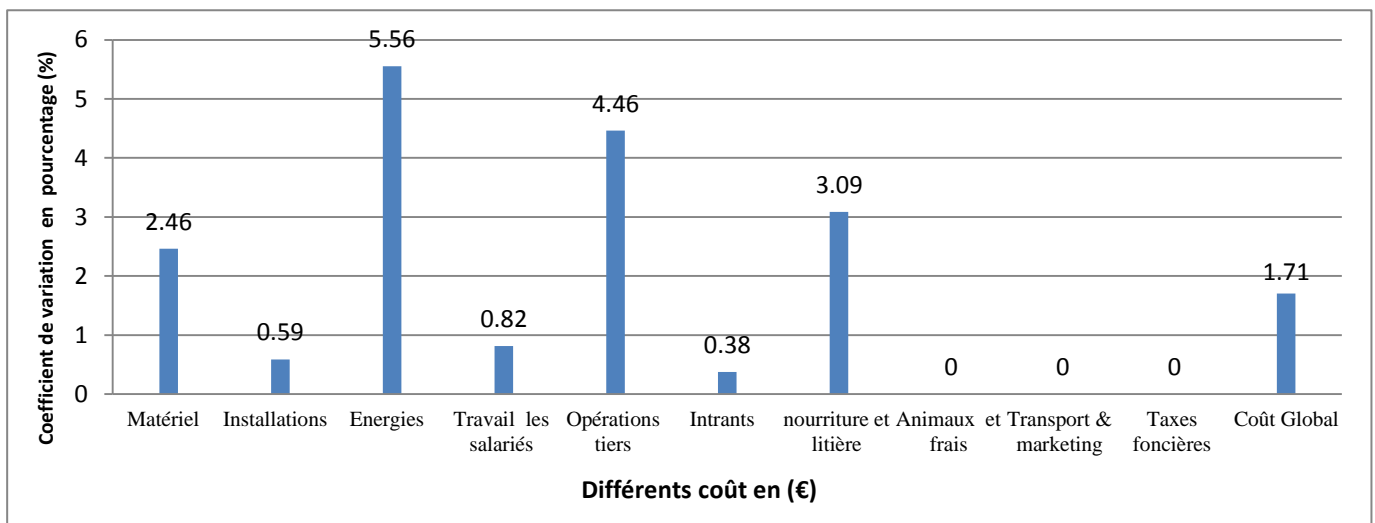


Figure 27 : Représentation des coefficients de variations des coûts sur 10 années

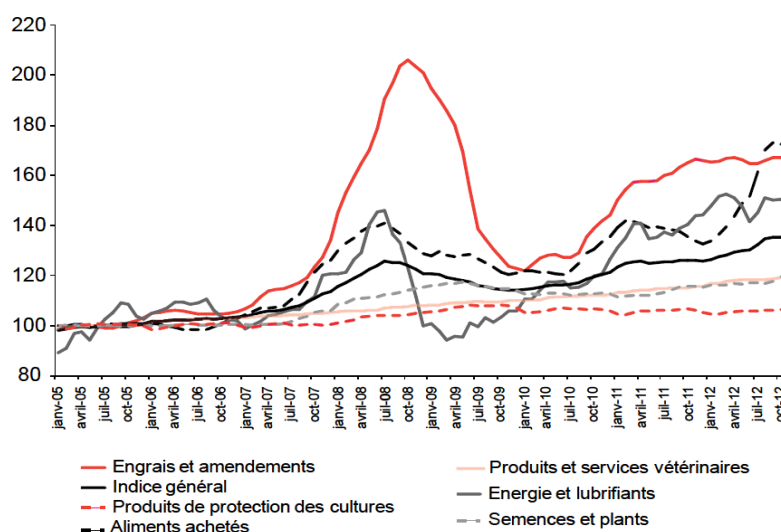


Figure 28: Les indices de prix des intrants dans le secteur du lait de vache en France (IPAMPA, indice 100 = 2005). Source : Institut de l'Élevage, d'après INSEE et Agreste

DISCUSSION GÉNÉRALE

– Calibration du modèle

Les résultats obtenus comparés à ceux de la bibliographie sont délicates. Cela est dû aux spécificités du problème, aux outils utilisés et à la méthodologie employée. Les spécificités d'IFSM et d'EDEN entraînent souvent des écarts significatifs entre les valeurs qu'ils fournissent. Nous avons ainsi formulé une démarche de calibration spécifique à l'étude pour pouvoir atteindre un niveau de rapprochement des prédictions d'IFSM et des données d'EDEN. Une calibration globale demande un investissement important en temps et une bonne connaissance du modèle pour atteindre une certaine représentation de la réalité. La calibration des sous-modèles est d'autant plus compliquée mais plus fiable. Ainsi, dans le but de simuler le rendement des principales cultures annuelles dans les exploitations laitières de l'est du Canada avec IFSM (Jégo *et al.*, 2014), des travaux ont consistés à la calibration et validation du sous-modèle de croissance des espèces fourragères pérennes afin de simuler le rendement et la valeur nutritive de la fléole des prés et de la luzerne, cultivées seules ou en mélange. Lors de ces travaux, la calibration et la validation du modèle ont été réalisées séparément pour les espèces fourragères pérennes et pour les cultures annuelles afin de raffiner les prédictions (Jégo *et al.*, 2014). La calibration et validation séparées ont permis d'avoir des prédictions plus précises, avec un biais faible pour deux espèces ($< 10\%$) et une erreur de prédiction acceptable (Root Mean Square Error [RMSE] $\leq 30\%$) (Jégo *et al.*, 2014). Notre cas consistait à faire varier directement les paramètres de contrôle, d'où le risque de modifier l'exploitation. Pour éviter cela, on aboutit à de fortes variations entre valeurs d'IFSM et valeurs d'EDEN souvent supérieures à 55 %. De plus, des processus agrégés et la substitution de cultures accentuent les différences. Ces résultats ont été analysés sur différentes unités fonctionnelles pour mieux les exploiter

– Unités fonctionnelles

Tout le long de notre analyse on observe des variations de production qui n'entraînent pas les mêmes impacts environnementaux encore moins les mêmes consommations d'énergie ou coûts de production. C'est ainsi que des analyses à l'échelle exploitations et par unité de lait ont été effectuées. Tous les impacts ont été alloués au lait dans les deux cas. Cependant dans les cas de production de différents produits dans un système, les impacts sont répartis entre les produits suivant une règle d'allocation. Pour les exploitations laitières, l'allocation protéique attribue 85% des impacts au lait produit et 15% des impacts à la viande issue du troupeau laitier (Gac *et al.*, 2010). L'évaluation des GES secteur laitier mondial est également faite selon ce principe (FAO, 2010). La méthode consistant à des comparaisons notre simplification entraîne des surplus d'impacts de 15% sur le lait. Cela est acceptable dans la mesure où nous ne sommes pas dans un cas de quantification mais de comparaison. Toute fois les écarts seront proportionnels dans le cas d'une allocation. D'où la possibilité de juger les scénarios par rapport à leur scénario de référence en considérant le lait comme seul produit.

– Analyse des coûts

Nous avons comparé des valeurs relatives des coûts de production des exploitations de référence avec ceux des scénarios correspondants. Les exploitations sont différentes, et les données à notre disposition n'étaient appropriées ni suffisantes pour une étude économétrique pour déterminer les relations entre les prédictions d'IFSM et les valeurs d'EDEN. Toutefois, à la suite de plusieurs simulations sur plusieurs années pour chaque exploitation, on pourrait constituer une base de données. Avec IFSM, les résultats seraient biaisés car IFSM ne prend pas en compte les fluctuations de coûts des ressources ni les aides et subvention instaurées par la PAC en France (Chatellier, 2006). Une prise en compte des de ces éléments est nécessaire pour avoir une base de données fiable. Une analyse faite entre 2007 et 2012 a été caractérisée par une forte volatilité des prix des ressources (Chatellier, 2011), il s'est avéré compliqué de considérer les fluctuations, vu la difficulté de classer et d'évaluer l'influence des facteurs qui y contribuent (la variation du prix de l'énergie, la variabilité des taux de change, spéculation financière, etc...) (Chatellier, 2011). Notre d'analyse des différences relatives des coûts est également confortée par les biais supplémentaire au niveau du profit dû au besoin de « suréquiper » les exploitations pour le bon fonctionnement du modèle. Le fait de se focaliser sur la comparaison des coûts est aussi justifié par les facteurs qui influencent la fixation du prix du lait, tels que les acheteurs (clients des exploitants, donc le prix de vente) et la qualité

des produits (Chatellier *et al.*, 2013). Aussi des entrées de capitaux relatifs aux spéculations des produits agricoles ne sont pas prises en compte dans le calcul du profit dans IFSM.

– Scénarios Innovants

L'objectif de réduction de la consommation d'énergie indirecte est atteint dans les scénarios des exploitations 13 et 15 mais aussi les scénarios SC14Bis de l'exploitation 14. Le scénario SC14 se caractérise par la réduction du temps de séjour d'animaux dans le bâtiment de 134 jours et la culture du maïs ensilage en monoculture en vue de réduire les achats d'intrants donc de consommation d'énergie indirecte. De plus l'association de cultures pour améliorer la structure du sol n'a pas permis d'atteindre l'objectif de réduction d'énergie indirecte. Ce résultat s'explique par le fait que la consommation d'énergie du scénario de référence de l'exploitation 14 avait une consommation d'énergie totale de 1145 GJ (soit 757 GJ d'énergie indirecte et 388 GJ d'énergie directe) alors que la consommation d'énergie total pour le scénario SC14 s'estime à 1917 GJ d'énergie totale (soit 1680 GJ d'énergie indirecte et 237 GJ d'énergie directe). On perçoit que la consommation d'énergie au départ très faible offre une faible marge de réduction. D'où l'augmentation de l'énergie totale et indirecte dans le scénario SC14, avec la baisse de la consommation d'énergie directe. Ainsi, malgré la réduction plus forte du temps de séjour des animaux en bâtiment et de l'utilisation de fertilisants pour le scénario SC14bis on n'arrive qu'à une réduction d'énergie indirecte d'environ 1% comparé au scénario de référence.

Le modèle des scénarios SC14 est SC18A est basé sur l'augmentation de la production, souvent en association avec une réduction de pâturage. Ce type de pratique est souvent économiquement efficace (Peyraud *et al.*, 2010) à cause du nombre important d'animaux et du grand potentiel de production. Cependant, il nécessite d'énormes quantités de ressources (énergie, aliment, intrants) et a des impacts non négligeables sur l'environnement. Nous l'avons bien constaté dans ces deux scénarios. Pour le scénario SC18A (intensif), l'augmentation d'effectif (+63 % de VL), le maintien des animaux dans le bâtiment toute l'année et l'achat d'intrants pour les cultures des deux rotations ne permet pas d'atteindre l'objectif de réduction d'énergie indirecte. De plus, dans le contexte laitier d'une baisse du prix du lait, des suppressions des quotas laitiers (Lips and Rieder, 2005) et l'augmentation de contraintes environnementales, des scénarios focalisés sur des méthodes d'intensification sont généralement peu durables. Quant au scénario SC18B (extensif), malgré le maintien du même effectif et du même temps de pâturage, les apports de concentrés et la mise en place de cultures en dérobées provoque une hausse de consommation d'énergie indirecte. Les scénarios

SC18A et SC18 B s'avèrent énergivores, il faut opter pour des scénarios semi-intensifs en privilégiant la mise en place de pratiques visant à valoriser l'herbe. S'appuyer fortement sur les postes de fertilisation et d'alimentation pour la réduction d'énergie indirecte afin concilier efficacité économique et environnementale (Peyraud *et al.*, 2010).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude a permis de mettre en évidence les postes les plus sensibles en termes de consommation d'énergie indirecte, d'émissions de GES et de coûts de production (l'alimentation et la fertilisation). Elle a permis d'identifier les pratiques qui permettraient d'améliorer les scénarios mais aussi de faire des propositions pour la conception de scénarios génériques énergétiquement efficaces (énergie indirecte) et intéressants sur les plans environnemental et économique. On arriverait à cela en basculant vers des races mixtes à forte valorisation des prairies. Le fait de favoriser des cultures fourragères et d'orienter l'alimentation vers la consommation de fourrages permettra de réduire significativement les achats d'intrants et de concentrés à fortes consommations d'énergie indirecte. L'étude nous a également permis de déceler la tendance de supplémentation d'IFSM, même si elle n'est pas parfaitement perçue dans le cas où plusieurs cultures sont présentes sur l'exploitation. Nous avons également pu déceler les limites d'IFSM, par exemple par l'absence du choix d'une culture protéagineuse autre que le soja. Cela pourrait être revu et adapté afin d'avoir une version d'IFSM propre aux exploitations françaises. Une des difficultés de l'étude était la calibration, vu l'approche généralisée adoptée et les spécificités d'IFSM, qui n'ont pas toujours rendu aisé le rapprochement des valeurs. Les analyses des coûts de production ont permis d'avoir une idée de l'aspect économique des différents scénarios innovants. Toutefois, il s'avère difficile d'extrapoler les valeurs des années d'exercice sur les années actuelles à cause de non intégration des fluctuations de coûts dans la simulation. Il est désormais possible d'élaborer un scénario générique à partir de certains leviers retenus qui ont permis d'atteindre l'objectif pour la plupart de scénarios élaborés. Certains scénarios tels que les scénarios SC14 et les scénarios de l'exploitation 18 n'ont pas permis d'atteindre l'objectif de réduction de l'énergie indirecte, vu la faible consommation d'énergie dans l'exploitation 14 qui offrait une faible marge de réduction d'énergie indirecte. C'est le cas pour les scénarios de l'exploitation 18 à cause des pratiques d'intensification et d'extensification, qui nécessitent pour leur fonctionnement d'énormes ressources en énergie indirecte. Il serait également intéressant d'adapter le modèle IFSM aux systèmes de culture bretonne, tout en intégrant les options de la fluctuation des coûts, les aides et subventions. On sera ainsi en mesure d'évaluer un scénario générique et le mettre en application.

BIBLIOGRAPHIE

ACCUEIL « Production Végétale » Conseils cultures. Le Syndicat Agricole 2011.

ADEME, 2014. Élevage laitier.

Agrimétiers, 2010. L'agriculture en Bretagne : Une diversité de productions.

Beguïn, E., Bonnet, J., Dolle, J., Charroin, T., Ferrand, M., 2008. Les différents postes de consommation en énergie et les pistes d'économie en élevage bovin laitier. Renc. Rech. Rum 15, 217.

Bochu, J.L., 2007. Synthèse 2006 des bilans PLANETE. Consommation d'énergie et émissions des GES des exploitations agricoles ayant réalisé un bilan PLANETE. Rapport final. ADEME, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche.

Bockstaller, C., Girardin, P., 2003. Mode de calcul des indicateurs agri-environnementaux de la méthode INDIGO. Rapprt technique, INRA.

Bos, Jules F.F.P., Janjo de Haan, Wijnand Sukkel, and René L.M. Schils, 'Energy Use and Greenhouse Gas Emissions in Organic and Conventional Farming Systems in the Netherlands', NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences, 68 (2014), 61-70 <<http://dx.doi.org/10.1016/j.njas.2013.12.003>>

Bouamra-Mechemache, Z., Jongeneel, R., Réquillart, V., 2008. Impact of a gradual increase in milk quotas on the EU dairy sector. European Review of Agricultural Economics 35, 461-491.

Box G.E.P., 1976 Science and statistics, Journal of the American Statistical Association, 71, 791-799

Chatellier, V., 2006. Le découplage et les droits à paiement unique dans les exploitations laitières et bovins-viande en France. Cahiers d'économie et sociologie rurales 78, 28.

Chatellier, V., 2011. Price volatility, market regulation and risk management: challenges for the future of the CAP. International agricultural policy 1, 33-50.

Chatellier, V., Lelyon, B., Perrot, C., You, G., 2013. Le secteur laitier français à la croisée des chemins. Productions animales 26, 77-99.

Comptes nationaux de l'agriculture, 2009

Delaby, L., Faverdin, P., Michel, G., Disenhaus, C., Peyraud, J.L., 2009. Effect of different feeding strategies on lactation performance of Holstein and Normande dairy cows. Animal : an international journal of animal bioscience 3, 891-905.

Delaby, L., Peyraud, J., 2009. Valoriser les fourrages de l'exploitation pour produire du lait. Lait 29, 38.

Desjeux, J., 1993. Valeur nutritionnelle du lait de chèvre. Le lait 73, 573-580.

Dia'Terre, 2010

Dollé, J., Gac, A., Le Gall, A., 2009. L'empreinte carbone du lait et de la viande bovine. Renc. Rech. Ruminants 16, 233-236.

Doreau, M., Martin, C., Eugène, M., Popova, M., & Morgavi, D. P. (2011). Leviers d'action pour réduire la production de méthane entérique par les ruminants. *Productions Animales*, 24(5), 461.

EIA, 2014. Annual Energy Outlook 2014.

Environnement en Bretagne, 2008

FAO, 2010. Greenhouse Gas Emissions from the Dairy Sector: A Life Cycle Assessment.

FAO. 2012. World agriculture towards 2030/2050. ESA Working Paper , no12-03, June 2012

Faverdin, P., Chardon, X., Rigolot, C., Baratte, C., Raison, C., Piquemal, B., Martin-Clouaire, R., Rellier, J.-P., Le Gall, A., Dourmad, J.-Y., 2011. Mélodie, un simulateur d'une exploitation d'élevage pour étudier les relations entre conduites des systèmes et risques pour l'environnement. *Innovations Agronomiques* 12, 109-119.

Gac, A., Manneville, V., Raison, C., Charroin, T., Ferrand, M., 2010. L'empreinte carbone des élevages d'herbivores: présentation de la méthodologie d'évaluation appliquée à des élevages spécialisés lait et viande. Renc. Rech. Ruminants 17, 335-342.

Galan, F., Dolle, J., Charroin, T., Ferrand, M., Hiet, C., 2007. Consommation d'énergie en élevage bovin-Des repères pour se situer et progresser. Renc. Rech. Rum 14, 29-32.

Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A., Tempio, G., 2013. Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

INSEE, 2013. Bretagne, La région et ses départements : agriculture.

Institut de l'élevage. 2006. Les consommations d'énergie dans les élevages bovins laitiers. Repères de consommation et pistes d'économie. Synthèse France entière.

Institut de l'élevage. 2009. Les consommations d'énergie en bâtiments d'élevage laitier. Repères de consommation et pistes d'économie. Collection synthèse.

Institut Elevage, 2011 Guide energie : Consommation d'énergie en élevages herbivores et leviers d'action

Jégo, G., Thivierge, M.-N., Rotz, C.A., Bélanger, G., Tremblay, G.F., Morissette, R., Charbonneau, É., Pellerin, D., 2014. Adaptation du modèle IFSM (Integrated Farm System Model) pour simuler le fonctionnement des fermes laitières du Canada.

Le Gall, A., Faverdin, P., Thomet, P., Verite, R., 2001. Grazing in New Zealand: some ideas for the rainy regions of Europe. *Fourrages (France)*.

Lips, M., Rieder, P., 2005. Abolition of raw milk quota in the European Union: a CGE analysis at the member country level. *Journal of Agricultural Economics* 56, 1-17.

Meul, M., Nevens, F., Reheul, D., Hofman, G., 2007. Energy use efficiency of specialised dairy, arable and pig farms in Flanders. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 119, 135-144.

Mosnier, C., Lherm, M., Agabriel, J., 2012. Parmi les systèmes bovins-viande, ceux dont le chargement est plus faible sont-ils moins sensibles aux aléas climatiques?

Nations Unies, D., 2012. *World Population Prospects: The 2012 Revision*. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division New York, NY, USA.

Pachauri, R.K., Reisinger, A., 2008. *Bilan 2007 des changements climatiques: Rapport de synthèse*. GIEC.

Peyraud, J., Dupraz, P., Samson, E., Le Gall, A., Delaby, L., 2010. Produire du lait en maximisant le pâturage pour concilier performances économiques et environnementales. *Renc. Rech. Rum* 17, 17-24.

Pikuła, D., Rutkowska, A., 2014. Effect of leguminous crop and fertilization on soil organic carbon in 30-years field experiment. *Plant, Soil and Environment* 60, 507-511.

Rapport ADEME, 2014

Risoud, B., 2002. *Analyse énergétique d'exploitations agricoles et pouvoir de réchauffement global. Méthode et résultats sur 140 fermes françaises*.

Rotz, C.A., 2008. *The Integrated Farm System Model: A Tool for Whole Farm Nutrient Management Analysis*. Proceedings of American Registry of Professional Animal Scientists.

Rotz, C.A., Corson, M.S., Chianese, D.S., Montes, F., Hafner, S.D., 2012. *The Integrated Farm System Model*. Cornell university crop and soil sciences research series r04-1 university of wisconsin extension publication a3794, 19.

Upton, J., Humphreys, J., Koerkamp, P.G., French, P., Dillon, P., De Boer, I., 2013. Energy demand on dairy farms in Ireland. *Journal of dairy science* 96, 6489-6498.

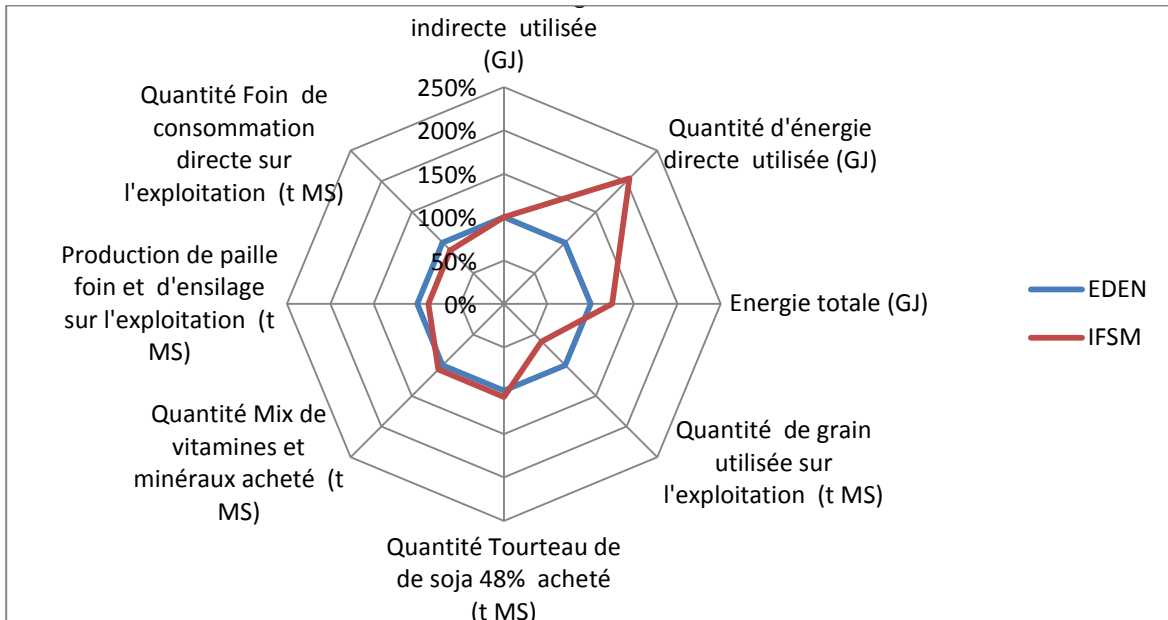
van der Werf, H.M., Kanyarushoki, C., Corson, M.S., 2009a. An operational method for the evaluation of resource use and environmental impacts of dairy farms by life cycle assessment. *Journal of environmental management* 90, 3643-3652.

van der Werf, H.M.G., Kanyarushoki, C., Corson, M.S., 2009b. An operational method for the evaluation of resource use and environmental impacts of dairy farms by life cycle assessment. *Journal of Environmental Management* 90, 3643-3652.

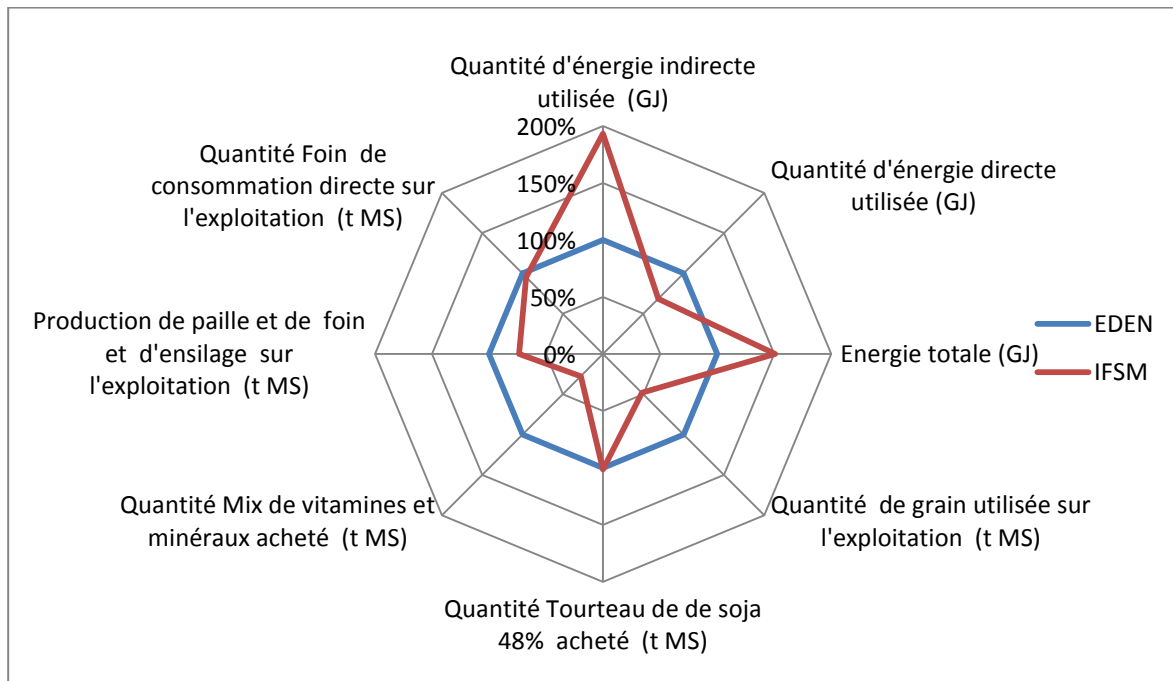
Vermorel, M., 1995. Emissions annuelles de méthane d'origine digestive par les bovins en France. Variations selon le type d'animal et le niveau de production. *INRA Productions Animales* 8, 265-272.

ANNEXES

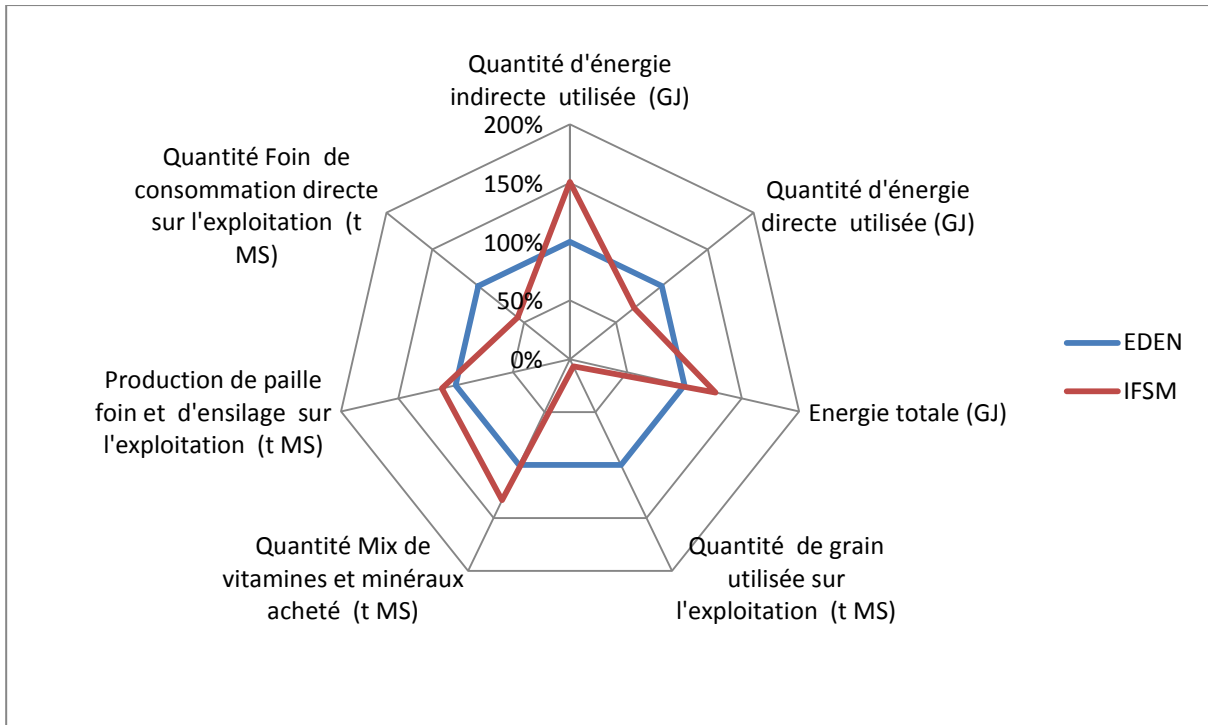
ANNEXE 1: Comparaison des prédictions relatives d'IFSM calibrées pour l'exploitation 13 par rapport aux données d'entrée d'EDEN.



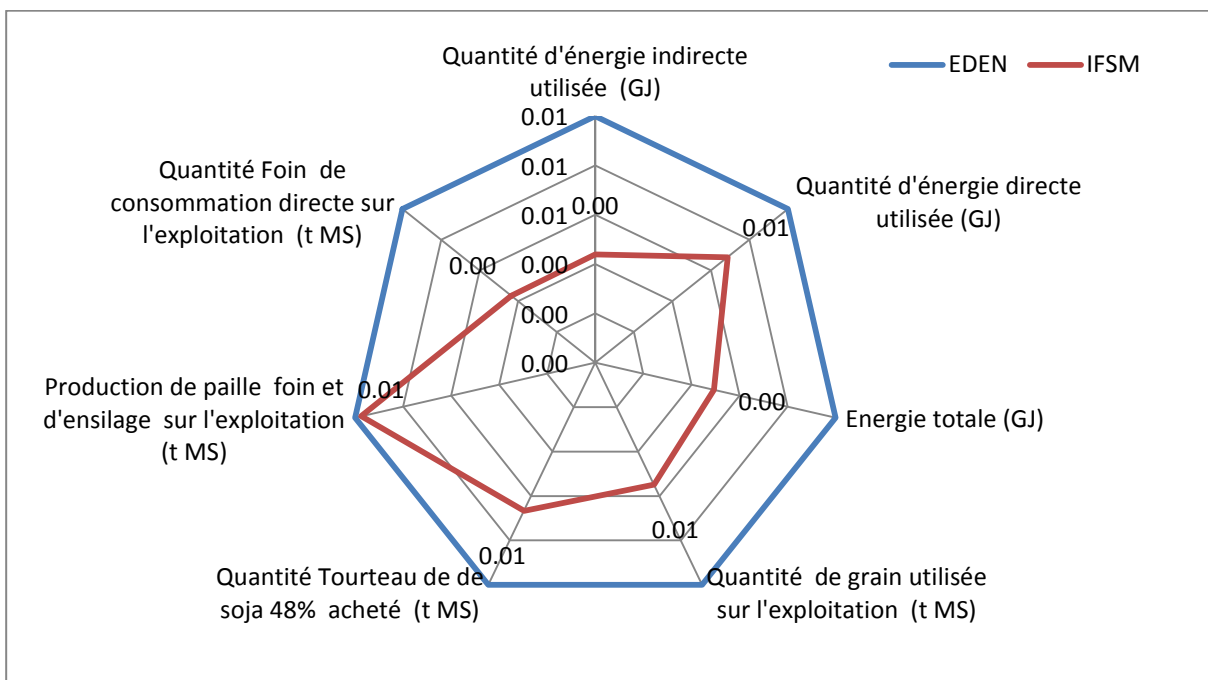
ANNEXE 2: Comparaison des prédictions relatives d'IFSM calibrées pour l'exploitation 14 par rapport aux données d'entrée d'EDEN.



ANNEXE 3: Comparaison des prédictions relatives d'IFSM calibrées pour l'exploitation 15 par rapport aux données d'entrée d'EDEN.



ANNEXE 4: Comparaison des prédictions relatives d'IFSM calibrées pour l'exploitation 18 par rapport aux données d'entrée d'EDEN.



ANNEXE 5: Estimations des principaux paramètres biophysiques pour l'exploitation 13.

Paramètres	REF 13	SC 13	SC 13BIS
Quantité d'énergie indirecte utilisée (GJ)	1122,94	1046,44	987,73
Quantité d'énergie directe utilisée (GJ)	722,61	81,66	81,52
Energie totale (GJ)	1845,55	1128,09	1069,25
Quantité de grain utilisée sur l'exploitation (t MS)	68,13	96,66	84,78
Quantité tourteau de soja 48 % acheté (t MS)	49,00	33,00	30,00
Quantité mix de vitamines et minéraux acheté (t MS)	3,00	2,00	2,00
Production de paille foin et d'ensilage sur l'exploitation (t MS)	226,38	116,65	0,00
Quantité foin de consommation directe sur l'exploitation (t MS)	163,00	236,00	0,00

ANNEXE 6: Résumé des émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'échelle exploitation et par litre de lait vendu pour l'exploitation 13

Énergie indirecte et GES	Unité	REF 13	SC 13	SC 13 BIS
Quantité de lait vendue	L	315541	219934	219934
Énergie indirecte	GJ	1122,943	1071,634	1036,214
CH4	kg	9718	8508	8700
CO2	kg	36515	31028	31691
N2O	kg	521	419	408
Énergie indirecte	GJ/L	0,004	0,005	0,005
CH4	kg /L	0,031	0,039	0,04
CO2	kg /L	0,116	0,141	0,144
N2O	kg /L	0,002	0,002	0,002

ANNEXE 7: Evaluation du changement climatique pour l'exploitation 13

Changement climatique	REF 13	SC 13	SC 13 BIS
kg éq CO2	434723,00	368590,00	370775,00
kg éq CO2/ ha	8125,66	6889,53	6930,37
kg éq CO2/ L de lait	1,38	1,68	1,69

ANNEXE 8: Coûts de fonctionnement et consommation d'énergie indirecte par litre de lait vendu pour l'exploitation 13.

Entité	REF 13	SC13	SC13bis
Matériel (€/L)	0,185	0,217	0,217
Installations (€/L)	0,266	0,375	0,375
Energies (€/L)	0,027	0,027	0,027
Salaires (€/L)	0,169	0,240	0,240
Opérations Par Tiers (€/L)	0,012	0,025	0,025
Intrants (€/L)	0,048	0,063	0,035
Nourriture & Litière (€/L)	0,175	0,198	0,205
Animaux & Frais (€/L)	0,087	0,124	0,124
Transport & Marketing (€/L)	0,024	0,024	0,024
Taxes foncières (€/L)	0,002	0,003	0,003
Energie indirecte (MJ/L)	3,559	4,873	4,711

ANNEXE 9: Coûts de fonctionnement, consommation d'énergie, et production à l'échelle exploitation au niveau des scénarios de l'exploitation 13

LIBELLE	REF 13	SC13	SC13BIS
Coûts du matériel ((€)	58329	47808	47809
Coûts des installations (€)	83920	82515	82383
Coûts des énergies (€)	8548	5949	5829
Coût du travail des salariés (€)	53288	52758	52757
Coût des opérations par tiers (€)	3786	5506	5438
Coût des intrants (€)	15076	13878	7745
Coût net de la nourriture et de la litière achetée (€)	55306	43527	45107
Achat des animaux d'élevage et leurs frais (euros)	27304	27304	27304
Coût du transport du lait et les frais de marketing (€)	7648	5331	5331
Taxes foncières (€)	551	551	551
Energie indirecte consommée (MJ)	1122943	1071634	1036214
Quantité de lait vendu (L)	315541	219934	219934

ANNEXE 10: Résumé des émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'échelle exploitation et par litre de lait vendu pour l'exploitation 14

Energie indirecte et GES	Unité	REF 14	SC14	SC14bis
Quantité de lait vendue	L	321476	325108	325108
Energie indirecte	GJ	1463,275	1679,732	1456,196
CH4	kg	9401,000	9920,000	9202,000
CO 2	kg	12855,000	10800,000	15243,000
N20	kg	538,000	546,000	500,000
Energie indirecte	GJ/L	0,005	0,005	0,004
CH4	kg /L	0,029	0,031	0,028
CO 2	kg /L	0,040	0,033	0,047
N20	kg /L	0,002	0,002	0,002

ANNEXE 11: Evaluation du changement climatique pour l'exploitation 14

Changement climatique	REF 14	SC14	SC14bis
kg éq CO2	408204,00	421508,00	394293,00
kg éq CO2/ ha	6510,43	6722,62	6288,56
kg éq CO2/ L de lait	1,27	1,30	1,21

ANNEXE 12: Coûts de fonctionnement et consommation d'énergie indirecte par litre de lait pour l'exploitation 14

Entité	REF 14	SC14bis
Matériel (€/L)	0.190	0.177
Installations (€/L)	0.328	0.324
Energies (€/L)	0.013	0.013
Salaires (€/L)	0.157	0.154
Opérations Par Tiers (€/L)	0.014	0.015
Intrants (€/L)	0.036	0.069
Nourriture & Litière (€/L)	0.160	0.141
Animaux & Frais (€/L)	0.052	0.052
Transport & Marketing (€/L)	0.021	0.024
Taxes foncières (€/L)	0.002	0.002
Energie indirecte (MJ/L)	4.552	4.479

ANNEXE 13: Coûts de fonctionnement, consommation d'énergie, et production à l'échelle exploitation au niveau des scénarios de l'exploitation 14

LIBELLE	REF 14	SC14	SC14bis
Coûts du matériel (€)	61118	57335	57644
Coûts des installations (€)	105332	104287	105251
Coûts des énergies (€)	4205	3990	4190
Coût du travail les salariés (€)	50331	49541	50214
Coût des opérations par tiers (€)	4370	5602	5014
Coût des intrants (€)	11718	24625	22515
Coût net de la nourriture et de la litière achetée (€)	51282	45562	45858
Achat Des Animaux d'élevage Et Les Différents Frais (€)	16758	16758	16758
Coût du transport du lait et les frais de (€)	6607	7659	7659
Taxes foncières (€)	709	710	710
Quantité de lait vendu (L)	321476	325108	325108
Energie indirecte consommée (MJ)	1463275	1679732	1456196

ANNEXE 14: Résumé des émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'échelle exploitation et par litre de lait vendu pour l'exploitation 15

Energie indirecte et GES	Unité	REF 15	SC15
Quantité de lait vendue	L	264986	235000
Energie indirecte	GJ	1598,595	1016,534
CH4	kg	8607,000	6188,000
CO 2	kg	18872,000	13043,000
N20	kg	677,000	367,000
Energie indirecte	GJ/L	0,006	0,004
CH4	kg /L	0,032	0,026
CO 2	kg /L	0,071	0,056
N20	kg /L	0,003	0,002

ANNEXE 15: Evaluation du changement climatique pour l'exploitation 15

Réchauffement climatique	REF 15	SC15
kg éq CO2	435793	277109
kg éq CO2/ ha	7285,07	4632,38
kg éq CO2/ L de lait	1,64	1,18

ANNEXE 16: Coûts de fonctionnement, consommation d'énergie, et production à l'échelle exploitation au niveau des scénarios de l'exploitation 15

LIBELLE	REF 15	SC15
Coûts du Matériel (€)	59471	58963
Coûts des Installation (€)	110823	110869
Coûts des Energies (€)	5247	4831
Coût du Travail Les Salariés (€)	51596	46729
Coût Des Opérations Par Tiers (€)	4222	4046
Coût des Intrants (€)	84300	16563
Coût Net de La Nourriture Et De La Litière Achetée (€)	51679	28662
Achat des Animaux d'élevage et les Différents Frais (€)	28056	24883
Transport Du Lait Et Les Frais De Marketing (€)	6221	4746
Taxes foncières (€)	738	738
Quantité de lait vendu (L)	264986	235000
Energie Indirecte consommée (MJ)	1598595	1016534

ANNEXE 17: Coûts de fonctionnement et consommation d'énergie indirecte par litre de lait pour l'exploitation 15

Libellés	REF 15	SC15
Matériel (€/L)	0,22	0,25
Installation (€/L)	0,42	0,47
Coûts Energies (€/L)	0,02	0,02
Salaires (€/L)	0,19	0,20
Opérations Par Tiers (€/L)	0,02	0,02
Intrants (€/L)	0,32	0,07
Nourriture & Litière (€/L)	0,20	0,12
Animaux & Frais (euros/L)	0,11	0,11
Transport & Marketing (€/L)	0,02	0,02
Taxes Foncières (€/L)	0,00	0,00
Consommation d'énergie Indirecte (MJ/L)	6,03	4,33

ANNEXE 18: Résumé des émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'échelle exploitation et par litre de lait vendu pour l'exploitation 18

Énergie indirecte et GES	Unité	REF 18	SC18 A	SC18 B
Quantité de lait vendue	L	384140,00	645190	384140
Énergie indirecte	GJ	791968,00	2559893,00	1024230,00
CH ₄	kg	2589,00	13032,00	1026,00
CO ₂	kg	28021,00	29213,00	23940,00
N ₂ O	kg	523,00	891,00	544,00
Énergie indirecte	GJ/L	2,06	3,97	2,67
CH ₄	kg /L	0,01	0,02	0,00
CO ₂	kg /L	0,07	0,05	0,06
N ₂ O	kg /L	0,00136	0,00138	0,00141

ANNEXE 19: Evaluation du changement climatique pour l'exploitation 18

Changement climatique	REF 18	SC18 A	SC18 B
kg éq CO ₂	248600,00	620531,00	211702,00
kg éq CO ₂ / ha	2270,32	5666,95	1933,35
kg éq CO ₂ / L de lait	0,65	0,96	0,55

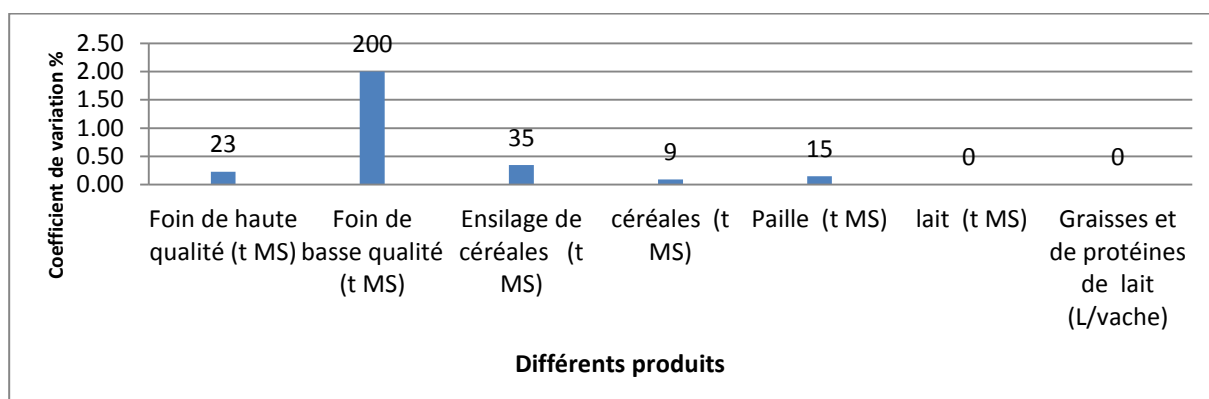
ANNEXE 20: Coûts de fonctionnement et consommation d'énergie indirecte par litre de lait pour l'exploitation 18

LIBELLE	REF 18	SC18 A	SC18 B
Matériel (€/L)	0,17	0,10	0,16
Installations (€/L)	0,29	0,16	0,28
Salaires (€/L)	0,13	0,10	0,13
Opérations Par Tiers (€/L)	0,03	0,02	0,03
Intrants (€/L)	0,12	0,09	0,16
Nourriture & Litière (€/L)	0,10	0,09	0,16
Animaux & Frais (€/L)	0,08	0,07	0,08
Transport & Marketing (€/L)	0,02	0,02	0,02
Taxes foncières (€/L)	0,002	0,001	0,002
Energie indirecte (MJ/L)	2,06	3,97	2,67

ANNEXE 21: Valeurs relatives des revenus nets en pourcentage entre scénarios de références et scénarios innovants correspondants pour l'exploitation 13, 14, 15 et 18.

Exploitations	Exploitation 13	Exploitation 14	Exploitation 15	Exploitation 18
Valeur relative du revenu net du scénario de référence (%)	100	100	100	100
Valeur relative du revenu net du scénario innovant A (%)	93	108	127	88
Valeur relative du revenu net du scénario innovant Bis (%)	96	108		117

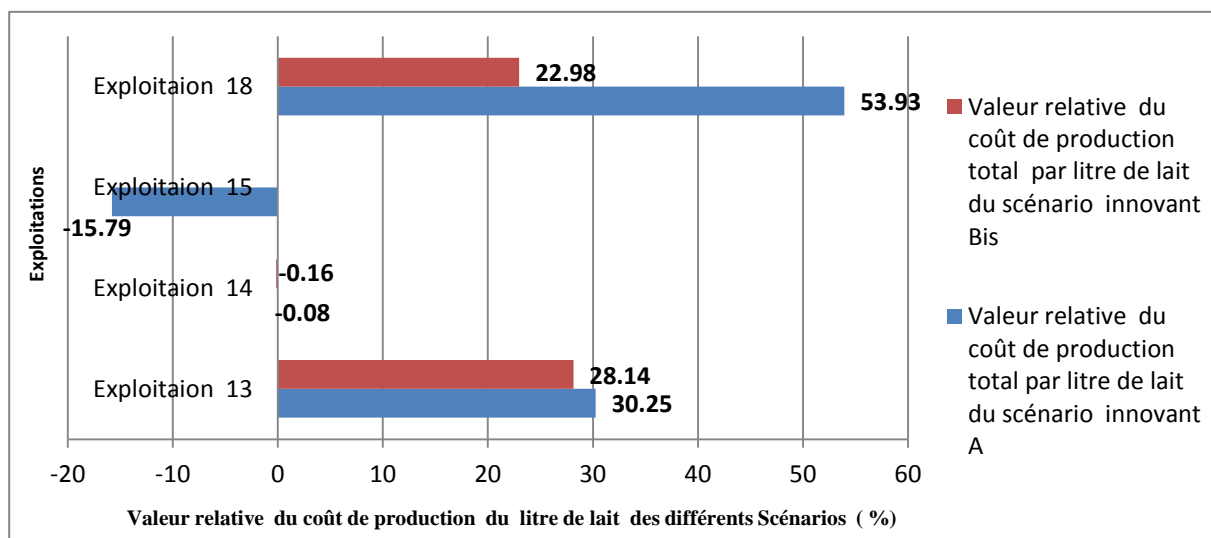
ANNEXE 22: Représentation des coefficients de variations des différents produits sur 10 années



ANNEXE 23: Les coûts de production annuelle pour une analyse de 10 ans dans une ferme laitière avec 47 vaches laitières dont un effectif total 56 animaux sur 54 hectares de surface.

Différents coût en (€)	Coûts moyens	Ecart type	Coefficient de variation (%)
Matériel	61346	1510	2,5
Installations	83485	492	0,6
Energies	5850	325	5,6
Travail les salariés	53266	435	0,8
Opérations tiers	3787	169	4,5
Intrants	15039	57	0,4
Nourriture et litière	58897	1818	3,1
Animaux et frais	27304	0	0,0
Transport & marketing	7648	0	0,0
Taxes foncières	551	0	0,0
Coût Global	317173	4806	1,7

ANNEXE 24: Comparaison des valeurs relatives des coûts de production du litre de lait des différents scénarios exprimées en pourcentage (%).



ANNEXE 25: Tableau récapitulatif des différents prix utilisés pour paramétrer IFSM

ITEM	VALEURS	UNITES	SOURCES
Coût de stockage annuel des céréales	173	€ / t MS	Arvalis Institut du Végétal. (http://www.terre-net.fr/observatoire-technique-culturelle/strategie-technique-culturelle/article/les-raisons-d-investir-217-101919.html) stockage à plat ou en cellules
prix initial de machines (tracteur)	60000	€	Http://www.agriaffaires.com
Coût initial de machine (tracteur)	80000	€	Http://www.agriaffaires.com
Equipements de conservation des foins	122000	€	Arvalis Institut du Végétal (http://www.terre-net.fr/observatoire-technique-culturelle/strategie-technique-culturelle/article/arvalis-cout-stockage-217-44809.html) Stockage « à plat »
Coûts de la salle de traite	141140	€	Référentiel des prix des bâtiments vaches laitières-Basse Normandie – édition octobre 2013 (salle de traite de 2 x 20 soit 40 vaches - un pas de 0.70 m TPA ligne basse double équipement)
Coût de logement pour vaches	141136	€	Référentiel des prix des bâtiments vaches laitières-Basse Normandie – édition octobre 2013 (Logettes 3 rangs – 60 vaches raclées tracteur)
Coût de logements pour génisse	141136	€	Référentiel des prix des bâtiments vaches laitières-Basse Normandie – édition octobre 2013 (Logettes 3 rangs – 60 vaches raclées tracteur)
Farine de soja, 48 %	528	€ / t MS	Note de conjoncture aliments, novembre 2013 (http://www.ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/novembre_2013.pdf)
Grains de maïs	207	€ / t MS	Note de conjoncture aliments, novembre 2013 (http://www.ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/novembre_2013.pdf)
Farine de soja, 44 %	528	€ / t MS	Note de conjoncture aliments, novembre 2013 (http://www.ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/novembre_2013.pdf)
drêches de brasserie	328	€ / t MS	Note de conjoncture aliments, novembre 2013 (http://www.ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/novembre_2013.pdf)
Gluten de maïs, 60 %	258	€ / t MS	Note de conjoncture aliments, novembre 2013 (http://www.ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/novembre_2013.pdf)
Expulseurs tourteau de soja	535	€ / t MS	Note de conjoncture aliments, novembre 2013 (http://www.ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/novembre_2013.pdf)
Graines de soja, brute	528	€ / t MS	Note de conjoncture aliments, novembre 2013 (http://www.ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/novembre_2013.pdf)
Graines de soja (grillée)	535	€ / t MS	Note de conjoncture aliments, novembre 2013 (http://www.ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/novembre_2013.pdf)
Maïs d'humidité élevée	207	€ / t MS	Note de conjoncture aliments, novembre 2013 (http://www.ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/novembre_2013.pdf)

Grains d'humidité élevée	207	€ / t MS	Note de conjoncture aliments, novembre 2013 (http://www.ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/novembre_2013.pdf)
Grains de maïs	207	€ / t MS	Note de conjoncture aliments, novembre 2013 (http://www.ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/novembre_2013.pdf)
Foin achetée	70	€ / t MS	Référentiel économique des réseaux d'élevage de l'est (alsace - lorraine - champagne Ardenne) - année 2014
Soins vétérinaire et médecine	59	€ / vache	Chambres d'agriculture 15-43-48-63 Institut de l'Élevage. Références systèmes Bovins Lait des réseaux d'élevage d'Auvergne et Lozère
sperme et l'élevage	50	€ / vache	Cyrielle Delisle - Réussir Bovins Viande Juillet-Août 2012 (l'utilisation de la semence sexée en élevage bovin viande se développe)
coût initial d'équipement de stockage	190000	euro	(Http://www.terre-net.fr/observatoire-technique-culturelle/strategie-technique-culturelle/article/arvalis-cout-stockage-217-44809.html) cellules intérieures
Gasoil	0.47	€ / litre	Base PEGASE de prix des Energies du site du ministère du développement Durable
Gaz naturel	0.68	euro / m cube	http://tarifgaz.com . (En moyenne, le coefficient thermique est d'environ 11,2 kWh/m ³ pour le gaz H et d'environ 10,0 kWh/m ³ pour le gaz B, et les variations ne peuvent aller en-dessous de 9,0 kWh/m ³ ni au-dessus de 12,4 kWh/m ³)
Electricité	0.09	€ / KWH	Base PEGASE de prix des Energies du site du ministère du développement Durable
Taxe foncière	0.2	%	Référentiel économique des réseaux d'élevage de l'est (alsace - lorraine - champagne Ardenne) - année 2014
Foin additif cultures d'ensilage	0.06	€ / kg	Référentiel économique des réseaux d'élevage de l'est (alsace - lorraine - champagne Ardenne) - année 2014
Grain additif récolte de l'ensilage	0.06	€ / kg	Référentiel économique des réseaux d'élevage de l'est (alsace - lorraine - champagne Ardenne) - année 2014
Azote	5.74	€ / kg N	Sources : CRA Franche Comté, CA Jura et Haute Saône pour les valeurs de la paille /Sources : Corpen pour les valeurs des déjections
Phosphate	1.99	€ / kg P ₂ O ₅	Sources : CRA Franche Comté, CA Jura et Haute Saône pour les valeurs de la paille /Sources : Corpen pour les valeurs des déjections
Potasse	13.56	€ / Kg K ₂ O	Sources : CRA Franche Comté, CA Jura et Haute Saône pour les valeurs de la paille /Sources : Corpen pour les valeurs des déjections
Tourteau de soja, 48 %	528	€ / t MS	Note de conjoncture aliments , novembre 2013 (http://www.ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/novembre_2013.pdf)
Grains de maïs	207	€ / t MS	Note de conjoncture aliments, novembre 2013 (http://www.ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/novembre_2013.pdf)
Foins	70	€ / t MS	Référentiel économique des réseaux d'élevage de l'est (alsace - lorraine - champagne Ardenne) - année 2014
Minéraux / vitamines	1161	€ / t	Référentiel économique des réseaux d'élevage de l'est (alsace - lorraine - champagne Ardenne) - année 2014

Récoltes de céréales d'ensilage	120	€ / t MS	30/08/2012 MAÏS ENSILAGE CAMPAGNE 2012: POUR FACILITER LES TRANSACTIONS (chambre d'agriculture loire atlantique -(source ARVALIS))
Grains d'humidité élevée	207	€ / t MS	Note de conjoncture aliments, novembre 2013 (http://www.ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/novembre_2013.pdf)
Grains de maïs	207	€ / t MS	Note de conjoncture aliments, novembre 2013 (http://www.ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/novembre_2013.pdf)
Soja	528	€ / t MS	Note de conjoncture aliments, novembre 2013 (http://www.ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/novembre_2013.pdf)
Le grain de blé	230	€ / t MS	Note de conjoncture aliments, novembre 2013 (http://www.ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/novembre_2013.pdf)
Foin de haute qualité	70	€ / t MS	Référentiel économique des réseaux d'élevage de l'est (alsace - lorraine - champagne Ardenne) - année 2014
Récolte de grains à découper	7	€ / t	Référentiel économique des réseaux d'élevage de l'est (alsace - lorraine - champagne Ardenne) - année 2014
Hachage de foin	7	€ / t	Référentiel économique des réseaux d'élevage de l'est (alsace - lorraine - champagne Ardenne) - année 2014
Récolte de céréales	115	€ / ha	Référentiel économique des réseaux d'élevage de l'est (alsace - lorraine - champagne Ardenne) - année 2014
Coût initial de camionnette	16000	€	http://www.agriaffaires.com

ANNEXE 26: Feuille de sortie "INPUT PARAMETERS" d'IFSM

Date: 10/06/2015 TUE Time: 07:11:50 PM

CROP AND SOIL PARAMETERS

Land and crop	Value
Owned land	54 ha
Rented land	0 ha
Grass	45 ha
Life of grass stand	2 years
Yield adjustment factor	120 %
Legume portion in sward	20 %
Maximum annual irrigation	0.0 cm
Nitrogen	7.65 kg N/ha
Phosphate	0.40 kg P2O5/ha
Potash	0.33 kg K2O/ha
Manure	76 % of that collected
Wheat	9 ha
Grain yield adjustment factor	150 %
Silage yield adjustment factor	70 %
Maximum annual irrigation	0.0 cm
Nitrogen	76.36 kg N/ha
Phosphate	0.00 kg P2O5/ha
Potash	0.00 kg K2O/ha
Manure	24 % of that collected

Soil Characteristics	Value
Predominant soil type	Deep Clay Loam
Available water holding capacity	210.007 mm
Fraction of available water when stress begins	0.500
Bare soil albedo	0.110
Soil evaporation coefficient	5.994 mm
Moist bulk density	1.300 kg/m3
Organic carbon concentration	1.800 %
Silt content	33.000 %
Clay content	34.000 %
Sand content	33.000 %
Runoff curve number	83.000
Whole profile drainage rate coefficient	0.350
Soil pH	6.500
Tractability coefficients	
Spring tillage and planting, upper soil	0.920
Fall tillage and planting, upper soil	0.990
Fall harvest and planting, upper soil	1.030
Spring tillage and planting, lower soil	0.940
Fall tillage and planting, lower soil	1.000
Fall harvest and planting, lower soil	1.010

TILLAGE AND PLANTING PARAMETERS

Operation	Starting Date
Grass	
Operation #1 Moldboard or chisel plow	15 September
Operation #2 Field cultivator/conditioner	31 December
Operation #3 Field cultivator/conditioner	20 January
Operation #4 Planting	10 February
Wheat	
Operation #1 Moldboard or chisel plow	10 August
Operation #2 Tandem disk	25 August
Operation #3 Field cultivator/conditioner	20 September
Operation #4 Field cultivator/conditioner	26 September
Operation #5 Planting	10 November
Maximum operations performed simultaneously:	2
Time available for tillage and planting operations	7.0 hrs/day

GRAZING PARAMETERS

Parameter	Value
Spring grazing area	32 ha
Summer grazing area	32 ha
Fall grazing area	13 ha
Investment in perimeter fence	0 \$
Investment in temporary fence	0 \$
Investment in watering system	0 \$
Annual cost for seed, fertilizer and chemicals	0 \$/ha
Grazed forage yield adjustment factor	100 percent
Labor for grazing management	70 h/week
Animals grazed	All animals
Time on pasture	Half days during grazing season

HARVEST, FEEDING, TILLAGE AND PLANTING MACHINE PARAMETERS

Machine	Num	Type and Size(Initial Cost)	Tractor(Initial Cost)
Mowing	1	Disk mower-conditioner,10 ft (3.0 m)(\$ 19200)	67 hp (50 kW) tractor(\$ 60000)
Tedding	1	Tedder, 9 ft (2.7 m)(\$ 3000)	67 hp (50 kW) tractor(\$ 60000)
Raking	1	Tandem rake, 26 ft(\$ 6000)	100 hp tractor(\$ 60000)
Baling	1	Medium round baler(\$ 19400)	100 hp tractor(\$ 60000)
Bale wrapping	0	None	None
Forage chopping	1	Medium forage harvester(\$ 22700)	100 hp tractor(\$ 60000)
Grain Harvesting	1	Large corn combine, 12 row(\$ 89000)	100 hp tractor(\$ 60000)
Feed mixing	1	Small mixer (5 ton, 4.5 t)(\$ 16800)	100 hp tractor(\$ 60000)
Silo filling	1	Forage blower or bunker compacting	134 hp tractor(\$ 60000)
Manure handling 1	1	Medium box spreader(\$ 9300)	100 hp tractor(\$ 60000)
Manure handling 2	0	None	None
Plowing	1	Coulter-chisel plow, 12 ft (3.7 m)(\$ 10000)	134 hp tractor(\$ 60000)
Disking	1	Tandem disk harrow, 12 ft (3.7 m)(\$ 11400)	120 hp tractor(\$ 60000)
Field Cultivation	1	Seedbed conditioner, 15 ft (4.6 m)(\$ 19000)	120 hp tractor(\$ 60000)
Aeration	0	None	None
Row crop planting	1	Corn planter, 16-row (12.2 m)(\$ 69200)	220 hp tractor(\$ 60000)
Drill seeding	1	Grain drill, 25 ft (7.6 m)(\$ 27100)	220 hp tractor(\$ 60000)
Spraying	0	None	None
Crop irrigation	0	None	None

MISCELLANEOUS MACHINE PARAMETERS

Machine Type	Number	Tractor
Transport tractors	1	67 hp (50 kW) tractor
Feed /manure loader	1	Medium skid-steer loader
Manure nurse tankers	0	
Round bale loader	1	100 hp tractor
Manure Agitator		100 hp tractor
Auxiliary manure pump		None
Initial machine shed cost		80000 \$
Custom Operations		
Mowing		32.26 \$/ha
Tedding		19.17 \$/ha
Grain harvest		115.00 \$/ha
Manure hauling		37.89 \$/hour

Feed transport	Machine	Number	Haul distance
Hay	Square bale wagons	1	1.00 km
Hay crop silage	Self unloading wagons	1	1.00 km
Grain crop silage	Self unloading wagons	1	1.00 km
Grain	Self unloading wagons	1	1.00 km

GRASS HARVEST PARAMETERS

Preferred harvest schedule: 4 Cuttings - early boot first, 45 days to others

Harvest	Type	Earliest Harvest Date	Drying Treatment
First	Hay harvest by baling	1 April	Mechanical conditioning, narrow swath
Second	Hay harvest by baling	16 May	Mechanical conditioning, wide swath
Third	Hay harvest by baling	30 June	Mechanical conditioning, narrow swath
Fourth	Hay harvest by baling	14 November	Mechanical conditioning, narrow swath

Harvest	Chemical Cond. Rate	% NDF at Harvest	%Moisture at Harvest	Critical NDF for HQ	Raking Treatment	Tedding Treatment
rain	First 0.00 L/ha	45	20	60	No raking	No tedding
rain	Second 0.00 L/ha	55	30	60	Raking both after rain & before harvest	Tedding 1st, 2nd day if > 40% mc & after
rain	Third 0.00 L/ha	55	30	60	Raking both after rain & before harvest	Tedding 1st, 2nd day if > 40% mc & after
rain	Fourth 0.00 L/ha	55	80	60	Raking both after rain & before harvest	Tedding 1st, 2nd day if > 40% mc & after

Wheat Harvest Parameters

Starting dates	
Wheat silage	1 July
High moisture Wheat	21 July
Dried grain	22 June
Primary use of grain	Animal feed
Harvest straw for bedding	Yes

STORAGE AND PRESERVATION PARAMETERS

Forage Type	Storage Type	Capacity (t DM)	Initial Cost (\$)	Annual Cost (\$/t DM)
High quality forage (1)	Sealed silo	137	33706	10.00
High quality forage (2)	Bunker silo	240	61550	10.00
Low quality forage (1)	Bunker silo	240	61550	10.00
Low quality forage (2)	Stave silo	137	46525	10.00
Grain crop silage (1)	No storage	0	0	10.00
Grain crop silage (2)	Bunker silo	168	42146	10.00
High moisture grain	Bunker silo	0	2413	10.00
Dry Hay	Inside a shed	136	35000	0.00
Dry grain storage	----	----	----	10.00

Preservation Treatments	Value
High moisture hay drying type	Ambient air drying of small rect bales
Dryer capacity	5.00 t DM
Additional labor	0.00 man h/t DM
Hay preservation procedure	Moderate hay preservation used
Hay preservation treatment	Buffered/ dilute acid solution
Hay preservation application rate	2.50 %DM
Hay preservation equipment cost	0.00 \$
Grain crop silage:	
Treatment	Anhydrous ammonia
Application rate	2.00 %DM
Equipment cost	0.00 \$

HERD, FEEDING AND MANURE PARAMETERS

Herd/Facility Parameters	Value
Animal type	Large Holstein
Target milk production	5461 liter/cow/year
First lactation animals	30 %
Number of lactating animals	47
Number of young stock (over 1 year)	36
Number of young stock (under 1 year)	20
Animal facilities	
Milking center structure: Double eight parlor	141140 \$
Milking and milk handling equipment	120250 \$
Cow housing: Free stalls and dry lot	141136 \$
Heifer housing: Calf hutches and open lot	141136 \$
Feed facility: Commodity shed	141136 \$
Labor for milking and animal handling	5.0 minutes/cow/day
Feeding Method	
Grain	Stationary mixer and conveyer
Silage	Loader and mixer wagon
Hay	Self fed in hay feeder
Ration constituents	
Minimum dry hay in rations	2.0% of forage
Relative forage to grain ratio	Low
Crude protein supplement	Soybean meal, 48%

Undegradable protein supplement	Soybean seed, raw
Energy supplement	None
Phosphorus feeding level in rations	110% of NRC recommendation
Protein feeding level in rations	110% of NRC recommendation
Livestock expense	
Bovine somatotropin injection	0.00 \$/cow
Veterinarian and medication	123.00 \$/cow
Semen and breeding	50.00 \$/cow
Animal and milking supplies	125.00 \$/cow
Insurance of animals	11.00 \$/cow
Utilities for Milking and animal handling	85.00 \$/cow
Animal hauling	10.00 \$/cow
DHIA, registration, etc.	23.00 \$/cow
<hr/>	
Primary Manure Parameters	Value
<hr/>	
Manure collection method	Scraper with bucket loading
Manure type	Semi solid (12 - 14% DM)
Average hauling distance	1.00 km
Average time between spreading and incorporation	3 day(s)
Manure storage	
Method	6 month storage
Type	Enclosed tank
Storage capacity	3358 t
Initial storage cost	190000 \$
Bedding	
Type	Straw
Amount of bedding per mature animal	5.00 kg/day
<hr/>	

ECONOMIC PARAMETERS

General Information	Value
Rates	
Diesel fuel	0.47 \$/liter
Electricity	0.09 \$/kWh
Grain drying	2.01 \$/pt/t DM
Labor wage	13.15 \$/hour
Land rental	294.00 \$/ha
Property tax	0.20 %
Treatment prices	
Drying agent	0.00 \$/kg
Hay preservative	0.00 \$/kg
Hay crop silage additive	0.06 \$/kg
Grain silage additive	0.06 \$/kg
Economic life	
Machinery	12.00 years
Structure	30.00 years
Salvage value	
Machinery	30.00 %
Structure	0.00 %
Interest rate	
Medium term	4.00 %
Long term	4.00 %
Other unaccounted farm overhead	0.00 \$

Cropping Information	Value
Cost of seeds and chemicals	
New forage stand	271.00 \$/ha
Established forage stand	45.12 \$/ha
Corn land	79.00 \$/ha
Wheat land	361.00 \$/ha
Soybean land	165.00 \$/ha
Additional for corn following corn	11.28 \$/ha
Fertilizer prices	
Nitrogen	5.740 \$/kg
Phosphate	1.990 \$/kg
Potash	13.560 \$/kg
Commodity Information	
Buying prices	
Crude protein supplement	528.00 \$/t DM
Soybean seed, raw	528.00 \$/t DM
Corn grain	207.00 \$/t DM
Hay	70.00 \$/t DM
Fat	891.27 \$/t
Minerals / vitamins	1161.00 \$/t
Bedding material	100.63 \$/t
Selling prices	
Grain crop silage	120.00 \$/t DM
High moisture corn	207.00 \$/t DM
Corn grain	207.00 \$/t DM
Soybeans	528.00 \$/t DM
Wheat grain	230.00 \$/t DM
Alfalfa hay	180.00 \$/t DM
Milk	35.00 \$/hL
Cull cow	1.10 \$/kg
Heifer	1369.50 \$/animal
Calf	136.95 \$/animal
Milk hauling, marketing & advertizing fees	2.077 \$/hL

Custom Operations	Value
Forage crop tillage and planting	147.77 \$/ha
Grain crop tillage	103.78 \$/ha
Grain crop planting	40.00 \$/ha
Mowing	32.26 \$/ha
Raking	19.17 \$/ha
Tedding	19.17 \$/ha
Baling	17.61 \$/t
Grain crop silage chopping	7.00 \$/t
Hay crop chopping	7.00 \$/t
Grain harvest	115.00 \$/ha
Manure hauling	37.89 \$/hour

ANNEXE 27 : Feuille de sortie "SAMMARY OUTPUT" d'IFSM

Average crop yields and nutritive contents over a 1 year analysis of a 54 ha dairy farm.

	----- Preharvest -----			----- Postharvest -----		
	Yield (t DM/ha)	Crude Protein	NDF	Yield (t DM/ha)	Crude Protein	NDF
GRASS, 44 ha						
Cutting 1	0.36	29.7	32.6	0.00	0.0	0.0
Cutting 2	1.21	27.7	41.3	1.04	28.1	41.9
Cutting 3	2.08	20.9	49.4	1.80	21.6	51.5
Cutting 4	4.34	19.7	50.5	4.14	20.0	51.3
Total	8.00	21.7	48.0	6.99	20.8	50.6
WHEAT, 9 ha						
Dry grain	11.59	13.3	32.0	10.85	13.3	32.0

Annual feed production and use for a 1 year analysis of a dairy farm with 47 cows and 56 other stock on 54 hectares of land.

	Unit	Mean	SD
High-quality hay production	t DM	95	0
Dry grain production	t DM	93	0
Stover and straw production	t DM	22	0
Grazed forage consumed	t DM	107	0
Forage purchased	t DM	118	0
Grain purchased	t DM	27	0
Soybean meal, 48% purchased	t DM	32	0
Mineral and vitamin mix purchased	t DM	2	0
Milk production	L/cow	5461	0
Fat and protein corrected milk production	kg/cow	5203	0

Nutrients available, used, and lost to the environment for a 1 year analysis of a farm with 47 cows and 56 other stock on 54 hectares of land.

	Unit	Mean	SD
Nitrogen imported to farm	kg/ha	234.9	0.0
Nitrogen exported from farm	kg/ha	36.7	0.0
Nitrogen available on farm	kg/ha	370.2	0.0
Nitrogen lost by volatilization	kg/ha	126.2	0.0
Nitrogen lost by leaching	kg/ha	59.0	0.0
Nitrogen lost by denitrification	kg/ha	18.5	0.0
Nitrogen lost by runoff	kg/ha	0.5	0.0
Average nitrogen concentration in leachate	ppm	14.7	0.0
Crop removal over that available on farm	%	60	0
Phosphorous imported to farm	kg/ha	13.7	0.0
Phosphorous exported from farm	kg/ha	7.3	0.0
Phosphorous available on farm	kg/ha	17.6	0.0
Phosphorous loss in runoff and leachate	kg/ha	0.2	0.0
Soil phosphorous build up	kg/ha	6.2	0.0
Crop removal over that available on farm	%	124	0
Potassium imported to farm	kg/ha	97.7	0.0
Potassium exported from farm	kg/ha	8.2	0.0
Potassium available on farm	kg/ha	112.7	0.0
Potassium loss through runoff	kg/ha	5.6	0.0
Soil potassium build up	kg/ha	83.9	0.0
Crop removal over that available on farm	%	128	0
Carbon imported to farm	kg/ha	9176.7	0.0
Carbon exported from farm	kg/ha	403.2	0.0
Carbon loss as carbon dioxide	kg/ha	8653.1	0.0
Carbon loss as methane	kg/ha	118.9	0.0
Carbon loss through runoff	kg/ha	1.4	0.0

Annual manure production, nutrient availability and handling cost for a 1 year analysis of a farm with 47 cows and 56 other stock on 54 hectares of land.

	Unit	Mean	SD
Manure handled	t	874	0
Manure applied to grass land	t	664	0
Manure applied to wheat land	t	209	0
Manure nitrogen over crop requirement	%	62	0
Manure phosphorous over crop requirement	%	103	0
Manure potassium over crop requirement	%	136	0
Machinery cost	\$	5674	0
Fuel and electric cost	\$	107	0
Custom hauling cost	\$	1180	0
Storage cost	\$	10988	0
Labor cost	\$	1243	0
Bedding cost	\$	9889	0
Total manure handling cost	\$	29081	0
Total cost per mature animal	\$/cow	619	0

Annual crop production and feeding costs and the net return over those costs for a 1 year analysis of a farm with 47 cows and 56 other stock.

	Unit	Mean	SD
Equipment cost	\$	46459	0
Fuel and electric cost	\$	3950	0
Feed and machinery facilities cost	\$	24170	0
Labor cost	\$	32718	0
Seed, fertilizer and chemical cost	\$	13878	0
Grain drying and roasting cost	\$	1180	0
Land rental	\$	0	0
Purchased feed cost	\$	33590	0
Income from feed sales	\$	0	0
Net feed cost	\$	155945	0
Net cost per unit of milk	\$/hl	60.76	0.00
Net cost as portion of milk income	%	173.6	0.0
Income from milk sales	\$	89833	0
Net return over feed costs	\$	-66112	0
Net return per cow	\$/cow	-1407	0

Annual production costs and return to management for a 1 year analysis of a farm with 47 cows and 56 other stock on 54 hectares of land.

	Unit	Mean	SD
Equipment cost	\$	47808	0
Facilities cost	\$	82515	0
Energy cost	\$	5949	0
Labor cost	\$	52758	0
Custom operation cost	\$	5506	0
Seed, fertilizer and chemical cost	\$	13878	0
Net purchased feed and bedding cost	\$	43527	0
Animal purchase and livestock expense	\$	27304	0
Milk hauling and marketing fees	\$	5331	0
Property tax	\$	551	0
Income from milk sales	\$	89833	0
Income from animal sales	\$	41900	0

Return to management and unpaid factors	\$	-153394	0
---	----	---------	---

Crop production costs and total feed costs for a 1 year analysis of a farm with 47 cows and 56 other stock on 54 hectares of land.

	Unit	Mean	SD
Crop Production Costs			
Hay	\$/t DM	520.23	0.00
Hay crop silage	\$/t DM	0.00	0.00
Grain crop silage	\$/t DM	0.00	0.00
High-moisture grain	\$/t DM	0.00	0.00
Dry grain	\$/t DM	197.19	0.00
Grazed forage	\$/t DM	388.24	0.00
Feed Costs			
Hay	\$/t DM	244.06	0.00
Hay crop silage	\$/t DM	0.00	0.00
Grain crop silage	\$/t DM	0.00	0.00
High-moisture grain	\$/t DM	0.00	0.00
Dry grain	\$/t DM	228.24	0.00
Grazed forage	\$/t DM	632.83	0.00

Daily and annual emissions of important gaseous compounds for a dairy farm with 47 cows and 56 other stock on 54 hectares of land.

	Maximum daily		Average daily		Total annual	
	kg/cow	kg	kg/cow	kg	kg/cow	kg
Ammonia						
Housing facility	1.774	83	0.329	15	120.1	5645
Manure storage	0.143	7	0.054	3	19.6	921
Field application	2.483	117	0.074	3	27.1	1272
Grazing	0.114	5	0.022	1	7.9	371
Total farm	2.866	135	0.479	22	174.7	8196
Hydrogen Sulfide						
Housing facility	0.002	0	0.002	0	0.6	26
Manure storage	0.001	0	0.000	0	0.1	4
Field application	0.154	7	0.006	0	2.4	111
Grazing	0.000	0	0.000	0	0.0	0
Total farm	0.157	7	0.008	0	3.0	142
Ozone Forming VOC						
Housing manure	0.002	0	0.001	0	0.4	18
Manure storage	0.001	0	0.001	0	0.5	22
Field / grazing	0.228	11	0.012	1	4.6	214
Total farm	0.230	11	0.015	1	5.4	254
Methane						
Housing facility	0.583	27	0.379	18	138.4	6504
Manure storage	0.009	0	0.002	0	0.7	34
Field application	0.033	2	0.001	0	0.5	24
Grazing	0.218	10	0.112	5	40.9	1921
Total farm	0.584	27	0.494	23	180.5	8508
Nitrous Oxide						
Housing facility	0.088	4	0.012	1	4.3	203
Manure storage	0.004	0	0.003	0	1.2	57
Farmland	0.091	4	0.009	0	3.4	159
Total farm	0.097	5	0.024	1	8.9	419
Biogenic Carbon Dioxide						
Housing facility	21.160	995	15.207	715	5550.4	260868
Manure storage	3.019	142	0.719	34	262.3	12330
Assimilated in feed	---	---	-26.187	-1231	-9558.2	-449233
Grazing animals	7.371	346	4.275	201	1560.2	73329
Net emission	---	---	-5.987	-281	-2185.2	-102706
Anthropogenic Carbon Dioxide						
	---	---	1.820	86	664.4	31226

Environmental footprints of water, nitrogen, energy and carbon for a dairy farm with 47 cows and 56 other stock on 54 hectares of land.

	Unit	Mean	SD
Water Use			
Feed production, rainfall	Mg	262790	0
Drinking	Mg	1350	0
Animal cooling	Mg	44	0
Parlor and equipment cleaning	Mg	429	0
Production of purchased feed and inputs	Mg	211734	0
Not allocated to milk production	Mg	-183740	0
Water footprint with rainfall	kg/kg FPCM	1197	0
Water footprint without rainfall	kg/kg FPCM	644.7	0.0
Reactive Nitrogen Loss			
Ammonia emission	kg	6751	0
Nitrate leaching and runoff	kg	3183	0
Nitrous oxide emission	kg	359	0
Fuel combustion emissions	kg	88	0
Production of resource inputs	kg	411	0
Not allocated to milk production	kg	-3711	0
Reactive nitrogen footprint	g/kg FPCM	28.96	0.00
Energy Use			
Feed production	MJ	375192	0
Animal feeding	MJ	19825	0
Manure handling	MJ	8574	0
Milking and milk cooling	MJ	57164	0
Animal housing ventilation and lighting	MJ	17147	0
Production of resource inputs	MJ	1071634	0
Not allocated to milk production	MJ	-627038	0
Energy footprint	MJ/kg FPCM	3.77	0.00
Greenhouse Gas Emissions (CO₂e)			
Animal emissions	kg	205192	0
Manure emissions	kg	84971	0
Emission during feed production	kg	47346	0
Net biogenic carbon dioxide emission	kg	-102775	0
Anthropogenic carbon dioxide emission	kg	31029	0
Production of resource inputs	kg	114269	0
Not allocated to milk production	kg	-207483	0
Carbon footprint without biogenic CO ₂	kg/kg FPCM	1.12	0.00
Carbon footprint with biogenic CO ₂	kg/kg FPCM	0.81	0.00

FPCM is fat and protein corrected milk (4.0% fat and 3.3% protein)