



HAL
open science

Étude des flux de matière et d'énergie des systèmes de culture, d'élevage et de production du canton de Madakasira, Andhra Pradesh, Inde

Camille Picart

► **To cite this version:**

Camille Picart. Étude des flux de matière et d'énergie des systèmes de culture, d'élevage et de production du canton de Madakasira, Andhra Pradesh, Inde. Agronomie. 2023. dumas-04428104

HAL Id: dumas-04428104

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04428104>

Submitted on 20 Mar 2024

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

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

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur agronome
Option RESAD (ressource des systèmes agricoles et développement)

Etude des flux de matière et d'énergie des systèmes de culture, d'élevage et de production du canton de Madakasira, Andhra Pradesh, Inde



Par Camille Picart

Année de soutenance : 2023

Mémoire préparé sous la
direction de : Claire Aubron

Organisme d'accueil :
INRAe UMR Selmet, UMR SAS

Présenté le : 26/10/2023,
devant le jury :
Claire Aubron
Olivier Philippon
Laurent Ruiz
Mathieu Vigne

Maître de stage : Claire Aubron

RESUME

Ce stage s'inscrit dans la deuxième phase du projet IndiaBio, une suite logique du diagnostic agraire effectué l'année précédente en 2022 dans le canton de Madakasira, en Andhra Pradesh. Le diagnostic agraire a joué un rôle essentiel en dressant un état des lieux des systèmes de production qui avaient potentiellement vocation à se diffuser dans le canton, grâce à une analyse technico-économique approfondie. En effet de nouvelles dynamiques agricoles sont à l'œuvre et il a été supposé que ces évolutions eussent vraisemblablement modifié les flux de matières et d'énergie au sein de ces systèmes de production. C'est à travers cette démarche que l'étude a pu élaborer une première évaluation environnementale, en examinant de près ces flux au sein des systèmes de production qui tendent à se répandre dans le canton.

Le canton de Madakasira est notable pour la conversion d'un certain nombre d'agriculteurs au natural farming, un mouvement agricole basé sur les pratiques agroécologiques traditionnelles indiennes. L'objectif de cette étude porte également sur l'analyse des changements associés à cette transition qualifiée d'agroécologique en comparant les systèmes de production convertis au natural farming à ceux menés selon des méthodes conventionnelles.

Enfin, l'étude des flux et la comparaison des systèmes de production, à travers l'utilisation d'indicateurs, a permis d'identifier les leviers et les limites en vue d'une utilisation plus efficace des ressources matérielles et énergétiques, dans le but de réduire les impacts environnementaux, notamment en termes de consommation d'énergie fossile.

Mots clés : flux d'énergie, consommation d'énergie fossile, système de production, transition agroécologique, natural farming, agriculture indienne

Pour citer ce document : [Picart C. 2023. Etude des flux de matière et d'énergie des systèmes de culture, d'élevage et de production du canton de Madakasira, Andhra Pradesh, Inde. Mémoire d'ingénieur agronome, option REssource des Systèmes Agricoles et Développement, L'institut Agro Montpellier, 78p.]

ABSTRACT

This internship is part of the second phase of the IndiaBio project, a logical continuation of the agrarian diagnosis conducted in the previous year, in 2022, in the Madaksira district of Andhra Pradesh. The agrarian diagnosis played a crucial role in providing an overview of production systems that had the potential to spread in the district, thanks to an in-depth techno-economic analysis. Indeed, new agricultural dynamics are at play, and it was assumed that these developments had likely altered material and energy flows within these production systems. It is through this approach that the study was able to develop an initial environmental assessment by closely examining these flows within the production systems that are spreading in the district.

The Madaksira district is noteworthy for the conversion of a number of farmers to natural farming, an agricultural approach based on traditional Indian agroecological practices. The objective of this study is also to analyze the changes associated with this agroecological transition by comparing the production systems converted to natural farming with those managed using conventional methods.

Finally, the study of flows and the comparison of production systems, through the use of indicators, have allowed for the identification of levers and limitations for more efficient use of material and energy resources, with the aim of reducing environmental impacts, especially in terms of fossil energy consumption.

Keywords: energy flows, fossil energy consumption, production system, agroecological transition, natural farming, Indian agriculture.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma gratitude envers les agriculteurs du canton de Madakasira qui ont généreusement participé à mes enquêtes, parfois sur de longues périodes. Partager des repas, du travail et des expériences avec eux a été une expérience incroyable. Je remercie particulièrement mon traducteur Guru, sans qui ce stage aurait été très compliqué. Sa précieuse aide m'a permis de comprendre les paroles des agriculteurs.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance à la famille de Jayaram, qui m'a chaleureusement accueilli. Un grand merci à Chandrakala pour m'avoir fait découvrir une cuisine traditionnelle indienne délicieuse. Parfois, les mots sont superflus lorsque les regards parlent.

Un grand merci à l'équipe de l'APCNF, notamment à Praveen, Ramesh et Adithi, qui m'ont aidé à organiser des rencontres avec les naturels farmers du canton. Leur engagement envers le natural farming est inspirant, et je leur souhaite tout le succès possible pour que ces pratiques puissent se diffuser davantage dans le canton.

Je tiens à remercier chaleureusement toute l'équipe de l'IFCWS, en particulier Laurent Ruiz, qui m'a non seulement apporté de précieuses connaissances sur l'Inde, mais a également fourni une assistance logistique précieuse.

Ma gratitude va également à ma maître de stage et tutrice, Claire Aubron, ainsi qu'à Mathieu Lavigne, pour leur accompagnement tout au long du stage, leurs conseils dans le traitement des données et la rédaction de ce mémoire. Je remercie Olivier Philippon pour sa visite sur le terrain et ses conseils. Un grand merci à Charlotte Hemingway pour le temps qu'elle a pu me consacrer et je lui adresse tout mon soutien pour sa thèse.

Enfin, je remercie chaleureusement la promotion 2022-2023 et le corps enseignant de RESAD. Cette formation, à la fois agronomique et humaine, m'a permis de m'épanouir et de grandir professionnellement.

TABLE DES MATIERE

I. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE	2
1- Les révolutions agricoles en Inde et leur influence sur le canton.....	2
2- Cultiver au grès des saison dans un climat semi-aride	3
3- Le natural farming, de sa création à son arrivée dans le canton de madakasira	4
Le natural farming de sa montée en puissance à un déclin dans le soutien politique ?	4
natural farming et agroécologie : des principes convergents	4
Le natural farming : des pratiques en essor ?.....	5
Un regard concret sur le canton de Madakasira	5
II. METHODOLOGIE	7
1- Appui sur l'existant avec le diagnostic agraire	7
1. Les objectifs du diagnostic agraire.....	7
2. Une typologie des systèmes de production caractéristique de la zone d'étude	7
2- Estimation des besoins alimentaires d'une famille sur le canton	11
3- Approche déployée pour répondre à la problématique	12
1. Organisation chronologique de l'étude	12
2. Présentation de l'outil de travail.....	13
4- Modélisation des flux d'énergie	15
1. Les différentes formes d'énergie au sein d'un système de production.....	15
2. Des flux d'énergie qui découlent des flux de matière.....	16
3. Adaptation des coefficients au canton de Madakasira.....	17
5- Choix des indicateurs	25
1. Efficience énergétique globale.....	25
2. Efficience énergétique spécifique.....	25
3. Part d'énergie brute, fossile et du travail importé.....	26
4. Indice de circularité.....	26
III. RESULTATS ET ANALYSE	27
1- Les préparations ZBNF.....	28
2- Exploitations en polyculture-élevages SP1 et SP2NF	30
1. Modélisation des systèmes de culture et d'élevage	30
2. Etude des flux de matière et d'énergie du système de production en polyculture élevage conduit en conventionnel et en natural farming.....	42
3- Exploitations en arboriculture avec élevage laitier bovin SP3 et SP4NF	45
1. Modélisation des systèmes de culture et d'élevage	45
2. Etude des flux de matière et d'énergie du système de production arboriculture, élevage laitier conduit en conventionnel et en natural farming.....	57
4- Elevage de petits ruminants SP5.....	60
5- Elevage de poulet de chair SP6.....	63
1. Etude des flux de matière et d'énergie entre deux systèmes d'élevages très contrastés...66	66
6- Etude des indicateurs	68
1. Exploitations en polyculture élevage.	68
2. Exploitations en arboriculture, élevage laitier	69
3. élevages de petit ruminant et de poulet de chair.....	70
7- Bilan sur la performance environnementale des systèmes de production	72

1.	Efficiencce énergétique globale et indice de circularité	72
2.	Part des énergies importées et leur effcience	73
IV.	DISCUSSION	76
1-	Les limites de la modélisation	76
2-	Etat des lieux des dynamiques agricoles sur le canton	76
	Progression des systèmes plus ouverts à l'extérieur avec des élevages et des cultures à vocation commerciale.	76
	Progression des cultures fourragères et conséquence sur la conduite de l'élevage.....	76
	Le natural farming face à d'autres pratiques agroécologiques	77
	Une évolution du natural farming	77

TABLE DES FIGURES

Figure 1- Carte de la situation géographique de la zone d'étude (faite à partir des cartes de APSAC, 2022)	2
Figure 2-Diagramme ombrothermique du canton de Madakasira (Hiblot-Lhoste et Nautré, 2022)	3
Figure 3-Graphique résumant la modélisation des systèmes de production du diagnostic agraire	8
Figure 4- Schéma de l'organisation chronologique de l'étude	12
Figure 5-Présentation du bilan énergétique sur Excel- Exemple SE2	14
Figure 6-Schéma des différentes formes d'énergie au sein d'une exploitation	15
Figure 7- Evolution des flux de matière et d'énergie avec les préparations ZBNF de SP4NF 29	
Figure 8- Evolution des flux de matière et d'énergie avec les préparations ZBNF de SP2NF 29	
Figure 9-Itinéraire technique et travaux post récolte de SC1 arachide conventionnelle	30
Figure 10-Itinéraire technique simplifié de SC2 arachide conduit en natural farming.....	31
Figure 11-Itinéraire technique simplifié des cultures de SC3 rotation céréalière conventionnelle	33
Figure 12-Itinéraire technique simplifié de la culture de riz NF	35
Figure 13-Itinéraire technique simplifié de la culture du millet NF	35
Figure 14-Itinéraire technique simplifié de la culture de maïs NF	36
Figure 15-Itinéraire technique simplifié de la culture de légume NF	37
Figure 16- Etat de croissance d'une culture de légume représentative du SC5 Légumes NF ..	38
Figure 17- Eleveur faisant pâturer une bufflesse et une vache Hallikar en bordure de parcelles	39
Figure 18-Schéma démographique et caractéristiques générales de SE1	39
Figure 19-Calendarier de production et d'alimentation de SE1	40
Figure 19-Calendarier de production et d'alimentation de SE1	40
Figure 20- Ration journalière moyenne d'une vache SE1	40
Figure 21-Schéma démographique de SE3 et caractéristiques générales de l'élevage	41
Figure 23- Ration journalière d'une chèvre de SE3	41
Figure 22-Schéma démographique et caractéristiques générales du troupeau SE2.....	41
Figure 24-Représentation des flux d'énergie du système de production polyculture élevage conduit en conventionnelle	43
Figure 25-Représentation des flux d'énergie du système de production polyculture élevage conduit en natural farming	44
Figure 26-Evolution de la plantation entre la phase non productive et celle productive.....	46
Figure 27-Calendarier de travail de SC6 plantation d'aréquier conventionnelle.....	47
Figure 28- Deux plantations d'aréquier ZBNF en phase productive avec culture de sunhemp en interrang en début de cycle (à gauche) et fin de cycle (à droite). Culture de légume (aubergine, tomate, piment) entre les arbres (à gauche)	49
Figure 29- Calendarier de travail de SC7NF plantation d'aréquier conduit en natural farming	51
Figure 30- Repousse progressive du napier, associé à une plantation d'agasa	53
Figure 32-Schéma démographique du troupeau et caractéristiques générales de SE2	55

Figure 33- Estimation d'une ration journalière moyenne d'une vache Holstein Friesian de SE2	55
Figure 34-Calendarier de travail de SE2	56
Figure 35-Représentation des flux d'énergie du SP arboriculture élevage laitier conduit en conventionnelle	57
Figure 36-Représentation des flux d'énergie du SP arboriculture élevage laitier conduit en natural farming	58
Figure 37-Un berger conduisant un troupeau de petit ruminant avec des ânes	60
Figure 38-Schéma démographique du troupeau de petit ruminant	62
Figure 39-Calendarier de travail du système de production petit ruminant SP5	62
Figure 40- Fin de production d'un lot de poulet de chair	63
Figure 41-Calendarier de travail du système de production élevage de poulet de chair	65
Figure 42-Evolution des flux de matière et d'énergie du système de production petit ruminant	66
Figure 43-Représentation des flux de matière et d'énergie de l'élevage de poulet de chair	67
Figure 44-Représentation graphique des indices de circularité des SP	72
Figure 45-Représentation graphique des efficacités énergétiques globales des SP	72
Figure 46-Représentations graphiques de la part des énergies fossile importés (à gauche) et de l'efficacité énergétique fossile des SP (à droite)	73
Figure 47-Représentations graphiques de la part des énergies brute importée (à gauche) et de l'efficacité énergétique brute des SP (à droite)	74
Figure 48-Représentations graphiques de la part des énergies du travail importée (à gauche) et de l'efficacité énergétique du travail (à droite)	74
Figure 49-Présentation de la classification des systèmes de production en fonction de leur performance environnementale et énergétique	75

TABLES DES TABLEAUX

Tableau 1-Estimation du besoin alimentaire annuel d'une famille sur le canton	11
Tableau 2-Matière sèche ingérée en fonction des différentes catégories d'animaux	16
Tableau 3-Coefficients énergétiques brutes des effluents d'élevages (Guzmán et Alonso, 2008)	17
Tableau 4-Coefficient énergétique liée au travail	18
Tableau 5-Estimation de la pénibilité des tâches agricoles	19
Tableau 6- Référence Dia'terre pour estimer les coefficients énergétiques fossile des concentrés et des bâtiments des élevages avicoles.....	20
Tableau 7-Données nécessaires au calcul du coefficient énergétique fossile du rotavator, du cultivateur et du pulvérisateur manuel (Guzmán et Alonso, 2008)	21
Tableau 8-Consommation électrique des équipements- Exemple avec le SC légume	23
Tableau 9-Consommation électrique (kWh) d'un bâtiment d'élevage de poulet de chair	23
Tableau 10- Consommation de carburant des équipements agricoles	24
Tableau 11-Présentation des 6 systèmes de production et des sous-systèmes les composant ..	27
Tableau 12-Modélisation des préparations ZBNF	28
Tableau 13-Présentation des essences d'arbres présentes dans le SC6	46
Tableau 14-Présentation des essences de la plantation d'aréquier de SC7NF	50
Tableau 15-Estimation de l'apport au pâturage des adultes	61
Tableau 16- Estimation des rations des petits de SP5.....	61

AVANT-PROPOS

Ce stage de fin d'études prend place au sein des projets TransIndianDairy et IndiaBio, qui font partie d'une collaboration avec l'INRAe dans le cadre de recherche sur les transitions agroécologiques. Ces travaux de recherche visent à caractériser les transitions agricoles divergentes par rapport au modèle conventionnel indien prédominant, né de la révolution verte. Ces transitions de grande envergure ont été relativement peu étudiées jusqu'à présent, bien qu'elles revêtent un intérêt crucial pour éclairer des questions liées à la durabilité environnementale, à la résilience agricole et à l'importance de la gouvernance à diverses échelles.

Ces projets s'articulent sur quatre États de l'Inde qui ont entrepris des changements majeurs dans leur secteur agricole, marquant ainsi des transitions agroécologiques distinctes. Le Gujarat, qui a vu naître la révolution blanche, symbolise une transition agricole semi-raisonnée dans un climat semi-aride. L'Uttarakhand qui n'a pas encore amorcé de transition à l'échelle de l'État. Le Sikkim, situé dans l'Himalaya, un état entièrement converti à l'agriculture biologique. Et enfin, l'Andhra Pradesh, un état qui suscite un vif intérêt en raison de l'émergence du "natural farming", un mouvement qui rallie aujourd'hui plus de 700 000 agriculteurs. Dans le cadre de ces recherches axées sur les défis de la transition agroécologique, l'INRAe se penche sur le "natural farming", qui constitue le point central de cette étude.

GLOSSAIRE

Système de production	Organisation des pratiques, des ressources et des processus dans le but de produire des cultures ou d'élever du bétail de manière optimale, en prenant en compte les facteurs agronomiques, environnementaux et économiques
Flux d'énergie	Le transfert ou la circulation d'énergie au sein d'un système. On le mesure en termes de quantité d'énergie qui se déplace par unité de temps.
Culture annuelle	Une plante cultivée sur une base de cycle d'un an, de la plantation ou du semis jusqu'à la récolte.
Culture pérenne	Culture agricole à longue durée de vie, produisant des récoltes pendant plusieurs années sans nécessiter de replantation annuelle.
Culture intraparcellaire	Une pratique agricole où différentes cultures sont cultivées dans une même parcelle de terrain, Cela vise en partie à maximiser l'utilisation de l'espace et des ressources.
Exploitation patronale	Des exploitations agricoles dont le système de production est structurellement basé sur l'utilisation de main-d'œuvre salariée, malgré la participation de la main-d'œuvre familiale. La rémunération de la main-d'œuvre salariée peut prendre diverses formes (salaires en espèces, rémunération en nature, concession d'une petite parcelle de terrain).
Exploitation capitaliste	Exploitation structurée sur l'utilisation de main-d'œuvre salariée, sans la contribution de la main-d'œuvre familiale. Ces exploitations sont généralement gérées par des gestionnaires salariés, qui supervisent à leur tour des travailleurs salariés. La rémunération prend la forme de dividendes ou d'intérêts
Saltus	Terme désignant l'un des quatre composants des écosystèmes exploités dans les anciens systèmes agricoles. Le "saltus" était la zone non cultivée et utilisée pour le pâturage du bétail. Cette surface faisait partie du processus de transfert latéral de la fertilité vers l'Ager par le biais du parquage nocturne des troupeaux sur les terres en jachère.
Busa	Nom local donné pour qualifier les concentrés des vaches

SIGLES ET ACRONYMES

ZBNF	Zero budget natural farming
PMDS	Pre monsoon dry sowing
ATM	AnyTime money
NF	Natural Farming
RySS	Rythu Sadhikara Samstha
APCNF	Andhra Pradesh Community-management Natural Farming
ICRP	Inter Community Ressource Persons
SC	Système de Culture
SE	Système d'Élevage
SP	Système de Production
MS	Matière Sèche
GJ	GigaJoule
Ee	Efficiencé énergétique
SELMET	Systèmes d'Élevage Méditerranéens et Tropicaux
IISc	Indian Institute of Science
IFCWS	Indo-French Cell for Water Sciences
INRAe	Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

INTRODUCTION

La gestion des ressources dans les systèmes agricoles revêt une importance cruciale, tant du point de vue agronomique qu'environnemental. Elle concerne la nécessité de nourrir durablement les populations tout en préservant les écosystèmes. L'Inde, en tant que l'un des principaux acteurs mondiaux du secteur agricole, offre un terrain d'étude particulièrement riche pour explorer les interactions complexes entre la gestion des ressources et les pratiques agricoles.

Les systèmes agricoles en Inde ont subi d'importantes évolutions au cours des dernières décennies, se caractérisant par une tendance à l'intensification engendrée par la révolution verte. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce stage de fin d'études, avec un accent particulier sur le canton de Madakasira. L'histoire de l'agriculture dans le canton revêt un intérêt particulier, car elle s'est façonnée en réaction à ces diverses révolutions. Aujourd'hui, de nouvelles dynamiques agricoles sont à l'œuvre, marquées par l'émergence de cultures fourragères et de plantations, ainsi que la montée en puissance de l'élevage intensif orienté vers les marchés extérieurs. Parallèlement, l'élevage extensif qui repose essentiellement sur des ressources locales et gratuites gagne également en importance. Aussi, plusieurs mouvements agricoles en Inde ont prôné l'adoption de systèmes agricoles a priori plus respectueux de l'agroécologie. Dans l'État d'Andhra Pradesh, le Zero Budget Natural Farming (ou natural farming) a émergé avec pour objectif de réduire l'utilisation d'intrants chimiques, de favoriser des systèmes plus autonomes, de s'affranchir des produits chimiques et de promouvoir la santé des sols, tout en maintenant des rendements agricoles satisfaisants.

Ces évolutions ont eu des répercussions sur les flux de matières et d'énergie au sein des systèmes de production et pose la question de leur durabilité, avec une problématique centrale : Le natural farming constitue-t-il une proposition durable du point de vue environnemental en termes d'utilisation de l'énergie ? Par cette approche, l'étude a pu élaborer une première évaluation environnementale, en examinant de près ces flux au sein des systèmes de production qui tendent à se diffuser dans le canton.

I. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE

1- LES REVOLUTIONS AGRICOLES EN INDE ET LEUR INFLUENCE SUR LE CANTON

À l'Indépendance de l'Inde, la major partie des systèmes de production se concentraient principalement sur la culture de denrées destinées à la consommation locale, en privilégiant les variétés indigènes. Les révolutions verte (pour les cultures) et blanche (pour le lait) des années 1960 et 70 ont encouragé une modernisation agricole visant à accroître la production alimentaire. Cela a conduit à intensifier les intrants extérieurs avec l'utilisation d'engrais de synthèse, de semences améliorées et de pesticides. Elle a initialement réussi à améliorer la sécurité alimentaire, mais a entraîné des effets néfastes, notamment sur la dégradation environnementale. La révolution des pompes submersibles dans les années 1980-1990 a poursuivi cette modernisation avec l'augmentation des surfaces irriguées, jouant un rôle crucial dans l'intensification de l'utilisation des terres, notamment par l'augmentation du nombre de cycle de cultures. De la même manière, dans les régions semi-arides du plateau du Deccan, la révolution jaune directement liée aux cultures oléagineuses a eu un impact significatif sur les systèmes de production, les incitant à se tourner vers des cultures à haute valeur pour l'huile, comme l'arachide. Dans ce contexte, l'essor du "Natural Farming" est apparu comme une réponse aux préoccupations environnementales causées par ces révolutions. Inspiré des pratiques agricoles traditionnelles, le natural farming est apparu comme une alternative, soulignant l'importance d'une agriculture durable et éthique pour répondre aux besoins alimentaires tout en préservant la biodiversité et la santé de la population.

Cette étude se focalise sur le canton de Madakasira, situé dans l'Andhra Pradesh comme le présente la Figure 1. Traditionnellement, l'agriculture était axée sur de l'autoconsommation avec des cultures pluviales et associée à un élevage de vaches ou de petits ruminants. À partir de 1975, les cultures commerciales ont pris le dessus : l'arachide en pluvial et les céréales tel que le maïs et millet en irrigué. Cependant, depuis 2010, la rentabilité de l'agriculture pluviale a diminué, entraînant l'abandon partiel des zones non irriguées et la conversion de culture pluviale en culture irriguée avec l'arachide par exemple. De plus, de nouvelles cultures pérennes avec l'essor des vergers à haute valeur ajoutée ont été introduites, favorisant la diversification et un meilleur revenu agricole. En ce qui concerne l'élevage, il s'est polarisé entre des systèmes de pâturage extensif et des élevages intensifs.

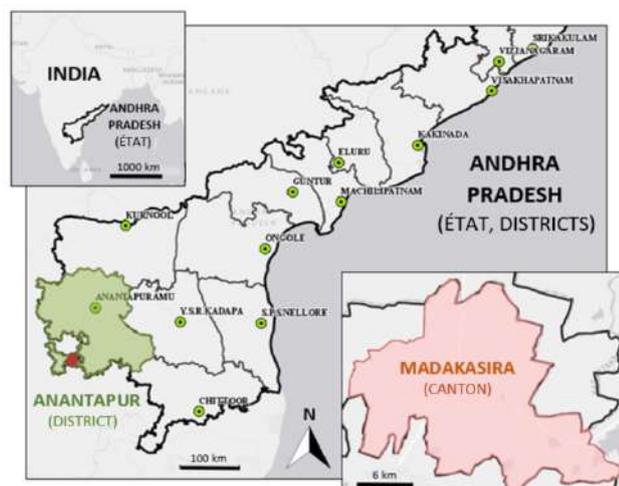


Figure 1- Carte de la situation géographique de la zone d'étude (faite à partir des cartes de APSAC, 2022)

Contrairement à la révolution verte, qui s'est principalement développée dans les vastes zones irriguées, la révolution jaune, axée sur les huiles végétales produites en agriculture pluviale, a eu un impact majeur dans le développement de la culture de l'arachide. Les zones irriguées dans le canton, qui représentaient traditionnellement une petite partie des terres agricoles, ont connu une expansion significative avec l'essor de culture et plantation gourmandes en eau, telles que les légumes, le coton, les vergers (aréquiers, grenades, mangues) et les cultures fourragères (murier, agasa, napier). En ce qui concerne l'élevage, les bovins locaux de race Hallikar sont

parfois remplacés par des Holstein pour la production laitière, et des systèmes intensifs en bâtiment, comme l'élevage de vers à soie et de poulets de chair, ont vu le jour. Parallèlement à cette dynamique, les élevages extensifs de petits ruminants sont également en augmentation.

En fin de compte, ces évolutions ont engendré des répercussions sur les flux de matières et d'énergie au sein des systèmes de production, soulevant ainsi des interrogations concernant leur durabilité. Cette étude entreprend une première évaluation environnementale en examinant ces flux au sein des systèmes de production qui tendent à se répandre dans le canton. Une question fondamentale se pose : le natural farming représente-t-il une solution durable du point de vue environnemental en ce qui concerne l'utilisation de l'énergie ?

2- CULTIVER AU GRES DES SAISON DANS UN CLIMAT SEMI-ARIDE

L'Inde connaît des saisons de pluie cycliques dictées par les moussons, qui déterminent les calendriers agricoles et d'irrigation. Dans le canton de Madakasira, on identifie trois types de saisons culturales : le kharif, le rabi et la saison sèche comme indiqué Figure 2. Le kharif correspond à la saison des pluies (mousson), s'étendant de juin à octobre, caractérisée par des précipitations abondantes et un climat chaud favorable à des cultures telles que le riz, l'arachide et le maïs.

La saison de rabi, de novembre à avril, est marquée par un second épisode de précipitations venant du nord-est, avec un climat plus sec et frais. Les agriculteurs cultivent généralement des céréales d'hiver, telles que l'orge et le millet, et ont souvent recours à l'irrigation en raison de précipitations limitées. Enfin, la saison sèche survient entre la fin du rabi et le début du kharif, avec des températures élevées (environ 35°C), des journées chaudes et sèches avec peu ou pas de précipitations. L'approvisionnement en eau limité durant la saison estivale constitue l'un des principaux défis pour les agriculteurs, incitant principalement à opter pour des cultures nécessitant de l'irrigation.

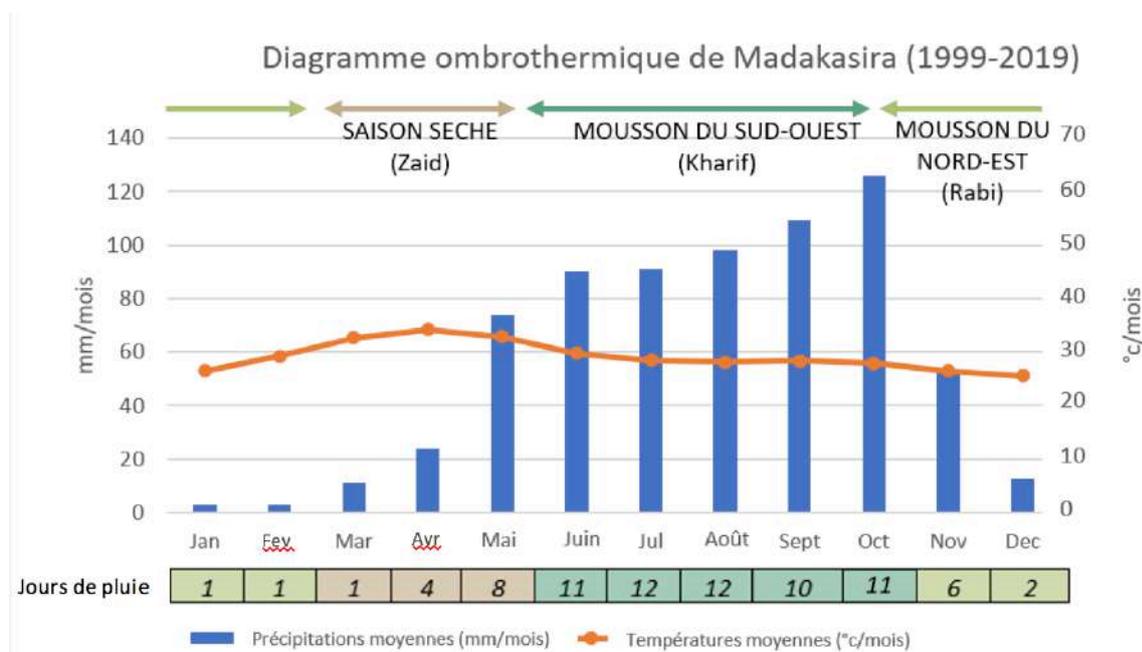


Figure 2-Diagramme ombrothermique du canton de Madakasira (Hiblot-Lhoste et Nautré, 2022)

3- LE NATURAL FARMING, DE SA CREATION A SON ARRIVEE DANS LE CANTON DE MADAKASIRA

LE NATURAL FARMING DE SA MONTEE EN PUISSANCE A UN DECLIN DANS LE SOUTIEN POLITIQUE ?

Le mouvement du natural farming, également connu sous le nom de « Zero Budget Natural Farming », a été initié en 1995 par Subbash Palekar, un agriculteur originaire de Maharashtra. L'idée promue par Subbash Palekar visait à changer le modèle sociotechnique en faveur de l'agroécologie afin de résoudre les nombreuses impasses auxquelles étaient confrontées l'agriculture et l'industrie alimentaire. Le natural farming a été institutionnalisé grâce à l'implication de Vijay Kumar, qui a persuadé Chandrababu Naidu, le chef du gouvernement de l'époque, de mettre en place un dispositif coordonné géré par une agence dédiée à l'émancipation des agriculteurs, le Rythu Sadhikara Samstha (RySS).

En 2016, Vijay Kumar est devenu conseiller du gouvernement de l'Andhra Pradesh et a lancé une ambitieuse initiative visant à convertir 6 millions d'agriculteurs et 8 millions d'hectares en pratiques de natural farming d'ici 2027. Cependant, depuis 2020, le natural farming a connu un déclin progressif de son soutien politique en raison des élections de 2019, au cours desquelles Chandrababu Naidu a été battu par Y.S. Jaganmohan Reddy, ce qui a soulevé des défis pour l'avenir de ce mouvement agricole.

NATURAL FARMING ET AGROECOLOGIE : DES PRINCIPES CONVERGENTS

Le natural farming est une approche qui s'articule autour de deux principaux aspects : l'action dans le sol et l'action en surface (Rythu Sadhikara Samstha, 2021)

L'action dans le sol consiste à sélectionner une population microbienne bénéfique pour améliorer la fertilité du sol. Plusieurs recommandations sont émises à cet égard. Tout d'abord, il est recommandé de maintenir les sols couverts tout au long de l'année en utilisant des cultures intermédiaires, des engrais verts ou en appliquant un mulch composé de résidus de culture ou de paille. Le mulch permet de former un humus épais et fertile qui favorise la productivité des cultures. Il contribue également à réduire les besoins en irrigation en retenant et en captant l'humidité. Une autre pratique, appelée "Acchadana," implique le paillage du sol pour créer un microclimat favorable au développement des micro-organismes. Ce mulch favorise la formation d'humus, supprime les mauvaises herbes et maintient l'eau pour les cultures. Il peut être réalisé en utilisant les résidus de cultures précédentes ou en cultivant des couvertures végétales vivantes comme les cultures dérobées ou les engrais verts à base de légumineuses. Une autre recommandation importante concerne l'application du "jeevamurtham," une culture microbienne fermentée à base d'urine, de bouse de vache (provenant de races locales et non croisées), de sucre non raffiné et de farine de légumineuses. Cette préparation fournit des nutriments essentiels et stimule l'activité microbienne dans le sol, tout en contribuant à la prévention des maladies fongiques et bactériennes des plantes.

Pour agir en surface, notamment dans la lutte contre les ravageurs, le natural farming prône la diversification des cultures à l'intérieur des parcelles, en utilisant des cultures inter et intraparcellaires telles que le niébé, le tournesol, la luzerne, la moutarde, le cosmos, le sompu, la menthe, la coriandre et le souci. Cette diversification vise à attirer certains ravageurs tout en repoussant d'autres. En cas d'infestation, des traitements curatifs appelés « neemastam »

sont recommandés. Il s'agit de préparations à base de piment, d'ail, de gingembre et de feuilles de margousier (neem tree). En ce qui concerne la conservation des sols, le natural farming prône un travail du sol sans labour, ce qui préserve la structure du sol et réduit l'érosion. De plus, l'utilisation de semences locales est encouragée pour favoriser l'adaptation des cultures aux conditions locales.

Enfin, au-delà des avantages agronomiques, le natural farming promeut également la création d'emplois agricoles pour enrayer l'exode rural. Il favorise une alimentation plus équilibrée et saine en mettant en œuvre une approche d'agriculture régénérative qui renforce la santé des sols, la résilience des cultures et la densité des éléments nutritifs, tout en contribuant à la lutte contre les problèmes liés au changement climatique.

LE NATURAL FARMING : DES PRATIQUES EN ESSOR ?

La diffusion du natural farming dans le canton a été rendue possible grâce à des réunions organisées par les employés de l'APCNF (Agence pour la Promotion du Natural Farming). Au cours de ces événements, les techniques et les avantages du natural farming sont expliqués et démontrés par les agents en collaboration avec les agriculteurs. Les agriculteurs sont convaincus à la fois par les démonstrations pratiques et les discours présentés lors de ces réunions.

Par ailleurs, la conversion des exploitations agricoles au natural farming se propage dans les villages grâce aux ICRP (Inter-Community Resource Persons). Ces ICRP sont des agriculteurs recrutés par l'APCNF pour former d'autres agriculteurs dans leur propre village ou dans des villages voisins. Lors de l'étude, il a été constaté que la majorité des agriculteurs engagés dans le natural farming étaient eux-mêmes des ICRP. Ce rôle d'ICRP représente un emploi à temps plein, avec une moyenne de 20 jours de travail par mois, à raison de 6 heures par jour (Hiblot-Lhoste et Nautré, 2022). Les ICRP perçoivent un salaire variant de 5000 roupies s'ils travaillent dans leur propre village à 8300 roupies s'ils interviennent dans un village voisin. De plus, les ICRP ont la possibilité de progresser vers des postes de cadres qualifiés, avec des rémunérations dépassant les 10000 roupies par mois. Les motivations évoquées pour cette profession d'ICRP sont l'acquisition de connaissances, le sens du devoir envers les autres, ainsi que la reconnaissance sociale et une meilleure position dans la société.

UN REGARD CONCRET SUR LE CANTON DE MADAKASIRA

Le constat effectué dans la zone d'étude résulte d'une analyse menée à la fois lors du diagnostic agraire de l'année précédente et au cours de la phase de terrain de ce stage d'une durée d'un mois et demi. Il est apparu que le natural farming s'est principalement développé au sein de systèmes de production de taille moyenne qui disposent d'un accès à l'irrigation. En effet, la plupart des agriculteurs possèdent leur propre puits, ce qui leur assure un approvisionnement en eau aisé. Par conséquent, les pratiques de natural farming sont plus courantes dans le cadre de cultures irriguées telles que l'arachide, le riz, le millet et le maïs. En revanche, le natural farming a peu d'impact sur les systèmes de production ne disposant pas d'un accès à l'eau, tels que les cultures pluviales et les élevages transhumants. Pourtant, ces systèmes de production s'avèrent mieux adaptés aux conditions biophysiques du territoire et présentent un intérêt en termes de fertilité, notamment grâce aux déjections animales et aux légumineuses. La préférence pour les vaches locales dans les préparations du natural farming signifie que la plupart des systèmes de production intègrent l'élevage de vaches laitières de race halikar.

Par ailleurs, il est important de noter que les agriculteurs pratiquant le natural farming ne sont pas tenus de convertir l'ensemble de leur système de production. Il est courant de rencontrer des agriculteurs qui ont adopté le natural farming pour un système de culture de leur exploitation, tandis que le reste demeure en agriculture conventionnelle. De plus, l'analyse économique réalisée lors du diagnostic agricole a révélé que certains systèmes de production gérés en natural farming pouvaient parfois être moins rentables que d'autres exploités en agriculture conventionnelle. Cette question sera explorée plus en détail ultérieurement. En fin de compte, du point de vue économique, les systèmes qui semblent les plus attrayants pour les agriculteurs ayant accès à la terre et à l'eau ne semblent pas être les systèmes conduits en natural farming.

En ce qui concerne le soutien politique, il a été constaté qu'il était en déclin, notamment en ce qui concerne les ICRP, qui percevaient leur salaire tardivement. Parallèlement, certaines subventions agissent à l'encontre de la transition agroécologique en réduisant le coût de certains intrants de synthèse et en rendant gratuite la consommation d'électricité dans le canton. Cette mesure a incité certains agriculteurs à développer des cultures irriguées, car l'irrigation repose sur le pompage électrique.

II. METHODOLOGIE

Pour répondre à la problématique énoncée précédemment, cette partie vise à identifier les besoins essentiels pour mener à bien l'étude. En s'appuyant sur les conclusions du diagnostic agraire, l'étude s'est focalisée sur l'analyse de six systèmes de production. Cependant, pour compléter les données obtenues lors du diagnostic, il a été nécessaire de collecter des informations supplémentaires sur le terrain par des enquêtes auprès des agriculteurs locaux. Ces enquêtes ont été conduites en collaboration avec un traducteur pour garantir une communication efficace avec les parties prenantes locales. Les enquêtes ont été portées sur les pratiques agricoles, la conduite des élevages liées à chaque système de production. L'objectif était de réussir à estimer les quantités d'intrants, de produits et de comprendre leur évolution au sein des systèmes. Ensuite, une méthodologie de modélisation de chacun des systèmes de production a été mise en œuvre pour analyser les données recueillies. Cette approche a permis de décrire de manière quantitative et qualitative les flux de matière et d'énergie des systèmes de production. Enfin, ces étapes de travail ont permis de calculer divers indicateurs dont l'objectif était d'évaluer et comparer les systèmes de production entre eux. Ces indicateurs fournissent une analyse détaillée sur la répartition des différentes sources d'énergie parmi les intrants, l'efficacité énergétique globale et spécifique, ainsi que la circularité des flux internes propres à chaque système.

1- APPUI SUR L'EXISTANT AVEC LE DIAGNOSTIC AGRAIRE

1. LES OBJECTIFS DU DIAGNOSTIC AGRAIRE

La méthode du diagnostic agraire repose sur l'idée fondamentale selon laquelle "les agriculteurs ont de bonnes raisons de faire ce qu'ils font" (Jouve, 1992) et que "l'agriculture est décrite comme un ensemble de formes locales complexes, variant dans l'espace, évoluant dans le temps et tout aussi variées que nos observations" (Mazoyer et Roudart, 1997). En d'autres termes, l'agriculture dans une région donnée est diversifiée et évolue au fil du temps en réponse aux choix rationnels des agriculteurs. Ainsi cette approche vise à comprendre les multiples facteurs qui influencent la situation actuelle de l'agriculture dans une zone donnée.

À cette fin, le diagnostic agraire permet d'établir une typologie des systèmes de production sur la zone d'étude. Il fournit également des informations essentielles sur les aspects techniques et économiques des systèmes de production, ce qui permet de modéliser ces systèmes en fonction de la surface exploitées et des revenus agricoles. Par conséquent, cette approche permet de formuler des hypothèses concernant la possible diffusion des systèmes de production au sein de la zone d'étude. Naturellement, cette étude, pourtant sur l'évolution des flux de matière et d'énergie des systèmes de production sur le canton de Madakasira, s'est appuyée sur la typologie établie lors du diagnostic agraire de l'an dernier.

2. UNE TYPOLOGIE DES SYSTEMES DE PRODUCTION CARACTERISTIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

L'année précédente, le diagnostic agraire a permis de réaliser une évaluation complète de treize systèmes de production qui sont en place dans le canton de Madakasira. Dans le cadre de cette évaluation, une synthèse a été élaborée, aboutissant à une typologie comprenant neuf systèmes de production distincts. Deux de ces systèmes, l'exploitation céréalière et l'exploitation en

arboriculture, sont conduits en utilisant des pratiques de natural farming, comme l'indique les traits rouges sur la Figure 3.

Pour cette étude, l'approche a consisté à modéliser et à analyser les flux de matières et d'énergie de six systèmes de production. Dans ce but, un processus de regroupement des systèmes de production a été fait tel qu'illustré Figure 3. Ainsi, l'élevage avicole a été choisi parmi les exploitations intégrées, « sous contrat », l'exploitation en polyculture-élevage a été représentée par l'exploitation céréalière. L'élevage extensif a été modélisé avec l'élevage de petits ruminants. L'exploitation en arboriculture avec élevage laitier a été conservé. La modélisation des systèmes de production en natural farming a suivi une méthodologie similaire à celle du diagnostic agraire, avec une modélisation spécifique pour l'exploitation en polyculture-élevage et l'exploitation en arboriculture avec élevage laitier.

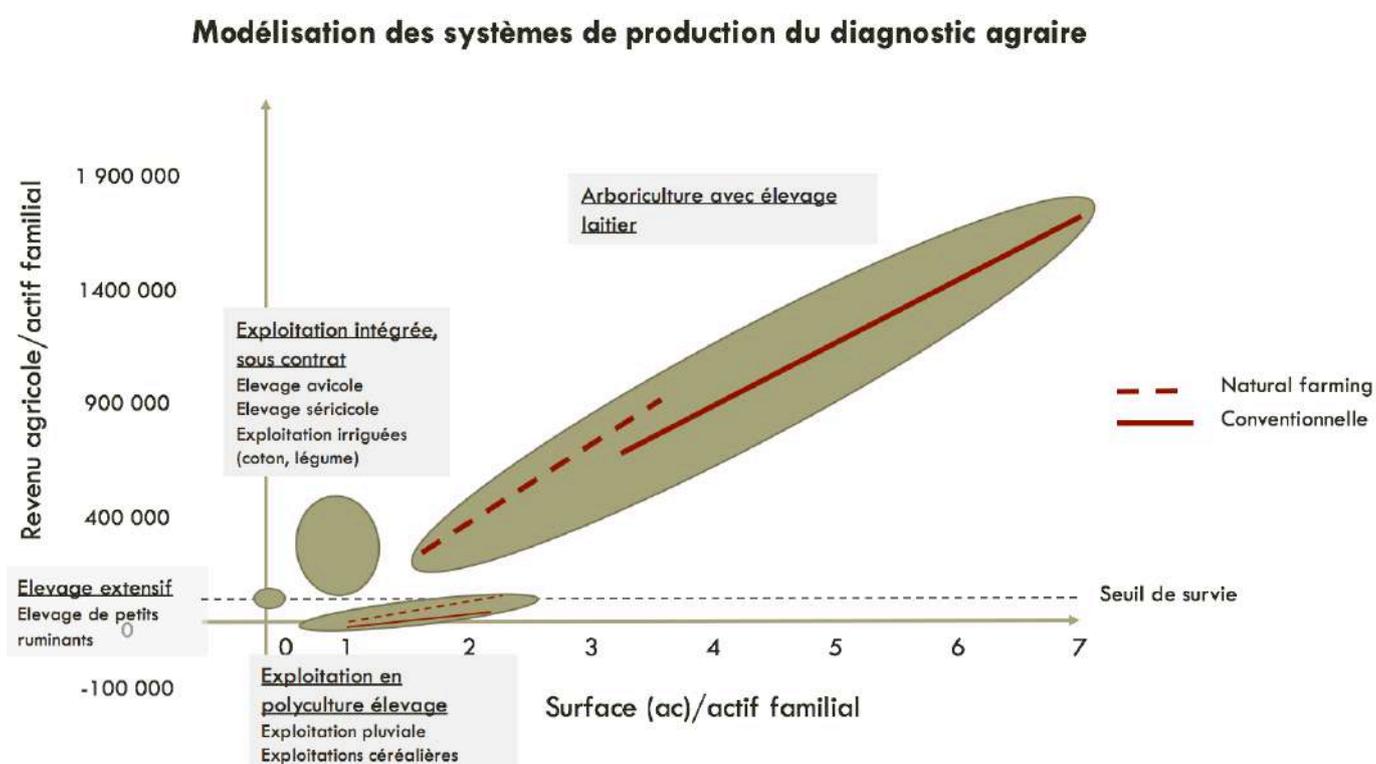


Figure 3-Graphique résumant la modélisation des systèmes de production du diagnostic agraire

Exploitation céréalière avec élevage de vache locale

L'exploitation en polyculture-élevage regroupe les exploitations pluviales et céréalières du diagnostic agraire. L'exploitation céréalière a été modélisé avec deux systèmes de culture, l'un pluvial (arachide, millet), l'autre de céréales irriguées (riz/millet//riz/maïs). Ces systèmes de cultures sont qualifiés de « traditionnels » sur la zone d'où l'intérêt de les représenter. Cependant, il a été montré que les cultures d'arachide et céréalières pluviales tendaient à évoluer vers des cultures irriguées à plusieurs cycles par an. Ainsi des ajustements des systèmes de culture ont été élaborées pour cette étude et seront présentées ultérieurement. L'exploitation céréalière inclus également un système d'élevage laitier modélisé avec 2 vaches locales Hallikar. Pour l'étude, ce système d'élevage a été conservé. L'intérêt pour ce système d'élevage

est en grande partie attribuable à son caractère traditionnel, ainsi qu'aux évolutions qu'il a subies dans la région, notamment en réaction à la révolution blanche. Cette révolution a entraîné des transformations majeures des systèmes d'élevage traditionnels, les orientant vers des modèles plus productifs avec les vaches croisées Holstein en raison de leur potentiel laitier.

Comme le montre le rapport du diagnostic agraire, ce type de ferme est aujourd'hui en déclin car il est en difficulté économique, parfois sous le seuil de survie. Il s'agit d'un système de production qui, comparés aux autres, demande encore peu de ressource en eau, de foncier et de capital. Il est possible de constater que la conduite en natural farming révèle une légère augmentation du revenu agricole pour les exploitations céréalières par rapport à leur référence en conventionnel. Elles sont donc plus susceptibles de se répandre dans le canton de Madakasira, ce qui a contribué à l'intérêt de les modéliser dans ce rapport.

La conduite en natural farming présente une diversification intéressante des cultures et des revenus (avec les ICRP) pour ces agriculteurs en difficulté. Ainsi, il a été supposé qu'un certain nombre de flux pouvaient en être modifiés avec davantage d'intraconsommation au sein du système.

Exploitation en arboriculture avec élevage de vaches Holstein

Dans cette étude l'exploitation en arboriculture avec élevage laitier de vaches Holstein a été conservé. Le système de culture modélisé dans le diagnostic agraire est un verger de grenadier associé à un élevage de plusieurs vaches Holstein plus important que celui présent dans SP1 qui produit une bonne part du revenu de l'exploitant. Ce système de production est mis en place par des agriculteurs historiquement favorisés (terres, accès à l'eau) avec de très bons résultats économiques. Il s'agit d'un système de production qui repose sur la capacité d'investissement en intrants, reflétant ainsi une dynamique d'investisseur. Ce sont des systèmes qui demandent beaucoup de ressources financières et physique (foncier, eau).

La conduite en arboriculture nécessite davantage de moto-mécanisation que les autres systèmes de culture, ce qui pouvait conduire à modifier les flux d'énergies de travail humain et fossiles liées au carburant par exemple. Ce système présente beaucoup plus de flux vers l'extérieur avec l'achat d'intrant et l'exportation d'une majorité de la production hors de la zone. Cela permettait d'étudier le contraste avec l'exploitation céréalière en polyculture-élevage.

L'objectif était également d'analyser l'évolution des flux de matière et d'énergie avec une conduite en natural farming. En effet il s'agit d'un système de production orienté vers l'extérieur, ce qui peut entrer en contradiction avec les valeurs de la communauté ZBNF qui encouragent une réduction des intrants extérieurs et une production locale. Il est observé que la modélisation d'une exploitation en arboriculture suivant les principes du natural farming pourrait être plus compétitive que celle en agriculture conventionnelle pour des surfaces réduites, inférieures à 3,7 acres. Par conséquent, ce sont souvent les arboriculteurs exploitant de petites superficies qui ont tendance à opter pour le natural farming.

Exploitation sans terre avec élevage extensif de petit ruminant

Ce système de production a uniquement un élevage, un troupeau de chèvres et de brebis allaitantes en pâturage extensif. Il est récent, en forte progression, et les fermiers sont généralement de classes socio-économiques défavorisées (sans terres, castes basses, ouvriers journaliers). Cette activité peut alors leur permettre de relativement bons revenus (supérieur au

seuil de survie et à certains systèmes de production traditionnels) avec un investissement initial minimal. Ce système est intéressant car une certaine déprise agricole a engendré l'apparition de friches dans le canton. Ces espaces d'usage commun représentent une nouvelle forme de Saltus où les petits ruminants pâturent. Leurs déjections représentent un nouveau flux de matière vers l'Ager, chez des agriculteurs ayant des terres. Ces nouveaux flux pourraient contribuer à rendre l'agriculture à Madakasira plus durable.

Elevage de poulet de chair intégré, sous contrat

Ce système de production possède uniquement un élevage de poules en intégré avec la compagnie Sneeha. Les fermiers construisent un bâtiment, puis reçoivent les poussins et les intrants nécessaires. Ils revendent les poules de chair à l'entreprise pour un prix fixe. Les fermiers ont souvent un emploi qualifié non agricole, et délèguent la gestion de l'élevage à des employés permanents. Ce système est intéressant car il représente une évolution possible pour certaines fermes pluviales : celles sur de petites surfaces et proches de grands axes routiers. Il nécessite beaucoup d'investissements mais permet une forte augmentation des revenus agricoles. Il a été supposé que cet élevage montrerait d'importants flux de matière et d'énergie via les intrants et les produits (aliment, déjections). L'intérêt de le modéliser résidait dans le fait qu'il s'agisse d'un élevage standardisé, orienté vers l'extérieur, un bon exemple d'un élevage aux flux très linéaires. Il permet également de mettre en avant un contraste avec l'élevage de petit ruminant, extensif qui repose sur les ressources locales et gratuites de la zone.

Bien que le diagnostic agraire ait conduit à fournir un certain nombre de données brutes, celles-ci ont été insuffisantes pour mener à bien cette étude. Il est parfois courant d'agglomérer des données en leur attribuant une seule valeur économique, mais dans le cadre de cette étude, il était impératif de dissocier tous les éléments. Par exemple, lorsqu'il s'agit d'une évaluation économique, le tracteur, la quantité de carburant utilisée et la main-d'œuvre sont souvent regroupés sous une seule donnée. Cependant, dans le contexte de la modélisation des flux d'énergie, il est essentiel de les différencier, car ils ont tous trois des coefficients énergétiques distincts. En effet, ils ne consomment pas la même quantité d'énergie, ni la même forme d'énergie par unité. De plus, plusieurs informations étaient manquantes sur la nature et la quantité de certains intrants et produits. En effet le processus de modélisation nécessaire à l'étude des flux d'énergie exige des données précises sur la nature, les quantités des intrants et des produits. Par exemple, il s'est avéré utile d'avoir des informations sur la puissance des pompes utilisées pour l'extraction de l'eau, afin de calculer la consommation en électricité ou en carburant. De même, avoir connaissance de la composition des sacs de concentrés et de l'origine des ingrédients était indispensable pour déterminer l'énergie indirecte associée au transport et à la fabrication.

2- ESTIMATION DES BESOINS ALIMENTAIRES D'UNE FAMILLE SUR LE CANTON

La modélisation des besoins alimentaires d'une famille présentée ci-dessous permet de comparer l'autonomie alimentaire de celle-ci par l'autoconsommation des produits issus de l'exploitation et les produits nécessitant un achat extérieur.

Le principe de modélisation des besoins alimentaires a été inspiré par le diagnostic agraire avec le calcul du seuil de survie. Les données collectées directement par les familles sur le terrain ont servi à ajuster ces valeurs pour une famille disposant de revenus moyens dans la zone. Par conséquent, les besoins alimentaires ont été modélisés pour une famille de cinq personnes, en tenant compte de la nécessité de nourrir 3,5 individus tout au long de l'année.

Tableau 1-Estimation du besoin alimentaire annuel d'une famille sur le canton

BESOINS ALIMENTAIRES ANNUELS						
Famille	Espèce	Teneur matière sèche	Coefficient énergétique brute (MJ/kgMS)	Quantité (kg/an)	Quantité (kgMS/an)	Energie brute (GJ/an)
Légumineuses	Arachide	0,93	25,9	48	44,64	1,16
	Pois de cajan	0,89	18,7	48	42,72	0,80
	Féverole	0,87	18,7	25	21,75	0,41
	Niébé	0,9	18,7	25	22,50	0,42
Céréales	Riz	0,89	20,5	360	320,40	6,57
	Millet	0,9	19,1	30	27,00	0,52
	Maïs	0,87	18,7	100	87,00	1,63
	Piments	0,13	15	44	5,72	0,09
Légumes	Tomates	0,07	18,2	48,6	3,40	0,06
	Légumes	0,18	15	180	32,40	0,49
	Oignons	0,14	17	37,8	5,29	0,09
Condiments	Ail	0,3	17	0,702	0,21	0
	Huile	1	37	60	60,00	2,22
	Tamarin	0,7	18,8	7,8	5,49	0,10
	Épices	0,9	17	7,2	6,48	0
	Sucre	0,9	17	60	54,00	0,92
	Thé	0,9	1,8	6	5,40	0,01
	Noix de coco	0,51	32,1	144	73,44	2,36
Fruits	Banane	0,22	17,1	768	168,96	2,89
	Citrons	0,16	3,3	12	1,92	0
	Mangues	0,17	15	144	24,48	0,08
	Fleurs	0,8	15	96	76,80	1,15
	Ricin	0,95	19,2	20	19	0,36
TOTAL				2897	1109	22,3

3- APPROCHE DEPLOYEE POUR REpondre A LA PROBLEMATIQUE

1. ORGANISATION CHRONOLOGIQUE DE L'ETUDE

Afin de répondre à la problématique présentée précédemment et de mener à bien la mission commanditée par l'INRAE, une démarche de travail, présenté Figure 4 a été mis en place. Cela a consisté à effectuer un travail bibliographique afin de comprendre la zone d'étude, d'étudier les systèmes de production, de choisir ceux qui seraient à modéliser et donc ceux sur lesquelles les enquêtes devaient s'attarder. Cette première phase de travail a donc permis de mettre en place une conduite d'entretien pour la phase de terrain.

Des enquêtes sur le terrain basés sur ces systèmes de production ont été réalisé pendant une période de 2 mois. Cette phase de terrain a permis de recueillir des données directement auprès des agriculteurs. L'objectif a été de bien identifier les systèmes de culture, d'élevage et de production sur la zone et de collecter les données nécessaires pour quantifier les flux de matière et d'énergie qui circulent au sein de ces systèmes. Cette phase de terrain a permis de consolider les données déjà existantes et d'approfondir davantage les conduites culturales et d'élevages en natural farming. Pour cela, l'idée a été de réaliser dans la mesure du possible entre 3 et 5 entretiens par systèmes de culture, d'élevage et système de production pour comprendre l'organisation des flux entre les sous-systèmes.

Du matériel de mesure, de pesée et d'analyse de l'eau ont également été amenés sur le terrain afin de pouvoir quantifier les quantités d'intrants ou de certains produits directement au champ, dans les zones de stockage, ou dans les bâtiments d'élevage. Cette phase de terrain a été bénéfique dans la compréhension des systèmes par l'observation de certaines pratiques agricoles en temps réels (conduite des semis, de l'irrigation, traction animale, etc.). Cela a été l'opportunité de se familiariser avec la confection des préparations spécifiques du natural farming par exemple. De juin à août s'est opéré une phase de traitement de données qui a consisté, à partir des données collectées, de modéliser les systèmes de culture, d'élevage et les systèmes de production retenus. La schématisation des flux de matière et d'énergie des différents systèmes de production ainsi que le choix des indicateurs ont également été réfléchi à ce moment-là. La phase de rédaction a été faite à partir de mi-août.



Figure 4- Schéma de l'organisation chronologique de l'étude

2. PRESENTATION DE L'OUTIL DE TRAVAIL

La modélisation des flux d'énergie implique en amont une modélisation des flux de matière au sein des systèmes de production. Cette étape nécessite d'identifier et de quantifier les éléments entrants (intrants) et sortants (produits) de chaque sous-système, qu'il s'agisse du système de culture ou de l'élevage, qui composent le système de production.

Les données brutes comprennent la nature et la quantité des intrants et produits associés aux systèmes de culture et d'élevage mais également la quantité de travail fournie par intervention, ainsi que les équipements et les bâtiments présents dans le système de production. Chacune de ces données a été rapportée en fonction de la surface occupée par la culture et ramené à l'échelle d'une année moyenne de production qui prend en compte les différentes étapes de production tel que l'implantation ou les années non productive d'une plantation par exemple. Ces données ont ensuite été converties en énergie à l'aide de coefficients énergétiques choisis et présentés dans la sous partie Adaptation des coefficients au canton de Madakasira.

Les systèmes de culture, d'élevage et de production ont été modélisés à l'aide du logiciel Microsoft Excel©. Chaque classeur de travail représente un système de production comprenant les différents systèmes de culture et d'élevage qui le composent.

Dans chaque classeur une présentation de chaque système de production et sous système a été réalisé avec la localisation, la surface retenue, les équipements pour le système de production. La présentation des systèmes de culture correspond aux espèces, à la surface occupée par chacune d'entre elle, les cultures en rotation, le nombre de cycles dans l'année pour les cultures annuelles. Pour les cultures pérennes et les plantations, il a été présenté la surface, la densité de plantation et la surface occupée par chaque essence. L'itinéraire technique des cultures présente chaque opération culturale pour lesquelles ont été détaillé les décisions prises pour les mettre en œuvre ainsi que les outils nécessaires à leur élaboration. Les intrants et les produits ont été modélisés de manière à distinguer ceux qui sont intra et autoconsommés de ceux qui proviennent ou qui sont destinés à l'extérieur. Un calendrier de travail est associé aux différentes opérations culturales dans lequel est également indiqué le type de main-d'œuvre (familiale ou salariale), le nombre de personnes mobilisées pour chaque tâche permettant ainsi de quantifier le travail en Homme-jours. L'unité "Homme-jour" représente la quantité de travail effectuée par une personne sur une journée de travail standard de 8h. Le calcul de l'énergie liée au travail humain a été réalisé avec les Hommes-jours et en l'ajustant en fonction d'un coefficient de pénibilité attribué à chaque tâche.

Concernant les systèmes d'élevage, les caractéristiques et performances de l'élevage ont été précisés avec le nombre de gestantes, le nombre de mises bas, l'âge de reproduction, le taux de renouvellement, de réforme, de mortalité, etc. Au même titre que les systèmes de culture, la conduite de l'élevage a été modélisé avec les tâches, les décisions prises et les outils utilisés. Les intrants et les produits ont également été modélisés distinguant ceux qui sont intraconsommés de ceux qui proviennent de l'extérieur ou qui sont destinés à être vendus en dehors de l'exploitation. Un calendrier de travail a été modélisé de la même manière que pour les systèmes de cultures. Pour les systèmes d'élevage bovin un calendrier de production et d'alimentation a été réalisé dans lequel a été adapté les rations au cycle de la vache. Afin que la modélisation des quantités des intrants puisse coïncider avec les besoins alimentaires du troupeau, une ration moyenne a été calculé à partir de 3 rations, pour une vache gestante, en lactation et une génisse.

La modélisation des flux de matière et de la conversion de celle-ci en flux d'énergie via les coefficients énergétiques a été présenté dans un bilan énergétique des systèmes de cultures, des systèmes d'élevage et du système de production comme présenté Figure 5. Chaque variable a été classé en fonction d'une catégorie. Par exemple le ganajeevamurtham est une variable classée dans la catégorie des intrants intra consommés par le système de culture. Pour chaque variable figure leur quantité, leur unité, leur coefficient fixe qui ont permis de déduire les flux d'énergie en Gigajoule.

À partir de ce bilan énergétique huit indicateurs ont pu être calculé en fonction des flux d'énergie entrants, sortants et circulant de chaque système de production.

SE	Flux	Catégorie	Variable	Unité	Quantité	Coefficient fixe	Energie brute (GJ/unité)	Energie liée au travail (GJ)	Coefficient fixe	Energie fossile consommée/produite (GJ/unité)	
SE2	ENTRANT	Intraconsommé	palme de cocotier	kgMS/an	382,5	17,0	6,5				
			napplier	kgMS/an	7358,4	17,4	128,0				
			agasa	kgMS/an	5475,0	19,0	104,0				
		TOTAL						238,6			
		Achats extérieurs	fouillage d'arachide	kgMS/an	3700,0	17,8	65,9				
			paille de millet	kgMS/an	3720,0	17,7	65,8				
			paille de riz	kgMS/an	3680,0	16,3	60,0				
			bussa	kgMS/an	2200,0	14,9	32,8	5,4		11,9	
			essence	L	109,5	37,4	4,1	48,2		5,3	
		TOTAL						228,6		17,2	
		Matériel en propriété	Stabulation tôle+bois	m2	50,0					36,0	0,1
			moto	nb	1,0					7,0	0,5
		TOTAL									0,6
		Travail	main d'œuvre familiale	Hj	273,6	2,0			4,6		
			main d'œuvre extérieur	Hj	0,0						
	TOTAL							4,6			
	TOTAL ENTRANT							467,1	4,6	17,7	
	SORTANT	Intraconsommé	lisier		kgMS/an	3451,4	3,8	13,1			
				TOTAL				13,1			
		vente	lisier		2388,6	3,8	9,1				
			viande		150,0	17,7	2,7				
			lait		1665,6	3,5	5,8				
		TOTAL						17,6			
autoconsommé		lait		86,4	3,5	0,3					
TOTAL						0,3					
TOTAL SORTANT							31,0				

Figure 5-Présentation du bilan énergétique sur Excel- Exemple SE2

4- MODELISATION DES FLUX D'ENERGIE

1. LES DIFFERENTES FORMES D'ENERGIE AU SEIN D'UN SYSTEME DE PRODUCTION

Tout d'abord, avant d'obtenir les flux d'énergie, il est essentiel de modéliser les flux de matière des systèmes de production examinés précédemment. Pour déterminer les diverses formes d'énergie au sein de ces systèmes, il est nécessaire de quantifier la quantité et d'attribuer un coefficient énergétique à chaque élément ou variable qui entre, circule ou sort du système de production. Pour atteindre cet objectif, une recherche approfondie a été nécessaire afin d'obtenir des coefficients fixes qui soient les plus représentatifs de la zone d'étude.

L'objectif principal d'une exploitation agricole est la production de biens. Au cours de ces processus de production, différentes formes d'énergie sont mobilisées. Ainsi, les systèmes agricoles peuvent être analysés en termes d'énergie brute, d'énergie du travail et d'énergie fossile. L'énergie brute correspond à l'énergie calorifique d'un élément. L'énergie liée au travail représente l'effort humain et animal investi dans les activités agricoles, tel que la traction animale, le désherbage manuel, etc.

L'énergie fossile peut être catégorisée en deux types : l'énergie directe et indirecte, comme indiqué Figure 6. Au centre du schéma, l'exploitation agricole est représentée avec ses composantes (matériel, bâtiments, intrants divers), qui consomment directement de l'énergie fossile pour la production agricole, notamment sous forme de carburants (gazole, essence), d'électricité. Ces formes d'énergie sont considérées comme des entrées directes dans le système de production. Par ailleurs, il existe une énergie indirecte, c'est-à-dire des énergies non renouvelables consommées en amont pour fabriquer les divers intrants transportés à l'exploitation et utilisés dans le système de production. Parmi les intrants considérés, on retrouve les engrais minéraux et organiques, les aliments achetés (concentrés, fourrages, etc.), les produits phytosanitaires (herbicides, etc.), les semences, le matériel, les machines (dont l'amortissement est pris en compte après un certain nombre d'années d'utilisation), ainsi que d'autres achats comme les plastiques. Les sorties d'énergie correspondent principalement aux produits alimentaires et sont calculées en fonction de leur valeur énergétique brute. Ainsi, l'analyse de ces flux permet de quantifier la consommation d'énergie fossile et d'évaluer l'impact environnemental qui en découle.

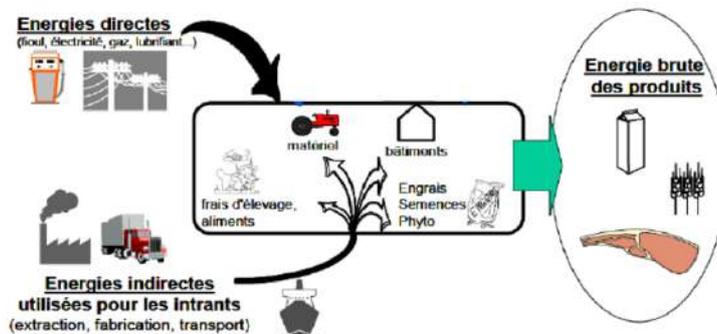


Figure 6-Schéma des différentes formes d'énergie au sein d'une exploitation

2. DES FLUX D'ENERGIE QUI DECOULENT DES FLUX DE MATIERE

Comme indiqué précédemment, la première étape essentielle avant de modéliser les flux d'énergie consiste à quantifier avec précision les intrants et les produits des systèmes de production. Cette démarche nous permet d'obtenir des données relatives aux flux de matière, exprimées en kilogrammes de matière sèche. En ce qui concerne les intrants biologiques tels que les produits issus des récoltes, leurs teneurs en matière sèche ont été déterminées pour la plupart en se référant à Feedipedia¹. Les quantités d'intrants et de produits ont été calculées en se basant sur des données provenant des entretiens réalisés avec les agriculteurs, ainsi que sur des mesures effectuées directement sur le terrain. Des références bibliographiques ont également été consultées afin d'estimer des quantités plus complexes à évaluer tel que les apports au pâturage ou les ratios paille/grain par exemple.

Estimation de l'apport au pâturage

L'apport au pâturage a pu être calculé à partir de la formule suivante :

$$\text{Apport au pâturage (kgMS)} = \text{MSingérée mensuelle} - \text{MS fourrage distribuée mensuelle}$$

La matière sèche ingérée mensuelle a été déterminé par la table ci-dessous qui est une valeur théorique de la matière sèche ingéré en fonction des besoins de l'animal. Ainsi, il a pu être estimé un apport journalier au pâturage de 2kgMS pour une vache Hallikar d'un poids de 400kg et un apport de 5kgMS pour une brebis de 60kg.

Tableau 2-Matière sèche ingérée en fonction des différentes catégories d'animaux

(K. Singhal et al., 2015)

Category of animal	DM intake kg/100 kg body weight
Adult local cow -dry-	2
Adult local cow -milking-	2,2
Adult local bull – breeding and working-	2,15
Adult crossbred cow – dry-	2
Adult crossbred cow – milking-	3
Adult female buffalo -dry-	2,5
Adult female buffalo -milking-	2,8
Sheep or goat (less than 1 year old)	3
Adult male or female sheep or goat	3,5

Estimation de la quantité de fumier

La quantité de fumier a été estimée en pesant les paniers de collecte matinale de plusieurs élevages. Pour SE1, il a été obtenu un poids de 21,5kg avec une collecte de 1,5 panier par jour correspondant à une quantité de 32,3kg de lisier/j pour un élevage de 2 vaches mère (descendance comprise).

¹ Feedipedia est une ressource en ligne de renom dans le domaine de l'alimentation animale et de la nutrition animale, développée en collaboration par l'INRAe, le CIRAD, l'AFZ et la FAO.

3. ADAPTATION DES COEFFICIENTS AU CANTON DE MADAKASIRA

Pour quantifier les entrées et les sorties en énergie, on dispose de coefficients énergétiques (en MJ/unité) qui sont affectés à chaque type d'intrant. Ces coefficients permettent de transformer des quantités préalablement données en kilogramme de matière sèche.

Coefficient pour l'énergie brute

Les coefficients associés à l'énergie brute des différents intrants et produits ont été obtenus à la suite d'une phase de recherche bibliographique. Les coefficients sont présentés avec leur source en Annexe 1. Pour expliquer l'obtention de certains de ces coefficients, prenons l'exemple de l'estimation de l'énergie brute de la viande issue des animaux vendus. Cette estimation a nécessité de déterminer le poids moyen des différents animaux et de le multiplier par le coefficient énergétique brut de la viande estimée à 17,7MJ/kgMS. Le coefficient énergétique brut lié au pâturage des animaux a été calculé en prenant la moyenne des coefficients énergétiques bruts de cinq espèces fourragères locales estimé à 18,4MJ/kgMS.

Les coefficients énergétiques bruts liés aux intrants et aux produits "biologiques" ont été établis en fonction de l'énergie brute contenue dans ces produits. En ce qui concerne les fourrages et les condiments pour la consommation familiale, les coefficients énergétiques brutes ont été obtenus à partir des données de Feedipedia. Quant aux effluents d'élevage, les coefficients énergétiques brutes proviennent d'une étude espagnole avec les valeurs spécifiées ci-dessous.

Tableau 3-Coefficients énergétiques brutes des effluents d'élevages (Guzmán et Alonso, 2008)

Biological inputs	Total energy (MJ/kg or l)
Vetch seed (<i>Vicia sativa</i>)	15.9
Commercial compost	10.5
Cow manure	3.8
Sheep manure	11.1
Poultry manure	10.9
Alperujo compost	13.3
Nettle extract	0.27

Pour certains coefficients, des calculs ont été nécessaires, comme dans le cas du lait. En effet, l'énergie brute du lait a été estimée à 3,3 MJ/kg de lait et calculée à partir de la formule d'Overman et Sanmann présentée ci-dessous (O.R. Overman et W.L. Gaines, 1933). Cette formule permet d'obtenir une valeur en kcal/L de lait. Le choix de la race a été déterminé, avec la race Holstein pour le système d'élevage 2 et la catégorie "non classée" pour le système d'élevage 1.

$$\begin{aligned} \text{Holstein : } E &= 128,19(1,99 + f) \\ &= 831,9 \text{ kcal/kg} \\ &= 3,3\text{MJ/kg} \end{aligned}$$

Avec:
E : Energie brute du lait exprimé en kcal/kg lait.
f : Le pourcentage de gras de 4,5

$$\begin{aligned} \text{Vache Hallikar: } E &= 115,33(2,51 + f) \\ &= 808,5 \text{ kcal/kg} \\ &= 3,2\text{MJ/kg} \end{aligned}$$

En ce qui concerne la plantation d'aréquier, celle-ci a été modélisée avec un apport de sol non négligeable. L'énergie brute du sol a été estimée à 9,23MJ/kgMS. Cette valeur correspond au carbone total obtenu à partir d'une analyse de sol réalisée sur six réservoirs dans le Karnataka. Les détails de l'analyse du sol sont présentés Annexe 13.

Coefficients énergétiques liés au travail

Les coefficients énergétiques liés au travail permettent d'évaluer l'efficacité du travail humain et animal au sein des systèmes agricoles, et de comparer ces méthodes de travail par rapport à l'utilisation de machines. Ces coefficients présentés Tableau 4 permettent de comprendre la contribution du travail humain et animal dans le travail agricole.

Les coefficients d'énergie liés au travail humain permettent de déterminer précisément l'énergie fournie par les travailleurs humains dans les opérations agricoles. Ce coefficient a été estimé à 1,96MJ/h. Cette valeur est issue d'une étude qui a estimé la dépense énergétique moyenne des travailleurs pendant l'exécution de tâches agricoles (Singh et Mittal, 1992). Afin d'adapter au mieux la modélisation aux pratiques réelles, chaque tâche a été associée à un coefficient de pénibilité présenté Tableau 5. Cette approche découle du travail de (Natasha Caumartin, 2017) au cours duquel des coefficients de pénibilité ont été calculés à partir d'enquêtes menées auprès des agriculteurs. Une attention a été apportée pour que ces coefficients soient adaptés aux tâches agricoles de la zone d'étude.

De manière similaire aux coefficients d'énergie liés au travail humain, les coefficients relatifs au travail animal permettent de quantifier l'énergie fournie par les animaux lors de diverses opérations agricoles. Pour cela, il a été modélisé un travail animal réalisé par une paire de bœufs pour le semis, le travail du sol, et le transport sur de courtes distances (moins de 10 kilomètres). Ces coefficients permettent de mesurer l'efficacité énergétique des animaux dans le cadre des activités agricoles.

Tableau 4-Coefficient énergétique liée au travail

Type de flux	Flux	Unité	Coefficient énergétique brutes (MJ/unité)	Référence
Travail animal	Labour	Heure	3	(Vigne, 2012)
	Désherbage	Heure	3,1	(Vigne, 2012)
	Semis	Heure	2,8	(Vigne, 2012)
	Transport	Km	0,4	(Vigne, 2012)
Travail humain	Tous type de travail	Heure	1,96	(Singh et Mittal, 1992)

Tableau 5-Estimation de la pénibilité des tâches agricoles

	Pénibilité 1	Pénibilité 2	Pénibilité 3	Pénibilité 4	Pénibilité 5
Coefficient attribué (MJ/h)	0,69	0,85	0,99	1,25	1,44
Exemple d'intervention pour SC	Conduite de tracteur, travail du sol, désherbage mécanique, décorticage	Fertilisation organique, traitements, irrigation à la raie	Semis à la volée, préparations ZBNF, stockage des récoltes au village	Plantation, récolte	Travail du sol, désherbage manuel et avec animaux
Exemple d'intervention pour SE	Pâturage des animaux, alimentation et abreuvement automatisée	Alimentation et abreuvement manuel	Traite Collecte du fumier	Collecte du fourrage Nettoyage	

Coefficient énergétique fossile

Coefficient pour l'énergie fossile indirect

Estimation du coefficient énergétique fossile de la busa

Le coefficient énergétique fossile du concentré alimentaire pour l'élevage laitier de vaches Holstein, connu sous le nom de busa, est estimé à 5,4 GJ/kgMS.

Ce coefficient représente l'énergie consommée tout au long du cycle de vie du produit et comprend :

- La production des ingrédients de base (maïs, arachide, coton, tournesol, riz).
- La phase de fabrication du concentré, qui se déroule à Dindigul, dans l'État du Tamil Nadu. L'énergie fossile consommée est liée à l'utilisation de gaz naturel et d'électricité pour la fabrication du concentré. Cependant, la consommation d'énergie fossile liée à la construction des machines d'usinage n'a pas été prise en compte.
- Le transport du concentré depuis l'usine de fabrication jusqu'au lieu de commercialisation à Chennai, situé à 430 km du lieu de production, et ensuite du magasin à l'exploitation.

Il s'est avéré difficile d'obtenir la composition précise du concentré, celle-ci n'étant pas mentionnée sur les emballages et n'étant pas communiquée par les coopératives locales. Par conséquent, la composition utilisée correspond aux ingrédients contenus dans les concentrés alimentaires distribués aux élevages bovins à Anantapur, une ville qui fait l'objet d'une étude de quantification des flux réalisée par Charlotte Hemingway. Anantapur se trouve à une centaine de kilomètres de la zone d'étude. La formulation utilisée est issue d'un rapport de référence (Tavva and Anantharaman, 2022).

Estimation du coefficient énergétique fossile des concentrés donnés aux poulets de chair

En ce qui concerne l'élevage de poulet de chair affilié à la compagnie Sneeha, il s'est également avéré difficile d'obtenir des informations précises sur les matières premières utilisées pour la construction des bâtiments, la fabrication des concentrés et des vaccins. Face à cette complexité, les coefficients énergétiques fossiles associés aux concentrés alimentaires, compléments alimentaires, vaccins et aux bâtiments d'élevage de poulet de chair ont été extraits de la base de données européennes Dia'terre. Le choix d'utiliser des références européennes plutôt qu'indiennes s'explique par la nature standardisée de cette pratique d'élevage. Cependant, il est important de souligner qu'il aurait été préférable de disposer de données indiennes, car les méthodes de production des cultures destinées à l'alimentation des poulets ne sont pas adaptées aux conditions locales en Inde.

En ce qui concerne l'estimation des flux d'énergie fossile liés aux bâtiments d'élevage, le coefficient énergétique choisi est de 56,2 MJ/m²/an pour un bâtiment de volaille de type Colorado, comme indiqué dans le Tableau 6. La surface totale des bâtiments d'élevage a été estimée à 10 000 m², ce qui équivaut à un coefficient d'énergie fossile total de 168,7 GJ. Cette valeur a ensuite été répartie sur la durée d'amortissement du bâtiment, estimée à 50 ans, ce qui correspond à un flux annuel d'énergie fossile de 3,4 GJ.

Tableau 6- Référence Dia'terre pour estimer les coefficients énergétiques fossile des concentrés et des bâtiments des élevages avicoles

Type d'aliment	Formulation	Catégorie d'aliment	Coefficient énergétique (MJ/T)	Facteur émission GES (kg CO2 eq/T)	Ratio SEM (ha / t)	Coefficient azote (kg N / tonne)
Aliment volaille à base de blé	Granulé	composée	3255,60	225,60	0,235	27,8
Aliment volaille à base de maïs	Granulé	composée	3327,70	230,50	0,235	27,8
Aliment volaille à base de blé	Farine	composée	2869,30	199	0,235	27,8
Aliment volaille à base de maïs	Farine	composée	2941,40	204	0,235	27,8

Type de bâtiment	Coefficient énergétique (MJ / unité/an)	Facteur émission GES (eq kg CO2 / unité/an)	Unité	Catégorie de bâtiment
Volaille / Louisiane	73,188	3,326	m2	
Volaille / Colorado	56,232	2,66	m2	
Volaille / Lanterneau	56,808	3,116	m2	

Estimation du coefficient énergétique fossile lié au matériel des systèmes de production

Le calcul des flux d'énergie fossile lié au matériel agricole a pu être réalisé en utilisant un coefficient énergétique fossile exprimé en MJ par unité. Pour adapter ce calcul sur une année complète, il a été nécessaire d'estimer la durée d'amortissement du matériel et de diviser la valeur finale par cette durée comme vu avec le bâtiment d'élevage de poulet de chair. Ainsi, les bâtiments d'élevage bovin et les bâtiments de stockage ont été modélisés avec un bâtiment construit à partir de tôles et de bois. Le coefficient énergétique de ces bâtiments ont été repris du travail de (Natasha Caumartin, 2017) réalisé dans un contexte indien.. Les coefficients énergétiques fossiles pour les équipements tels que les pompes, les tracteurs, la remorque en

bois, la batteuse de riz, la charrue et l'araire manuelle ont également été tirés de cette même source.

Les coefficients énergétiques fossiles des outils de travail du sol tel que le rotavator et le cultivateur, ainsi que le pulvérisateur manuel ont été déterminé à partir des références d'une étude espagnole (Guzmán et Alonso, 2008) présentés Tableau 7. Cette étude prend en compte l'énergie fossile indirecte liée aux matières premières, à la fabrication, ainsi qu'à la maintenance de ces outils. Les poids des outils référencés correspondent approximativement à ceux utilisés dans la zone d'étude, avec un poids de 80 kg pour le rotavator, 700 kg pour le cultivateur, et 10 kg pour le pulvérisateur manuel. Ainsi, bien que ces données proviennent d'une étude espagnole, elles correspondent aux caractéristiques des outils utilisés dans la zone d'étude.

Tableau 7-Données nécessaires au calcul du coefficient énergétique fossile du rotavator, du cultivateur et du pulvérisateur manuel (Guzmán et Alonso, 2008)

Machinery	UL (H)	UL (N)	Power (kW)	Weight (kg)	Raw mats. (MJ/kg)	Manufacture (MJ/kg)	Rep.-Mainten.	
							(%)	(MJ/kg)
Tractor: 2 RM, 41 kw	12,000	10	41	2300	49.4	14.7	49	31.4
Tractor: 2 RM, 50 kw	12,000	10	50	3400	49.4	14.7	49	31.4
Tractor: 4x4, 50 kw	16,000	12	50	3900	49.4	14.7	49	31.4
Tractor: 4x4, 60 kw	16,000	12	60	4200	49.4	14.7	49	31.4
Tractor: 4x4, 75 kw	16,000	12	75	4700	49.4	14.7	49	31.4
Tractor: 4x4, 90 kw	16,000	12	90	5200	49.4	14.7	49	31.4
Tractor: 4x4, 100 kw	16,000	12	100	5500	49.4	14.7	49	31.4
Tractor with shaker	16,000	12	110	9000	50.3	13.0	24	15.2
Hand-held trimmer	2000	6	1.84	10	62.8	7.4	26	18.3
Backpack sprayer	2000	6	1.84	10	62.8	7.4	26	18.3
Rotavator	2000	6	7.35	80	62.8	7.4	26	18.3
Chainsaw	2000	6	1.84	10	62.8	7.4	26	18.3
Branch shaker	2000	6	1.84	15	62.8	7.4	26	18.3
Centrifugal fertilizer spreader	1200	10	0	200	62.8	8.6	30	21.4
Sprayer tank (100-400 l)	1500	10	0	100	62.8	8.6	30	21.4
Sprayer tank (400-600 l)	1500	10	0	200	62.8	8.6	30	21.4
Sprayer tank (1000 l)	1500	10	0	400	62.8	8.6	30	21.4
Sprayer tank (1000-2000 l)	1500	10	0	600	62.8	8.6	30	21.4
Cultivator	2500	12	0	700	62.8	8.6	30	21.4
Disc harrow	2500	12	0	700	62.8	8.6	30	21.4
Tine harrow	2000	15	0	500	62.8	8.6	30	21.4
Trailer (0.7-1 t)	5000	15	0	300	62.8	8.6	30	21.4
Trailer (5-6 t)	5000	15	0	1600	62.8	8.6	30	21.4
Trailer (8 t)	5000	15	0	2500	62.8	8.6	30	21.4
Roller	2500	15	0	700	62.8	8.6	30	21.4
Chipper	2000	10	0	720	62.8	8.6	26	18.6

Coefficient pour l'énergie fossile direct

Estimation de la consommation d'électricité

Le coefficient énergétique fossile de l'électricité est estimé à 11,93 MJ/kWh (Sarkar et al., 2022). Il s'agit d'une donnée calculée dans un contexte indien prenant ainsi en compte le mix énergétique du pays. Ce coefficient énergétique est appliqué à la consommation électrique annuelle de chaque système de production. Cela nous renseigne sur l'énergie fossile direct liée à la consommation d'électricité des différents équipements et des bâtiments présentés Tableau 8 et Tableau 9.

Pour certains systèmes de production le poste de l'électricité fait partie des postes qui présentent un bilan énergétique élevée. En effet, la consommation d'électricité au sein des exploitations est directement liée à l'usage des pompes submersibles et des pompes de surfaces qui permettent de faire remonter l'eau des forages afin de pouvoir irriguer les cultures. La consommation d'électricité dépend également de l'utilisation des ventilateurs, de la lumière dans les bâtiments d'élevage de poulet de chair par exemple.

Pour estimer la consommation d'électricité en kilowattheures (kWh) des systèmes de production, il a été nécessaire d'identifier les équipements consommateurs d'électricité et d'évaluer leur consommation en fonction de leur puissance et de la durée d'utilisation comme le souligne la formule ci-dessous. Grâce à cette formule la consommation en électricité a pu être estimé facilement avec excel en indiquant le temps d'utilisation des équipements comme présenté avec le Tableau 8. Bien sûr les équipements et le temps d'utilisation des équipements ont été adapté à chaque système de production.

$$\text{Consommation électrique (kWh)} = \frac{\text{Puissance} * \text{temps d'utilisation}}{1000}$$

Dans un souci de simplification, chaque système de production a été modélisé avec un même modèle de pompe submersible dont les caractéristiques figurent ci-dessous. Concernant la consommation en électricité des pompes de surfaces, il a été modélisé l'utilisation d'une pompe de surface d'une puissance de 2HP.

Modèle pompe submersible :
6SR1010-5,5 (150mm)
Débit de 10m³/h
12 stages
Puissance de 7,5HP (soit 5,5 kW)

La charge des batteries des pulvérisateurs à main constitue également une source de consommation électrique et a été incluse dans le calcul. Il a été modélisé un pulvérisateur d'une capacité de 20L avec une autonomie de 8h, muni d'une batterie d'une tension de 12V et d'une intensité de 5A.

Tableau 8-Consommation électrique des équipements- Exemple avec le SC légume

Equipement	Puissance (HP)	Puissance consommée (W)	Temps d'utilisation (h)	Consommation électrique totale (kWh)
Pompe submersible	7,5	5625	59	331,9
Pompe de surface	2	1500	59	88,5
Pulvérisateur à main (batterie)		60	1,5	0,09

En ce qui concerne la consommation électrique des bâtiments d'élevage de poulet de chair celle-ci a été estimée en fonction de la consommation électrique des équipements le composant tels que des ventilateurs, des ampoules et des systèmes automatisés de distribution alimentaire ou de boisson. Toutes les données proviennent des enquêtes menées sur le terrain. Le tableau ci-dessous présente les calculs détaillés.

Tableau 9-Consommation électrique (kWh) d'un bâtiment d'élevage de poulet de chair

Equipement	Quantité	Consommation électrique (kWh)	Heures d'utilisation/j	Nb jours	Consommation électrique/cycle	Consommation électrique/an	
Ventilateurs	Tous les 100m2. Jours et nuits durant la saison sèche et seulement la nuit en saison des pluies	30	0,07	14,6	40	1316	5265
Ampoules incandescentes	Tous les 50m2, allumées de 18h30 à 7h	60	0,06	11,5	40	1656	6624
Systèmes automatisés (alimentation automatique)	Durant starter et finisher	1	0,4	3	30	36	144
Systèmes automatisés (abreuvement automatique)		1	0,1	3	30	9	36
					3017	12069	

Estimation de la consommation en carburant

Le coefficient énergétique fossile du diesel et de l'essence ont été respectivement estimés à 56,31 et 48,23 MJ/L (Sarkar et al., 2022). Ces coefficients ont été repris de la même étude que pour le coefficient énergétique fossile de l'électricité.

Afin de pouvoir estimer la consommation de carburant des équipements agricoles et de l'adapter à la zone d'étude il a fallu définir un modèle à chacun d'entre eux. L'étude sur le terrain a permis de faire ces choix qui figurent Tableau 10.

Tableau 10- Consommation de carburant des équipements agricoles

Équipement	Modèle	Puissance (HP)	Consommation (L/h)	Consommation (L/km)
Tracteur	1035 DI Massey Fergusson	35		
Tracteur + rotavator		35	3,5	
Tracteur + cultivateur		35	3,5	
Tracteur + remorque		35	3,5	
Camion de transport				0,25
Moto	Hero Motocrop 125 cm3			0,02
Débrousailluse thermique	STIHL	2,69	0,5	
Motoculteur		2,01	1	
Tronçonneuse	STIHL MS192T		1	
Tractopelle	Caterpillar 320		17	

En ce qui concerne l'apport du sol pour SC6 et SC7NF, cette opération a été modélisée avec l'utilisation d'un tractopelle pour l'extraction du sol du tank et d'un tracteur avec remorque pour le transport jusqu'à la plantation d'aréquier. Pour une quantité de sol chargé de 5 tonnes, la consommation de carburant augmenterait de 10 à 20% par rapport à l'utilisation du tracteur sans remorque, équivalent à une consommation de 3,5L/h. Il a été estimé une durée d'une heure pour extraire 5 tonnes de sol avec une pelle mécanique, soit 2h pour un apport de 10T de sol. Il a été estimé un chargement à une minute par tonne. Ainsi la durée estimée pour charger et transporter 5 tonnes de sol sur une distance de 20 km avec un tracteur et une remorque est d'1 heure et 20 minutes. Donc 2h40 au total si l'on considère deux aller-retours pour un apport de 10T de sol dans le verger.

5- CHOIX DES INDICATEURS

L'étude des indicateurs permet d'évaluer la performance d'un système de production, aussi bien du point de vue énergétique qu'environnemental. L'efficacité énergétique fossile, par exemple, permet de quantifier la dépendance du système aux énergies non renouvelables. Réduire cette dépendance offre une protection contre les fluctuations des prix de l'énergie et contribue à la réduction des émissions de gaz à effet de serre responsables du réchauffement climatique. Cela contribue à réduire la pollution de l'air, de l'eau et des sols associée à l'extraction, la production et la combustion de ces énergies. Ainsi une agriculture efficace sur le plan énergétique et environnemental vise à maximiser la productivité tout en réduisant l'impact environnemental.

Dans ce rapport, l'analyse des indicateurs des systèmes de production s'effectue en comparant ceux conduits en conventionnel avec ceux en natural farming. Une seconde partie du rapport dresse un bilan des performances environnementales des différents systèmes de production à l'aide de graphiques permettant de les comparer entre eux.

1. EFFICIENCE ENERGETIQUE GLOBALE

L'indicateur d'efficacité énergétique globale ou EROI (Energy Return on Investment) correspond à la somme de l'énergie exportée divisée par la somme de l'énergie importée par le système.

$$\text{Efficacité énergétique globale} = \frac{\sum \text{Énergie produite exportée}}{\sum \text{Énergie importée}}$$

L'énergie produite exportée est de l'énergie brute dans tous les cas. L'énergie importée correspond aux différentes formes d'énergie déjà présentées : énergie brute qui concerne principalement les intrants pour l'alimentation, le fumier, les semences ; l'énergie liée au travail humain ou animal ; l'énergie fossile directe et indirecte.

Il se peut que cet indicateur soit supérieur à 1, dans ce cas, cela signifie que l'énergie apportée via les produits est supérieure à l'énergie consommée via les intrants. Plus la valeur sera élevée, plus le système de production sera efficace.

2. EFFICIENCE ENERGETIQUE SPECIFIQUE

Il y a un consensus dans la communauté scientifique qui indique que l'utilisation seule de l'efficacité énergétique globale ne serait pas suffisante (Galán et al., 2016). Pour comparer les différents systèmes de production, il est possible de décomposer cet indicateur d'efficacité énergétique globale en ses sous-composantes qui permettraient d'obtenir l'efficacité énergétique fossile, brute et du travail comme présenté ci-dessous.

$$\text{Efficacité énergétique fossile} = \frac{\sum \text{Énergie produite exportée}}{\text{Énergie fossile importée}}$$

$$\text{Efficacité énergétique du travail} = \frac{\sum \text{Énergie produite exportée}}{\text{Énergie liée au travail importée}}$$

$$\text{Efficacité énergétique brute} = \frac{\sum \text{Énergie produite exportée}}{\text{Énergie brute importée}}$$

Les indicateurs d'efficacité énergétique fossile et liée au travail permettent de voir les effets de substitution entre énergie fossile directe et l'énergie liée au travail humain et animal en fonction

du degré de mécanisation du système de production. L'efficacité énergétique fossile indirecte et brute permettent de se rendre compte de la dépendance aux intrants transformés.

3. PART D'ÉNERGIE BRUTE, FOSSILE ET DU TRAVAIL IMPORTE

Cet indicateur permet de se rendre compte de la proportion des différentes formes d'énergie parmi l'énergie totale entrante dans le système de production. Ainsi il sera possible de visualiser les systèmes de production qui consomment le plus d'énergie fossile par exemple. L'évaluation de la part d'énergie fossile parmi l'énergie entrante peut être assimilée à un indicateur environnemental qui donne une indication sur l'impact environnemental du système de production à partir de l'énergie fossile qu'il consomme.

La part de l'énergie liée au travail est minime par rapport aux autres formes d'énergie, cependant, cet indicateur permet de mettre en évidence les systèmes de production qui requièrent le plus de travail. En effet il est supposé que les systèmes de production conduits en *natural farming* sont plus exigeants en termes de main d'œuvre que les systèmes conventionnels.

$$\text{Part d'énergie fossile importée} = \frac{\text{Énergie fossile importée}}{\sum \text{Énergie importée}}$$

$$\text{Part d'énergie du travail importée} = \frac{\text{Énergie du travail importée}}{\sum \text{Énergie importée}}$$

$$\text{Part d'énergie brute importée} = \frac{\text{Énergie brute importée}}{\sum \text{Énergie importée}}$$

4. INDICE DE CIRCULARITE

L'indice de circularité correspond à l'énergie circulante divisée par le total des énergies importées (Kleinpeter et al., 2023)

L'objectif de cet indicateur est de comparer la circulation interne de l'énergie des systèmes de production. Cet indicateur permet d'évaluer l'autonomie du système de production par les produits auto ou intraconsommés par les sous-systèmes. Ainsi une valeur proche des 100% signifie que l'exploitation fonctionne en faisant recirculer son énergie

$$\text{Indice de circularité} = \frac{\text{Énergie circulant}}{\sum \text{Énergie importée}}$$

III. RESULTATS ET ANALYSE

Cette partie a pour objectif de présenter et d'expliquer la logique systémique des pratiques agricoles des systèmes de production étudiés. À cette fin, des schémas illustrant les itinéraires techniques des cultures et la gestion des différents élevages sont présentés. Ces schémas permettent de mettre en évidence les choix de modélisation effectués pour représenter ces systèmes. Ainsi, dans cette étude, 6 systèmes de production ont été retenues dont 2 systèmes de production conduit en natural farming. Ils sont nommés SP1, SP2NF, SP3, SP4NF, SP5 et SP6 comme présentée Tableau 11.

Tableau 11-Présentation des 6 systèmes de production et des sous-systèmes les composant

SP1- Exploitation polyculture-élevage laitier		SP1NF- Exploitation polyculture-élevage laitier	
SC1: Arachide (1 ac)	SE1: 2 vaches Hallikar	SC2NF: Arachide associés (2ac)	SE1: 2 vaches Hallikar
SC3: Rotation céréalière (1 ac) Riz/millet//maïs/millet		SC4NF: Rotation céréalière (1 ac) Riz/millet//maïs/millet	SE3: 4 chèvres allaitantes
		SC5: Légumes associés	
SP3-Arboriculture avec gros élevage laitier		SP3NF-Arboriculture avec gros élevage laitier	
SC6: Plantation d'aréquier (3ac)	SE2: 5 vaches Holstein Friesan	SC7NF: Plantation d'aréquier (1,5ac)	SE2: 5 vaches Holstein Friesan
SC8: Napier (1 ac)			
SP5-Elevage petit ruminant sans terre		SP6-Elevage poulet de chair sans terre	
	SE4- 50 brebis et 20 chèvres		SE5- 4 lots de 10000 poulets de chair

1- LES PREPARATIONS ZBNF

Avant d'entrer dans les détails de la modélisation des préparations, il est important de souligner que la modélisation des systèmes en natural farming a été construite de manière à ce qu'elle soit fidèle au modèle instauré par la communauté ZBNF (Ryss). Cela concerne principalement l'organisation spatiale des cultures, les associations culturales et les rotations mises en place. La quantification des intrants et des produits ainsi que les itinéraires techniques des cultures et la conduite des élevages ont tous été construits à partir des entretiens réalisés sur le terrain, avec les agriculteurs.

Les préparations spécifiques du natural farming sont une composante essentielle de la présentation du fonctionnement et des pratiques des systèmes de production. Ainsi il a été nécessaire de les modéliser comme le présente le Tableau 12 avec les indications relatives à la confection des préparations ZBNF, accompagnées des quantités modélisées.

Les systèmes de production en natural farming se basent sur six préparations : le Ganajeevamurtham, le Beejamurtham, le Jeevamurtham, le Neemastram, le Panchagva et le Mulch. Les quantités d'intrants nécessaires pour la création du Ganajeevamurtham, du Beejamurtham, du Jeevamurtham et du Neemastram ont été extraites des recettes mentionnées dans le diagnostic agraire. En ce qui concerne le Mulch et le Panchagva, le choix des intrants et de leurs quantités a été basé sur les données issues des entretiens avec les natural farmers réalisés lors de la phase sur le terrain. Les quantités de chaque intrant ont été adaptées en fonction de la quantité de préparation apportée au champ, ce qui peut varier d'un système de production à un autre. Afin d'obtenir une quantité d'énergie brute, des calculs ont été effectués pour déterminer les teneurs en matière sèche ainsi que les coefficients d'énergie brute pour chacune des six préparations, en se basant sur les composants des intrants. Des détails plus approfondis sur les calculs et les recettes sont présentés Annexe 3 et Annexe 5.

Tableau 12-Modélisation des préparations ZBNF

Nom des préparations ZBNF	Indications sur la préparation	Quantité
Ganajeevamurtham	Préparation en amont de 150kg/j pdt 3 jours avec 10 pers. Séchage pdt 1 mois et émiettage. À épandre juste après le semis.	450kg/ac
Beejamurtham	Trempeage des semences pdt 1h	4,5L/ ac (graines) 20L/ ac (plants)
Jeevamurtham	A pulvériser ou incorporer à l'eau d'irrigation 25 jours après le semis, puis tous les 15 jours.	1600L/ ac
Mulch	Collecte des feuillages qui mobilise 5 personnes. Pas de mulch pour les céréales.	2000kg/ ac
Neemastram	5L de solution a diluer dans 20L d'eau. Application 1 fois/mois	39L/ ac
Panchagva	Dilution avec de l'eau dans un rapport de 1/10. Fertilisation avant la floraison	4L/ac

Le temps de travail nécessaire à la confection et à l'application en champ des préparations ZBNF a également été estimé. Il faut compter 6,5Hj/ac pour la préparation du ganajeevamurtham qui s'étale sur 3 jours en comptant une durée de 1,5h/j/ac de travail et une main d'œuvre de 10 personnes. L'émiettage a été modélisé à 2h/ac de travail avec une main d'œuvre de 4 personnes.

à la tâche, correspondant à 2Hj. La préparation et l'émiettage du ganajeevamurtham après séchage nécessite un total de 13Hj/ac avec une main d'œuvre principalement issus de la communauté ZBNF du canton. La fertilisation avec le ganajeevamurtham est réalisée par deux membre de la famille avec une durée à la tâche de 2h pour un total de 0,25Hj.

La fertilisation avec le jeevamurtham a été modélisé tous les 15 jours, correspondant à 8 apports au cours d'un cycle cultural de 4 mois. La préparation du jeevamurtham est réalisée une fois avant le début de la culture. Elle s'étale sur 2 jours et mobilise une main d'œuvre familiale de 2 personnes modélisé à 2h/ac, soit un total de 0,5Hj/ac. La fertilisation avec le jeevamurtham se fait via l'eau d'irrigation. Il a été modélisé une durée de 10min avec un actif familial soit 0,2Hj/ac. La collecte du mulch a été modélisé avec une mobilisation de 6 personnes dont un actif familial. La collecte s'étend sur une journée, correspondant à 6Hj. L'apport du mulch au champ est fait par un actif familial avec un salarié correspondant à 1,5Hj.

Pour avoir une vision claire du fonctionnement des flux de matière et d'énergie au sein des systèmes de production conduits en natural farming, les figures Figure 7 et Figure 8 ci-dessous qui présentent la structuration de ces flux d'énergie.

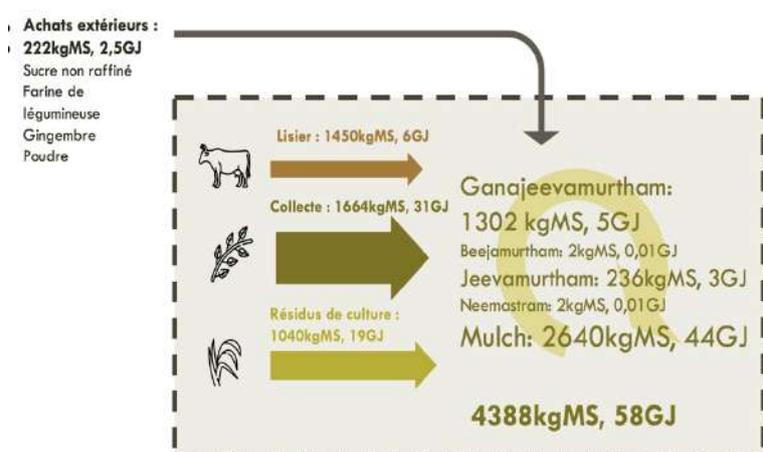


Figure 8- Evolution des flux de matière et d'énergie avec les préparations ZBNF de SP2NF

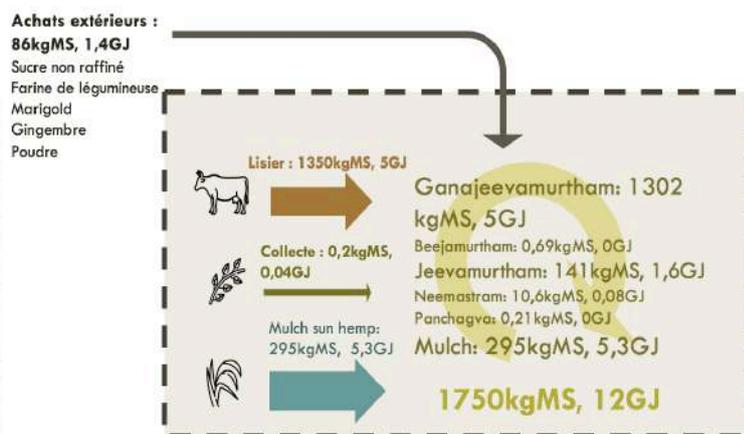


Figure 7- Evolution des flux de matière et d'énergie avec les préparations ZBNF de SP4NF

Pour SP2NF, les préparations ZBNF génèrent un flux d'énergie brute de 58 GJ dans les champs, contribuant ainsi à la fertilisation et au traitement des cultures. Ces préparations requièrent un apport de 6 GJ de lisier, 31 GJ de feuillages collectés sur place et 19 GJ de résidus de culture. Les éléments récoltés comprennent des feuillages et des branchages de margousier, d'arbre à soie, d'agasa, d'herbe désherbée ou coupée, de tige de murier, ainsi que des cosses de tamarin. Les résidus de culture de SP1NF, utilisés lors de la préparation des préparations ZBNF, incluent les fleurs séchées de souci, les feuilles de ricin, les tiges de pois d'angole, les résidus de maïs et les balles de riz. Ces éléments sont principalement destinés à la création de mulch et de Neemastram. De plus, il existe un flux d'énergie provenant de l'extérieur de 2,5 GJ.

Pour SP4NF, les préparations ZBNF génèrent un flux d'énergie brute de 12 GJ, ce qui est près de cinq fois moins élevé que pour SP2NF. Le mulch consiste en la restitution au sol de la culture de sun hemp fraîche, qui a été modélisée avec une faible teneur en matière sèche de 26%, contrairement au mulch de SP2NF, qui est basé sur des éléments secs. L'apport d'énergie provenant du panchagva, du neemastram et du beejamurtham sont négligeables. Leur apport est minime et se compose principalement d'eau.

2- EXPLOITATIONS EN POLY CULTURE-ELEVAGES SP1 ET SP2NF

Pour ce système de production polyculture-élevage laitier mené en conventionnel et en natural farming, une présentation des cultures et des élevages constituant le système a été effectuée. En raison de nombreuses associations culturales dans les parcelles gérées en natural farming, les rendements des cultures ont été calculés en fonction de la surface occupée par chaque culture dans la parcelle, dont les détails des calculs sont présentés en Annexe 7. Les rendements ont été déterminés à partir des données recueillies lors des entretiens sur le terrain, avec des ajustements parfois nécessaires basés sur les rendements agricoles d'Andhra Pradesh (Agriculture Department Andhra Pradesh, 2017). Un itinéraire technique a été établi pour chacune des cultures. Les trajets de courte distance (-10 km) ont été réalisés avec une paire de bœufs, tandis que les trajets plus longs ont été effectués à l'aide d'un tracteur.

1. MODELISATION DES SYSTEMES DE CULTURE ET D'ELEVAGE

SC1 culture d'arachide

Ce système de culture est modélisé avec une culture d'arachide irriguée associée à une culture de pois d'angole. Cette association culturale a été modélisée à un cycle à l'année sur une surface de 1ac. SC1 permet une production annuelle de 390kg d'arachide décortiquée, 55kg de pois d'angole et 893kg de fourrage intraconsommé par les élevages. Cette culture mobilise 124Hj de travail à l'année avec 70% des tâches réalisées issues d'une main d'œuvre salariée.

SC1: ARACHIDE (CONVENTIONNEL)

- 1AC
- 2 ESPÈCES ASSOCIÉES
- AUTO/INTRA CONSOMMATION : 86% DES INTRANTS, 56% DES PRODUITS
- 124HJ AVEC MAIN D'ŒUVRE FAMILIALE (37HJ) ET SALARIALE (86HJ)

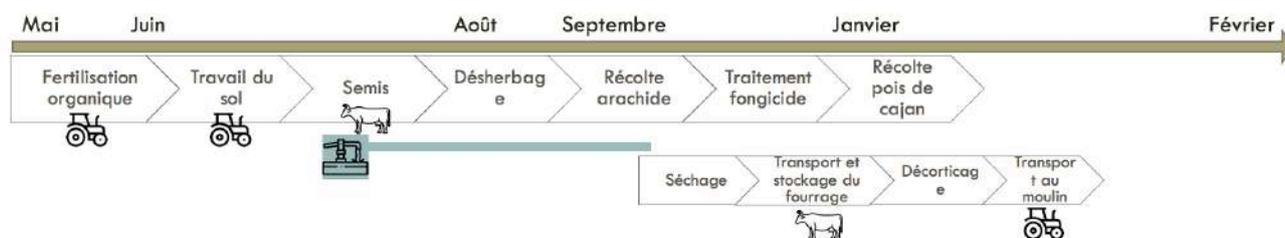


Figure 9-Itinéraire technique et travaux post récolte de SC1 arachide conventionnelle

Au début du mois de mai, une fertilisation organique avec les déjections des vaches est réalisée. L'épandage est manuel et l'incorporation au sol est fait avec un tracteur équipé d'un rotavator. À partir de début juin, après les premières pluies, une série de travaux du sol est entrepris, comprenant l'utilisation d'un cultivateur et d'un rotavator, avec deux passages chacun. Le semis a été modélisé mi-juin après une étape de séchage des semences. Une araire en bois, tirée par une paire de bœufs, est utilisée pour créer des sillons où les graines sont semées.

En ce qui concerne la gestion de l'irrigation, celle-ci dépend des précipitations, même pendant la saison des pluies. Ainsi, pour les cultures d'arachide en conventionnel et en natural farming, une irrigation est mise en œuvre si aucune pluie n'est enregistrée pendant deux semaines. Ainsi quatre irrigations ont été modélisées avec, la première intervenant après le semis, puis une par mois jusqu'à la récolte de l'arachide, qui a lieu trois mois après le semis.

La gestion de la fertilité du sol s'effectue avec l'incorporation de 3 tonnes de déjections de vache au sol, avant le semis. La lutte contre les adventices comprend un désherbage manuel un mois après le semis, et est réalisé à l'aide de binette et de sarcloir. À la période de floraison, fin novembre, une pulvérisation de fongicide est effectuée dans la parcelle à l'aide d'une pompe à main.

Les activités post-récolte englobent le séchage, le transport, et le stockage du fourrage et des grains, suivis d'une étape de décorticage. Souvent, les récoltes sont acheminées vers un moulin pour l'extraction d'huile qui est par la suite destinée à la vente.

SC2 arachide conduit en natural farming

Ce système de culture est la version natural farming de celui présenté ci-dessus. Il s'agit d'une rotation arachide/arachide à un cycle par an sur une surface de 2ac. La culture d'arachide est également une culture irriguée, associée à du pearl millet, du pois d'angole, de la féverole, du niébé et du ricin.. Au sein de la parcelle, l'organisation spatiale des cultures est faite avec une alternance de 7 rangs d'arachide, 1 rang de pois d'angole, de niébé ou de féverole. Au centre de la parcelle est semé du ricin et les bordures de la parcelle sont constituées de pearl millet.

Ce système de culture permet une production annuelle de 439kg d'arachide décortiqué, 28kg de pearl millet, 13kg de pois d'angole, 19kg de féverole, de niébé et de ricin et un total de 1140kgMS de fourrage intra consommé. Comme pour la conduite en conventionnelle 70% des tâches sont réalisées par une main d'œuvre salariée. Cependant l'itinéraire technique est plus chronophage avec des tâches plus fastidieuses liées notamment à la confection des préparations ZBNF. En effet ce système de culture mobilise 587Hj à l'année pour 2 acres soit 293,5Hj/ac/an. Cela correspond à une quantité de travail supposé plus de 2 fois supérieure à la conduite en conventionnelle.

SC2: ARACHIDE ASSOCIÉ (ZBNF)

- 2AC
- 6 ESPÈCES ASSOCIÉES
- AUTO/INTRA CONSOMMATION : 96% DES INTRANTS, 60% DES PRODUITS
- 587HJ AVEC MAIN D'ŒUVRE FAMILIALE (116HJ) ET SALARIALE (474HJ)

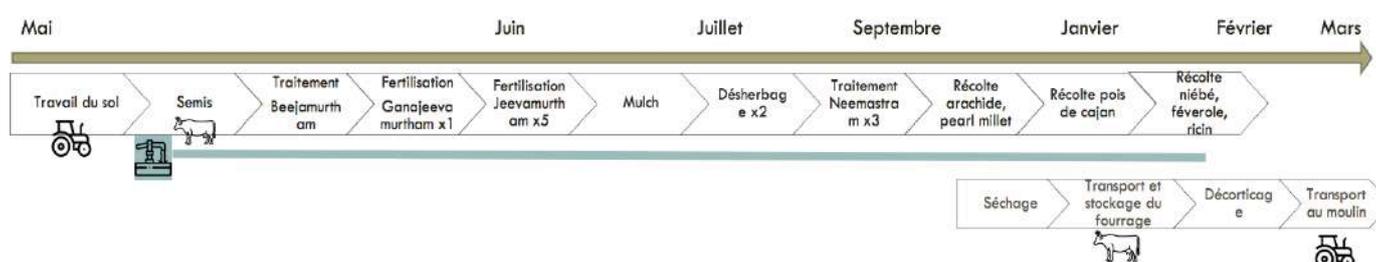


Figure 10-Itinéraire technique de SC2 arachide conduit en natural farming

La gestion de la fertilité est faite par les préparations ZBNF dont les quantités et les temps à la tâche modélisés à l'acre ont été présentés précédemment *partie Les préparations ZBNF*.

La gestion de l'irrigation en natural farming diffère de la conduite en conventionnelle dû à l'association de diverses cultures dont la durée des cycles culturaux est plus longue. En effet,

les 5 cultures (pois d'angole, féverole, niébé, ricin, pearl millet) associé à l'arachide nécessite d'être irrigué durant leur cycle de croissance. Il a donc été modélisé 3 récoltes au long de l'année avec la récolte de l'arachide et du pearl millet début novembre, suivi du pois d'angole début janvier et du niébé, du ricin et de la féverole mi-février. De ce fait, la modélisation de l'irrigation a été étalé sur 8 mois avec une fréquence d'une fois par mois. L'irrigation est permise par des asperseurs.

La lutte contre les ravageurs est faite avec le beejamurtham, un traitement appliqué aux semences avant le semis et avec le neemastram décrit comme un anti fongique. La préparation et l'application du beejamurtham est réalisé par une main d'œuvre familiale de deux personnes avec un total de 0,5Hj. Concernant le neemastram, il a été modélisé une durée de préparation d'une journée de travail et d'un traitement au champ de 3h correspond à 4Hj.

Les travaux post récolte ont été modélisé de la même manière que pour la conduite en conventionnelle avec une étape de séchage, le transport et le stockage des grains puis du fourrage, le décorticage avant que les grains soient amenés au moulin.

SC3 rotation céréalière

Il s'agit d'une rotation céréalière de 2 ans : riz/millet//maïs//millet. L'itinéraire technique des cultures ont été repris du diagnostic agraire réalisé l'an dernier et sont présenté Figure 11. La rotation a été modifié avec une culture de millet en rabi et une culture de maïs durant la saison du Kharif de la deuxième année. Le maïs a un cycle de croissance court et d'autant plus court s'il bénéficie d'eau. Ainsi cela permet à l'agriculteur de semer du millet durant la saison du Rabi, une culture moins exigeante en eau et avec un cycle de croissance souvent plus long que celui du maïs. La modélisation a été faite avec un cycle cultural de 4 mois avec deux cycles par an. La première culture est une culture de riz semée en début de saison des pluies, début juin, suivi d'une culture de millet semée durant la saison du Rabi, fin novembre. La deuxième année du maïs grain est semé en début de saison des pluies avec, à nouveau, une culture de millet en Rabi. La culture du riz et de millet nécessite une première phase de croissance en pépinière avant d'être transplanté en plein champs. La transplantation du riz permet de rendre plus vigoureuse la culture face à certaines maladies fongiques. En ce qui concerne la culture du millet, la phase de pépinière permet de trier le millet des adventices qui ont pu être récoltés pendant la récolte.

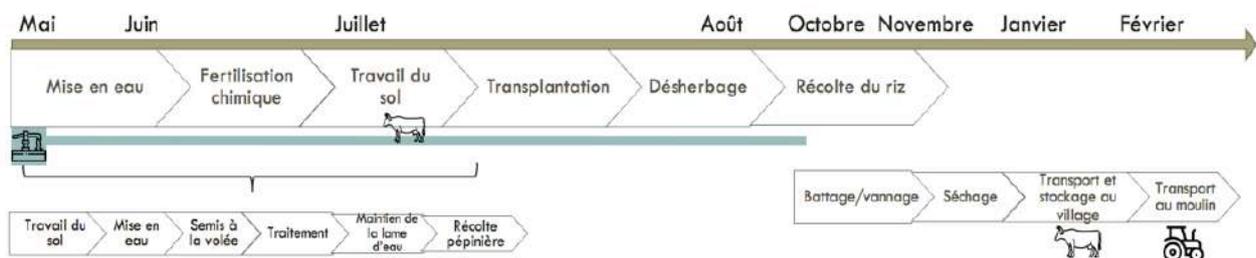
SC3: ROTATION CÉRÉALIÈRE

CULTURE : RIZ

-SURFACE: 0,5A

-AUTO/ INTRACONSOMMATION : 10% DES INTRANTS ET 62% DES PRODUITS

- TRAVAIL: 62HJ AVEC MAIN D'ŒUVRE SALARIALE (33HJ) ET FAMILIALE (17HJ)

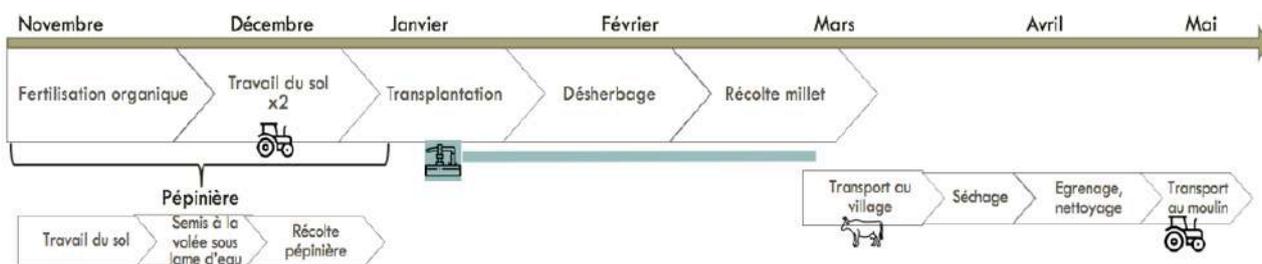


CULTURE : MILLET

-1AC

-AUTO/ INTRACONSOMMATION : 45% DES INTRANTS ET 64% DES PRODUITS

-TRAVAIL: 57HJ AVEC MAIN D'ŒUVRE SALARIALE (47HJ) ET FAMILIALE (12HJ)



CULTURE : MAÏS

-0,5AC

-AUTO/ INTRACONSOMMATION : 45% DES INTRANTS ET 67% DES PRODUITS

-TRAVAIL: 44HJ AVEC MAIN D'ŒUVRE SALARIALE (32HJ) ET FAMILIALE (12HJ)

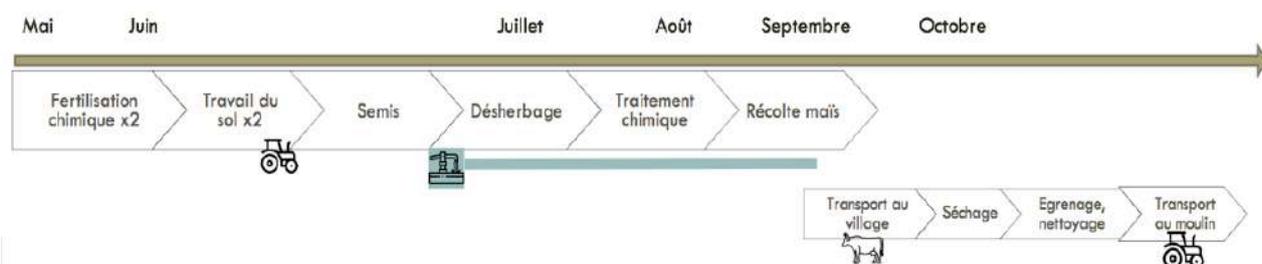


Figure 11-Itinéraire technique des cultures de SC3 rotation céréalière conventionnelle

La culture de riz mobilise 62Hj avec une main d'œuvre salariée de 34Hj et familiale de 17Hj. La culture de millet mobilise 57Hj avec une main d'œuvre salariée de 47Hj et familiale de 10Hj. Le travail en pépinière est réalisé par un actif familial correspondant à 2,6Hj pour le riz, 0,4Hj pour le millet. Le désherbage, la récolte et les travaux post récolte sont les tâches qui sollicitent un travail plus conséquent par la durée et la pénibilité avec 32Hj pour le riz, 33Hj pour le millet, 19Hj pour le maïs.

En ce qui concerne la gestion de l'irrigation, l'essor des forages sur la zone ont contribué à irriguer les cultures céréalières en fonction des fréquences des précipitations. Ainsi la

modélisation de l'irrigation des cultures de maïs et de millet suit le même raisonnement que celle concernant la culture d'arachide, soit une irrigation tous les 15 jours s'il ne pleut pas.

En ce qui concerne la gestion de la fertilité, une fertilisation organique est réalisée tous les 3 ans avec l'incorporation de 3 tonnes de déjection bovine au champ. Elle s'établit avant le travail du sol et la transplantation du millet. Cette tâche a été modélisée d'une durée de 2h en mobilisant un actif familial, et d'un employé avec une paire de bœuf correspond à 0,5Hj. Une fertilisation chimique est ensuite réalisée annuellement avec des apports de super phosphate, d'urée et de sulfate pour la culture de riz et des apports de DAP et d'urée pour la culture de maïs. La fertilisation se réalise via l'eau d'irrigation avec l'ajout de ces engrais de synthèse. Il a été compté 2h à la tâche pour un actif familial soit 0,25Hj. Les trois cultures céréalières (riz, millet, maïs) ont été modélisées avec trois fertilisations chimiques annuelles : une fertilisation avant le travail du sol puis de deux autres après la transplantation du millet ou le semis du maïs.

En ce qui concerne les traitements, un traitement pour la culture de riz est réalisé avec l'ajout de margousier et de fleurs de calostropis gigantea en pépinière. Cette plante est connue pour avoir des propriétés insecticides grâce à des composés toxiques appelés cardénolides. La lutte contre les adventices a été modélisée avec un désherbage manuel pour les trois cultures qui mobilise une journée de travail avec une main d'œuvre constituée de 10 salariés et d'un actif familial d'une moyenne de 11Hj à la tâche. Pour lutter contre les maladies fongiques deux traitements chimiques sur le maïs ont été réalisés. Il s'agit d'un traitement qui se pose manuellement sur le haut des tiges mobilisant 2 employés et un actif familial sur 2 journées correspondant à un total de 6Hj.

SC4 rotation céréalière conduit en natural farming

Ce système de culture est la version conduite en natural farming de la rotation céréalière vu ci-dessus. La différence vient du nombre de culture associées qui est plus élevé que la rotation céréalière conduite en conventionnelle. Cette diversification culturelle induit une augmentation des produits autoconsommés par la famille. L'intraconsommation élevée est liée aux ingrédients des préparations ZBNF qui sont en grande partie interne au système de production. Elle est également associée à une moindre utilisation d'intrant extérieur, tels que les engrais de synthèse, les produits phytosanitaires, les concentrés etc.

SC4: ROTATION CÉRÉALIÈRE (ZBNF)

CULTURE : RIZ

-0,5AC

-AUTO/ INTRA-CONSOMMATION : 99% DES INTRANTS ET 86% DES PRODUITS

-TRAVAIL: 66HJ AVEC MAIN D'ŒUVRE SALARIALE (47HJ) ET FAMILIALE (18HJ)

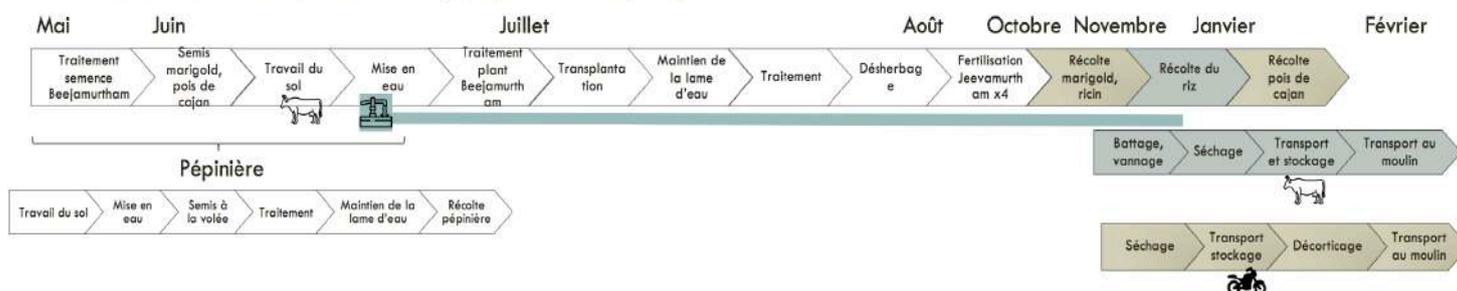


Figure 12-Itinéraire technique de la culture de riz NF

La culture de riz associée permet une production annuelle de 2800kg de riz paddy/ac, de 171kg de marigold/ac, 162kg de pois d'angole/ac, 191kg de ricin/ac. Elle permet une production de 2,5T de paille de riz. Le travail nécessaire à la production est similaire à celle du riz conduit en conventionnel avec 66Hj.

La culture de riz, contrairement à celle du millet et du maïs n'a pas d'association intraparcellaire. La parcelle est délimitée par des bordures sur lesquelles on retrouve une alternance entre les cultures de ricin, de marigold et de pois d'angole. Les semences utilisées sont des variétés locales avec Hamsa, BPT5204, NLR, IR 64. La durée de la culture dépend de la variété utilisée lors du semis, elle s'étend sur une période de 4 à 6 mois.

CULTURE : MILLET ZBNF

-1AC

-6 ESPÈCES ASSOCIÉES

-AUTO/ INTRA-CONSOMMATION : 98% DES INTRANTS ET 66% DES PRODUITS

-TRAVAIL: 144HJ AVEC MAIN D'ŒUVRE SALARIALE (100HJ) ET FAMILIALE (44HJ)

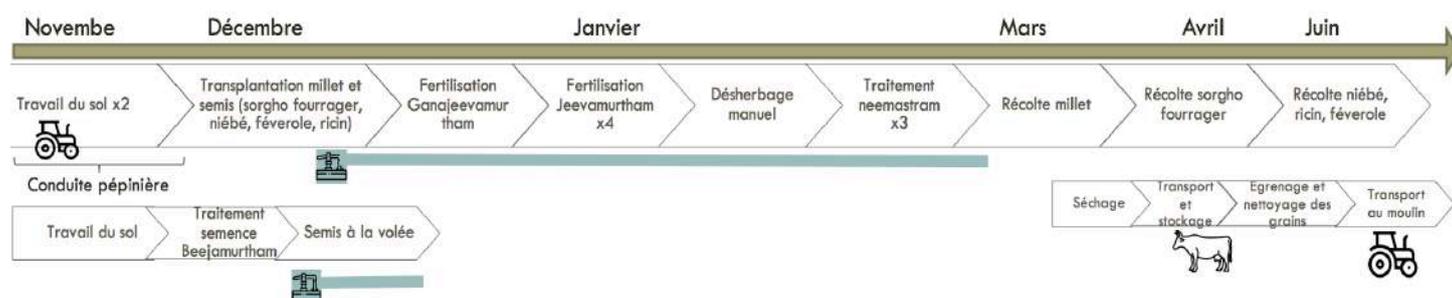


Figure 13-Itinéraire technique de la culture du millet NF

La culture du pearl millet permet une production annuelle de 700kg/ac de pearl millet, de 236kg de niébé et de féverole/ac, de 191kg de ricin/ac et 581kg de sorgho fourrager/ac. La conduite en natural farming du pearl millet nécessite plus du double de la quantité de travail en comparaison de celle conduite en conventionnelle.

La culture de millet suit les cultures de maïs et de riz. Elle se sème après leur récolte, en novembre. Concernant l'organisation spatiale il s'agit d'une association interparcellaire avec une culture de sorgho fourrager et d'une association intraparcellaire avec les cultures de niébé, de féverole et de ricin. Au sein de la parcelle il y a une alternance entre 8 rangs de pearl millet et un rang de féverole, de niébé et de ricin. En bordure de parcelle il est semé 3 rangs de sorgho fourrager. Les semences de millet utilisées sont des semences supposées être des variétés locales avec kalyani, guttu ragi, M4.

CULTURE : MAÏS

-0,5AC

-AUTO/ INTRACONSOMMATION : 97% DES INTRANTS ET 68% DES PRODUITS

-TRAVAIL: 104HJ AVEC MAIN D'ŒUVRE SALARIALE (46HJ) ET FAMILIALE (59HJ)

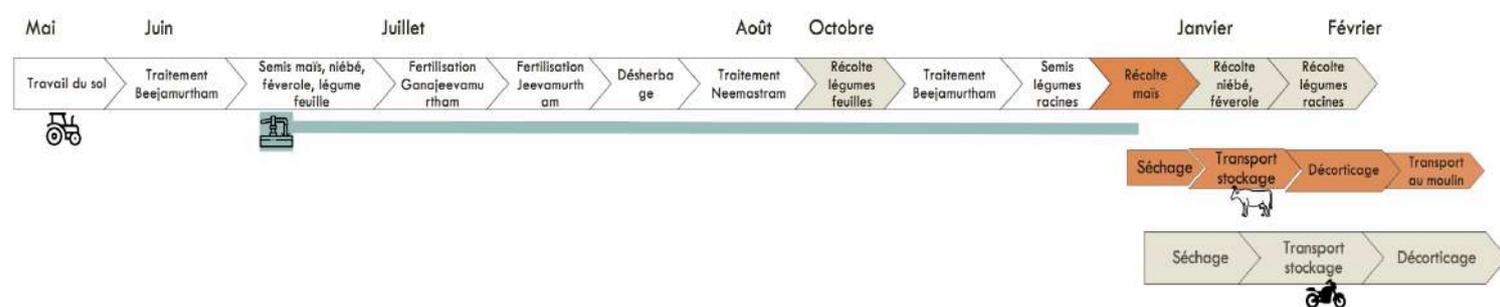


Figure 14-Itinéraire technique de la culture de maïs NF

La culture du maïs a été modélisée avec une production annuelle de 2000kg de maïs grain/ac, 236kg de niébé et de féverole/ac, 10kg de légume feuille (amaranthe, épinard, menthe, coriande) et 40kg de légumes racine (radis betterave, carotte). De la même manière que la culture de millet, la culture de maïs conduit en natural farming a une quantité de travail plus de deux fois supérieure à la conduite en conventionnelle avec un total de 104Hj. Plusieurs variétés de maïs peuvent être utilisés et semées sur la même parcelle. Les variétés les plus communes dans le canton et utilisées en natural farming sont les variétés poineer, kalanasthi, noojiveedu et kaveri. Le maïs est semé durant la saison du Kharif, fin juin début juillet et est récolté 4 mois plus tard début novembre. L'organisation spatiale de la parcelle respecte une alternance entre 6 rangs de maïs et un rang de niébé et de féverole. Au centre de la parcelle se trouve les légumes à feuille dont le semis est réalisé au même moment que le semis du maïs. Après la récolte de ces légumes entre les mois de juillet et de septembre, les légumes racines sont semées sur le même espace occupé par les légumes feuilles. Leur cycle de culture varie entre 30 et 90 jours en fonction de l'espèce. Les légumes racines sont récoltés entre les mois de janvier et de mars, avant la saison sèche. Pour la modélisation, la conduite culturale des légumes racines après la récolte du maïs est la même que celle des légumes conduit dans le SC5. La distance interrang est de 60 à 75 cm et la densité de semis est de 50 000 à 60 000 plants par hectare.

Concernant la gestion de l'eau de ces trois cultures, celle-ci suit le même raisonnement que vu précédemment avec une irrigation s'il ne pleut pas pendant 15jours. L'irrigation est gravitaire avec une conduite de l'eau en butte. Les buttes sont réalisées manuellement, modélisés avec

une main d'œuvre familiale de 4 personnes pendant 2 journées de travail, ce qui correspond à un total de 8Hj. Pour la culture de riz la parcelle doit être inondé et nécessite un travail du sol pour maintenir la lame d'eau. Le maintien de cette lame d'eau mobilise un actif familial à 1h de travail/jour/ac tout au long du cycle cultural pour un total de 6Hj.

En ce qui concerne la gestion de la fertilité, la culture de riz ne nécessite pas d'apport de ganajeevamurtham. La disponibilité en effluent étant limitée, les agriculteurs privilégient de fertiliser les cultures de maïs et de millet. Ils justifient cela par le fait que la gestion de l'eau dans la rizière serait plus compliquée par l'utilisation de lisier qui peut entraîner une perte de nutriments par lessivage. Comme vu avec la conduite du riz en conventionnelle, le traitement du riz en natural farming suit le même principe, avec l'ajout du calostropis gigantea dans la parcelle après la transplantation. Cependant, contrairement aux autres cultures, le neemastram une préparation anti fongique, n'est pas appliqué sur le riz.

SC5 cultures de légumes conduit en natural farming

Ce système de culture est souvent rattaché à un élevage de petit ruminant conduit au village. Il a été modélisé sur une surface de 1ac avec une association intraparcellaire de 23 espèces. Sur la parcelle sont cultivés des légumes à feuille et des plantes aromatiques (amaranthe, épinards, coriandre, menthe), des légumes (tomate, aubergine, piment, radis, carotte, betteraves), des oléagineux (ricin), des fabacées (pois d'angole, niébé, féverole), des céréales (pearl millet, sorgho) et des cultures pérennes pour la plupart fourragères (agasa).

La culture de légume permet une production annuelle de 215kg de légumes, 30kg d'arachide, 80kg de fabacées, 65kg de céréales. L'intraconsommation annuelle de fourrage a été modélisé à 222kg. Ce système de culture est souvent associé à un élevage de chèvre qui permet de valoriser le fourrage et les résidus de culture.

SC5: LEGUMES (ZBNF)

- 1AC
- 23 ESPECES ASSOCIÉES
- AUTO/ INTRA CONSOMMATION : 98% DES INTRANTS ET 66% DES PRODUITS
- TRAVAIL: 594HJ AVEC MAIN D'ŒUVRE SALARIALE (240HJ) ET FAMILIALE (354HJ)

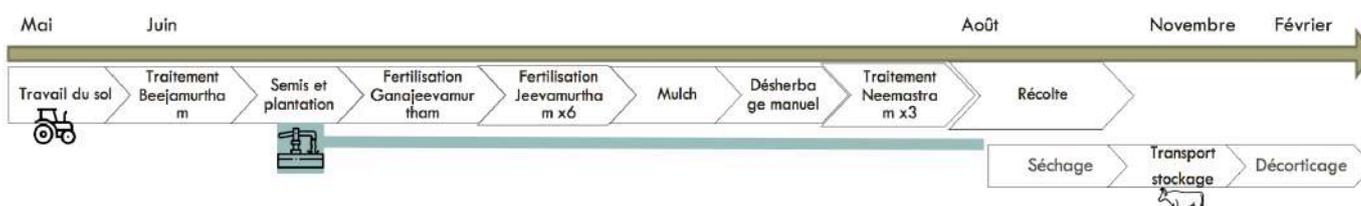


Figure 15-Itinéraire technique de la culture de légume NF

Ce système de culture est caractérisé par une grande quantité de travail avec un total de 260Hj dont la part de main d'œuvre familiale est plus élevée comparé à celle salariale. Les tâches les plus prenantes en travail sont les récoltes avec 97Hj étendu sur une période de 4 mois mobilisant une quinzaine de personne et le désherbage manuel avec 196Hj à 15 personnes. La collecte du mulch nécessite 7Hj avec une mobilisation de 9 personnes.

En ce qui concerne la gestion de l'eau, la culture maraîchère est plus consommatrice en eau par rapport aux cultures de céréales et d'arachide. L'irrigation est gravitaire et a été modélisée avec une fréquence de 3 irrigations par mois, pendant 6 mois jusqu'à la fin des récoltes en novembre.

Des légumes toute l'année, sans irrigation

L'essor de nouvelles pratiques culturales arrive sur le canton et sont présentés comme pouvant réduire considérablement la quantité d'eau irriguée sur ces cultures. Il s'agit de la technique du PMDS (pre monsoon dry sowing) qui consiste à semer des cultures avant l'arrivée des premières pluies de la mousson, à la mi-mai, pour amorcer la croissance des plantes. Cette technique permettrait de ne pas irriguer les cultures par la suite. Cette technique conduit à des essais petits à petits dans le canton, depuis le début de cette année (janvier 2023), mais, de ce fait, les rendements n'ont pas pu être estimés.

Les pratiques culturales reposant sur le modèle ATM (anytime money) sont également prisées par la communauté ZBNF. Ce modèle consiste à échelonner les semis sur une longue période. Les cycles de croissance des légumes s'échelonnent et conduisent à avoir des récoltes à plusieurs moments de l'année.

Les deux photos ci-dessous présentent deux parcelles caractéristiques du SC5 Légumes. Elles ont été semées le 30 mai et les photos permettent de visualiser leur croissance au 19 juillet.



Figure 16- Etat de croissance d'une culture de légume représentative du SC5 Légumes NF

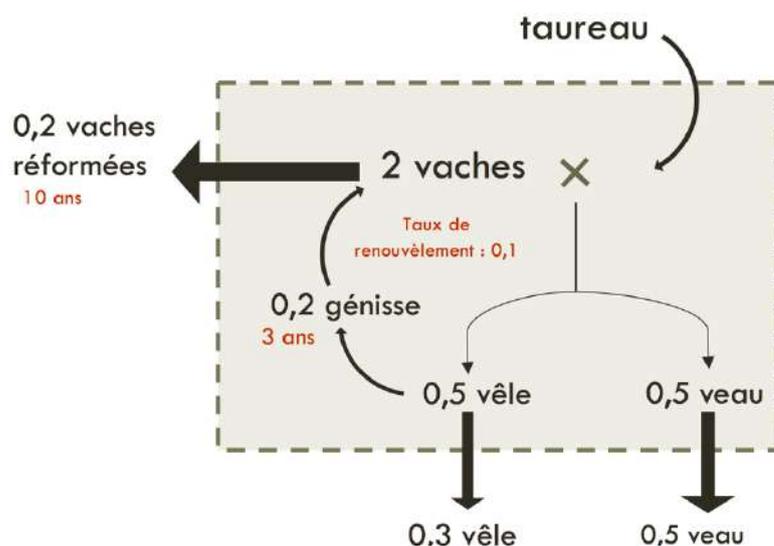
SE1 Elevage laitier avec 2 vaches locales

Ce système d'élevage est constitué de deux vaches locales de race Hallikar. Cet élevage est fréquent dans la région d'étude, et fait partie des systèmes de production SP1, SP2NF et SP4NF. Une particularité de cette approche est l'idée de faire paître les vaches le long des routes, à proximité des parcelles, voire de les laisser brouter les résidus de culture des parcelles voisines. Les éleveurs voient de nombreux avantages à cette pratique, notamment la réduction des coûts liée à la gratuité du pâturage et un gain de temps significatif en évitant le transport des fourrages jusqu'au village.



Figure 17- Eleveur faisant pâturer une bufflesse et une vache Hallikar en bordure de parcelles

Comme le présente le schéma démographique Figure 18, l'élevage SE1 permet une vente annuelle de 0,8 veaux et 0,2 vaches réformées correspondant à un flux d'énergie de 0,8GJ. Celui-ci a été calculé avec un poids vif de 400kg pour une vache et de 100kg pour un veau. SE1 permet également une production annuelle de 1386L de lait dont près de la moitié est autoconsommée. Il permet également une production de 4,7 tonnes de déjection avec un peu plus du quart intraconsommés.



Nombre mère	2
Nombre vêlage/an	1
Durée lactation (mois)	9
Durée pic de lactation (mois)	2
Volume lait pic lactation (L/jour)	8
Durée fin lactation (mois)	3
Volume lait fin lactation	3
Nombre de L/cycle	1386
Âge réforme (ans)	10
Âge reproduction génisse (ans)	3
Nombre vaches réforme/an	0,2
Nombre mâles vendus 1 an	0,5

Figure 18-Schéma démographique et caractéristiques générales de SE1

La conduite de la production et de l'alimentation est présentée Figure 20. La période de lactation a été modélisée avec une durée de 9 mois et une production laitière de 5L de lait par jour. La période de mise bas s'effectue au commencement de la saison des pluies, période durant laquelle la disponibilité en fourrage est plus élevée. Le pic de lactation se situe entre août et septembre avec une production de 8L de lait par jour. La fin de la lactation coïncide avec la saison sèche, période durant laquelle la disponibilité en fourrage est plus faible. La période de tarissement qui y fait suite induit une diminution progressive de la quantité de lait modélisée à 3L/j. La production laitière à l'année est assurée par une vache, l'autre étant pleine. Cela s'inverse à l'année suivante.

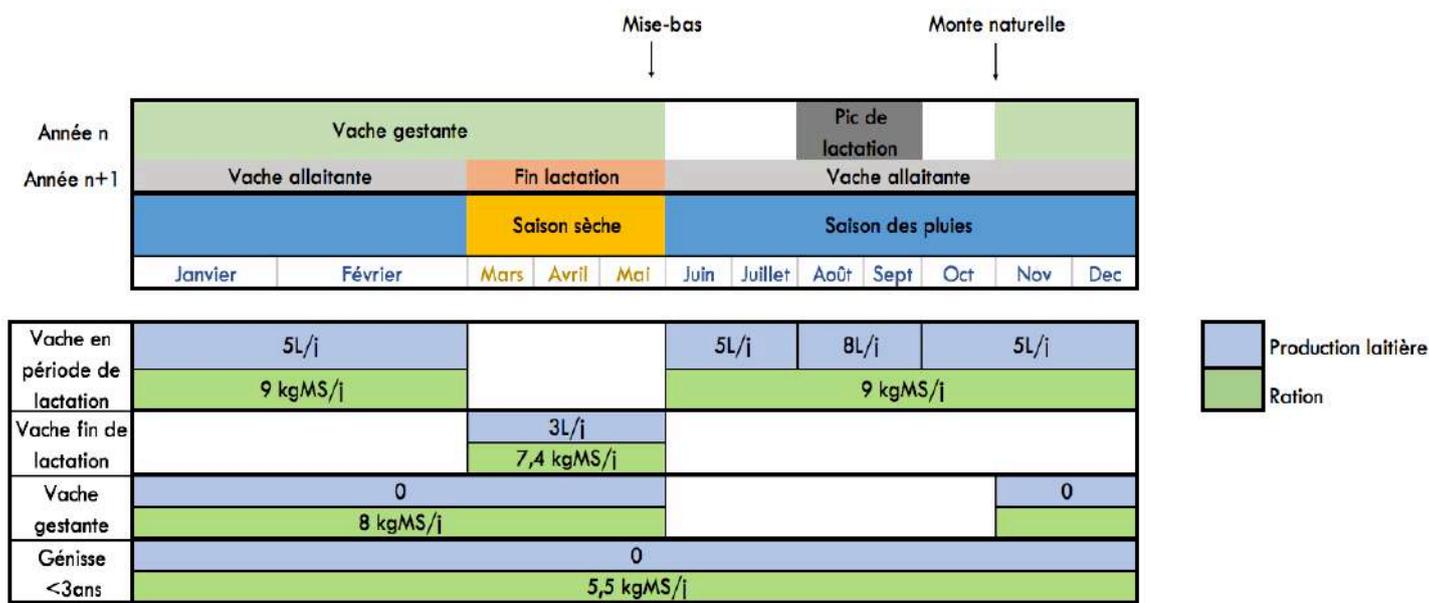


Figure 19- Calendrier de production et d'alimentation de SE1

	Disponibilité (kgMS)	Ration journalière moyenne kgMS/vache
Fourrage d'arachide	336	0,37
Paille de millet	899	1,00
Fourrage légumineuse	132	0,15
Paille de riz	2318	2,58
Paille de maïs	819	0,91
Sorgho fourrager	120	0,13
Pâturer	728	2,02
TOTAL	5353	7,16

EB= 93GJ

La ration journalière est présentée Figure 21. Elle est constituée de pâturer et de fourrage provenant des systèmes de culture précédemment mentionnés. Les quantités sont en fonction de la disponibilité en fourrage et paille produit sur l'exploitation.

Figure 21- Ration journalière moyenne d'une vache SE1

SE3 Elevage de 4 chèvres

La modélisation de ce système d'élevage est basée sur les données provenant de quatre entretiens. La modélisation a été conçue de manière à ce que l'alimentation des animaux provienne exclusivement des productions issues des systèmes de culture précédemment mentionnés. Cela s'explique par le fait qu'il s'agit d'un petit élevage pour lequel les coûts extérieurs entraînaient des pertes financières pour les agriculteurs. Comme indiqué Figure 22, cet élevage permet la vente annuelle de 0,8 chèvres réformées et de 2,2 chevreaux correspondant à un flux d'énergie brute de 0,14GJ. Il a été calculé avec un poids vif de 35kg pour les chèvres et de 10kg pour les chevreaux. Cet élevage génère également une production de 2,4 tonnes de déjections correspondant à un flux d'énergie de 16,4GJ.

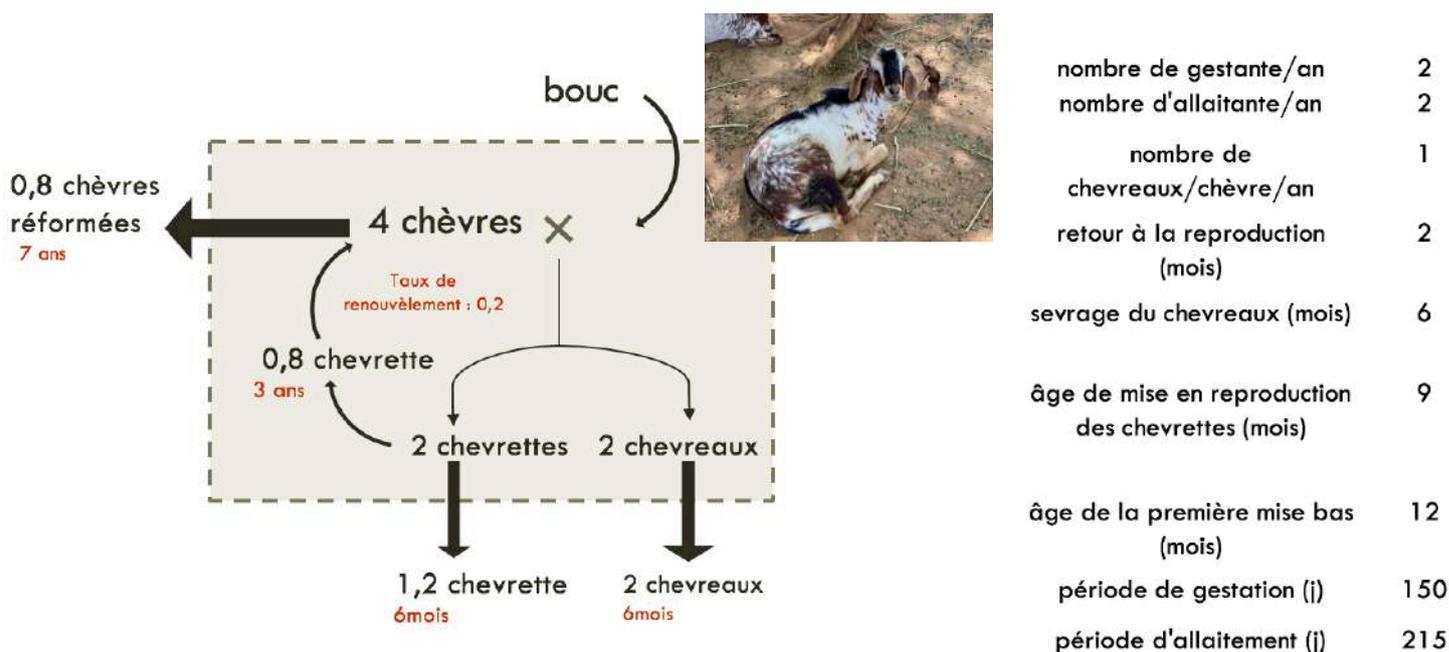


Figure 22-Schéma démographique de SE3 et caractéristiques générales de l'élevage

	Disponibilité annuelle (kgMS)	kgMS/animal/j
Agasa	192	0,13
Feuillage margousier	66	0,05
Feuilles manguiers	17,2	0,01
Maïs	45	0,03
Paille de maïs	91	0,06
Pearl millet	13,5	0,01
Paille de pearl millet	27	0,02
Fourrage d'arachide	11,1	0,01
Fourrage de fabacées	64	0,04
Reste légumes	1,55	0,00
Résidus (son de riz, reste de légumes)	365,4	0,25
TOTAL	894	0,61

Energie brute= 16,5GJ

La ration repose sur le caractère autonome de cet élevage, dans lequel l'alimentation est constituée principalement des résidus de culture et des feuillages collectés sur place. Cette approche est étroitement corrélée à la production des cultures et a été développée en fonction de leur disponibilité saisonnière. Il convient de noter que la composition de la ration demeure constante, que la chèvre soit gestante ou allaitante. La modélisation a été définie avec un apport quotidien de 0,6 kg de matière sèche par chèvre en prenant en compte la présence de la descendance, comme l'illustre la Figure 23.

Figure 23- Ration journalière d'une chèvre de SE3

2. ETUDE DES FLUX DE MATIERE ET D'ENERGIE DU SYSTEME DE PRODUCTION EN POLYCLTURE ELEVAGE CONDUIT EN CONVENTIONNEL ET EN NATURAL FARMING

Les schémas présentés ci-dessous illustrent l'évolution des flux d'énergie au sein des systèmes de production en polyculture élevage dont la modélisation a été présentée précédemment. Ces schémas visent à offrir une vue d'ensemble de la manière dont l'énergie est utilisée, échangée et transformée au sein de ces systèmes. L'analyse des flux entrants permet de quantifier les apports en énergie et en ressources nécessaires au fonctionnement du système. La consommation d'énergie fossile, quant à elle, révèle la dépendance du système vis-à-vis des énergies non renouvelables. Les flux internes permettent de comprendre comment l'énergie est utilisée à l'intérieur même du système de production. Enfin, l'analyse des flux sortants permet d'évaluer la production et le rendement du système agricole en question.

Pour faciliter la compréhension des schémas, voici quelques indications pour l'interprétation. La taille des flèches est proportionnelle à la quantité d'énergie quelque soit sa forme (brute, liée au travail ou fossile). Les valeurs exprimées en kgMS sont fournies à titre indicatif pour refléter la quantité de matière nécessaire. Il convient de noter que la quantité d'énergie est directement proportionnelle à la quantité de matière sèche. Par conséquent, un apport important d'éléments peut sembler faible en termes d'énergie s'il contient une grande quantité d'eau. Un code couleur a été utilisé pour clarifier l'origine des flux. Les flux de couleur vert clair représentent ceux liés aux systèmes de culture, tandis que les flux schématisés en vert foncé proviennent de la collecte ou du pâturage. Les flux de couleur rouge foncé correspondent à l'énergie liée au travail, tandis que les flux marrons proviennent des systèmes d'élevage. Les flux schématisés en noir indiquent l'entrée d'énergie fossile dans le système. Les flux d'énergie fossile associés à la fabrication et à la maintenance du parc matériel sont représentés en marron clair. Les cadres en pointillés entourent ce qui est interne au système de production, tandis que les éléments provenant de l'extérieur sont représentés avec un trait plein.

Pour rappel, il a été vu précédemment que le système de production polyculture élevage, comparés aux autres, demandait encore peu de ressource en eau, de foncier et de capital. Sur ce système de production la conduite en natural farming a révélé une légère augmentation du revenu agricole par rapport à la référence conventionnel.

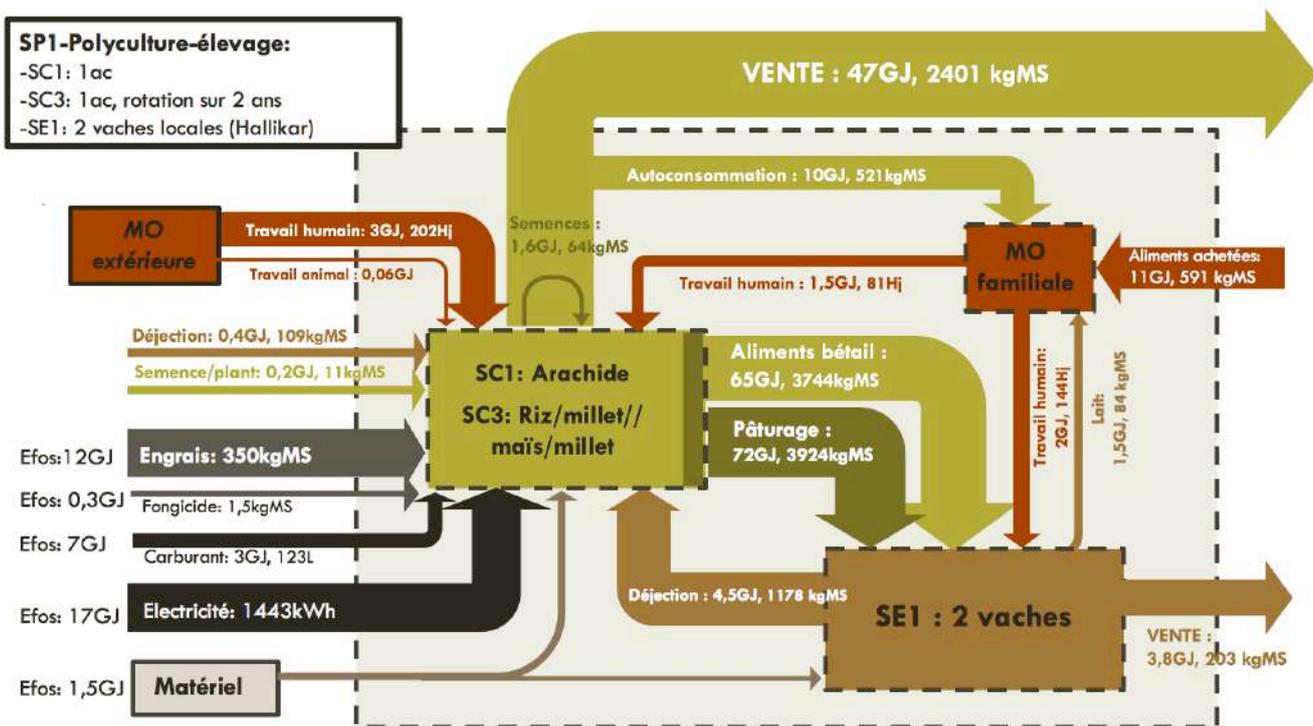


Figure 25- Représentation des flux d'énergie du système de production polyculture élevage conduit en conventionnelle

On constate que le système fonctionne avec une part importante d'énergie fossile. Les intrants qui ont les flux d'énergie les plus élevés concernent l'énergie fossile avec les engrais de synthèse pour la fertilisation chimique des cultures, l'électricité directement liée à la consommation électrique des pompes pour irriguer les cultures. Il est possible de constater que l'énergie liée au travail humain et animal (4,8GJ) est moitié moins élevée que l'énergie fossile liée à la consommation en carburant du matériel et le matériel lui-même (8,3GJ). L'énergie liée au travail humain et animal n'est donc pas négligeable dans ce système de production. Les flux d'énergie associés à l'apport externe de déjection et de semences ont une incidence relativement faible, en grande partie, en raison de l'intraconsommation des déjections. Cependant, il convient de noter que l'élevage de seulement deux vaches ne fournit pas suffisamment d'effluent pour répondre aux besoins des cultures. Par ailleurs, les flux d'énergie liés à l'autoconsommation jouent un rôle important, permettant à la famille de subvenir à la majorité de ses besoins en légumineuses et en céréales.

On constate que les flux d'énergie les plus importants correspondent aux flux internes liés à l'intraconsommation des produits issus de culture par les vaches de SE1. Ces flux sont même supérieurs au produit total exporté par le système de production. De plus, les flux d'énergies liés à l'autoconsommation sont loin d'être négligeables et permettent à la famille d'être autonome sur une partie des légumineuses et sur la totalité des céréales. Malgré la présence d'une main-d'œuvre externe plus importante, les flux d'énergie de travail provenant de la main-d'œuvre familiale sont élevés.

Les flux d'énergie issus des récoltes se trouvent parmi les flux d'énergie les plus élevés au sein du système de production. En effet, un total de 47 GJ d'énergie brute provenant des récoltes de SC1 et SC2 est exporté hors du système. Il en va de même pour SE1 et SE3, qui génèrent un flux d'énergie brute de 4 GJ destiné à l'extérieur.

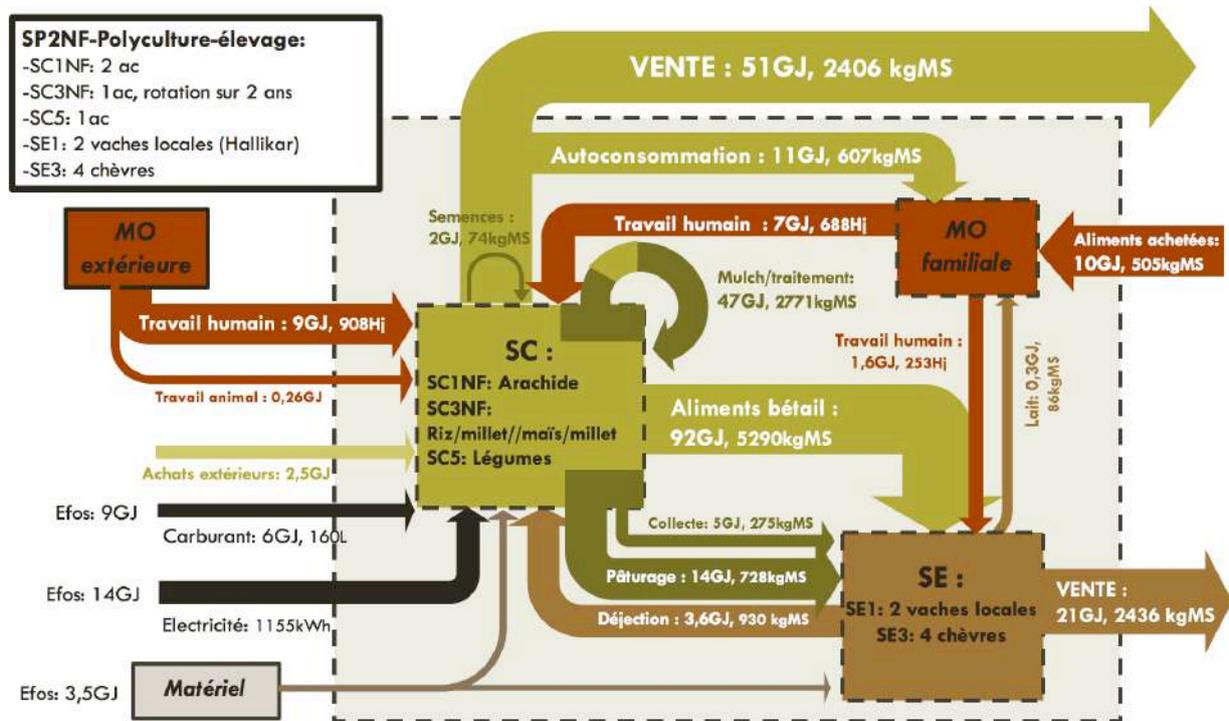


Figure 26- Représentation des flux d'énergie du système de production polyculture élevage conduit en natural farming

La consommation en carburant de SP2NF est légèrement supérieure à celle de SP1. Cette augmentation pourrait s'expliquer par une surface de culture d'arachide plus importante et l'ajout d'une nouvelle culture de légumes. De plus, une main-d'œuvre plus nombreuse, plus de trois fois supérieure à celle de SP1, contribue à cette augmentation, tant au sein de la famille qu'avec la main-d'œuvre extérieure, généralement issue de la communauté et participant à la préparation des préparations du natural farming. Outre ces préparations, le désherbage et les récoltes sont plus fréquents et demandent plus de travail que dans le cas du système conventionnel. Le travail des animaux est également plus sollicité, avec le semis de l'arachide qui s'effectue sur une plus grande surface et l'augmentation du nombre de transport sur de courtes distances lors des récoltes. Les flux d'énergie brute liés aux aliments achetés s'élèvent à 10 GJ, ce qui rend SP2NF légèrement plus autonome en termes d'alimentation, en partie grâce à une plus grande autoconsommation des légumes. En ce qui concerne les flux d'énergie fossile, ils atteignent 26,5 GJ contre 38 GJ pour SP1, ce qui montre une utilisation moins importante d'énergie non renouvelable malgré l'ajout d'un système de culture et d'élevage.

En ce qui concerne les flux internes, l'élevage de chèvres consomme 16,5 GJ d'énergie intraconsommée, provenant de la collecte et des fourrages issus des cultures. L'élevage de vaches, quant à lui, en consomme 93 GJ, principalement en raison du pâturage et de l'utilisation des fourrages provenant des cultures. Il y a également une intraconsommation significative de 47 GJ au sein des systèmes de culture, notamment due à la restitution des résidus de culture et de feuillage issus des collectes avec le mulch, dont la composition est détaillée dans la section pertinente, ainsi que de la production autonome d'une partie des semences (riz et arachide).

Les flux d'énergie liés à la production sont plus élevés, avec des flux extérieurs sortants (qui incluent l'intraconsommé, l'autoconsommé et les ventes) atteignant 181 GJ pour SP2NF, contre 121 GJ pour SP1. La modélisation y contribue, car elle intègre un nouveau système de culture fournissant 165 kg de légumes (soit 0,03 GJ) et un nouveau système d'élevage de chèvres permettant la vente de 26 kg de viande par an (soit 0,14 GJ). Le système d'élevage caprin permet également la vente de 16 GJ de déjection, soit plus de cinq fois plus que les vaches. Cette différence s'explique par la teneur en matière sèche du fumier des chèvres, modélisée à 60 %, contre 30 % pour les effluents de bovin. Ainsi, ces deux nouveaux systèmes entraînent une augmentation de la production de 17 GJ. Sans ces nouveaux systèmes de culture et d'élevage, la production annuelle du système SP2NF en natural farming reste supérieure, avec un flux d'énergie de 164 GJ.

3- EXPLOITATIONS EN ARBORICULTURE AVEC ELEVAGE LAITIER BOVIN SP3 ET SP4NF

1. MODELISATION DES SYSTEMES DE CULTURE ET D'ELEVAGE

SC6 Plantation d'aréquier conventionnelle

Les plantations d'aréquiers sont en pleine expansion dans le canton. En effet, l'Andhra Pradesh a connu un essor de la plantation d'aréquiers en raison de la demande croissante de bétel², des conditions climatiques favorables et du soutien du gouvernement et des coopératives agricoles. Ces facteurs font que cette plantation permet aux agriculteurs de dégager de bons revenus agricoles.

Le système de culture SC6 a été construit sur la base de 4 entretiens. Il a été modélisé avec une culture de napier et une plantation d'aréquier. La modélisation des quantités des intrants et des produits a été adaptée aux différentes phases de production de la plantation (pépinière, phase non productive et productive). Ainsi, pour la phase en pépinière, d'une durée de 3 ans, les intrants et les produits comptent pour 10% (3/30). Pour une plantation non productive, âgée de moins de 10 ans, ils comptent pour 33% (10/30). Pour la plantation productive dont l'âge est compris entre 10 et 30 ans, ils comptent pour 57% (17/30). Les intrants nécessaires à la transplantation ou les produits issus de la destruction de l'agasa n'ont été pris en compte qu'une fois dans la modélisation.

L'âge de productivité des aréquiers est de 13 ans après une étape en pépinière de 2 ans, et une phase non productif associé à une plantation d'agasa de 10 ans. La plantation d'aréquier productif a été modélisé sur 17 ans avec une association à des feuilles de bétel comme le présente la Figure 27. Le piper bétel est une plante grimpante de la famille des pipéracées. Elle est associée à l'aréquier qui lui sert de tuteur. Cette phase productive conduit à la destruction des agasas qui sont remplacés par de nouveaux plants d'aréquiers dans un objectif d'augmenter la surface occupée par le palmier afin de garantir plus de récolte de noix d'arec. Au sein de la parcelle plusieurs espèces d'arbres sont présents avec des cocotiers, bananiers, manguiers et citronniers. Ces arbres sont présents tout au long de la période de production et leur production est autoconsommée et vendue.

² Le bétel fait référence à une pratique de mastication de feuilles, de noix d'aréquier et de chaux. Il s'agit d'une pratique traditionnelle qui est controversées en raison d'effets nocifs sur la santé.



Figure 27-Evolution de la plantation entre la phase non productive et celle productive

La plantation de SC6 a été modélisée sur une surface de 3ac dont les espèces et le nombre d'arbres sont présentés Tableau 13. Les densités de plantation sont de 500 arbres/ac pour l'aréquier et de 1000 arbres/ac pour l'agasa. Au sein de la même parcelle, d'autres arbres fruitiers ont été plantés comme des manguiers, des citronniers, des cocotiers des bananiers avec une densité de plantation respective de 0,3 ; 6,7 ; 10 et 20 arbres/ac.

La modélisation de cette plantation conduit à une production annuelle de 4,2 tonnes de noix d'arec avec un rendement de 3kg/arbre/an. Il a été modélisé une production annuelle de 180kg de feuilles de bétel par aréquier avec une récolte mensuelle de 500 feuilles d'un poids de 3g/feuille.

La production annuelle issues de la plantation d'agasa a été difficile à estimer sur le terrain. Il a été nécessaire de se référer à des études indiennes sur des productions d'agasa. L'étude en question a été réalisée à l'université agricole du Pendjab. En se référant aux données de l'étude, la plantation d'agasa permet une quantité de bois de chauffage de 3,52 tMS/ha, soit 1,4tMS/ac. La production annuelle de feuillage a été estimée avec 6 récoltes espacées d'un intervalle de 8 semaines en sachant qu'une récolte permet de collecter 2,95kgMS/arbre (Chauhan et al., 2016). En ramenant ces valeurs au nombre d'arbre dans la plantation, la production annuelle en bois de chauffe et de feuillage est respectivement de 3,9TMS/an et 53,1TMS/an en prenant en compte une teneur en matière sèche de 92% pour le bois et 30% pour le feuillage. Les rendements détaillés figurent Annexe 9.

Tableau 13-Présentation des essences d'arbres présentes dans le SC6

	Agasa	Aréquier	Bananier	Cocotier	Citronnier	Manguier
Nb arbre sur 3 ac	3000	1500	60	30	20	1
Densité de plantation	1000	500	20	10	6,7	0,3
Surface occupée	65,06%	32,53%	1,30%	0,65%	0,43%	0,02%
	1,95	0,98	0,04	0,02	0,01	0,00

Le calendrier de travail ci-dessous présente les différentes opérations culturales de la plantation d'aréquier conduite en conventionnelle. L'énergie liée au travail est estimée à 3,2GJ équivalant à 147Hj/an sur les 30 années de la plantation. Ramené à l'acre, cela mobilise un travail annuel de 49Hj.

Surface: 3 ac	Opération	CALENDRIER DE TRAVAIL (PLANTATION AREQUIER)												
		Mai	Jun	Juill	Août	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Feb	Mars	Avr	
Pépière (3 ans)	Creuser les trous et plantation	0,44												
	Fertilisation organique	0,90												
	Irrigation à la raie	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	
Implantation (1 an)	Creuser les trous et transplantation arbres		0,40											
	Fertilisation organique													
	Fertilisation chimique		1,52											
Plantation non productive (10ans)	Travail du sol agasa		0,03											
	Semis agasa		0,03											
	Fertilisation chimique			0,01										
	Irrigation à la raie		1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	
	Coupe quotidienne d'agasa (intraconsommation, location à un berger)	Modélisé dans SE3												
	Retirer les arbres												2,00	
	Toute la production (30 ans)	Fertilisation organique												4,95
	Fertilisation chimique			0,02										
Plantation productive (17ans)	Extraction et apport de sol	Prestation de service												
	Enlever le système goutte à goutte		0,11			0,11			0,11			0,11		
	Désherbage mécanique			0,09			0,09			0,09			0,09	
	Désherbage manuel			4,25			4,25			4,25			4,25	
	Pose du système goutte à goutte			0,11			0,11			0,11			0,11	
	Irrigation goutte à goutte	0,00										0,00	0,00	
	Irrigation à la raie		4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50			
	Récolte noix d'arec													25,50
	Récolte feuille de bétel	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	
	Transport	Hors exploitation												
	Autres récoltes	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	
TOTAL Hj		4,30	11,07	13,46	8,98	9,09	13,43	8,98	9,09	13,43	8,98	4,59	41,38	
		146,78												
Energie liée au travail (GJ)		3,2												

Figure 28-Calendar de travail de SC6 plantation d'aréquier conventionnelle

Durant la phase en pépière, la fertilité du sol est permise par une fertilisation organique tous les 3 mois de 50g de fumier par plant. Pour la transplantation des plants, une fertilisation organique est réalisée en ajoutant 5kg de fumier par trou. Durant la phase non productive la plantation est fertilisée avec des engrais de synthèse, du diammonium phosphate, de l'urée et un engrais complet NPK avec une quantité de 50kg chacun. Cette fertilisation se réalise via l'eau d'irrigation.

Durant la phase productive, la plantation d'aréquier a été modélisé avec un apport annuel de 10 tonnes de sol provenant du tank. L'apport de sol permettrait d'augmenter la fertilité du sol qui est souvent appauvri en éléments nutritifs et en matière organique. Cela permettrait également d'augmenter la rétention en eau et de réduire l'érosion dans les plantations. L'énergie brute du sol a été déterminé par le carbone total issu d'une analyse de sol faite sur 6 tanks dans le Karnataka. L'énergie fossile liée à son extraction a également pu être modélisé avec la consommation en carburant des pelles mécaniques et du tracteur utilisés pour le transport jusqu'à la parcelle. Le détail des calculs figure dans la partie Modélisation des flux d'énergie.

Il y a également une fertilisation organique annuelle de 10 tonnes de fumier et une fertilisation chimique avec les mêmes engrais et les mêmes quantités que pour la conduite du verger non productif.

Concernant l'irrigation, celle-ci est conduite à la raie dans la pépinière, durant la phase non productive de la plantation et pendant une partie de la phase productive. En effet, pendant la phase productive, l'irrigation a été modélisé avec 3 mois de goutte à goutte durant la saison sèche et 9 mois d'irrigation à la raie, période durant laquelle l'eau est plus disponible. Pour l'irrigation à la raie, celle-ci a été modélisé avec une fréquence d'une fois tous les 5 jours et d'une durée de 6h par jour, équivalent à irriguer une quantité de 25mm/ac³. La consommation électrique des pompes pour l'irrigation à la raie est de 3946kWh. Concernant l'irrigation au goutte à goutte, celle-ci a été modélisé à une fréquence de 2h/jour pendant 3 mois (période de saison sèche) équivalent à irriguer une quantité de 10mm/ac⁴. La consommation électrique des pompes pour l'irrigation au goutte à goutte est de 2308kWh. La consommation électrique totale est donc de 5741kW.

En ce qui concerne la lutte contre les adventices, durant la phase productive un désherbage mécanique dans l'interrang et un désherbage manuel autour des arbres ont été modélisé tous les 3 mois. Cela mobilise une main d'œuvre de 15 personnes sur 2 journées de travail soit un total de 17Hj.

Avantage environnemental avec l'association agasa-aréquier

L'association de l'agasa (*Leucaena leucocephala*) avec l'aréquier est considérée comme une pratique agroforestière et est courante dans le canton. L'agasa a l'avantage d'avoir une croissance très rapide et un feuillage dense qui fournit de l'ombre aux jeunes plants qui leurs permettraient de mieux résister aux fortes températures durant les saisons sèches. L'agasa est également une plante fourragère de bonne qualité, utilisée principalement pour l'alimentation des petits ruminants. En l'associant à l'aréquier, cela permet à l'agriculteur de diversifier ses sources de revenus par la vente du bois ou par la location de quelques arbres à des éleveurs pour le fourrage. Il s'agit d'un avantage économique qui permet d'améliorer la productivité du verger en attendant que les aréquiers soient productifs. De plus l'agasa est une plante de la famille des légumineuses capable de fixer l'azote contribuant ainsi à améliorer la fertilité du sol dont les aréquiers tirent avantage. Ainsi, l'association des deux espèces peut aider à réduire l'érosion du sol dû aux systèmes racinaires développés par l'agasa. Par contre, il est à noter que l'agasa présente également une sensibilité au déracinement dû aux intempéries. Des agriculteurs ont détruit la culture dû aux dommages causés par le vent.

³ Référence donnée par Laurent Ruiz

⁴ Référence donnée par Laurent Ruiz

SC7 Plantation d'aréquier conduit en natural farming

La modélisation de ce système de culture repose sur trois visites de plantation et d'un entretien avec un natural farmer possédant une plantation d'aréquier âgée de plus de 13 ans. Il a été relativement difficile de trouver des plantations d'aréquier gérées en natural farming en phase productive dans la zone d'étude car la plupart des plantations d'aréquiers étaient âgés de moins de 10 ans et ne produisaient pas encore de noix d'arec.

Afin de rendre la plantation rentable pendant la phase non productive, il est courant d'associer de jeunes aréquiers à des cultures annuelles ou pérennes telles que des légumineuses ou des fleurs comme le crossandra entre les rangées d'aréquiers. On peut également planter des arbres fruitiers (comme le cocotier et le bananier), des arbres fourragers (comme l'agasa) ou des légumes (comme l'aubergine, le piment et la tomate) entre les aréquiers, comme illustré Figure 29 qui présente des plantations d'aréquier en phase productive. Ces cultures associées permettent aux agriculteurs de diversifier leurs sources de revenus en attendant la productivité des aréquiers.



Figure 29- Deux plantations d'aréquier ZBNF en phase productive avec culture de sunhemp en interrang en début de cycle (à gauche) et fin de cycle (à droite). Culture de légume (aubergine, tomate, piment) entre les arbres (à gauche)

La plantation d'aréquier du SC7 a été modélisée sur une surface de 1,5ac dont les essences, le nombre et la densité des arbres sont présentées Tableau 14. La phase en pépinière n'a pas été prise en considération, car les plants sont fournis en interne par la communauté ZBNF. Les phases non productives et productives ont la même durée que la plantation SC6 modélisée en conventionnel, soit 10 ans et 17 ans respectivement. Les intrants et les produits ont été calculés en prenant en compte les différentes étapes de conduite de la plantation en fonction de sa période de croissance, de la même manière que pour la plantation SC6. Ainsi, pour la plantation non productive de moins de 10 ans, les intrants et les produits représentent 37% (10/27) du total. La plantation productive, dont l'âge se situe entre 10 et 27 ans, représente 63% (17/27) du total. Par ailleurs, les quantités des intrants issus de l'implantation et de l'apport du sol ont été modélisées de manière similaire. Les produits provenant de la récolte des cocotiers et des bananiers ont été modélisés à partir de l'âge productif de l'arbre, soit respectivement à partir de 4 ans et 2 ans.

Tableau 14-Présentation des essences de la plantation d'aréquier de SC7NF

	Aréquier	Cocotier	Bananier	Fleurs (crossandra, sunhemp)	TOTAL
Nb total	700	100	60		860
Densité de plantation (arbre/ac)	467	67	40		
Surface occupée (ac)	0,49	0,07	0,04	0,90	1,50
Pourcentage d'occupation	32%	5%	3%	60%	

La phase non productive de la plantation d'aréquier de SC7 a été modélisée avec une culture de crossandra entre les rangées. Le crossandra (*crossandra infundibuliformis*) est une culture annuelle, avec une production de fleur estimée à 1500 kg par acre, par an. Durant la phase non productive, des légumes (tels que l'aubergine, le piment et la tomate) ainsi que des cultures de légumineuses ont été modélisés entre les aréquiers tout au long de la période de production.

La phase productive a été modélisée avec une culture du sunhemp (*crotolaria jonciforme*). Le sunhemp n'est ni commercialisé ni consommé en interne, il est utilisé comme mulch pour fertiliser la plantation. La production de sunhemp est estimée à un peu plus de 2 tonnes par acre. De plus, des écorces de noix de coco et des feuilles d'aréquier peuvent être placées à la base des arbres pour maintenir l'humidité du sol. La culture du sun hemp qui complète son cycle de vie en une saison (environ 3 à 4 mois entre la germination et la production de graines) a été modélisée en tant que culture annuelle. Les semis sont généralement effectués en début de saison des pluies, avec des récoltes observées courant juin. Par conséquent, il a été modélisé un semis en février.

La production de légumineuses a été modélisée avec une production de pois d'angole, féverole, niébé et de lentille noire avec une quantité de 1,5 kg par semaine pendant 4 mois, équivalent à une production annuelle de 24 kg. Ces légumineuses sont cultivées pour l'autoconsommation de la famille. En ce qui concerne la production de légumes, celle-ci a été modélisée avec une récolte de 4 kg par semaine pendant 2 mois, totalisant ainsi 32 kg par an. De manière similaire à la conduite en conventionnelle, diverses essences d'arbres sont présentes dans la parcelle et contribuent également à la production annuelle destinée à la vente et à l'autoconsommation familiale. La modélisation inclut une production de 64 kg de noix de coco par arbre et 38 kg de palmes par arbre pour les cocotiers, ainsi que 36 kg de bananes par arbre pour les bananiers. A titre indicatif, les détails des rendements sont présentés Annexe 10

Le calendrier de travail ci-dessous présente les différentes opérations culturales de la plantation d'aréquier conduite en natural farming. L'énergie liée au travail est estimée à 4GJ équivalant à 260Hj de travail à l'année sur la surface totale de 1,5ac. Cela correspond à 173Hj/ac/an soit plus de 3 fois supérieur à la conduite en conventionnelle.

Surface 1,5 ac	Opération	CALENDRIER DE TRAVAIL (PLANTATION D'AREQUIER NATURAL FARMING)											
		Mai	Juin	Juill	Août	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avr
Implantation (1 an)	Préparation Ganajeevamurtham	1,3											
	Préparation beejamurtham		0,3										
	Plantation, traitement beejamurtham et fertilisation au ganajeevamurtham		18,1										
Tous les 3 ans	Extraction et apport de sol	Prestation de service											
Toute la production (27 ans)	Travail du sol	0,8		0,8		0,8		0,8		0,8		0,8	
	Préparation Ganajeevamurtham		8,1					8,1					
	Fertilisation Ganajeevamurtham			0,6					0,6				
	Préparation jeevamurtham	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	Fertilisation jeevamurtham	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
	Préparation beejamurtham		0,3										
	Traitement au beejamurtham		1,5										
	Semis des légumineuses et plantation des légumes					1,0							
	Irrigation au goutte à goutte	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	Traitement neemastram				0,5				0,5				0,5
	Enlever le système goutte à goutte				1,0					1,0			1,0
	Désherbage manuel				20,0					20,0			20,0
	Pose du système goutte à goutte				2,0					2,0			2,0
	Récolte des légumes							1,0	1,0				
	Récolte des légumineuses							3,0	3,0	3,0	3,0		
	Récolte noix de coco	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
	Récolte banane	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Plantation non productive (10 ans)	Plantation crossandra		0,5										
	Préparation panchagavya												
	Fertilisation panchagavya						0,1						
Plantation productive (17 ans)	Récolte crossandra							2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
	Semis à la volée sun hemp									0,6			
	Coupe Sunn hemp		5,7										
	Enfouissement dans le sol		2,5										
	Récolte noix d'arec			28,4									
	Transport	Hors exploitation											
TOTAL (Hj)		8,5	43,3	36,1	29,8	8,1	18,6	15,0	35,1	12,9	9,7	10,4	32,1
Energie liée au travail		259,7											
		3,7											

Figure 30- Calendrier de travail de SC7NF plantation d'aréquier conduit en natural farming

La gestion de la fertilité de la plantation s'effectue par l'apport de sol du tank, avec une quantité de 200 tonnes tous les 3 ans. Au moment de la plantation des arbres, une fertilisation est réalisée dans les trous creusés en utilisant du ganajeevamurtham. La quantité de ganajeevamurtham a été modélisée à 20 kg par arbre, équivalant à un apport de 20 tonnes. Quelle que soit la phase de production, deux applications annuelles de 400 kg de ganajeevamurtham par acre sont effectuées en juillet et en novembre. La préparation et l'application de la fertilisation suivent la même conduite décrite précédemment pour SP2.

La fertilisation avec le jeevamurtham a été modélisée pour la culture en inter-rang, avec une application foliaire effectuée mensuellement à l'aide d'un pulvérisateur manuel. Une deuxième application est réalisée à la base des arbres et est rendue possible grâce à l'irrigation par goutte à goutte. Dans les deux cas, il s'agit d'une application de 200 litres par acre tous les 15 jours pour les arbres et mensuellement pour la culture de crossandra et de sunhemp. Au total, l'apport de jeevamurtham a été modélisé avec une quantité de 4800 litres par acre par an.

La fertilisation est également réalisée en appliquant un stimulant de croissance, le panchagavya. Pour chaque saison de culture, 4 litres par acre de panchagavya sont ajoutés à 100 litres d'eau avant la floraison.

Les traitements consistent à immerger les semences et les plants de légumes dans 20 litres de beejamurtham. L'utilisation du neemastram pour contrôler les ravageurs et les maladies est effectuée uniquement lorsque des symptômes apparaissent. Trois applications ont été modélisées dans l'année, avec un temps de travail de 2 heures et la mobilisation de 2 employés par acre, correspondant à un besoin de 1,5 heures de travail par acre pour la préparation et le traitement. La lutte contre les adventices est réalisée par trois désherbages manuels au cours de l'année. Cette tâche a été modélisée avec une main-d'œuvre de 20 personnes mobilisées sur une journée de travail, ce qui équivaut à un total de 60 heures de travail par acre.

Concernant l'irrigation celle-ci a été modélisée au goutte à goutte, tous les jours de l'année pendant 1h. Ainsi pour la phase non productive la consommation électrique des pompes est de 1637kWh engendrant un flux d'énergie fossile de 19GJ contre 42GJ pour SP3.

Limite de la plantation d'aréquier

Il est important de noter que les plantations d'aréquiers sont avant tout une plantation à vocation commerciale avec la vente des noix d'arec. La hausse sur le marché du prix des noix d'arec dû à une demande importante explique l'essor des plantations d'aréquiers dans la zone. Ainsi pour accroître la productivité de l'aréquier, il est courant de planter, dès lors que la plantation est productive, de nouveaux aréquiers entre ceux déjà présents. Cela conduit à réduire l'espacement de l'inter rang et entre les plants. Ainsi il est possible de voir des plantations qui peuvent atteindre jusqu'à 600 aréquiers/ac (Djavan Daoût, 2019).

Le développement de l'irrigation au goutte à goutte a également permis d'irriguer de plus grandes surfaces ce qui a conduit à augmenter la taille des plantations. Une plantation d'aréquier est très consommatrice en eau. Ces besoins en eau sont estimés à 2500 m³/ha en saison sèche (1000m³/ac) soit plus de 10L/jour pendant 6 mois, pour une densité de 600 arbres par acre. (Djavan Daoût, 2019). Cela conduit à une diminution du niveau d'eau des nappes souterraines prélevée par les forages notamment lors de la saison sèche, quand les précipitations dans le canton (560mm/an) ne peuvent couvrir la quantité d'eau évapotranspirée par la plantation qui peut être très élevée durant une sécheresse. A noter également que les aréquiers sont très sensibles au stress hydrique ce qui cause souvent des pertes.

SC8 Napier (conventionnel)

Comme vu précédemment, le canton connaît un essor des cultures fourragères avec les cultures de napier et de supernapier qui sont des cultures pérennes valorisées en tant que fourrage pour les élevages. Le napier est réputé pour avoir une pousse rapide et une productivité annuelle élevée. Son adoption est encouragée par les gouvernements et les organisations de développement agricole. Le supernapier est une amélioration génétique de la variété *Pennisetum purpureum* en termes de rendement, de qualité nutritive et de résistance aux maladies. L'intervalle entre deux coupes de supernapier est d'un mois contre un mois et 10 jours pour le napier. Les cultivars nains sont feuillus et de haute valeur alimentaire (Cook et al., 2005). Comme l'agasa, la culture de napier peut également être louée à des éleveurs mais la production est très rarement vendue, juste en cas de surplus. Elle est principalement destinée à l'alimentation des animaux en intraconsommation.



Figure 31- Repousse progressive du napier, associé à une plantation d'agasa

Le calendrier de travail ci-dessous présente les différentes opérations culturales de la culture du napier qui a été modélisé avec une énergie liée au travail presque négligeable de 0,07GJ équivalant à 9Hj. Le peu de travail s'explique par la collecte journalière du napier qui a été modélisé dans la conduite de SE2.

Surface : 1 ac	CALENDRIER DE TRAVAIL DU NAPIER (Hj)												
	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	
Travail du sol	0,13												
Fertilisation organique	0,22												
Désherbage	3,07												
Plantation	0,89												
Travail du sol									0,11				
Fertilisation organique									1,89				
Fertilisation chimique	0,17	0,17	0,17		0,17	0,17	0,17		0,17	0,17	0,17		
Irrigation	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Collecte	Modélisé dans la conduite de SE2												
Coupe à la base							1,00						
TOTAL (Hj)	4,48	0,18	0,18	0,01	0,18	0,18	1,18	0,01	2,18	0,18	0,18	0,01	
Energie liée au travail (GJ)	0,07												

Figure 31-Calendarier de travail de SC8 napier

La culture du napier permet une production annuelle en biomasse de 12,3TMS/ac. La durée définie est de 9 mois. Ainsi les intrants issus de l'implantation comptent pour 11%. Les intrants et produits nécessaires à la conduite en routine compte pour 89%.

L'implantation a été modélisée avec un travail du sol motorisé, une fertilisation organique avec 1 tonne de fumier bovin, un désherbage manuel, et la plantation des boutures. L'implantation nécessite 4,3Hj et se réalise en juin, en début de mousson. La plantation a été modélisée avec 5kg de boutures (10000 tiges mures), une main d'œuvre de 3 employés et d'un actif familial pendant 2 journées de travail, correspondant à un total d'1Hj. Le désherbage nécessite 3Hj.

La conduite après l'implantation se réalise avec une fertilisation organique annuelle d'un apport de 4 tonnes de fumier suivi d'un travail du sol motorisé avec un rotavator. La culture est également fertilisée avec de l'urée directement dans l'eau d'irrigation après chaque récolte. Le napier est une culture qui requiert un accès à l'eau car elle a besoin d'être irriguée tout au long de l'année. L'irrigation se réalise au goutte à goutte, toutes les semaines en comptant 45m³ d'eau/ac. Le travail de la conduite du napier après l'implantation a été modélisée avec 4,6Hj. Ainsi le travail nécessaire à cette culture est d'environ 9Hj. Concernant l'irrigation, celle-ci entraîne des flux d'énergie fossile avec la consommation d'électricité par les pompes submersibles et de surface. Il a été modélisé une irrigation au goutte à goutte d'une fréquence d'une fois/semaine pendant 2h.

En ce qui concerne la récolte, celle-ci s'effectue avec une coupe quotidienne pour nourrir l'élevage SE3. La culture est entièrement coupée tous les deux ans, ce qui permet d'accroître sa vigourosité pour les années suivantes. Le temps de travail de la collecte journalière est pris en compte dans la conduite de l'élevage. Elle a été modélisée à 2h par jour avec un actif familial équivalent à un total de 90Hj à l'année.

SE 3 Elevage laitier avec 5 vaches Holstein Friesian

Ce système d'élevage permet une production annuelle dédiée à la vente de 0,5 vaches réformées et de 4,5 veaux âgés de moins de 6 mois. Cela induit un flux d'énergie brute de 3,7GJ. Il a été calculé avec un poids de 500kg pour la vache Holstein et de 100kg pour le veau. Cet élevage permet également la production de 14600L de lait en modélisant une production laitière annuelle moyenne de 2920L/vache. Le calendrier de production et d'alimentation a été modélisé de la même manière que pour SE1.

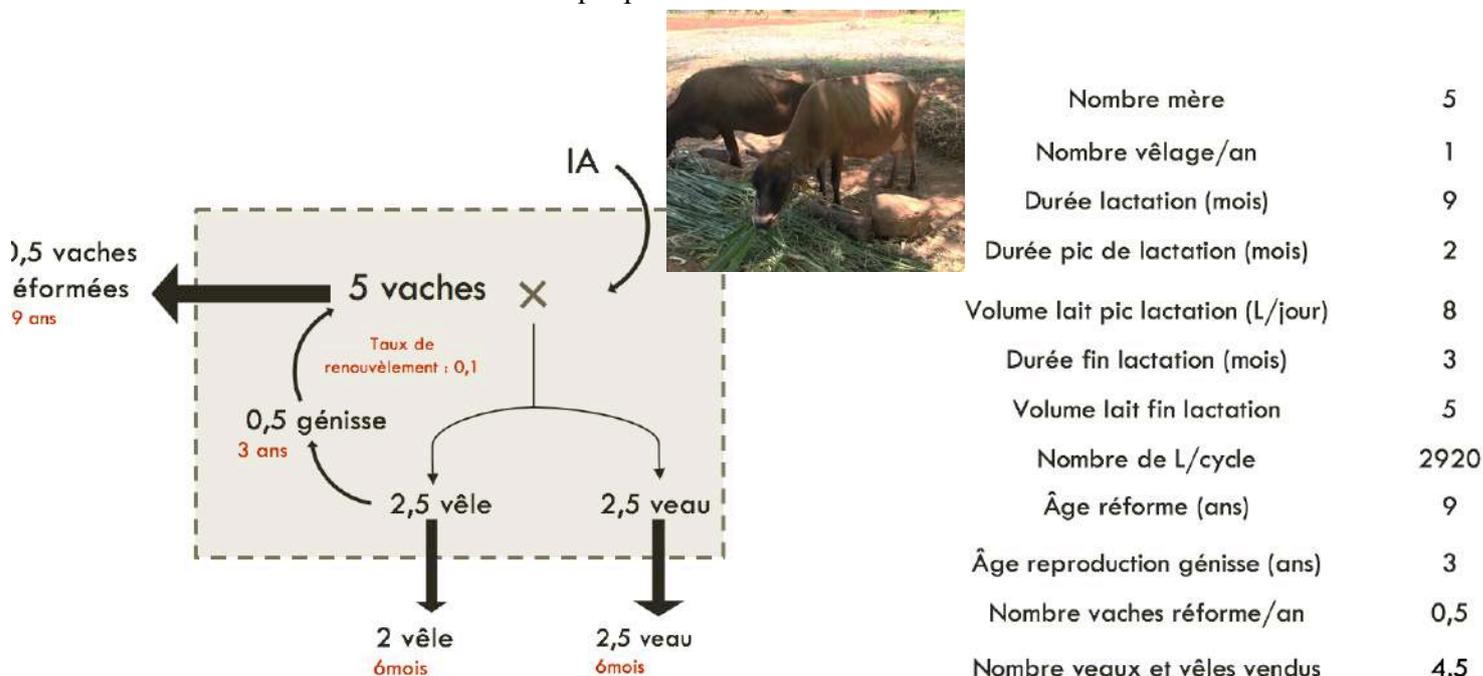


Figure 32-Schéma démographique du troupeau et caractéristiques générales de SE2

La constitution de la ration est présentée par la Figure 33 ci-dessous. Le napier et l'agasa sont intraconsommés par la production de SC6 et SC8. Les fourrages restants sont achetés à des producteurs voisins et la busa vient d'une coopérative agricole. La quantité d'aliment consommée représente un flux d'énergie brute de 456GJ et un flux d'énergie fossile de 12GJ qui représente la consommation d'énergie fossile nécessaire à la production des matières premières, de la phase d'usinage et du transport de la busa.

Aliment	Disponibilité annuelle (kgMS)	Ration (kgMS/j/vache)
Fourrage arachide	3700	2,03
Agasa	5375	3,00
Napier	7358	4,03
Paille de millet	3720	1,97
Paille de riz	3680	2,02
Busa Santosa	2200	1,79
TOTAL	26133	14,84
Energie brute	456GJ	

Figure 33- Estimation d'une ration journalière moyenne d'une vache Holstein Friesian de SE2

2. ETUDE DES FLUX DE MATIERE ET D'ENERGIE DU SYSTEME DE PRODUCTION ARBORICULTURE, ELEVAGE LAITIER CONDUIT EN CONVENTIONNEL ET EN NATURAL FARMING

Pour rappel, ce système de production a été mis en place par des agriculteurs qui ont acquis des terres et ont un accès à l'eau. Il s'agit d'un système qui offre une bonne garantie de revenus agricoles. Cependant, cette garantie dépend d'une capacité d'investissement élevée en intrants.

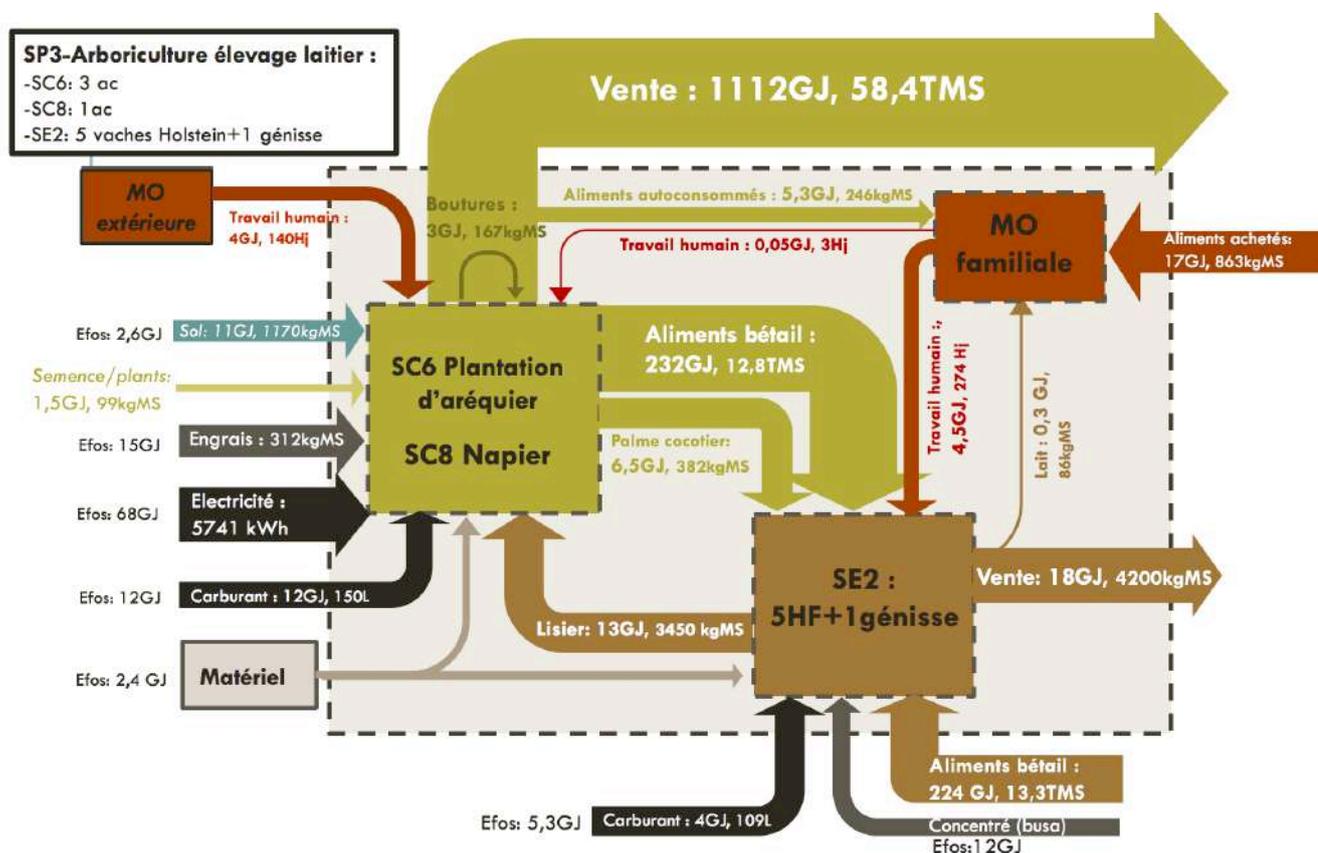


Figure 35- Représentation des flux d'énergie du SP arboriculture élevage laitier conduit en conventionnelle

En effet, ce système de production présente d'importants flux d'énergie entrants en provenance de l'extérieur avec 93 GJ d'énergie fossile. Cette énergie est principalement utilisée pour la consommation de carburant, la consommation d'électricité directe et indirecte liée aux engrais de synthèse, à la busa, à l'extraction du sol et au matériel agricole. En comparaison avec les systèmes de production polyculture élevage précédemment vu, ce système génère davantage de flux depuis l'extérieur en raison de l'achat d'intrants. Il présente également un flux d'énergie brute non négligeable de 224 GJ lié à l'achat d'aliments pour les vaches. Dans cette modélisation, la moitié de l'alimentation provient de l'intraconsommation (napier, agasa) et le reste des fourrages provient de l'extérieur.

Les flux d'énergie internes totalisent 270 GJ, dont un flux de 4,6 GJ lié au travail des membres de la famille et 240 GJ d'énergie brute liée à l'intraconsommation des produits issus des cultures, du lisier et des produits autoconsommés. Les flux d'énergie liés au travail sont presque négligeables en comparaison des flux d'énergie fossile, qui sont également beaucoup plus importants que ceux des systèmes de production polyculture élevage. Cela indique une

corrélation entre la réduction de la main-d'œuvre humaine et le recours croissant à la mécanisation motorisée.

La majeure partie des produits issus de SP3 conventionnel provient des ventes de la plantation d'aréquier, en particulier la vente de feuillage d'agasa (974 GJ) suivi par la vente de noix d'arc (17GJ). Les détails des intrants et produits sont présentés en Annexe 10.

Compte tenu d'une production sur 30 ans il peut être constaté que la production de dix années de feuillage et de bois d'agasa pendant la phase non productive n'est pas négligeable. Il s'agit d'un flux d'énergie brute qui reste dans la zone et est utilisé soit par les éleveurs locaux, soit par le propriétaire qui possède du bétail. Cependant, il est important de souligner que pendant la phase productive (sans la plantation d'agasa) une grande proportion des produits issus de la plantation d'aréquier est destinée à une exportation en dehors de la zone.

L'objectif était également d'analyser l'évolution des flux de matière et d'énergie avec une conduite en natural farming. En effet il s'agit d'un système de production orienté vers l'extérieur, ce qui peut être en désaccord avec les valeurs de la communauté ZBNF qui promeut une réduction des intrants extérieurs et une production locale.

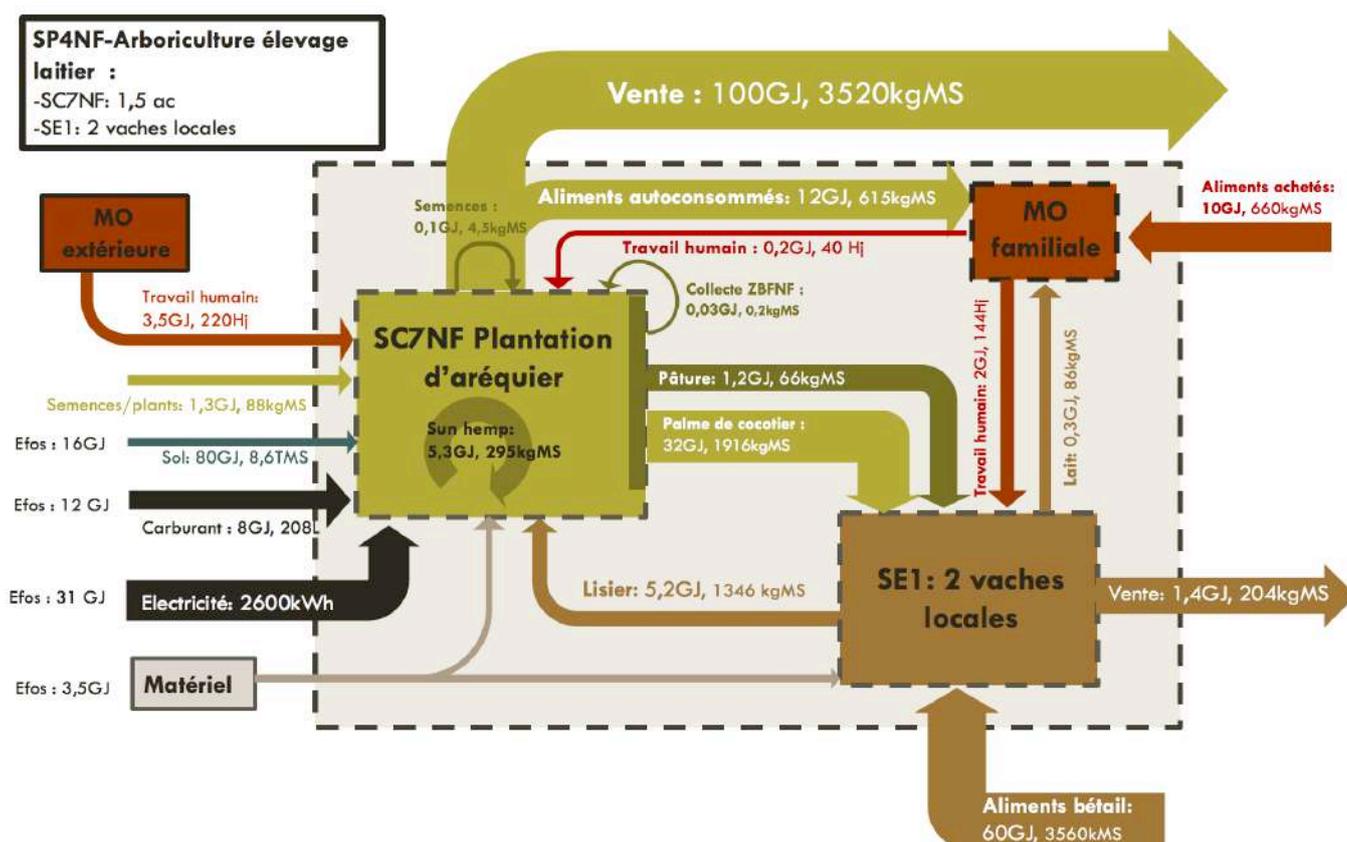


Figure 36- Représentation des flux d'énergie du SP arboriculture élevage laitier conduit en natural farming

Le schéma ci-dessus, Figure 36 montre une moindre utilisation d'intrants extérieurs avec l'absence de concentré et d'engrais. Cependant la consommation en carburant s'équivaut à la conduite en conventionnelle malgré une surface moitié moins importante. Cela est dû à l'apport de sol plus important dans la conduite en natural farming qui accroît la consommation dû au transport et à l'utilisation de pelle mécanique. La consommation électrique liée au fonctionnement des pompes pour l'irrigation est moins élevée avec 1733kW/ac/an contre 1913kW/ac/an pour la conduite en conventionnelle. Les bénéfices du mulch durant la phase productive sur l'augmentation de la rétention d'eau semblent être significatif sur la réduction de l'utilisation de l'eau. Le mulch semble également contribuer à la fertilité de la parcelle en réduisant le besoin de lisier de vache. En effet, SP3 nécessite un apport d'énergie brute de 13GJ, soit presque trois fois supérieur à celui de SP4NF. Ainsi le mulch permis par la culture du sunhemp, combiné à un apport de sol contribuerait au maintien de la fertilité du sol et permettrait de ne pas avoir recours aux engrais de synthèse.

Les produits vendus par SP4NF sont beaucoup moins importants, ce qui s'explique par plusieurs facteurs. Il n'y a pas d'association avec l'agasa pendant la phase non productive. La culture associée de sunhemp pendant la phase productive est restituée au sol en tant que mulch. La surface de plantation d'aréquier modélisé est moitié moins importante. De plus, SP3 possède un système de culture supplémentaire, celui du napier qui permet de produire un flux d'énergie brute intraconsommés de 86 GJ, ce qui n'est pas négligeable.

4- ELEVAGE DE PETITS RUMINANTS SP5

La modélisation de l'élevage de petits ruminants a été construite sur la base de trois entretiens. Il a été particulièrement étonnant de constater qu'un chauffeur s'était reconverti en berger en achetant directement 100 brebis après avoir vendu sa voiture. Cela témoigne de la diffusion de ce métier dans le canton. Parmi les trois bergers interrogés, l'un d'entre eux photographié Figure 37 est un berger de père en fils depuis trois générations. Il conduit son troupeau de manière traditionnelle en utilisant des ânes. Ce type d'élevage est réalisé par des sans terres qui ont soit hérité du troupeau de leurs parents, soit ont réussi à constituer un troupeau à partir de quelques ovins et caprins. La conduite du troupeau peut être réalisé par plusieurs bergers lorsqu'il est constitué de plusieurs cheptels qui appartiennent à 2 voir 3 propriétaires différents. Le troupeau peut donc atteindre plus d'une centaine de brebis et de chèvres.

Le troupeau est constitué de 70 bêtes comprenant 20 chèvres et 50 brebis. Ce type d'élevage est pratiqué de manière sédentaire, le troupeau est parqué la nuit dans le village et pâture toute l'année. Il a été indiqué que l'intérêt des chèvres était de guider les brebis qui ont plus de mal à s'aventurer dans les terres.



Figure 37-Un berger conduisant un troupeau de petit ruminant avec des ânes

En ce qui concerne la ration des adultes, il s'agit d'un élevage extensif qui pâture la journée en bordure de route, dans les parcelles agricoles voisines et quelque fois dans des zones de friches. Le pâturage a été estimé avec un apport de 2kgMS/j/adulte équivalent à un total d'environ 54 tonnes d'herbe fourragère à l'année. La pâture a été estimée avec 5 ressources fourragères locales qui sont présentées Tableau 15. Le détail du calcul de l'apport au pâturage a été présenté *partie Des flux d'énergie qui découlent des flux de matière*. Les zones de friches ne sont pas vraiment exploitées dû à la présence de *Prosopis juliflora*, une plante envahissante de la famille des légumineuses toxique pour de nombreux animaux. Le troupeau peut être conduit proche des tanks pour l'abreuvement des animaux.

En ce qui concerne l'alimentation des petits, deux rations présentées Tableau 16 ont été estimées en fonction des disponibilités fourragères locales des saisons. La ration en saison sèche se base sur une collecte d'agasa sur 4 mois lorsque les fourrages sont rendus moins disponibles. En lien avec les plantations d'aréquier SC6, l'agasa peut être loué à des bergers. Il a été modélisé une location sur un acre avec le même rendement en biomasse vu pour SC6 de 2,95TMS/an. Le prix est souvent trop élevé pour une location à l'année pour ces bergers qui ont de faible revenu agricole. A titre indicatif, le prix d'une location à l'acre par mois est de 10000INR. Ainsi, une alternative à la location est la plantation de sa propre culture d'agasa devant les maisons, entre 50 et 60 plants.

La santé du troupeau est garantie par des traitements curatifs avec l'administration de 3 antiparasitaires à tout le troupeau. La quantité totale utilisée est de 350mL tous les 3 mois.

Tableau 15- Estimation de l'apport au pâturage des adultes

Estimation apport pâturage		
Famille	Espèce	kgMS/j/adulte
herbe fourragère	Panicum antidotale	0,4
	Cenchrus ciliaris	0,4
	Cynodon dactylon	0,4
légumineuses	Desmanthus virgatus	0,4
	Vicia villosa	0,4
TOTAL		2

Tableau 16- Estimation des rations des petits de SP5

Estimation de la ration des petits		
Saison	Aliment	kgMS/j/petit
saison sèche	agasa	0,14
	fourrage d'arachide	0,06
	margousier	0,01
	tamarin	0,01
	lait	0,03
TOTAL		0,25
saison des pluies	maïs grain	0,44
	fourrage d'arachide	0,06
	feuille de margousier	0,01
	feuille de tamarin	0,01
	lait	0,01
TOTAL		0,53

Comme le présente le schéma démographique Figure 38, ce système d'élevage permet une vente annuelle des réformes avec 0,1 mouton et 0,02 bouc âgé de 6 ans, de 4,3 brebis et 5,6 chèvres âgées de 4 ans correspondant à un flux de matière vers l'extérieur de 130kgMS de viande/an et un flux d'énergie brute de 2,3GJ. Il permet également la vente de 22,3 chevreaux et 32,5 agneaux âgés de 6 mois correspondant à un flux de 355kgMS de viande/an et un flux d'énergie brute de 6,3GJ. A titre indicatif ces valeurs ont été déterminées avec un poids vif des animaux de 80kg pour le mouton, 60kg pour le bouc, 60kg pour la brebis, 45kg pour la chèvre âgée et 30 et 20kg pour les agneaux et les chevreaux.

Concernant la production de déjection celle-ci a été estimée à 38kg/nuit correspondant à 8,3TMS, soit un flux d'énergie de 92GJ à l'année. Cette quantité a été estimée entre 35 et 40kg de fumier par les éleveurs et correspond à la quantité de fumier collectée dans le shed pendant une nuit. Le fumier est stocké en tas à proximité du shed. Une vente se réalise tous les 3 mois, payé 8000INR par un marchand qui poursuit la vente auprès des agriculteurs dans le Karnataka. Le fumier de petit ruminant est prisé pour fertiliser les vergers d'aréquier et les cultures de raisin, davantage présent dans l'état voisin. Concernant la quantité de fumier produite au

pâturage par le troupeau elle a été estimée à 0,6kgMS/j/adulte équivalent à une quantité de 16,4TMS et a un flux d'énergie de 182GJ pour un troupeau de 75 bêtes.

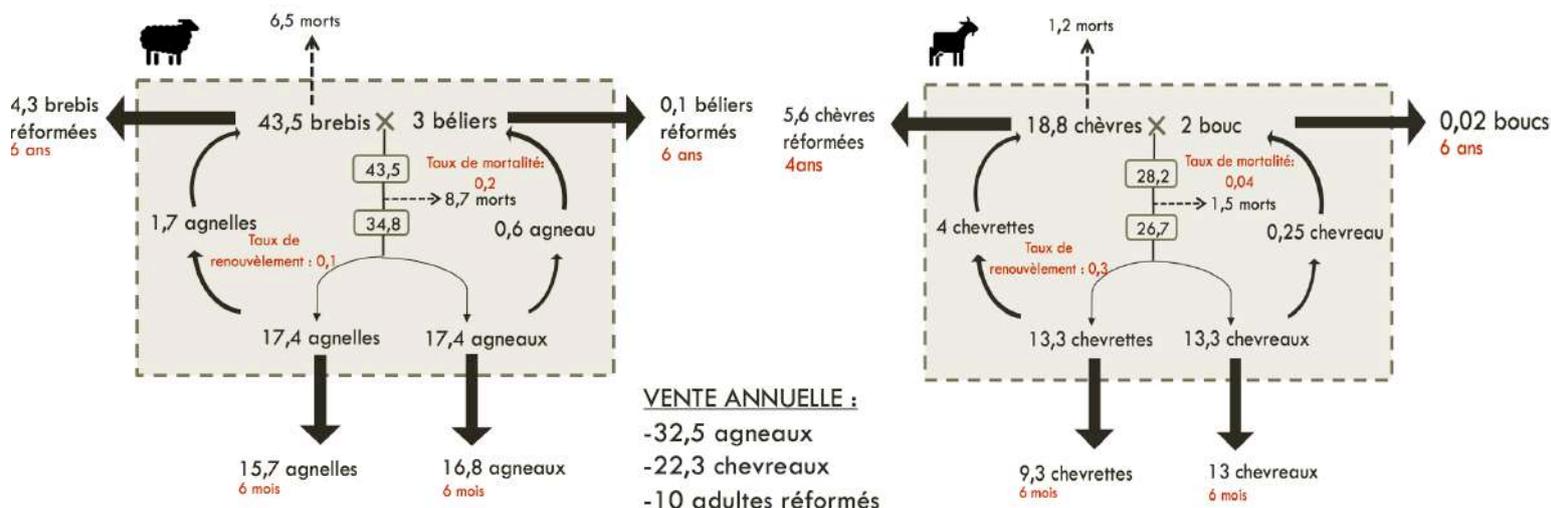


Figure 38-Schéma démographique du troupeau de petit ruminant

Le calendrier de travail présenté ci-dessous montre un travail de 497Hj correspondant à un flux d'énergie liée au travail de 6GJ. Le pâturage mobilise la présence du berger sur une journée de travail de 8h, soit 360Hj ramené à l'année. La collecte d'agasa a été comptée 15min de collecte et 10min de distribution, soit une quantité de travail de 4,7Hj réparti sur l'année. Il a été modélisé 15min de distribution des fourrages pour les petits par jour pour un total de 11,25Hj. L'administration des traitements médicaux a été modélisé avec une quantité de travail de 2,9Hj réparti sur 3 mois de l'année.

SP5 20 chèvres et 50 brebis	CALENDRIER DE TRAVAIL (ELEVAGE DE PETITS RUMINANTS)											
	Juin	Jul	Août	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai
Pâturage	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Alimentation des chevreaux/agneaux au shed	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
Collecte agasa pdt saison sèche	0,39									0,39	0,39	0,39
Collecte margousier, tamarin toute l'année	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60
Transport de la collecte	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85
Médecine	0,98			0,98			0,75			0,75		
Collecte du fumier	5,63	5,63	5,63	5,63	5,63	5,63	5,63	5,63	5,63	5,63	5,63	5,63
Transport fumier	ne dépend pas de l'exploitaïton											
Transport animaux	ne dépend pas de l'exploitaïton											
TOTAL (Hj)	42,38	41,01	41,01	41,99	41,01	41,01	41,76	41,01	41,01	42,15	41,40	41,40
Energie liée au travail (GJ)	5,86											

Figure 39-Calendarier de travail du système de production petit ruminant SP5

5- ELEVAGE DE POULET DE CHAIR SP6

Ce système d'élevage a été élaboré à partir de trois entretiens. Il s'agit d'un type d'élevage souvent associé à des systèmes de culture et à d'autres formes d'élevage. Il est courant de constater que ce type d'élevage est intégré à des exploitations agricoles capitalistes qui couvrent des dizaines d'hectares de terrain et emploient de nombreuses personnes au quotidien. L'un des entretiens a été mené avec le responsable de la production, employé par le propriétaire qui réside sur place et qui supervise deux employés permanents.

En ce qui concerne l'élevage de poulets de chair, celui-ci permet une production annuelle de 10 000 poulets par lot, avec un total de 4 lots par an. Sur une année, il est même possible de réaliser jusqu'à 6 lots. En tenant compte d'un poids carcasse équivalent à 70% du poids vif, la production annuelle de poulet atteint 22,6 TMS. Par ailleurs, cet élevage génère également une production d'un mélange litière et de fientes de l'ordre de 58TMS.

La conduite de l'élevage est dictée par la compagnie Sneha et est suivi dans un cahier de conduite dans lequel figure la catégorie (aliment, santé, entretien), la nature des intrants utilisés, leur quantité et la date d'utilisation. Le chef de production suit la conduite dictée dans le calendrier. L'entreprise Sneha fournit les poussins, l'alimentation, les conseils et les soins à l'éleveur. L'éleveur doit acheter la litière (son de riz), le charbon pour chauffer le hangar et les produits à nettoyer entre chaque lot. Il doit également entretenir le hangar, le matériel (mangeoires, abreuvoirs) et payer les coûts élevés de l'électricité. La consommation d'électricité est liée au fonctionnement de la ventilation, de la lumière et du système automatisé qui permet de délivrer la nourriture et l'eau à l'élevage. Ainsi il a été modélisé une ventilation activée de 9:00 à 18:00, une lumière allumée de 18:30 à 7:00 durant la nuit. Cela correspond à une consommation moyenne annuelle de 12070kWh.



Figure 40- Fin de production d'un lot de poulet de chair

La production de poulet dure 40 jours. Il faut 20 jours pour nettoyer, réinstaller et recevoir le prochain lot. L'éleveur reçoit les poussins à environ 50g. Après les 40 jours de production, les poulets atteignent un poids de 3,2kg. L'alimentation est réalisée avec un premier concentré, le pre-starter durant les 10 premiers jours de la production. Il s'agit d'un aliment à base de maïs sous forme de farine. Les ingrédients ne sont pas référencés sur les sacs Sneeha. Pour un lot de 10000 poulet la quantité annuelle requise est de 5,3T en comptant 530kg de pre starter consommé par jour, soit 76 sacs de 70kg.

L'alimentation évolue avec la croissance des poulets. A partir du 11^{ème} jour les poulets sont nourris avec un autre concentré « starter » durant 10 jours. Il a été modélisé une consommation de 98 sacs de 70kg soit une quantité consommée de 1,3T/j. Enfin le dernier concentré fournit « finisher » est donné durant les 20 derniers jours de la production. La consommation est de 437 sacs (poids 70kg) correspondant à une quantité de 2,2T par jour.

Au cours de la production, l'élevage est également complémenté. Cette complémentation a été modélisé avec l'apport de 5 types de compléments alimentaire à base de vitamines, de minéraux. La santé de l'élevage consiste en l'administration de 4 vaccins. Concernant le bâtiment d'élevage, il a été estimé une surface de 10000m² pour une densité de peuplement de 10000poulets ce qui équivaut à une surface par oiseau de 0,5 à 1m² avec prise en compte de l'espace pour les mangeoires, les abreuvoirs, les zones de stockage et de ventilation. Pour le bien-être des poulets, une rangée d'une vingtaine d'arbres, comprenant des Pongamia, des cocotiers et des Copperpods, est plantée entre les allées pour fournir de l'ombre à l'élevage. Les palmes de cocotier sont utilisées pour couvrir les bâtiments d'élevage chaque année.

En ce qui concerne la conduite de cet élevage dont le calendrier de travail est présenté Figure 41, celle-ci nécessite un travail quotidien et constant sans connaître de pics d'activité. Deux employés permanents sont responsables d'un total de 341 H_j par an, équivalent à une consommation d'énergie liée au travail de 2,1GJ pour les quatre lots de poulets de chair. Le calendrier de travail présenté ci-dessus correspond à un seul lot, dont la production s'étend du 23 mars au 1er mai. Les valeurs indiquées sont multipliées par quatre pour refléter la quantité de travail sur une année complète. Les principales tâches incluent l'alimentation qui nécessite 5 heures de travail par jour pendant 40 jours, soit un total de 200 heures par an. Le nettoyage, réalisé sur 20 jours, représentant 106 heures par an. Les traitements prennent 3 heures par traitement, soit 12 heures par an. La collecte de la litière et des fientes est effectuée après chaque cycle de production de 40 jours et nécessite deux journées de travail pour deux employés, soit 16 H_j réparties sur l'année. Les transports quotidiens des aliments et de la litière à la fin de la production sont estimés à 30 minutes par jour tout au long de l'année.

Operation	Calendrier de travail pour une production de 10000 poulets de chairs												
	Mars			Avril				Mai					
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Alimentation et soin quotidien				33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3				
Abreuvement				0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6				
Medecine				4,0	4,0	4,0							
Nettoyage et maintenance											53,0	53,0	
Collecte du fumier											8,0	8,0	
Transport des aliments et du fumier				0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
Transport des poulets													
TOTAL (Hj)	0,0	0,0	0,0	38,4	38,4	38,4	34,4	34,4	34,4	34,4	61,5	61,5	
	341,5												
Energie liée au travail (GJ)	2,1												

Figure 41-Calendrier de travail du système de production élevage de poulet de chair

En ce qui concerne le transport des poulets de chair après la production, la destination demeure incertaine. Une partie de la production peut être abattue à Anantapur (110 km), transformée et vendue sur le marché de Madakasira. Une autre partie peut être transportée vers les grandes villes portuaires comme Mumbai ou Chennai (915 km) pour être exportée vers des destinations internationales. Le transport en camion de deux lots à Anantapur et des deux autres lots à Chennai a été modélisé, avec une consommation moyenne de 0,25 litre de diesel par kilomètre, équivalant à une consommation de 512 litres par an.

1. ETUDE DES FLUX DE MATIERE ET D'ENERGIE ENTRE DEUX SYSTEMES D'ELEVAGES TRES CONTRASTES.

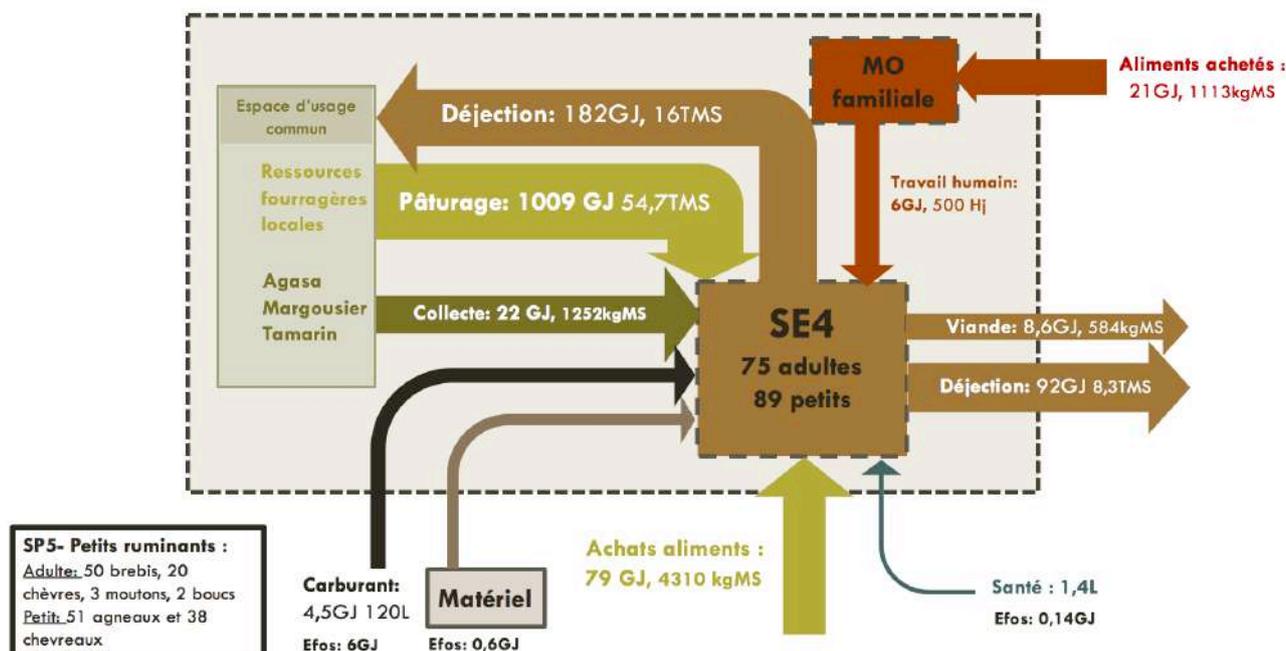


Figure 42-Evolution des flux de matière et d'énergie du système de production petit ruminant

En ce qui concerne l'élevage de petits ruminants, le troupeau se nourrit principalement de ressources fourragères locales et gratuites, générant ainsi un flux d'énergie brute de plus de 1000 GJ, suffisant pour couvrir les besoins alimentaires du troupeau. Cela présente un avantage significatif pour le berger, car il n'a pas besoin de recourir à des sources d'énergie externes pour nourrir ses animaux. De plus, cet élevage valorise les espaces communs non exploités ce qui peut être considéré comme un nouveau flux de matière et d'énergie vers une forme de salus. En parallèle, les déjections laissées dans les pâturages représentent également un nouveau flux de matière vers les terres agricoles des agriculteurs locaux, contribuant ainsi à la fertilisation de leurs terres. Ces flux peuvent être perçus comme des externalités positives, favorisant la durabilité de ce système d'élevage.

En ce qui concerne les flux internes, ils nous aident à comprendre comment l'énergie est utilisée pour soutenir les activités agricoles spécifiques. Le travail nécessaire pour la gestion de cet élevage est élevé, entraînant un flux d'énergie de 6 GJ. Il est intéressant de noter que la quantité d'énergie fossile consommée par le matériel et le carburant est équivalente à celle utilisée pour le travail. Cela contraste avec d'autres systèmes où la consommation d'énergie fossile est bien supérieure à celle due au travail. Par conséquent, ce système d'élevage présente une faible dépendance aux énergies fossiles, ce qui renforce sa durabilité.

En ce qui concerne les flux d'énergie sortants, la vente des animaux génère un flux d'énergie brute de 22 GJ destiné à alimenter la communauté musulmane locale. Cependant, ce système d'élevage génère également un flux sortant vers l'extérieur de la zone, grâce à la vente du fumier à un marchand local, notamment pour fertiliser les cultures de raisin et les plantations d'aréquier dans la région du Karnataka.

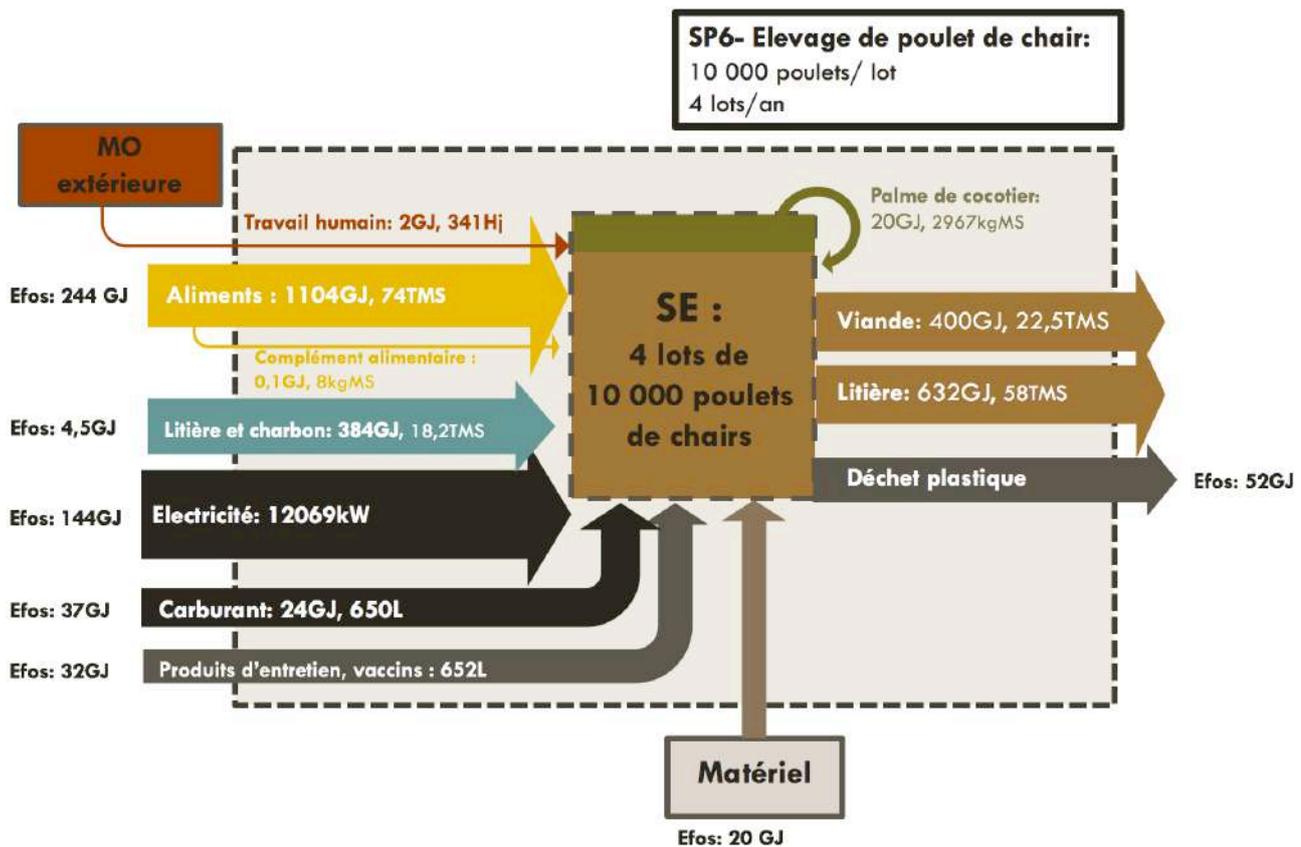


Figure 43- Représentation des flux de matière et d'énergie de l'élevage de poulet de chair

La modélisation du système d'élevage présenté ci-dessus révèle un contraste marqué par rapport à l'élevage de petits ruminants vu précédemment. En effet, ce système se distingue par des flux d'énergie entrants et sortants en provenance de l'extérieur, créant ainsi un schéma de flux très linéaire orienté vers l'extérieur. Les flux d'énergie fossile sont considérablement élevés, atteignant 489GJ, soit près de 70 fois plus élevés que ceux de l'élevage de petits ruminants précédemment étudié, qui se chiffraient à 7GJ. Cette disparité met en évidence la forte dépendance de ce système d'élevage à l'égard des sources d'énergie non renouvelables, notamment en ce qui concerne la consommation d'électricité, de concentré, de charbon, de carburant, de produits d'entretien et de vaccins. Le matériel utilisé, comprenant un bâtiment d'élevage équipé de systèmes d'alimentation automatisés comportant des centaines de mangeoires et d'abreuvoirs en plastique, contribue à l'augmentation du flux d'énergie fossile.

Ce système d'élevage présente un seul flux d'énergie interne, qui, bien que non négligeable, restes-en deçà des flux externes. Il totalise 90GJ d'énergie brute, principalement liés à l'utilisation des palmes de cocotier pour créer de l'ombrage dans l'élevage.

En ce qui concerne les flux d'énergie sortants, la production de viande est considérablement plus élevée par rapport au système d'élevage de petits ruminants précédent, atteignant 400 GJ destinés à la vente, tandis que la production de fiente mélangée à la litière atteint 632 GJ. Cette augmentation d'énergie pour la production de fiente et de litière s'explique par le taux de matière sèche estimé à 87%, alors qu'il est de 25% pour la viande et les os.

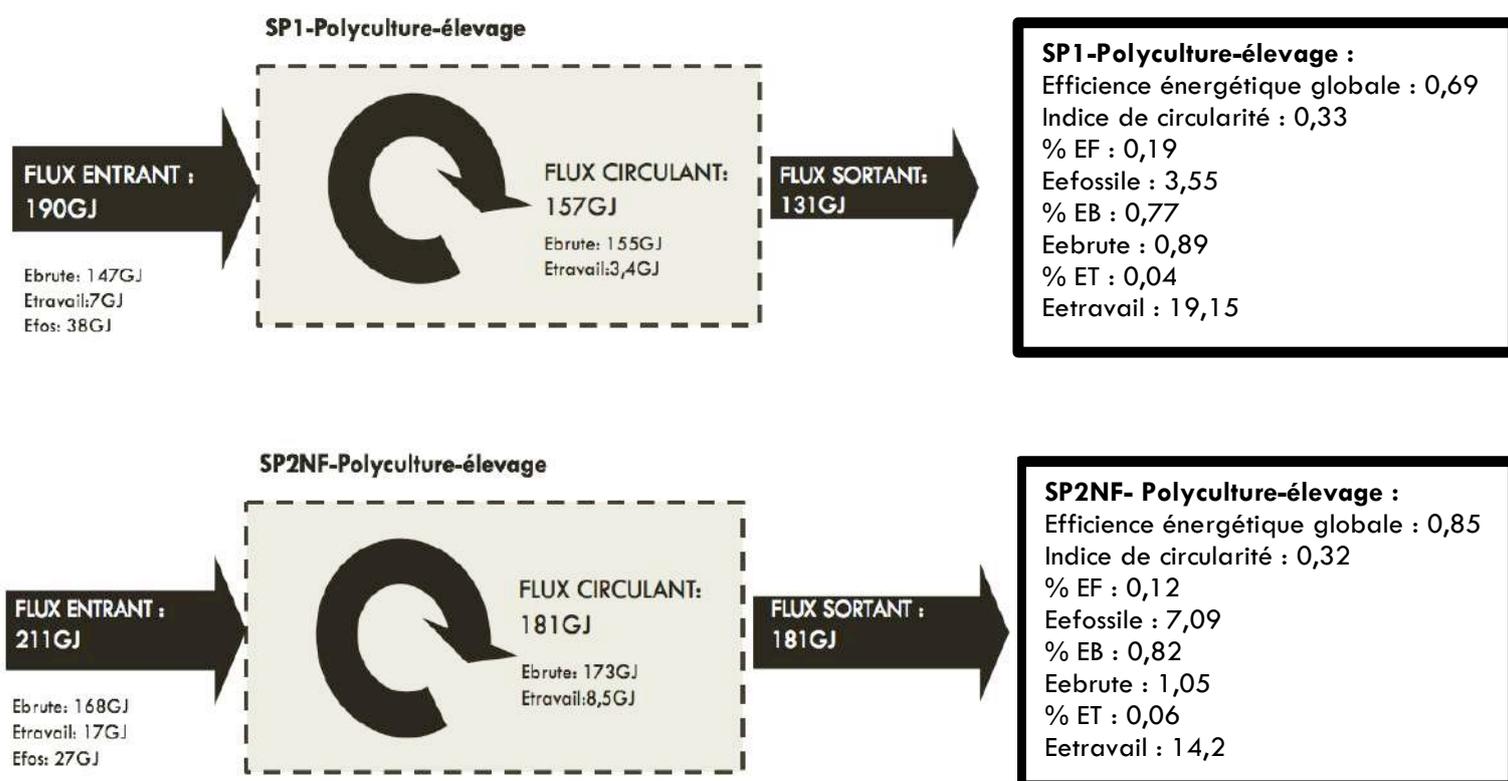
6- ETUDE DES INDICATEURS

Les flux entrant, sortant et circulant au sein des systèmes de production ont été quantifiés puis schématisés. Les flux d'énergie importés correspondent aux intrants énergétiques nécessaires à la production agricole. Ils peuvent être d'origine biologique (énergie brute de la biomasse), fossile (directe et indirecte) ou issus du travail humain et animal.

Les flux d'énergie brute circulants sont liés aux flux d'énergie brute entrant et sortant intraconsommés par les systèmes de culture et d'élevage et autoconsommés par la famille.

Les flux d'énergie liée au travail circulants sont liés à la main d'œuvre familiale.

1. EXPLOITATIONS EN POLY-CULTURE ELEVAJE.



Dans les deux cas, l'efficience globale est inférieure à 1, ce qui signifie qu'il y a une quantité d'intrants plus élevée que de produits. Il est à noter que l'efficience énergétique est meilleure pour SP2NF que pour SP1. Les flux circulants présentent des similitudes dans les deux cas, bien que légèrement plus élevés dans le cas de SP2NF. La part d'énergie prédominante parmi les flux circulants est l'énergie brute liée à l'herbe pâturée et à l'intraconsommation des produits issus des systèmes de culture. L'indice de circularité est similaire dans les deux cas.

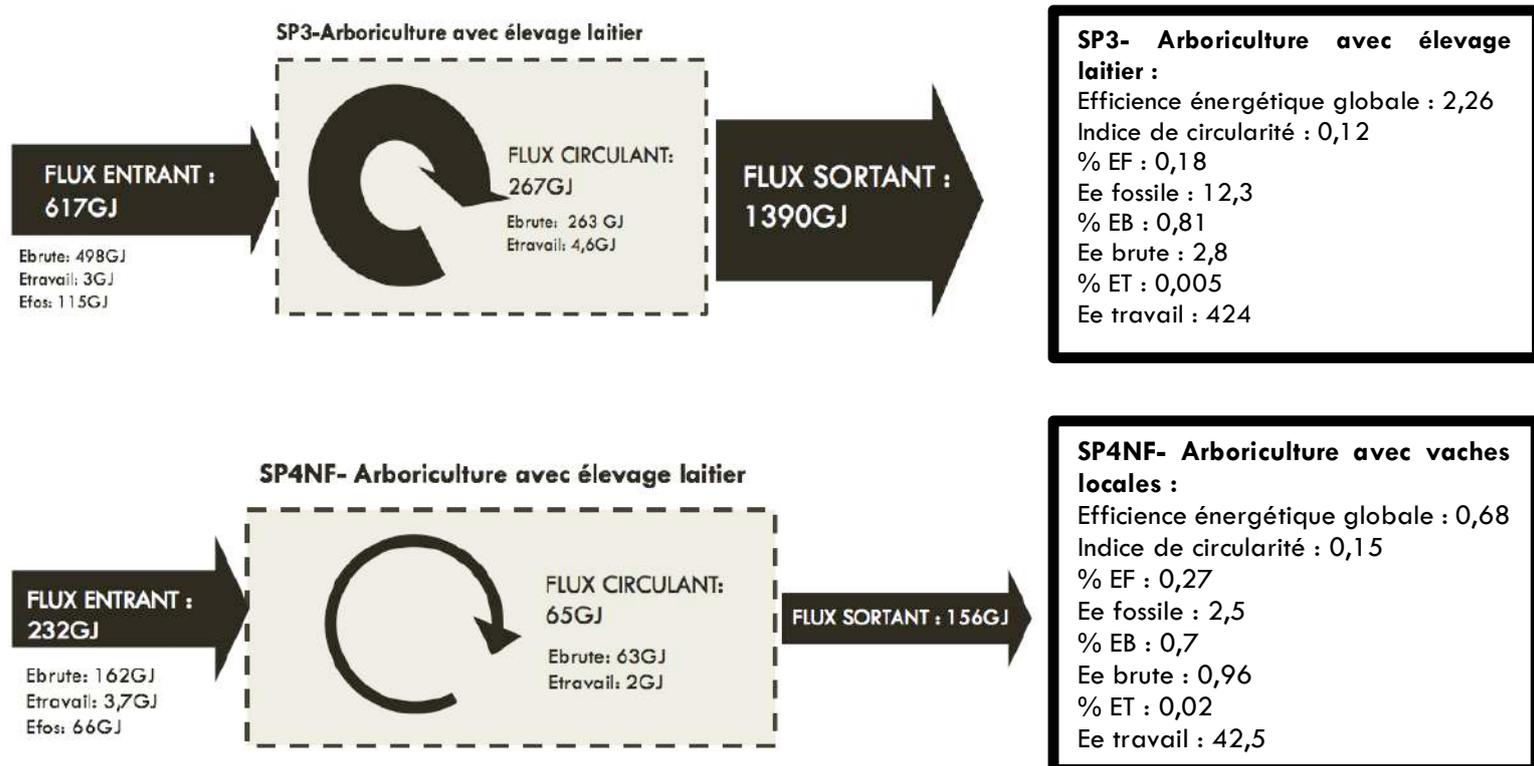
En ce qui concerne l'efficience énergétique fossile, le cas de SP2NF est meilleur en raison de sa consommation d'énergie fossile plus faible par rapport à SP1. Cela peut s'expliquer par l'absence d'utilisation d'engrais de synthèse et de fongicides, qui consomment de l'énergie fossile lors de leur fabrication et de leur transport. De plus, il y a une plus grande quantité d'intrants intraconsommés dans la modélisation de SP2NF, ce qui n'utilise pas d'énergie fossile

et contribue à son efficacité. De même, l'efficacité énergétique brute est meilleure dans le cas de SP2NF, avec une part plus importante de cette énergie parmi les autres systèmes de production.

En ce qui concerne l'efficacité énergétique liée au travail, l'indicateur est plus élevé pour SP1, qui a besoin de moins de main-d'œuvre que SP2NF. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, la confection des préparations demande plus de temps et mobilise plus de personnes pour SP2NF. Cette valeur plus faible pour SP2NF peut également être liée aux temps de transport entre le village et la parcelle pour le fumier ou entre la parcelle et le village pour les récoltes, qui sont plus fréquents et plus chronophages pour SP1NF car réalisés à l'aide d'une remorque tractée par des bœufs.

En résumé, dans les deux cas, l'énergie brute prédomine, avec une part importante attribuée à l'intraconsommation des fourrages pour l'alimentation des animaux, ainsi qu'à l'intraconsommation du fumier pour fertiliser les cultures. En ce qui concerne l'efficacité, les deux systèmes de production se comparent favorablement, bien que l'efficacité énergétique globale soit plus élevée pour SP2NF.

2. EXPLOITATIONS EN ARBORICULTURE, ELEVAGE LAITIER



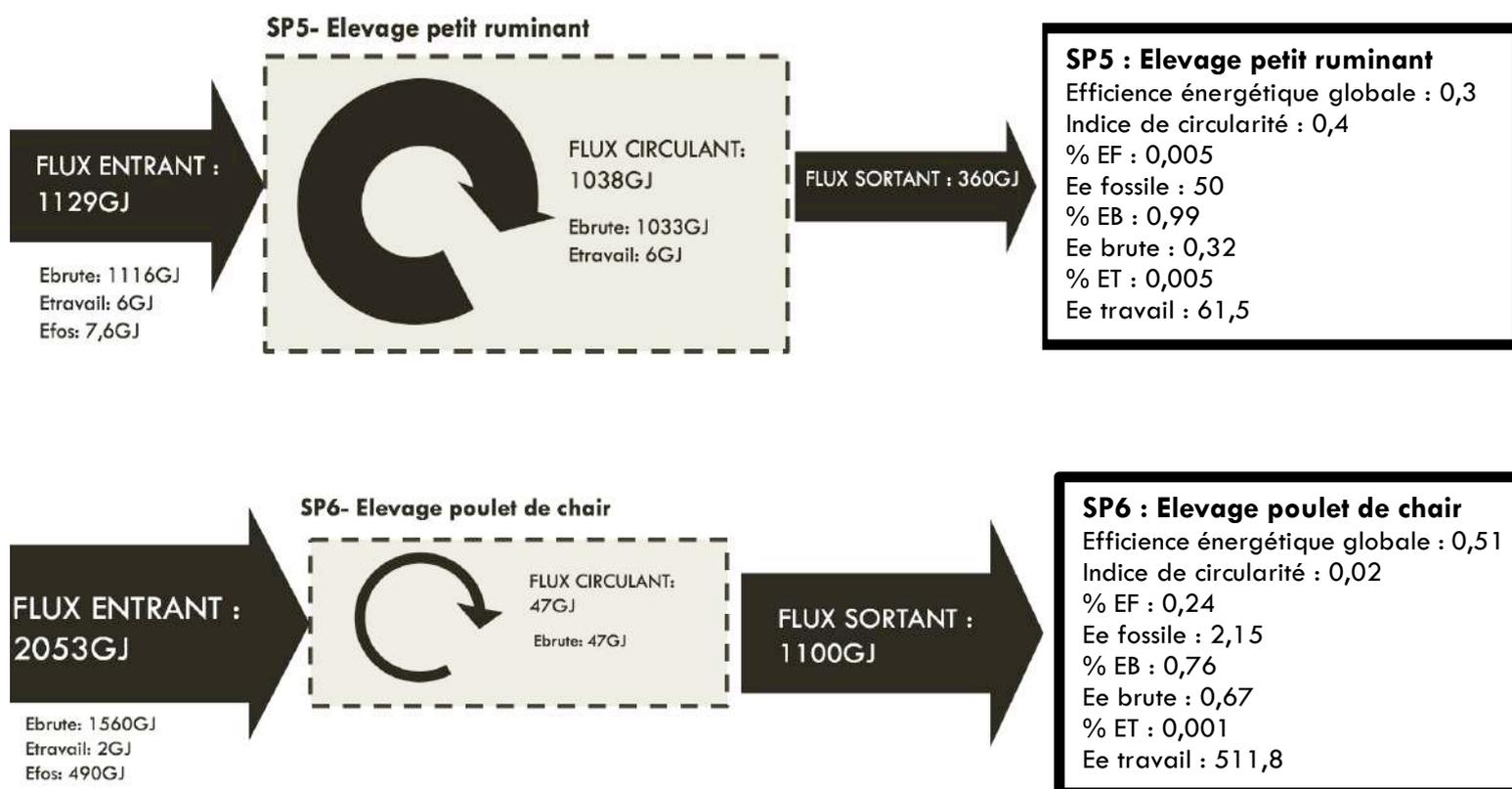
En résumé, on constate que l'efficacité énergétique globale est supérieure à 1 dans le cas de SP3, ce qui signifie que le flux d'énergie brute sortant est plus élevé que les flux d'énergies entrants. En effet, ce flux d'énergie entrante est 2 fois plus élevé et le flux d'énergie sortante plus de 8 fois plus comparé à SP4NF. A noter que l'indice de circularité est légèrement plus élevé dans le SP4NF. Dans les deux cas, les produits autoconsommés constituent une part importante des flux circulants, avec l'autoconsommation de divers produits issus de SC plantation d'aréquier et du lait produit par les vaches.

En ce qui concerne l'efficacité énergétique fossile, SP4NF présente une efficacité bien plus faible. Cela peut s'expliquer par la consommation de carburant nécessaire pour extraire le sol du tank, qui est beaucoup plus importante (16GJ) comparé à SP3 (2,6GJ). De plus, SP4NF a été modélisé avec une restitution au sol de la culture de sun hemp, ce qui entraîne une consommation de carburant supplémentaire avec les équipements mobilisés (débossailleuse, rotavator, etc.) Cette tendance se confirme également pour l'efficacité énergétique brute, qui est également plus élevée pour SP3 en raison de la plus grande quantité de produits bruts exportés par rapport à SP4NF.

En ce qui concerne l'efficacité énergétique liée au travail, SP4NF affiche encore une performance nettement inférieure. En effet, les flux d'énergie liée au travail sont légèrement plus élevés pour SP3 (7,8GJ contre 5,7GJ pour SP4NF), ce qui est surprenant étant donné que la surface de SP3 est deux fois plus grande.

En conclusion, il est clair qu'il existe une nette différence en termes d'efficacité énergétique entre ces deux systèmes de production, avec SP3 qui est plus efficace que SP4NF à cet égard. Cette tendance se vérifie également pour les efficacités énergétiques spécifiques.

3. ELEVAGES DE PETIT RUMINANT ET DE POULET DE CHAIR



L'efficacité énergétique globale est nettement plus faible pour l'élevage de petit ruminant par rapport à l'élevage de poulet de chair. En effet, l'énergie produite rapportée à l'énergie entrante est bien moindre pour SP5, avec seulement 13 GJ de viande produite par an et 92 GJ de fumier vendu, comparés aux 400 GJ de viande de poulet et aux 632 GJ de litière + fiente produite sur une année pour l'élevage de poulet de chair. Il convient également de noter que 52 GJ d'énergie fossile sont consommés avec les déchets plastiques.

Cette différence importante s'explique par les pratiques d'alimentation très différentes entre ces deux types d'élevage, ce qui se traduit par un écart significatif entre leurs indices de circularité. En effet, SP6 est un élevage standardisé dont la plupart des intrants proviennent de l'extérieur. Les palmes de cocotiers sont les seuls produits intraconsommés au sein de SP6, représentant un flux d'énergie brute interne de 47 GJ, tandis que l'élevage de petit ruminant nécessite une quantité bien plus importante d'intrants internes, atteignant 1038 GJ.

L'efficacité énergétique fossile est également plus faible pour l'élevage de poulet de chair, en grande partie due à la dépendance aux concentrés, au carburant, etc.

En ce qui concerne l'efficacité énergétique brute, elle est plus faible pour l'élevage de petit ruminant en raison de la quantité inférieure de produits exportés par rapport aux intrants. Il est à noter que les intrants de SP5 sont à 99 % constitués d'énergie brute, ce qui explique une meilleure efficacité énergétique fossile.

L'efficacité énergétique liée au travail est faible pour l'élevage de poulet de chair, étant le plus élevé parmi les systèmes modélisés jusqu'à présent. La part d'énergie liée au travail importée pour SP5 est trois fois supérieure à celle de SP6, avec respectivement 6 et 2 GJ par an.

En conclusion, les résultats montrent des différences marquées entre ces deux systèmes d'élevage, avec une meilleure efficacité énergétique globale et du travail pour SP6, mais une efficacité énergétique fossile très faible, un élément important des indicateurs environnementaux.

7- BILAN SUR LA PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE DES SYSTEMES DE PRODUCTION

L'étude des indicateurs est importante dans l'évaluation de la performance d'un système de production, tant du point de vue énergétique qu'environnemental. Par exemple l'efficacité énergétique fossile permet de quantifier la dépendance d'un système aux énergies non renouvelables. Une réduction de cette dépendance peut offrir une protection contre les fluctuations des prix de l'énergie, réduisant ainsi la vulnérabilité du système. De plus, les énergies fossiles sont une source majeure d'émissions de gaz à effet de serre, qui sont responsables du changement climatique. En plus de contribuer aux émissions de gaz à effet de serre, une réduction de la consommation d'énergies fossiles contribue également à limiter la pollution de l'air, de l'eau et des sols associée à leur extraction, leur production et leur combustion. Ainsi, l'évaluation de l'efficacité énergétique fossile permet d'identifier les pratiques agricoles ou les comportements du système qui contribuent le plus aux émissions de gaz à effet de serre et d'éventuellement prendre des mesures pour les réduire.

Suite à l'analyse des indicateurs par paire de systèmes de production, voici une série de graphiques permettant de comparer les différents systèmes de production entre eux.

1. EFFICACITE ENERGETIQUE GLOBALE ET INDICE DE CIRCULARITE

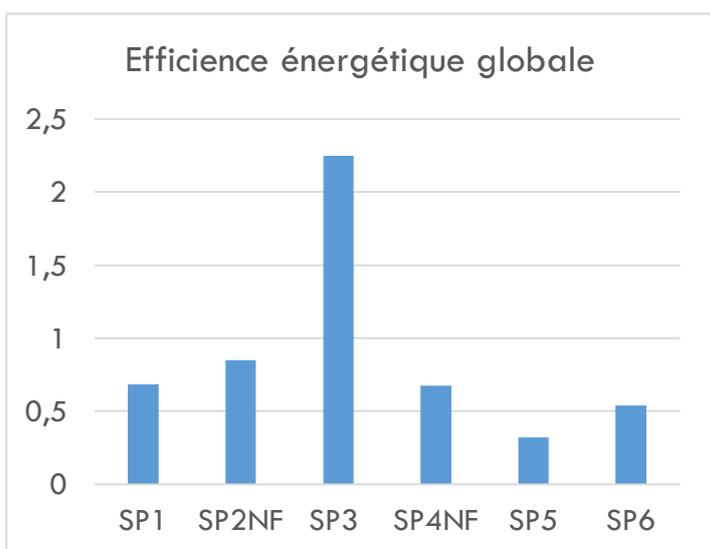


Figure 45- Représentation graphique des efficacités énergétiques globales des SP

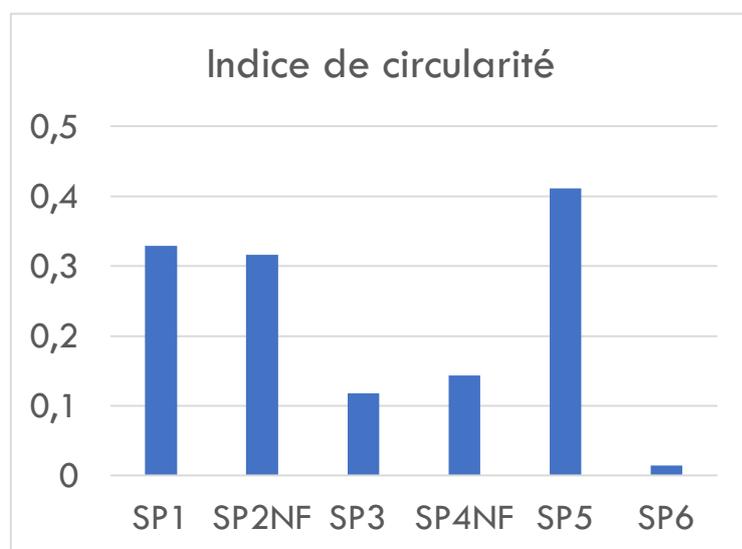


Figure 44- Représentation graphique des indices de circularité des SP

Les systèmes de production les plus efficaces ne semblent pas être exclusivement liés à un mode de conduite conventionnelle ou en natural farming. Une efficacité énergétique globale supérieure à 1 indique que le système produit davantage de produit par rapport à la quantité d'énergie qu'il consomme, ce qui est un indicateur positif de son efficacité énergétique. Ainsi SP3 serait le système de production le plus efficace énergétiquement et SP5 le moins. Cependant, il convient de noter que les valeurs de cet indicateur sont discutables car il ne prend pas en compte l'énergie fossile liée à la fabrication des intrants. En effet l'élevage de petit ruminant consomme principalement des ressources fourragères locales, considérées comme internes au système de production. Il s'agit donc d'une consommation locale et gratuite ce qui

le rend performant sur le plan environnemental de ce sens. SP2NF est plus efficient énergétiquement que SP4NF.

Concernant l'indice de circularité, celui de SP5 est le plus élevé. Cela fait sens avec ce qui a été indiqué ci-dessus avec la consommation de ressources fourragères essentiellement issus de collecte et de pâturage qui ont été modélisé comme étant des flux internes au SP.

L'élevage de poulet de chair (SP6) dont les intrants sont principalement issus de l'extérieur se voit attribuer la valeur la plus faible. L'indice de circularité est plus élevé dans le cas de SP1 comparé à SP3. Cette différence s'explique par le fait que l'intégralité de l'alimentation des élevages de SP1 provient des systèmes de cultures, des collectes ou du pâturage. L'alimentation des vaches HF de SE2 est constituée de busa qui est un intrant extérieur à l'exploitation.

2. PART DES ENERGIES IMPORTEES ET LEUR EFFICIENCE

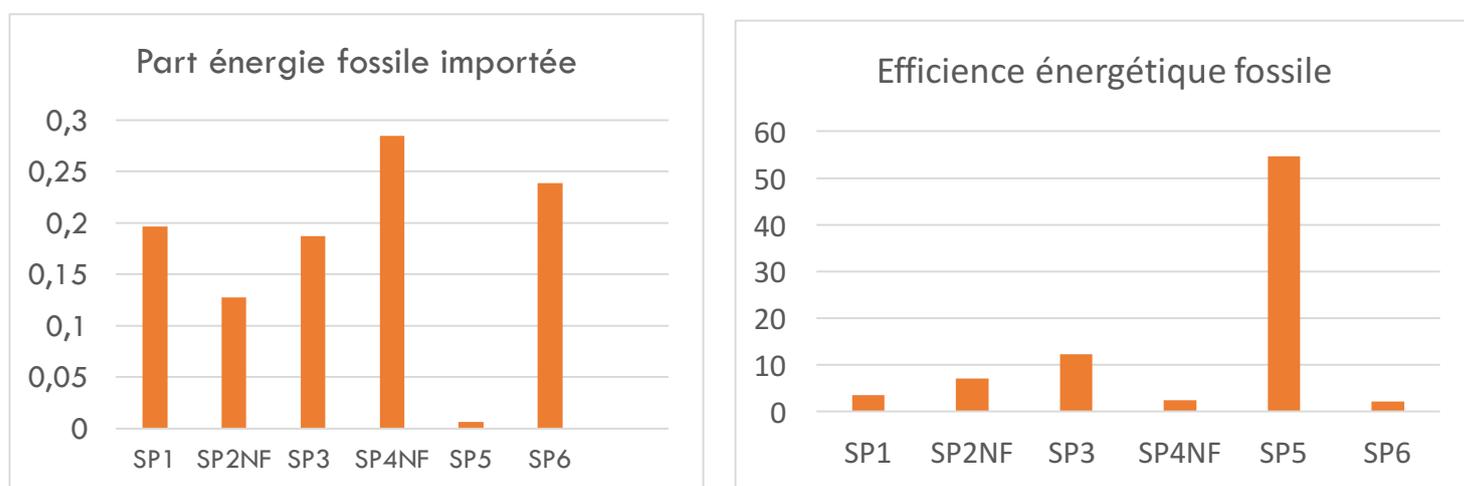


Figure 46- Représentations graphiques de la part des énergies fossiles importées (à gauche) et de l'efficacité énergétique fossile des SP (à droite)

Les systèmes de production en natural farming ne se révèlent pas les plus performants en termes d'utilisation de l'énergie fossile. L'efficacité énergétique la plus élevée est clairement observée dans le cas de l'élevage de petits ruminants, ce qui témoigne de son impact environnemental positif. Ensuite, le SP3, à savoir la plantation d'aréquier gérée de manière conventionnelle, se classe en deuxième position en termes d'efficacité énergétique. En revanche, les moins performants sont la plantation d'aréquier conduite en natural farming et le système de production d'élevage de poulets de chair. Comme l'indique le graphique de gauche, il s'agit des systèmes de production les plus consommateurs d'énergie fossile.

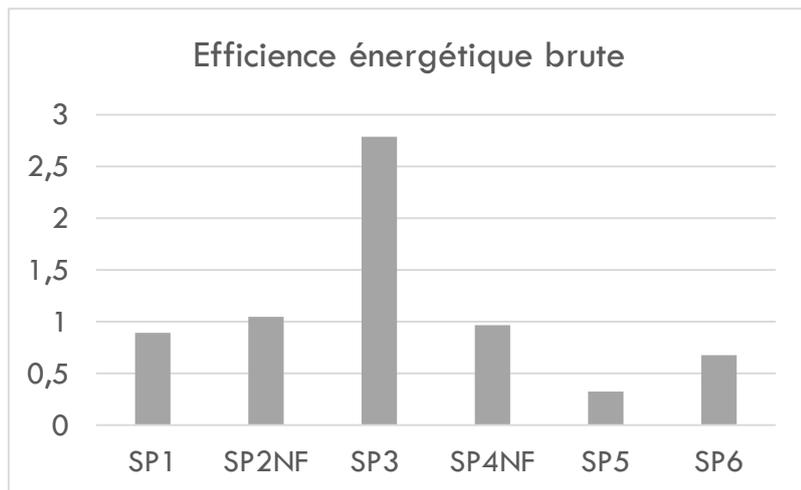
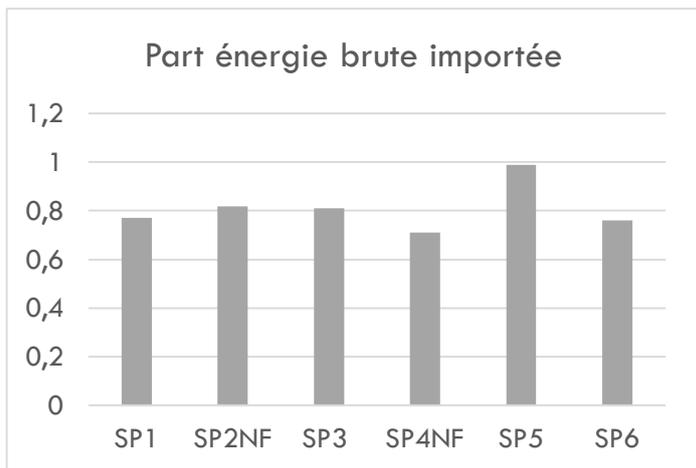


Figure 47- Représentations graphiques de la part des énergies brute importée (à gauche) et de l'efficacité énergétique brute des SP (à droite)

En comparaison des autres formes d'énergie, l'énergie brute est la part d'énergie la plus consommée parmi les intrants. La part d'énergie brute des systèmes de production est relativement homogène, proche de 80%. Les conclusions de ce graphique sont les mêmes que celles liées au graphique de l'efficacité énergétique globale avec SP3 le plus efficace et SP5 le moins efficace.

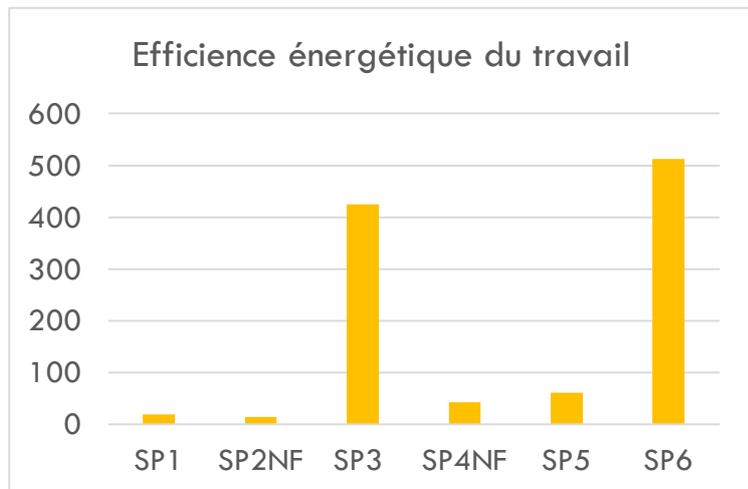
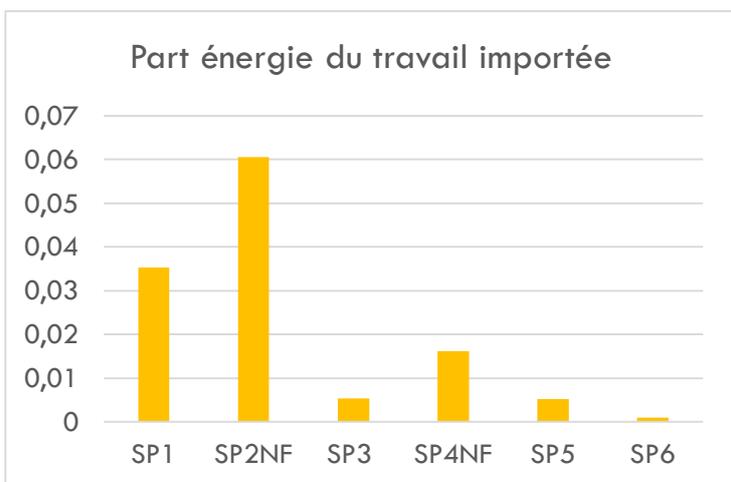


Figure 48- Représentations graphiques de la part des énergies du travail importée (à gauche) et de l'efficacité énergétique du travail (à droite)

Il n'est pas surprenant de constater que les systèmes de production les plus économes en termes d'utilisation de la main-d'œuvre sont les systèmes de production conventionnels, à savoir SP3 et SP6. Cependant, il est intéressant de noter que les systèmes de production considérés comme ayant de meilleures performances environnementales en raison de leur bonne efficacité énergétique fossile (SP5, SP2NF, SP3) sont également ceux qui demandent davantage de main d'œuvre.

En conclusion de cette partie un système de notation a été réalisé afin de classer les systèmes de production par rapport aux indicateurs analysés précédemment. Ce système fonctionne comme suit : parmi les cinq indicateurs, le système de production le mieux classé pour un indicateur obtient 5 points, et ce nombre diminue en fonction du rang du classement. Ainsi, chaque système de production peut obtenir un score maximal de 25 points au total. La moyenne calculée est de 17,5. Cela permet de classer les systèmes de production en fonction de leurs performances énergétiques et environnementales comme présenté Figure 49. Plus le score d'un système se rapproche de 25, plus il est performant selon ces critères d'évaluation.

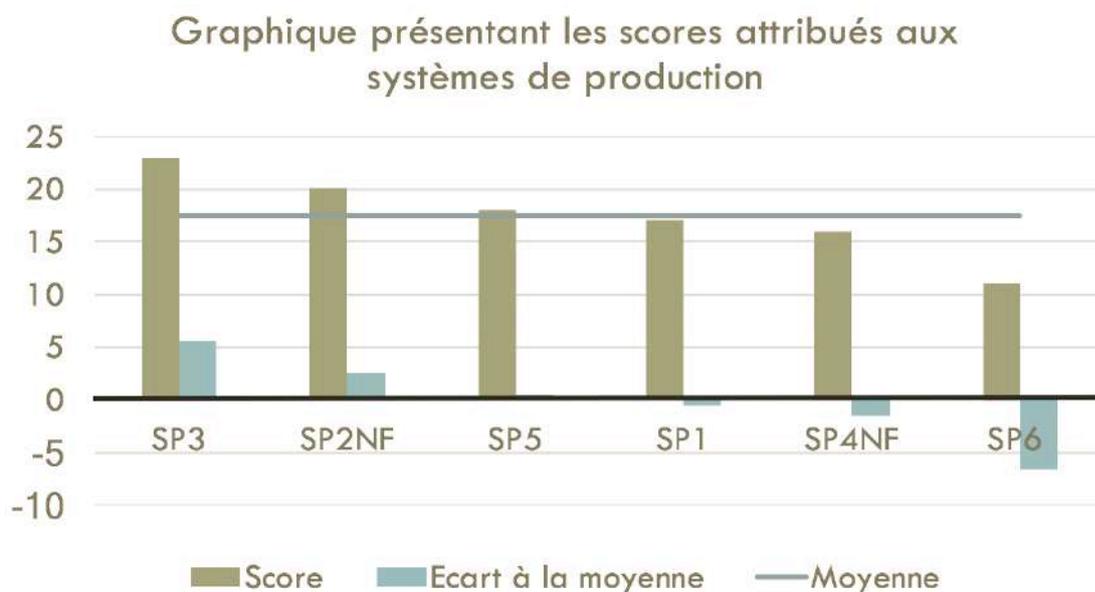


Figure 49-Présentation de la classification des systèmes de production en fonction de leur performance environnementale et énergétique

Les résultats présentés sur le graphique ci-dessous indiquent que le système le plus performant en fonction des indicateurs étudiés est SP3 avec 23 points, suivi de près par SP2NF avec 20 points, SP5 avec 18 points, SP1 avec 17 points, SP4NF avec 16 points et enfin SP6 avec 11 points. Il est important de noter un écart significatif par rapport à la moyenne entre les deux premiers et les deux derniers systèmes.

IV. DISCUSSION

1- LES LIMITES DE LA MODELISATION

La modélisation de ces différents systèmes de production est un processus complexe dans la mesure où il faut être le plus représentative possible des réalités sur le terrain. Il s'agit d'un travail de réflexion sur la manière de modéliser chaque pratique avec la nature et les quantités d'intrants et de produits nécessaires. Parfois, un manque de données ou des données collectés non fiables conduit à l'utilisation de données extérieures. Ça été le cas pour la composition de la busa des vaches laitières, reprise d'une étude réalisée à Anantapur. De même, les coefficients énergétiques pour les bâtiments d'élevage de poulets et les aliments concentrés ont été déterminés en fonction de données européennes plutôt qu'indiennes.

De plus, la modélisation rend inévitable le fait de simplifier et il est important de prendre en considération cela. En effet les systèmes de production modélisés sont la simplification de diverses exploitations agricoles, chacune ayant ses propres pratiques distinctes. Par exemple, il a été choisi de représenter des systèmes en natural farming conforme au modèle instauré. Cependant il peut y avoir une hybridation des pratiques natural farming avec les pratiques conventionnelles encore dominant.

2- ETAT DES LIEUX DES DYNAMIQUES AGRICOLES SUR LE CANTON

PROGRESSION DES SYSTEMES PLUS OUVERTS A L'EXTERIEUR AVEC DES ELEVAGES ET DES CULTURES A VOCATION COMMERCIALE.

Dans le canton, les agriculteurs sont passés d'une pratique de cultures traditionnelles incluant l'arachide, le riz, le maïs et le millet à de nouveaux systèmes de culture et d'élevage rattachée à des filières intégrées tel qu'il a été modélisé avec l'élevage de poulets de chair, ou à l'implantation de vergers modélisé par la plantation d'aréquier. L'expansion de ces nouveaux systèmes de culture et d'élevage tourné vers l'extérieur a entraîné une modification significative des flux de matières et d'énergie. En effet, ces cultures et ces élevages requièrent davantage d'intrants extérieurs à la ferme et génèrent des produits destinés à l'exportation hors de la zone d'étude. L'analyse des indicateurs révèle que cette expansion des nouveaux systèmes associée peut-être sujet à une régression des performances en termes d'efficacité énergétique et environnementale. Cette tendance n'est pas applicable à tous les systèmes, en effet, le système modélisé le plus performant est une plantation d'aréquier modélisé avec diverses associations, notamment avec l'agasa, présentant des caractéristiques agroécologiques et des éléments d'agroforesterie. Il convient de noter que la modélisation des plantations d'aréquier suscite des controverses, notamment en ce qui concerne leur impact sur la santé et leur utilisation intensive de l'eau, bien que ces aspects ne fassent pas l'objet de cette étude.

PROGRESSION DES CULTURES FOURRAGERES ET CONSEQUENCE SUR LA CONDUITE DE L'ELEVAGE

Les cultures pérennes destinées à l'alimentation animale sont de plus en plus répandues dans la zone d'étude. Ces pratiques ont apporté des changements aux méthodes traditionnelles, en rapprochant les vaches des fourrages sur les parcelles plutôt que d'apporter les fourrages jusqu'aux animaux au village. Par conséquent, elles ont eu un impact sur la gestion des élevages

dans la région. De plus, on observe un accroissement des pratiques consistant à laisser les animaux paître sur les parcelles après la récolte. Ces évolutions sont clairement visibles dans l'élevage de petits ruminants du canton, qui a montré des performances énergétiques et environnementales positives.

L'expansion des cultures fourragères au sein des systèmes se traduit par une augmentation des flux de matières et d'énergie utilisés pour l'alimentation des animaux, ce qui peut contribuer à réduire la dépendance aux intrants extérieurs. Les rations traditionnelles des vaches et des petits ruminants, composés principalement de fourrage d'arachide et de paille de céréale, ont évolué vers des rations plus riches en fourrage vert, notamment à base de napier et d'agasa.

LE NATURAL FARMING FACE A D'AUTRES PRATIQUES AGROECOLOGIQUES

Une des conclusions du diagnostic agraire était de dire que la diffusion du natural farming ne pourrait pas s'adresser à tous les types de systèmes de production. En effet, le natural farming est davantage une alternative aux systèmes de culture irrigués et aux cultures pluviales en déclin, dont la rentabilité est remise en cause. Cependant le natural farming s'adresse également à des systèmes moins traditionnels comme les plantations d'aréquier. Il a été vu que ce système de production était parmi les moins performants sur le volet énergétique et environnemental.

Une des conclusions de ce mémoire est de dire que les pratiques du natural farming ne sont pas les seules pratiques agroécologique possible dans le canton. En effet, cette étude a permis de constater de bons indicateurs de circularité et d'efficacité énergétique globale dans d'autres systèmes de production, notamment ceux qui présentent beaucoup d'association de culture et ceux qui ont une bonne complémentarité élevage/culture comme ce qu'on peut retrouver dans SP1 et SP3 conventionnels. En effet certaines pratiques conventionnelles ont évolué avec des pratiques traditionnelles qui reposent parfois sur des principes agroécologiques. A titre d'exemple, les cultures fourragères irriguées (napier, agasa) et les plantations pérennes sont, pour la plupart, associées à des arbres fruitiers ou fourragers souvent de la famille des légumineuses (tamarins, agasa). Ainsi, les agriculteurs peuvent tirer davantage de bénéfices qui peuvent se caractériser par des flux liés à l'autoconsommation, la construction d'abris, l'ombrage des vaches qui viennent pâturer proche des parcelles ou à la fertilisation des cultures. Il en est de même pour les élevages de petits ruminants qu'on retrouve beaucoup sur les terres non exploitées qui garantissent une certaine valorisation et conservation du milieu.

Finalement l'étude des flux de matière et d'énergie au sein de ces systèmes de production en natural farming a permis de rendre compte qu'il s'agissait de système avec une bonne performance environnementale dans le cas de SP2NF. Le diagnostic agraire a rendu compte également de son intérêt économique plus élevé par rapport au conventionnelle. Il serait donc viable et durable que ce système de production puisse se diffuser.

UNE EVOLUTION DU NATURAL FARMING

Un point à noter est que le natural farming, apparu il y a une dizaine d'année, semble également évoluer dans la zone. En effet il semblerait que certains systèmes conduit en natural farming s'orientent vers des modèles plus hybrides, moins orthodoxe qui se rapproche de modèle plus conventionnel, plus intensif en intrants extérieurs.

CONCLUSION

En conclusion, l'analyse des flux de matière et d'énergie de système de production agricole du canton de Madaksira a permis d'évaluer leur performance énergétique et environnementale dans le cadre d'une première évaluation environnementale. Il est à noter que le mode de conduite des systèmes qu'ils adoptent des pratiques du natural farming ou suivent des méthodes conventionnelles n'a pas montré d'influence significative sur leur performance énergétique et environnementale globale. Cette constatation suggère que d'autres pratiques agroécologiques peuvent également être viables dans la région.

Les systèmes de production les plus performants sur le plan énergétique et environnemental intègrent davantage leur propre système en utilisant principalement des intrants locaux, ce qui entraîne les plus faibles flux d'énergie fossile. En effet, ces systèmes favorisent la réduction de la dépendance aux intrants extérieurs coûteux, promeut une autonomie alimentaire, préserve les ressources locales et réduisent l'empreinte environnementale grâce à une diminution des besoins en transport. L'exemple de l'élevage de petit ruminant qui s'assimile à un retour d'élevage sur le saltus illustre cette approche en exploitation efficacement les ressources locales et gratuites. Le natural farming joue également un rôle clé à cet égard, comme le montre la modélisation du système de production en polyculture élevage, caractérisé par des flux d'énergie internes élevés entre les systèmes d'élevage, de culture et la famille. Par conséquent ces formes d'agricultures peuvent être considéré comme étant à la fois agroécologiques et durables dans le canton.

Au contraire les systèmes orientés vers l'extérieur, caractérisés par des flux d'énergie linéaires basés sur des intrants et des produits destinés à l'exportation ont présenté des efficacités énergétiques fossiles très faibles dû à leur importante consommation en énergie fossile. Par conséquent ils sont parmi les moins performant sur le volet environnemental et énergétique. Par contre ils ont l'avantage d'être très efficient vis-à-vis de l'énergie liée au travail.

Cependant il est important de noter que les performances varient en fonction des systèmes de production spécifiques et de leurs pratiques. Certains systèmes de natural farming ont montré de bons résultats tandis que d'autres ont encore des défis à relever pour atteindre une durabilité agroécologique optimale. Le natural farming peut être une proposition agroécologiquement durable, mais sa mise en œuvre efficace nécessite une compréhension approfondie du contexte local et une adaptation aux besoins spécifiques des agriculteurs.

Cette étude souligne également l'importance du rôle des autorités étatiques qui peuvent jouer un rôle significatif dans la promotion de la transition agroécologique, comme observé en Andhra Pradesh. Les gouvernements locaux ont un rôle clé à jouer pour encourager l'adoption de pratiques agroécologiques et sensibiliser la communauté agricole aux avantages de ces approches. Cette sensibilisation englobe également la qualité nutritionnelle des aliments produits et l'impact environnemental des pesticides, des aspects de plus en plus pris en compte par les agriculteurs dans le canton de Madakasira.

Références bibliographiques

- Agriculture Department Andhra Pradesh**, 2017. Area, yield and production [en ligne].
- Chauhan, S.K., Singh, A., Sikka, S.S., Tiwana, U.S., Sharma, R., Saralch, H.S.**, 2016. Yield and quality assessment of annual and perennial fodder intercrops in Leucaena alley farming system.
- Djavan Daoût**, 2019. *Diagnostic agraire dans le taluk de Channagiri*.
- Galán, E., Padró, R., Marco, I., Tello, E., Cunfer, G., Guzmán, G.I., González De Molina, M., Krausmann, F., Gingrich, S., Sacristán, V., Moreno-Delgado, D.**, 2016. Widening the analysis of Energy Return on Investment (EROI) in agro-ecosystems: Socio-ecological transitions to industrialized farm systems (the Vallès County, Catalonia, c.1860 and 1999). *Ecological Modelling* 336, 13-25.
- Guide des valeurs Dia'terre**, 2011.
- Guzmán, G.I., Alonso, A.M.**, 2008. A comparison of energy use in conventional and organic olive oil production in Spain. *Agricultural Systems* 98 (3), 167-176.
- Guzmán-Luna, P., Gerbens-Leenes, P.W., Vaca-Jiménez, S.D.**, 2021. The water, energy, and land footprint of tilapia aquaculture in Mexico, a comparison of the footprints of fish and meat. *Resources, Conservation and Recycling* 165, 105224.
- Hiblot-Lhoste, T., Nautré, L.**, 2022. Natural farming, the dynamic of a new opportunity in an evolving agrarian system.
- K. Singhal, Madhu Mohini, Arvind K Jha, Prabhat K. Gupta**, 2015. Methane emission estimates from enteric fermentation in Indian livestock: Dry matter intake approach.
- Keilling, J., Casalis, J.**, 1952. La tendance des laits à cailler. Recherches des causes et des remèdes. *Le Lait* 32 (318), 486-489.
- Natasha Caumartin**, 2017. *Evaluation des consommations d'énergie fossile et des émissions de gaz à effet de serre de systèmes laitiers contrastés en Inde*.
- O.R. Overman, W.L. Gaines**, 1933. *MILK-ENERGY FORMULAS FOR VARIOUS BREEDS OF CATTLE*.
- Rythu Sadhikara Samstha**, 2021. *Andhra Pradesh Community managed Natural Farming (APCNF)*.
- Singh, Mittal**, 1992. *Energy in production agriculture. New Delhi: Mittal Publications*.
- Vigne, M.**, 2012. Flux d'énergie dans des systèmes d'élevage laitier contrastés - élaboration d'indicateurs et analyse de la diversité inter et intra-territoire.

ANNEXE

- Annexe 1-Coefficient pour l'énergie brute
- Annexe 2-Coefficients pour l'énergie fossile
- Annexe 3-Détail des intrants des préparations ZBNF de SP2NF
- Annexe 4-Détail des intrants par catégorie et besoin en eau des préparations pour SP2NF
- Annexe 5-Détail des intrants des préparations de SP4NF
- Annexe 6-Détail des intrants par catégorie et besoin en eau des préparations pour SP4NF
- Annexe 7-Rendement des cultures pour SP2NF
- Annexe 8-Rendement de cultures pour SP1
- Annexe 9-Rendement des cultures pour SP3
- Annexe 10-Rendement des cultures pour SP4NF
- Annexe 11-Détail des calculs de la consommation en énergie fossile des intrants pour SP6
- Annexe 12-détail des calculs de la ration pour SP6
- Annexe 13-Analyse de sol
- Annexe 14-Schéma des flux détaillés de SP4NF
- Annexe 15-Schéma des flux détaillés de SP3
- Annexe 16-Schéma des flux détaillés de SP1
- Annexe 17-Schéma des flux détaillés de SP2NF
- Annexe 18-Schéma des flux détaillés de SP5

Annexe 1 Coefficients pour l'énergie brute

Type de flux	Flux	Unité	Teneur en matière sèche	Coefficient énergétique brutes (MJ/unité)	Référence
Grains	Arachide	kgMS	0,93	25,90	Feedipedia
	Millet	kgMS	0,90	19,10	Feedipedia
	Pois d'angole	kgMS	0,89	18,70	Feedipedia
	Féverole	kgMS	0,87	18,70	Feedipedia
	Ricin	kgMS	0,95	30,40	Feedipedia
	Niébé	kgMS	0,90	18,70	Feedipedia
	Marigold	kgMS	0,80	15,00	Feedipedia
	Riz poli	kgMS	0,89	18,00	Feedipedia
	Légumes	kgMS	0,10	2,00	Feedipedia
	Mais grains	kgMS	0,87	18,70	Feedipedia
	Sorgho fourager (grains)	kgMS	0,87	18,70	Feedipedia
Résidus	Fourrage d'arachide	kgMS	0,37	17,8	Feedipedia
	Paille de millet	kgMS	0,9	18	Feedipedia
	Fourrage légumineuse	kgMS	0,32	19,7	Feedipedia
	Paille de riz	kgMS	0,92	16,3	Feedipedia
	Balles+son	kgMS	0,87	18,10	Feedipedia
	Paille de maïs	kgMS	0,91	18,5	Feedipedia
	Epis dégrainé	kgMS	0,93	18,2	Feedipedia
Sorgho fourager (fourrage)	kgMS	0,37	17,6	Feedipedia	
Collecte	Agasa	kgMS	0,30	19,00	Feedipedia leucaena leucocephala, partie aérienne, frais
	Margousier	kgMS	0,33	17,60	Feedipedia Azadirachta indica, feuilles frais
	Feuilles de mangiers	kgMS	0,34	17,90	Feedipedia
Condiment	Ail	kgMS	0,3	17	Feedipedia
	Huile	kgMS	1	37	Feedipedia
	Tamarin	kgMS	0,7	18,8	Feedipedia
	Epices	kgMS	0,9	?	Feedipedia
	Sucre	kgMS	0,9	17	Feedipedia
	Thé	kgMS	0,9	1,8	Feedipedia
Pâtture	Panicum antidotale	kgMS	0,29	18,1	Feedipedia
	Cenchrus ciliaris (Buffel grass)	kgMS	0,3	18,3	Feedipedia
	Cynodon dactylon (herbes de bermudes)	kgMS	0,31	18	Feedipedia
	Desmanthus virgatus (luzerne des haies)	kgMS	0,35	19,3	Feedipedia
	Vicia villosa (vesce velue)	kgMS	0,2	18,5	Feedipedia
Produits animaux	Viande petit ruminant	kgMS	0,3	17,70	Meat and bone meal, feedipedia
	Viande vache	kgMS	0,3	17,70	Meat and bone meal, feedipedia
	Lait	L	0,12	3,3	(O.R. Overman et W.L. Gaines, 1933)
Effluents	Lisier de vache	kgMS	0,25	3,80	(Guzmán et Alonso, 2008)
	Fumier ovín, caprin	kgMS	0,6	11,10	(Guzmán et Alonso, 2008)
	Fumier poulet de chair	kgMS	0,87	10,9	(Guzmán et Alonso, 2008)
Carburant	Diesel	kg	1	37,4	(Benyoussef et Chitour, 2010)
	Charbon	kgMS	0,92	32,6	PCS du charbon à 80% de carbone
	Busa	kgMS	0,89	14,9	Calculé, annexe
Concentrés	Pre starter	kgMS	0,9	15	Feedipedia, maïs farine
	Starter, finisher	kgMS	0,9	15	Feedipedia, maïs granulé
	Complément alimentaire	L	0,9	15	Feedipedia, maïs granulé

Annexe 2 Coefficients pour l'énergie fossile

Type de flux	Flux	Unité	Coefficient énergétique fossile (MJ/unité)	Reference
Engrais	DAP (Diammonium phosphate)	kg	24,3	(Jat et al., 2020; Patel et al., 2020)
	Urée, 46% N	kg	60,6	(Jat et al., 2020; Patel et al., 2020)
	Complex engrais NPK (10-10-10)	kg	7,84	(Jat et al., 2020; Patel et al., 2020)
	Superphosphate	kg	11,1	(Jat et al., 2020; Patel et al., 2020)
	Sulfate	kg	12,94	Natascha
Phytosanitaires	fongicide	kg de matière active	199,5	(Singh et al., 2019)
	busa	kgMS	5,4	Calculé
Concentrés	Pre starter	T	2941,4	Dia'terre, aliment volaille à base de maïs (farine)
	Starter, finisher	T	3327,7	Dia'terre, aliment volaille à base de maïs (granulé)
	complément alimentaire	L	50	Dia'terre
	produits d'entretien	L	50	Dia'terre
	vaccins	L	100	Estimation entre 100 et 200MJ/L
	charbon	kgMS	4,89	Estimation de 10 à 15% de l'énergie totale contenue dans le charbon lui-même
Bâtiments	Stabulation tôle+bois	m2	36	(Natasha Caumartin, 2017)
	bâtiments d'élevage +système automatisé	m2	168,7	Dia'terre, bâtiment type Colorado
	bâtiment de stockage du fourrage			(Natasha Caumartin, 2017)
Matériel	pompe submersible	nombre	828	(Natasha Caumartin, 2017)
	tracteur	nombre	10200	(Natasha Caumartin, 2017)
	rotavator	nombre	7080	(Guzmán et Alonso, 2008)
	cultivateur	nombre	7080	(Guzmán et Alonso, 2008)
	débroussailleuse	nombre	200	Estimation entre 200 et 300MJ
	remorque bois	nombre	2300	(Natasha Caumartin, 2017)
	machine battage riz	nombre	2000	(Natasha Caumartin, 2017)
	système goutte à goutte	m	0,76	Dia'terre
	pulvérisateur à main (batterie)	nombre	183	Dia'terre
	charrue lame plate (manuelle)	nombre	165	(Natasha Caumartin, 2017)
	araire (manuelle)	nombre	165	(Natasha Caumartin, 2017)
	tuyau PVC irrigation	m	87	Dia'terre
	panier plastique	nombre	87	Dia'terre
	bâche (tarpaulin)	nombre	87	Dia'terre
	bidon bleu	kg	87	Dia'terre
mangeoires	kg	87	Dia'terre	
abreuvoirs	kg	87	Dia'terre	

Annexe 3 Détail des intrants des préparations ZBNF de SP2NF

Préparation pour SP1NF			Intrants pour les préparations				
Nom	Quantité (kgMS)	Energie brute (GJ)	Intrants	% dans la préparation	Quantité (kgMS)	Coefficient énergétique brute fixe (MJ)	Energie brute (GJ)
Gana jeevamurtham	1302,39	5,09	galettes de bouse de vache séchées	0,98	1282,50	3,80	4,87
			Jeevamurtha	0,02	19,89	11,05	0,22
Beejamurtham	1,99	0,01	lisier vache	0,98	1,96	3,80	0,01
			sol de thermite	0,02	0,03		0,00
Jeevamurtham	235,70	2,60	lisier de vache (kg)	0,40	93,44	3,80	0,36
			Farine de légumineuse (pois chiche) (kg)	0,29	67,27	15,10	1,02
			Sucre non-raffiné (Jaggery) (kg)	0,32	74,75	16,50	1,23
			Sol-local (kg)	0,00	0,24		0,00
Neemastram	204,50	0,01	Marigold	0,10	19,68	15	0,30
			feuille de ricin	0,06	13,12	18,10	0,24
			feuille de papaye	0,06	13,12	18,10	0,24
			6 autres plantes	0,06	13,12	18	0,24
			lisier vache	0,32	65,59	3,80	0,25
			poudre curcuma	0,29	59,03		0,00
			gingembre	0,10	19,68	15	0,30
			autre poudre	0,01	1,18		0,00
			Mulch	2643,12	48,36	tige de pois d'angole	0,08
résidus de maïs	0,17	461,31				18,20	8,35
balle de riz	0,12	326,25				18,10	5,91
margousier	0,15	391,67				17,60	6,89
arbre à soie	0,12	326,39				17,90	5,84
herbe coupé désherbé	0,17	438,10				18,4	8,06
tige de murier	0,07	174,60				20,5	3,58
cosses/feuillage de tamarin	0,03	73,41				18	1,32
agasa	0,09	233,13				19	4,43
TOTAL	4387,69						

Annexe 3-Détail des intrants des préparations ZBNF de SP2NF

Intrants pour les préparations		
Intrants	Quantité (kgMS)	Energie brute (GJ)
Résidus de culture	1038,61	18,76
Lisier	1451,36	5,57
Collecte	1663,54	30,60
Achat extérieur	221,91	2,54
TOTAL	4375,41	57,48

Quantité d'eau nécessaire SP1NF			
Préparations	Quantité (kg)	% d'eau	Quantité d'eau (kg)
Gana jeevamurtham	2025	0,31	630,69
Beejamurtham	60,25	0,87	52,16
Jeevamurtham	8000	0,93	7474,89
Neemastram	204,50	0,97	199,02
TOTAL			8356,76

Annexe 4-Détail des intrants par catégorie et besoin en eau des préparations pour SP2NF

Annexe 4 Détail des intrants des préparations ZBNF de SP4NF

Préparation pour SP3NF			Intrants pour les préparations				
Nom	Quantité (kgMS)	Energie brute (GJ)	Intrants	% dans la préparation	Quantité (kgMS)	Coefficient énergétique brute fixe (MJ)	Energie brute (GJ)
Ganajeevamu rtham	1302,25	5,09	gallettes de bouse de vache séchées	0,98	1282,36	3,80	4,87
			Jeevamurtha	0,02	19,89	11,05	0,22
Beejamurtham	0,69	0,00	lisier vache	0,98	0,67	3,80	0,00
			sol de thermite	0,02	0,01		0,00
Jeevamurtham	141,42	1,56	lisier de vache (kg)	0,40	56,06	3,80	0,21
			Farine de légumineuse (pois chiche) (kg)	0,29	40,36	15,10	0,61
			Sucre non-raffiné (Jaggery) (kg)	0,32	44,85	16,50	0,74
			Sol-local (kg)	0,00	0,15		0,00
Neemastram	10,62	0,08	Marigold	0,10	1,02	15,00	0,015
			feuille de ricin	0,06	0,68	18,10	0,012
			feuille de papaye	0,06	0,68	18,10	0,012
			6 autres plantes	0,06	0,68	18,00	0,012
			lisier vache	0,32	3,41	3,80	0,013
			poudre curcuma	0,29	3,07		0,000
			gingembre	0,10	1,02	15,00	0,015
			autre poudre	0,01	0,06		0,000
Panchgayva	0,21	0,00	Lisier de vache(kg)	0,18	0,04	3,8	0,000
			Lait de vache	0,06	0,01	15,1	0,000
			curd	0,06	0,01	3,5	0,000
			ghee	0,24	0,05	3,5	0,000
			Sucre non-raffiné (Jaggery) (kg)	0,47	0,10	16,5	0,00
Mulch sun hemp	294,84	5,31					
TOTAL	1750,02	12,05					

Annexe 5-Détail des intrants des préparations de SP4NF

Quantité d'eau nécessaire SP3NF			
Préparations	Quantité (kg)	% d'eau	Quantité d'eau (kg)
Gana			
jeevamurth am	1302	0,31	405,59
Beejamurth am	0,69	0,87	0,59
Jeevamurth am	141	0,93	132,14
Neemastram	10,62	0,97	10,34
Panchgayva	0,21	0,67	0,14
TOTAL			548,80

Intrants pour les préparations		
Intrants	Quantité (kgMS)	Energie brute (GJ)
lait, curd, ghee	0,07	0,00
lisier	1346,67	5,19
collecte	0,19	0,04
achat extérieur	85,80	1,38

Annexe 6-Détail des intrants par catégorie et besoin en eau des préparations pour SP4NF

Annexe 5 Rendement des cultures SP1 et SP2NF

RENDEMENT DES CULTURES				
SC	espèce	surface occupée (ac)	rendement (kg/ac)	rendement en fonction de la surface occupée (kg)
SC arachide	arachide	0,51	681	390
	pois d'angole	0,49	113	55
	riz paddy	1	2900	2900
SC rotation céréalière	maïs grain	1	1250	1250
	Pearl millet (Bajra)	1	700	700

Annexe 8-Rendement de cultures pour SP1

RENDEMENT DES CULTURES				
SC	espèce	surface occupée (ac)	rendement (kg/ac)	rendement en fonction de la surface occupée (kg)
SC arachide	arachide	0,57	767	439
	pois d'angole	0,08	162	13
	niébé	0,08	236	19
	féverole	0,08	236	19
	ricin	0,08	191	16
	millet	0,10	283	28
	riz paddy	0,90	2800	2520
	marigold	0,03	171	6
riz	pois d'angole	0,03	162	5
	ricin	0,03	191	6
SC rotation céréalière	maïs grain	0,60	2000	1200
	niébé	0,10	236	24
	féverole	0,10	236	24
	légume feuille	0,20		10
	légume racine	0,20		40
	pearl millet (Bajra)	0,65	700	458
	niébé	0,08	236	19
	féverole	0,08	236	19
	ricin	0,08	191	16
	sorgho fourrager (Jowar)	0,10	581	58

Annexe 7-Rendement des cultures pour SP2NF

Annexe 6 Rendement des cultures SP3 et SP4NF

RENDEMENT DES CULTURES				
Production	Nombre d'arbre sur 3 ac	Rendement (kg/arbre/an)	Rendement total (kg/an)	Sources
noix d'arec	1500	3	4200	calculé
feuille de bétel		180	180	entretien, poids feuille=3g, récolte mensuelle de 500 feuilles
agasa	3000	59	177000	littérature, 2,95kgMS/arbre avec 30% de matière sèche
bois d'agasa		1,423	4269	Littérature, 1423kgMS/ac avec 1000 arbres/ac
noix de coco	30	64	1920	Calculé, Rdt moyen annuel fruit: 50 noix/arbre (poids=1,2kg/noix)
palme de cocotier		37,5	1125	Rdt annuel : 15 palmes/cocotier (poids=2,5kg)
bananes	60	36	2160	Rdt annuel: 20 grappes de 10bananes/bananier (poids banane=180g)
citron	20	5	100	100citrons/arbres avec poids moyen de 50g
mangues	1	10	10	manguier qui produit 10kg de fruit/an

Annexe 9-Rendement des cultures pour SP3

RENDEMENT DES CULTURES

espèce	surface occupée sur 1,5ac (ac)	Nombre d'arbre	rendement (kg/ac)	rendement (kg/arbre/an)	rendement en fonction de la surface occupée (kg)	Source
pois d'angole						1,5kg/semaine pdt 4 mois
niébé	0,05				24	
féverole						
haricot vert						
lentille noire						
aubergine						4kg/semaine pdt 2 mois
tomate	0,05				32	
piment						
crotolaire	0,90			1500	1350	
sunhemp	0,90		2000		1800	
noix d'arec	0,49	700,00		3	1960	
noix de coco		100,00		64	6400	Rdt moyen annuel fruit: 50 noix/arbre (poids=1,2kg/noix)
	0,07					Rdt annuel : 15 palmes/cocotier (poids=2,5kg)
palme de cocotier				38	3750	
bananes	0,04	60,00		36	2160	Rdt annuel: 20 grappes de 10bananes/bananier (poids banane=0,180kg)

Annexe 10-Rendement des cultures pour SP4NF

Annexe 7 Calcul de la consommation en énergie fossile des intrants pour l'élevage de poulet de chair

Calcul de la consommation en énergie fossile`

Type d'aliment		coef énergétique (MJ/T)	EF (GJ)
aliment volaille à base de maïs	farine	2941,4	56,2
aliment volaille à base de maïs	granulé	3327,7	181,5
TOTAL			237,8

Complément alimentaire et de boisson	quantité	Coef énergétique (MJ/L)	EF (GJ)
ATS mix (g) 1kg=1L	0,43	50	0,01
ND mix (g)	0,95	50	0,02
Vitakind-P (L)	50	50	0,93
Ferikind-P(L)	50	50	0,93
Respite Dx (L)	8	50	0,15
TOTAL			2,03

Vaccins	quantité	Coef énergétique (MJ/mL)	EF (GJ)
ValvoND (1dose=1mL)	6	100	0,00
Gombora (dose)	28000	100	1,04
NDVH(dose)	27000	100	1,00
EttoBoost (dose)	110	100	0,00
TOTAL			2,04

Produits d'entretien, traitement de l'eau	quantité	Coef énergétique (MJ/mL)	EF (GJ)
AOV	30	50	0,56
Sanipro	390	50	7,22
Aquatreat	10	50	0,19
BKC	10	50	0,19
TOTAL			8,15

Annexe 11-Détail des calculs de la consommation en énergie fossile des intrants pour SP6

Annexe 8 Calcul de la ration en fonction de la période de production des poulets de chairs

Calcul ration en fonction de la période de production

	nb jour	nb sacs consommés	quantité (kg/lot de 10000)	kg/j
Pre starter	10	76	5309	531
starter	10	98	12927	1293
finisher	20	437	44528	2226
TOTAL	40	610	62764	4050

Annexe 12-détail des calculs de la ration pour SP6

Annexe 9 Analyse de sol de 6 tanks dans le Karnataka

Sample_Name	Clay (g/kg)	Silt (g/kg)	Sand (g/kg)	pH	Electrical Conductivity (EC) (mS/cm)	Azote (N) total g/kg	Calcaire (CaCO3) total g/kg	Carbone (C) total g/kg	Carbone organique total (COT) g/kg	C/N	Matière organique g/kg
Gudlupet	771	215	14	8,46	0,47	0,65545119	58	14,4875669	7,52756695	11,5	13
Gudlupet	758	223	19	8,47	0,443	0,63973367	64	14,7767317	7,09673173	11,1	12,3
Unknown	492	207	301	9,08	0,344	0,28969163	17	6,93244636	4,89244636	16,9	8,46
Kallipora	303	81	616	7,36	0,0487	0,26245875	<1	3,22610527	3,22610527	12,3	5,58
Kallipora	504	233	263	7,63	0,0762	0,34075119	<1	4,26750124	4,26750124	12,5	7,38
Gopalpura	328	179	493	7,98	0,104	0,57872463	<1	8,08371663	8,08371663	14	14
Gopalpura	251	134	615	7,75	0,218	0,2285978	<1	2,99308658	2,99308658	13,1	5,18
Gopalpura	389	203	408	7,61	0,117	0,42558163	<1	5,39424539	5,39424539	12,7	9,33
Kunagahalli	352	230	418	8,01	0,212	1,24536522	2	13,0627096	12,8227096	10,3	22,2
Kunagahalli	404	276	320	7,43	0,396	1,43480435	2	15,6598556	15,4198556	10,7	26,7
Koothonur	434	199	367	8,46	0,154	0,30771453	7	4,76699322	3,92699322	12,8	6,79
Koothonur	505	268	227	8,53	0,13	0,28340559	5	6,47245705	5,87245705	20,7	10,2
Koothonur	558	219	223	8,01	0,576	1,18263938	13	13,006289	11,446289	9,68	19,8
Koothonur	681	286	33	8,08	0,446	1,25958785	33	16,1047852	12,1447852	9,64	21
MOYENNE								9,23103499			

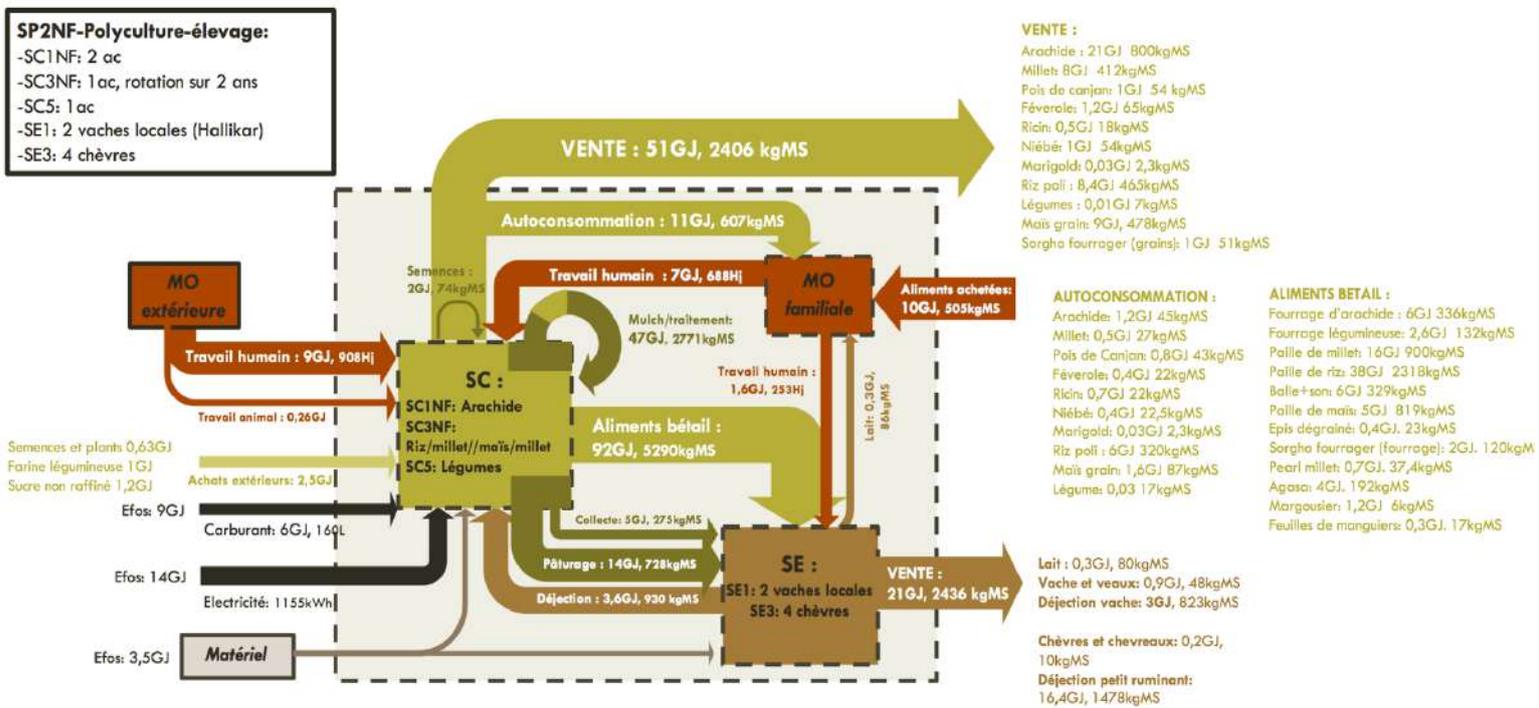
Annexe 13-Analyse de sol

Il s'agit de sol collecté durant la saison sèche, en février 2021 sur 6 tanks dans l'état du Karnataka. Les analyse de sol ont été réalisé dans le cadre d'une étude conduite en collaboration avec la french indo cell basée au campus de l'IISc, à Bangalore.

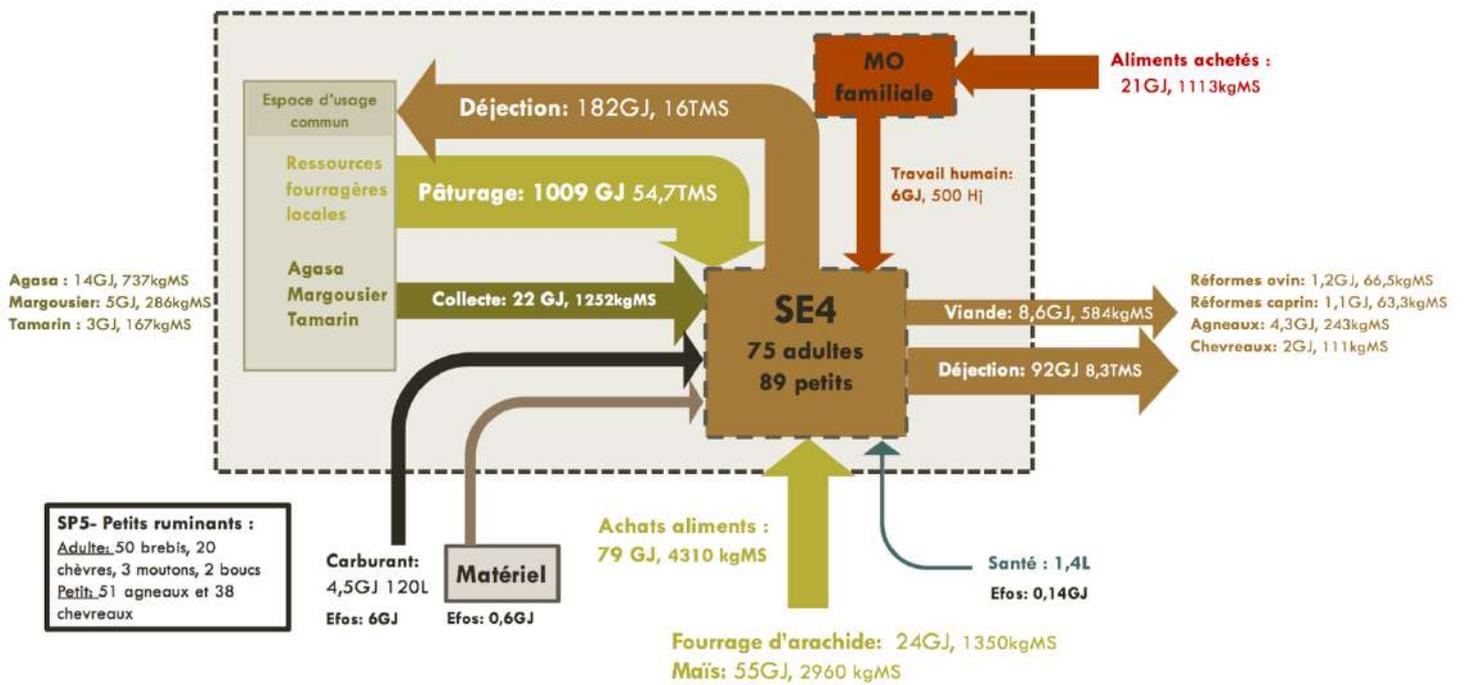
Annexe 11



Annexe 16-Schéma des flux détaillés de SP1



Annexe 17-Schéma des flux détaillés de SP2NF



Annexe 18-Schéma des flux détaillés de SP5