RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ADEME
AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

ANALYSE DE CYCLE DE VIE DE LA VALORISATION DES CO-PRODUITS DE TRANSFORMATION DE LA MANGUE A LA REUNION

Livrable 4.2 du projet Mangoval

Décembre 2022

EXPERTISES

Lubrizol BIOVAL OCÉAN INDIEN cirad

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier Pierre Olivier Law Yat de *Pulpes Mascareignes Industrie* et Henri Payet de *Royal Bourbon Industries* pour leur disponibilité et leur accueil lors des entretiens réalisés. Merci également à Frédéric Normand, du *CIRAD Hortsys*, pour ses conseils, son temps et son intérêt pour cette étude.

Les auteurs souhaitent également remercier les différents partenaires du projet *Mangoval* qui ont contribué à cette étude en apportant leur expertise sur les différents procédés étudiés. Merci en particulier à Gwenn Atheaux, Nicolas Gaboriaud Kolar et Rémi Przybylski de *Bioval Océan Indien*, à Xavier Vitrac de *Lubrizol*, à Jean-Paul Danflous du *CIRAD Qualisud*, et à Joël Blin, François Broust et Jérémy Valette du *CIRAD BioWooEB*.

Enfin, merci à l'ADEME pour leur soutien financier et à Grégoire David et Isabelle Hébé pour leur accompagnement.

CITATION DE CE RAPPORT

BENOIST Anthony, WAQUINGA Hermenegildo, LANVIN Charline. 2022. **Analyse de Cycle de Vie de la valorisation des co-produits de transformation de la mangue à La Réunion**. 40 pages.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME
ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01
Numéro de contrat : 1903C0011

Étude réalisée par le CIRAD (UPR BioWooEB) pour ce projet financé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : Xavier Vitrac, Lubrizol
Appel à projet de recherche : GRAINE 2018

Coordination technique - ADEME : DAVID Grégoire
Direction/Service : Direction Bioéconomie Energies Renouvelables (DBER) / Service Forêt, Alimentation et Bioéconomie (SFAB)

SOMMAIRE

RÉSUMÉ 5

1. DEFINITION DES OBJECTIFS ET CHAMP DE L'ETUDE 6

1.1. Objectifs de l'étude d'Analyse de Cycle de Vie 6
1.2. Description générale des systèmes étudiés 6
1.2.1. Définition de la fonction principale et de l'unité fonctionnelle 6
1.2.2. Définition des systèmes d'étude et de leurs frontières 7

1.3. Description des scénarios étudiés 7
1.4. Champs spatial et temporel de l'étude 10
1.5. Origine générale des données 10
1.6. Choix des modèles et indicateurs relatifs à l'évaluation de l'impact du cycle de vie 11

2. INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE 13

2.1. Description générale du gisement en co-produits 13
2.1.1. Estimation du potentiel disponible de co-produits 13
2.1.2. Caractérisation des peaux et noyaux de mangue 14

2.2. Description des scénarios de référence (R) 15
2.2.1. Scénario de référence actuelle (R1) 15
2.2.2. Scénario de référence améliorée (R2) 16

2.3. Description des scénarios *Mangoval* pour les peaux (P) 16
2.3.1. Scénario d'extraction à l'eau subcritique (P1) 16
2.3.1.1. Alimentation et fonctionnement de l'unité d'extraction à l'eau subcritique 16
2.3.1.2. Valorisation des extraits de peaux 16
2.3.1.3. Méthanisation des résidus de peaux 17
2.3.2. Scénario de méthanisation (P2) 17

2.4. Description des scénarios *Mangoval* pour les noyaux (N) 17
2.4.1. Scénario de pressage (N1) 17
2.4.1.1. Production du beurre de mangue 18
2.4.1.2. Valorisation énergétique des coques et tourteaux 18
2.4.2. Scénario d'extraction assistée par micro-ondes (N2) 18
2.4.2.1. Extraction assistée par micro-ondes 18
2.4.2.2. Valorisation énergétique des noyaux résiduels 19
2.4.3. Scénario combiné de pressage et extraction (N3) 19
2.4.4. Scénario de combustion (N4) 19

3. EVALUATION DE L'IMPACT DU CYCLE DE VIE 20

3.1. Analyse détaillée des différents scénarios 20
3.1.1. Analyse des scénarios de référence (R) 20
3.1.2. Analyse des solutions *Mangoval* de valorisation des peaux (P) 21
3.1.2.1. Analyse de la solution P1 d'extraction à l'eau subcritique 21
3.1.2.2. Analyse de la solution P2 de méthanisation 22
3.1.3. Analyse des solutions *Mangoval* de valorisation des noyaux (N) 23
3.1.3.1. Analyse de la solution N1 de pressage des amandes 23

3.1.3.2. Analyse de la solution N2 d'extraction assistée par micro-ondes 24
3.1.3.3. Analyse de la solution N3 combinée de pressage et d'extraction 25
3.1.3.4. Analyse de la solution N4 de combustion des noyaux 26

3.2. Analyse comparée des solutions *Mangoval* 27
3.2.1. Valorisation des peaux de mangue 27
3.2.2. Valorisation des noyaux de mangue 28

3.3. Limites et sensibilité des résultats ACV obtenus 28
3.3.1. Séchage des peaux et noyaux 28
3.3.2. Potentiel d'amélioration des scénarios d'extraction P1 et N2 30

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES DE L'ETUDE 32

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 33

ANNEXE A : IDENTIFICATION DES PRINCIPAUX ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX DES SCENARIOS ETUDIES 35

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES 37

SIGLES ET ACRONYMES 38

RÉSUMÉ

Cette étude d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) s'inscrit dans le cadre du projet *Mangoval*, dont l'ambition est de contribuer à une meilleure valorisation des co-produits de la transformation de la mangue, peaux et noyaux, sur l'île de La Réunion. L'évaluation réalisée ici a pour objectifs principaux d'évaluer l'intérêt environnemental des solutions proposées dans le cadre du projet et d'en identifier les principales sources d'impacts et les leviers potentiels d'amélioration.

Sur la base des données produites au cours du projet, complétées par la littérature, huit scénarios sont construits, dont deux représentatifs de la gestion actuelle des co-produits ou d'une variante améliorée, servant de références. Les six autres scénarios incluent les pistes de valorisation des co-produits étudiées dans le cadre du projet, dont notamment l'extraction à l'eau subcritique ou assistée par micro-ondes, la production de beurre de mangue, la méthanisation ou la combustion.

En l'état des connaissances disponibles, les résultats obtenus montrent que les solutions les plus intéressantes d'un point de vue environnemental sont la méthanisation pour la valorisation des peaux, et la production de beurre ou la combustion pour la production d'électricité pour la valorisation des noyaux. Néanmoins, si un séchage solaire des peaux s'avérait insuffisant pour les besoins de leur transport et qu'un séchage au gaz devait être mis en place, la méthanisation des peaux perdrait son intérêt vis-à-vis de la gestion actuelle et des scénarios alternatifs devraient être envisagés.

Concernant les procédés d'extraction, les données produites au cours du projet ne permettent pas de confirmer leur intérêt environnemental, et des travaux complémentaires doivent donc être menés afin d'en optimiser les conditions opératoires. En particulier, les pistes d'amélioration les plus intéressantes d'après les résultats de cette étude sont le couplage du procédé avec une source de chaleur à faible impact environnemental et l'amélioration de la sélectivité de l'extraction pour l'extraction à l'eau subcritique, et la réduction des temps de séjour et l'augmentation des quantités de biomasse traitées à chaque opération pour l'extraction assistée par micro-ondes.

Enfin, la réalisation d'une étude de marché pour les extraits produits permettrait également d'affiner les résultats de cette étude, en identifiant de façon plus pertinente les effets de substitution potentiels liés à la valorisation des extraits. Une étude d'évaluation économique serait également intéressante à mener pour compléter le point de vue environnemental considéré ici.

A La Réunion, la production de mangues représente entre 2000 et 3000 tonnes par an, principalement consommées comme fruit de bouche, localement ou à l'exportation (Bianchi, 2020). Correspondant à moins de 10 % de cette production, la transformation locale de mangues, en jus, purée ou confiture, constitue une filière modeste en termes de volume mais qui fait face depuis plusieurs années à une demande croissante. De plus, les co-produits de cette transformation, peaux et noyaux de mangue, sont intéressants car ils sont déjà concentrés au niveau des transformateurs, ce qui simplifie a priori la collecte, et possèdent un potentiel de valorisation multiple, incluant différentes voies de production de bioproduits ou de biomasse-énergie (García-Villegas et al., 2022; Manhongo et al., 2021; Zuñiga-Martínez et al., 2022). Dans un contexte insulaire de tension sur les ressources en biomasse (Kleinpeter et al., 2019), l'étude du gisement des co-produits de transformation de la mangue est d'autant plus intéressant que ceux-ci sont aujourd'hui peu valorisés, ce qui représente un manque à gagner économique, et un impact potentiel sur l'environnement.

Le projet *Mangoval* a ainsi pour ambition de contribuer à une meilleure valorisation des co-produits de la mangue sur l'île de La Réunion, dans une démarche d'économie circulaire et de valorisation en cascade. Au sein du projet, la tâche 4 vise plus particulièrement à évaluer l'intérêt environnemental de la filière et des innovations proposées dans le projet.

L'objet de ce présent livrable est de présenter l'étude d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) réalisée dans ce but. En cohérence avec la norme ISO 14040 relative à l'ACV (ISO, 2006), la partie 1 précise les objectifs et champ de l'étude réalisée, et la partie 2 détaille les données mobilisées et les hypothèses nécessaires à la constitution de l'inventaire de cycle de vie décrivant les différents systèmes considérés. La partie 3 présente ensuite les principaux résultats obtenus, ainsi que leurs limites. Enfin, la dernière partie 4 formule les principaux éléments de conclusions et perspectives à retenir.

1. Définition des objectifs et champ de l'étude

Cette première partie précise les principales hypothèses et les principaux choix méthodologiques de l'étude d'ACV réalisée. Ceci inclut notamment la définition des objectifs, des frontières des systèmes, des scénarios étudiés, et des champs spatial et temporel de l'étude, mais aussi un bref descriptif du type de données collectées et des méthodes d'évaluation des impacts mobilisées. Ces deux derniers points sont approfondis respectivement dans les parties 2 et 3 du présent livrable.

1.1. Objectifs de l'étude d'Analyse de Cycle de Vie

L'objectif général du projet *Mangoval* est de proposer des solutions de valorisation pour les co-produits de la filière de transformation de la mangue, peaux et noyaux, sur l'île de La Réunion. L'étude d'impact environnemental associée, réalisée par ACV, vise plus particulièrement à mettre en valeur les bénéfices ou impacts environnementaux générés par ces solutions de valorisation. L'objectif de cette étude d'ACV est double :

- Evaluer l'intérêt environnemental des solutions proposées pour la filière, par rapport à la situation actuelle, et
- Identifier les principales sources d'impacts et les leviers potentiels d'amélioration environnementale des solutions retenues à travers une démarche d'écoconception.

1.2. Description générale des systèmes étudiés

1.2.1. Définition de la fonction principale et de l'unité fonctionnelle

Les solutions de valorisation proposées dans le cadre du projet *Mangoval* ont un double intérêt : fournir des moyens de gestion des co-produits de la filière mangue (peaux et noyaux), aujourd'hui peu valorisés voire considérés comme des déchets, et permettre la production de différents biens ou services nouveaux (actif cosmétique, acide gallique, beurre de mangue, éco-extrait actif contre l'anthracnose, et bioénergie).

Dans le cadre de cette étude, afin de pouvoir évaluer l'intérêt de ces solutions *Mangoval* par rapport à la situation actuelle et de faciliter la comparaison des solutions entre elles, la fonction principale retenue des solutions de valorisation est la gestion des co-produits de la filière, commune à toutes les solutions de valorisation. L'unité fonctionnelle qui en découle est la tonne de co-produit gérée. La valorisation des co-produits en différents biens ou services est alors considérée ici comme une fonction secondaire du système, dont la prise en compte est explicitée ci-après.

D'après les objectifs définis à la section 1.1 précédente, et d'après les lignes directrices européennes de l'ILCD (*International Life Cycle Data system*), l'étude d'ACV réalisée s'inscrit dans un contexte d'aide à la décision d'échelle micro (Benoist et al., 2015; EC-JRC, 2010). Les choix méthodologiques réalisés pour l'étude respectent donc les préconisations de l'ILCD pour ce type de contexte. En particulier, l'approche de l'élargissement des frontières du système est adoptée pour gérer les cas de

multifonctionnalité, et en particulier la fonction secondaire de production des différents biens ou services mentionnée précédemment.

1.2.2. Définition des systèmes d'étude et de leurs frontières

Les différents systèmes considérés pour cette étude se focalisent sur la gestion ou la valorisation des co-produits de transformation de la mangue. Comme représenté à la Figure 1, chaque scénario inclut donc la mobilisation des co-produits, et les différentes étapes de transport ou de transformation nécessaires à l'utilisation ou la mise sur le marché des produits obtenus (cadre orange sur la Figure 1), ainsi que, dans la logique de la méthode d'élargissement du système, la substitution de produits existants qui pourraient être remplacés par les produits issus des peaux et noyaux de mangue (cadre bleu).

A l'inverse, la filière actuelle de transformation des mangues à La Réunion (cadre jaune sur la Figure 1), est exclue du système car elle existe indépendamment de la mise en œuvre ou non des solutions *Mangoval*. Dit autrement, aucun impact n'est associé à la génération des co-produits eux-mêmes. Néanmoins, ceci ne concerne que la transformation des mangues, et les éventuelles étapes de transformation des co-produits qui auraient lieu au niveau des transformateurs dans le cas de certaines solutions sont bien considérées et intégrées à la description de la solution (cadre orange).

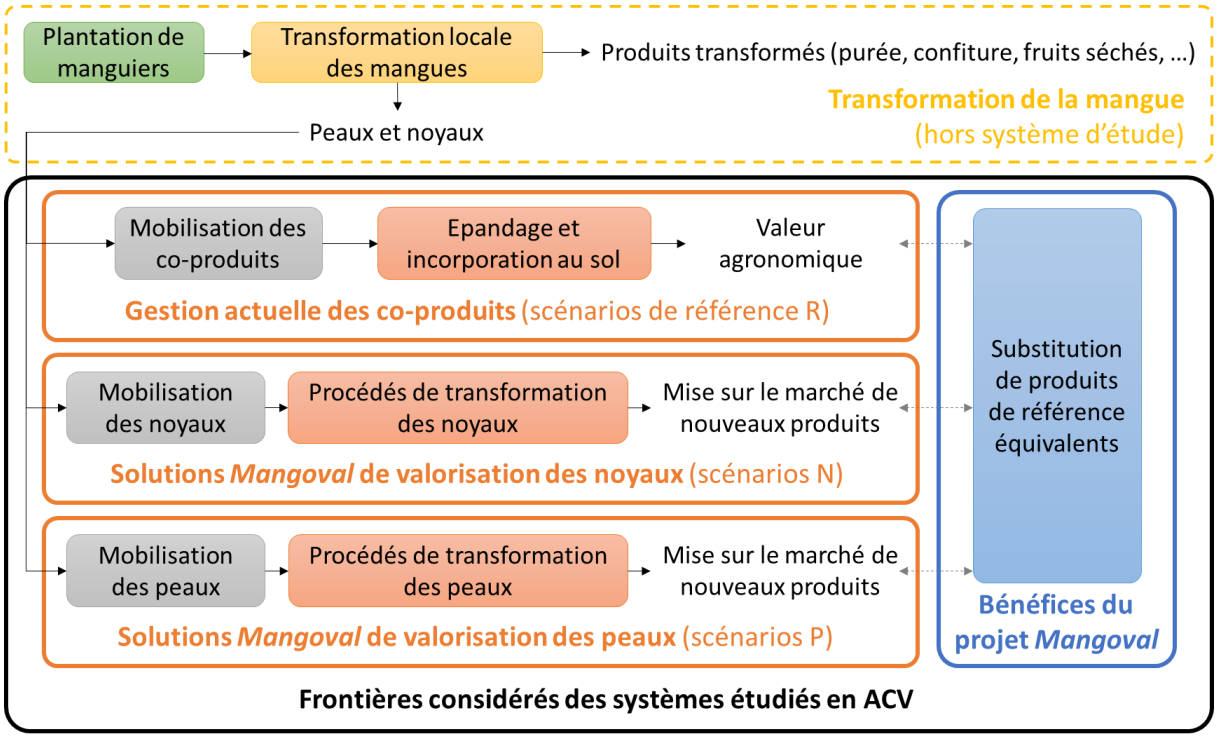

Figure 1 - Représentation schématique des systèmes étudiés dans le cadre de cette étude d'ACV, et de leurs frontières

1.3. Description des scénarios étudiés

Dans le cadre du projet *Mangoval*, différentes solutions de valorisation des peaux et noyaux de mangue ont été envisagées : l'extraction d'actifs cosmétiques, d'actifs antifongiques, ou de beurre de mangue, ou la biomasse-énergie. Faute de données suffisantes générés par le projet concernant l'extraction d'actifs antifongiques, cette voie n'est pas considérée dans la présente étude d'ACV.

Selon la voie de valorisation considérée, la fraction et la quantité de co-produits valorisée peuvent varier, ce qui peut créer un biais dans les comparaisons effectuées. Pour éviter cela, les scénarios de valorisation des peaux, notés P, et les scénarios de valorisation des noyaux, notés N, ont été distingués. De plus, chacun des scénarios a été construit de sorte à valoriser l'ensemble de la biomasse disponible, en utilisant les voies de biomasse-énergie comme une solution par défaut, applicable à toute biomasse ou résidu de biomasse.

Au total, huit scénarios complets ont ainsi été définis. Chacun de ces scénarios, dont le détail technique est précisé en partie 2, peuvent être décrits succinctement de la façon suivante :

- Deux scénarios de référence, concernant peaux et noyaux (voir Figure 2) :
    - Un scénario R1 représentant la gestion actuelle, où les peaux et noyaux sont épandus et incorporés à des sols agricoles sans traitement particulier.
    - Un scénario R2 visant à représenter une situation améliorée par rapport au scénario R1, où les peaux et noyaux sont broyés afin de mieux mettre à profit la valeur agronomique des co-produits.

- Deux scénarios de valorisation des peaux (voir Figure 3) :
    - Un scénario P1 mettant en œuvre de façon prioritaire l'extraction à l'eau subcritique, qui aurait lieu dans une unité de transformation située en Afrique du Sud, et dans lequel le résidu après extraction serait valorisé par méthanisation puis cogénération.
    - Un scénario P2 dans lequel les peaux seraient entièrement valorisées par méthanisation, à La Réunion, où le biogaz serait uniquement brûlé pour la génération d'électricité, compte tenu des faibles besoins en chaleur sur l'île.

- Quatre scénarios de valorisation des noyaux (voir Figure 4) :
    - Un scénario N1 dans lequel les noyaux seraient décortiqués afin d'en extraire les amandes, pressées ensuite pour produire un beurre de mangue, et les tourteaux et coques résiduels seraient brûlés pour la génération d'électricité.
    - Un scénario N2 mettant en œuvre de façon prioritaire l'extraction aqueuse assistée par micro-ondes des noyaux, dont les résidus seraient valorisés pour la production d'électricité.
    - Un scénario N3 combinant les deux scénarios N1 et N2 précédents, dans lequel les noyaux seraient décortiqués et les amandes pressées pour la production de beurre de mangue, et les tourteaux issus de ce pressage seraient valorisés par extraction assistée par micro-ondes. Les coques issues du décorticage et les tourteaux résiduels issus de l'extraction seraient enfin valorisés pour la production d'électricité.
    - Un scénario N4 dans lequel les noyaux seraient entièrement valorisés pour la production d'électricité.

Parmi ces scénarios, les scénarios P1 et P2, et N1 à N4, désignent les solutions *Mangoval*, dont l'intérêt environnemental est évalué en comparaison avec le scénario de référence R1. Le scénario de référence améliorée R2 est défini de sorte à représenter une variante optimisée de la gestion actuelle R1, afin d'alimenter la discussion sur l'intérêt des solutions *Mangoval* et de ne pas introduire de biais en comparant des scénarios optimisés à un scénario actuel sous-optimisé.

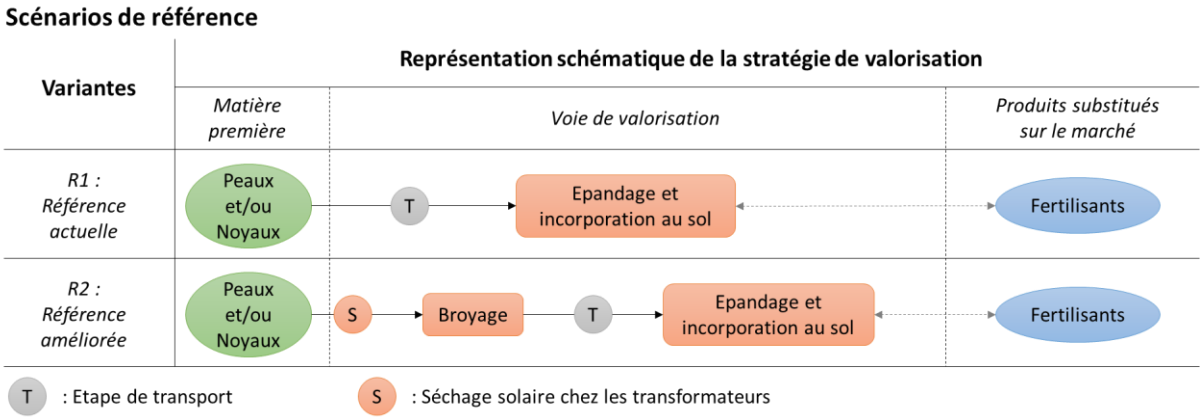

Figure 2 - Représentation simplifiée des scénarios de référence (R)

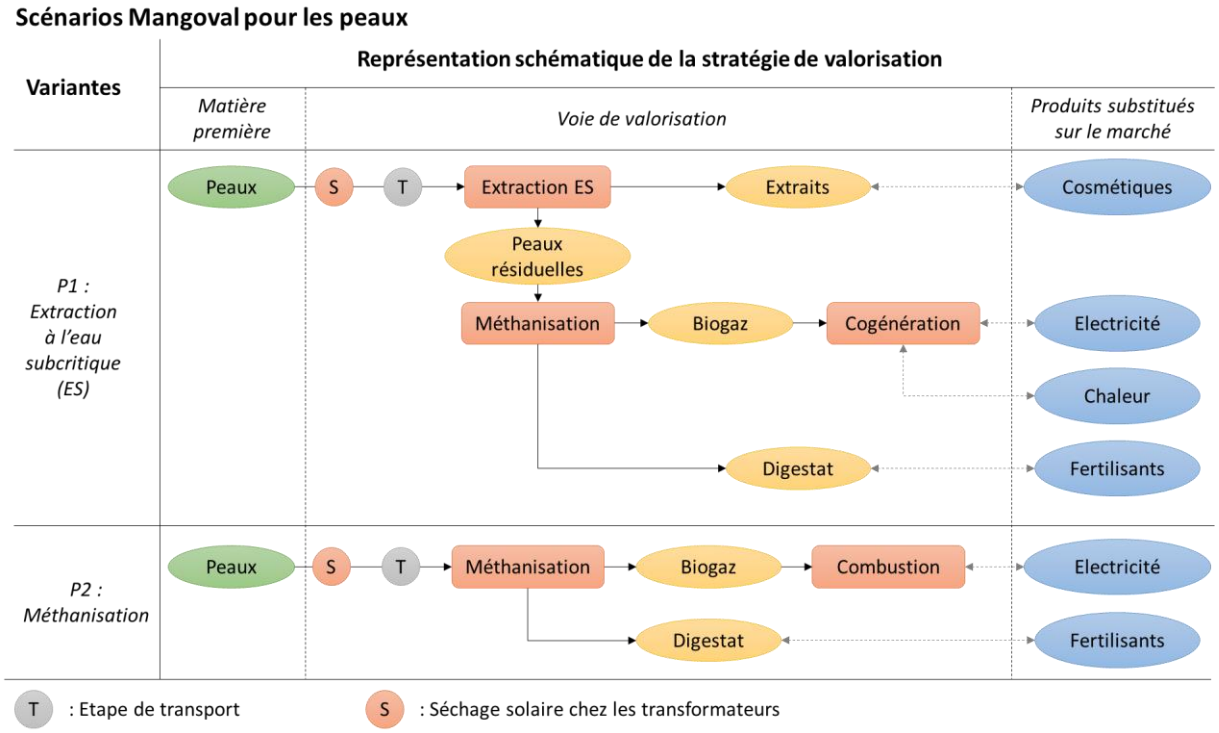

Figure 3 - Représentation simplifiée des scénarios de valorisation des peaux (P)

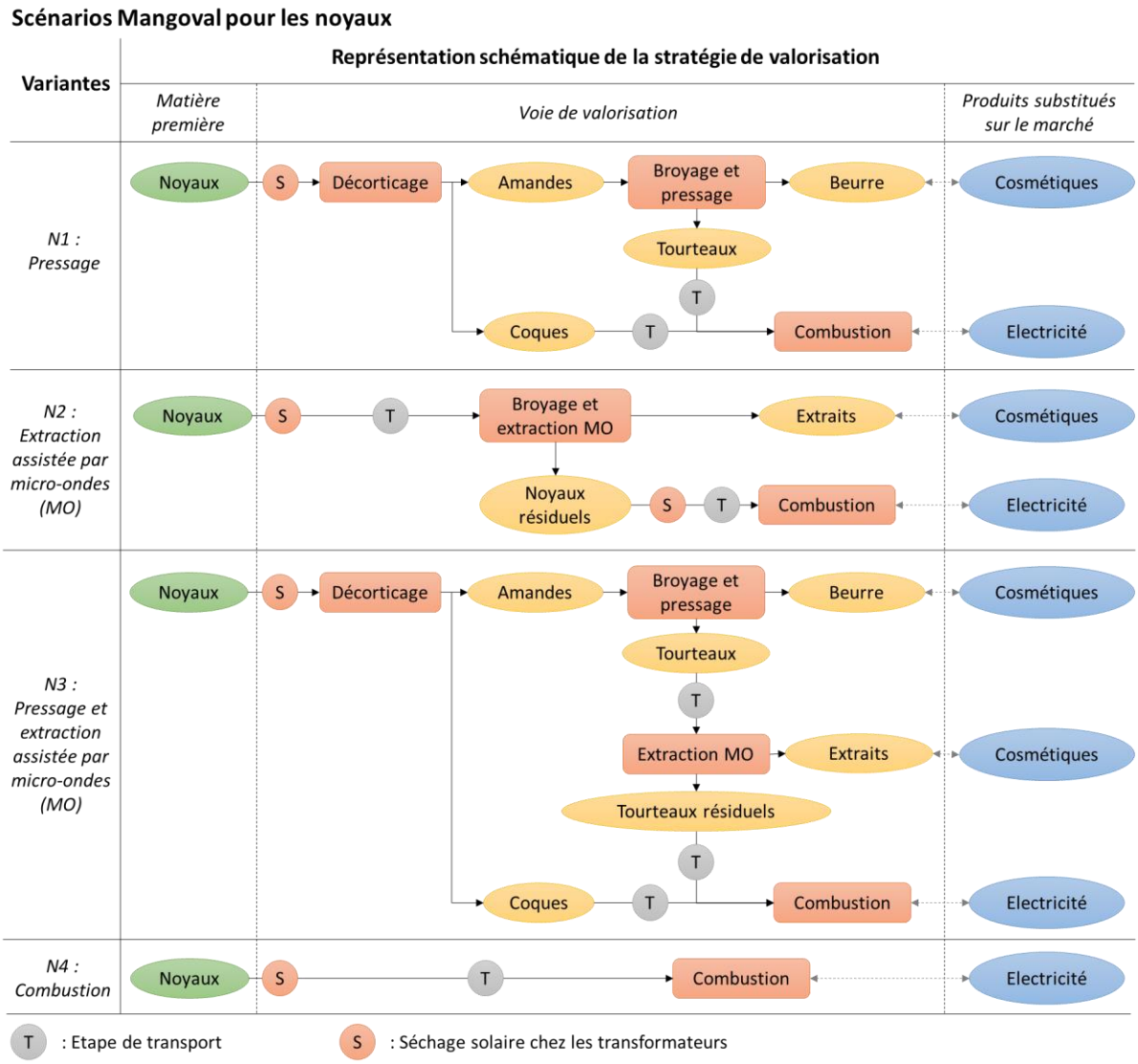

Figure 4 - Représentation simplifiée des scénarios de valorisation des noyaux (N)

1.4. Champs spatial et temporel de l'étude

L'étude réalisée a pour objectif d'être représentative de la situation actuelle sur l'Ile de La Réunion. Les données collectées dans le cadre de cette évaluation privilégieront donc les informations les plus récentes disponibles, spécifiques au contexte de la Réunion.

Parmi les différents scénarios considérés, seule la solution *Mangoval* P1 est mise en œuvre en partie hors de La Réunion, en Afrique du Sud. Ce choix répond à des contraintes liées au procédé d'extraction à l'eau subcritique (voir section 2.3.1). Enfin, concernant les produits issus des solutions *Mangoval*, le lieu de la substitution dépend du type de valorisation : localement, à La Réunion ou en Afrique du Sud, pour la production de fertilisants, d'électricité ou de chaleur, et au niveau international pour la mise sur le marché de produits cosmétiques.

1.5. Origine générale des données

La définition des solutions *Mangoval* étant au cœur du projet, les données nécessaires à leur description sont issues en priorité des travaux menés au cours du projet par les différents partenaires *Lubrizol*, *Bioval Océan Indien* et *CIRAD*, au cours des tâches 1, 2 et 3. Ces données du projet sont complétées par des données de la littérature afin notamment de faciliter l'extrapolation de données généralement obtenues à une échelle laboratoire ou pilote à une échelle industrielle.

La description des filières de référence a été établie à partir d'entretiens réalisés avec les deux principaux transformateurs de mangue à La Réunion, *Royal Bourbon Industries* (RBI) et *Pulpes Mascareignes Industrie* (PMI), complétés par des échanges avec Frédéric Normand, agronome spécialiste de la mangue au *CIRAD* à La Réunion, notamment pour l'établissement la variante améliorée R2.

Enfin, la description des processus dits d'arrière-plan, décrivant notamment l'approvisionnement en consommables des solutions *Mangoval*, et celle des produits substitués sur le marché par les produits issus des solutions *Mangoval* (représentés en bleu sur la Figure 1), sont issues principalement de la base de données *ecoinvent* (version 3.8 - *allocation, cut-off by classification*), adaptée lorsque nécessaire aux spécificités de la présente étude. Dans le cas spécifique de la mise sur le marché du beurre de mangue (scénarios N1 et N3), la base de données *World Food LCA Database* (version 3.5) a également été utilisée faute de données pertinente dans la base *ecoinvent*.

Les valeurs et sources des différentes données utilisées sont décrites plus en détails dans la partie 2 de ce rapport.

1.6. Choix des modèles et indicateurs relatifs à l'évaluation de l'impact du cycle de vie

Dans le cadre de cette étude d'ACV, la méthode retenue pour l'évaluation des impacts est la méthode *ReCiPe 2016 Endpoint* (version 1.1, approche dite hiérarchiste). En effet, cette méthode fait partie des méthodes les plus récentes et les plus globales disponibles à l'heure actuelle (Huijbregts et al., 2017, 2016). De plus, l'utilisation d'indicateurs dits *endpoints*, bien que généralement plus incertains, permet de faciliter l'analyse par rapport aux indicateurs dit *midpoints* en réduisant le nombre d'indicateurs.

Concrètement, les indicateurs *endpoints* expriment les dommages potentiels des systèmes étudiés selon trois grandes aires de protection définies en ACV : l'épuisement des ressources, la qualité des écosystèmes, et la santé humaine. Ces indicateurs permettent alors d'agréger les différents enjeux environnementaux considérés en ACV, tels que le changement climatique, la destruction de la couche d'ozone ou l'épuisement des ressources intègrent, qui constituent les indicateurs dits *midpoints*.

Le Tableau 1 ci-dessous décrit les principaux enjeux environnementaux considérés par la méthode *ReCiPe 2016*, par indicateur endpoint. Une brève description de ces enjeux environnementaux est ensuite donnée dans le Tableau 2 (Huijbregts et al., 2017).

Tableau 1 - Synthèse des enjeux environnementaux considérés par chacun des trois indicateurs endpoints *de la méthode ReCiPe 2016*

Catégorie d'impact	Enjeux environnementaux considérés par chaque indicateur *endpoint*		
	Epuisement des ressources	*Qualité des écosystèmes*	*Santé humaine*
Changement climatique		X	X
Destruction de la couche d'ozone			X
Effets des radiations ionisantes			X
Formation de particules fines			X
Formation d'ozone photochimique		X	X
Acidification terrestre		X	
Eutrophisation des eaux douces et marine		X	
Toxicité et écotoxicité		X	X
Consommation d'eau		X	X
Usage des sols		X	
Epuisement des ressources minérales	X		
Epuisement des ressources fossiles	X		

Tableau 2 - Description succincte des différents enjeux et mécanismes environnementaux considérés par la méthode ReCiPe 2016

Catégorie d'impact	Description de l'enjeu environnemental
Changement climatique	Emissions de gaz à effet de serre à l'origine de perturbations du système climatique
Destruction de la couche d'ozone	Emissions de composés tels que les ChloroFluoroCarbones (CFC) ou halons, à l'origine du phénomène de trou de la couche d'ozone
Effets des radiations ionisantes	Rejets de substances radioactives
Formation de particules fines	Emissions de matières particulaires ou de précurseurs de particules, à l'origine de troubles respiratoires
Formation d'ozone photochimique	Emissions de polluants précurseurs d'ozone tels que les NOx ou les Composés Organiques Volatils (COV), à l'origine de problèmes de santé humaine (irritations, asthme) ou de dommages sur les végétaux
Acidification terrestre	Effets des émissions de polluants acidifiants, à l'origine de phénomènes tels que les pluies acides, sur les écosystèmes terrestres
Eutrophisation des eaux douces et marine	Emissions de nutriments dans le milieu naturel, à l'origine de déséquilibres dans les écosystèmes marins ou présents en eaux douces (prolifération d'espèces végétales ou animales aux dépens d'autres espèces)
Toxicité et écotoxicité	Emissions de polluants toxiques pour la santé humaine ou pour les espèces naturelles
Consommation d'eau	Effets de la consommation d'eau douce sur les populations humaines et sur les écosystèmes
Usage des sols	Effets des transformations d'usages et des occupations des sols sur la biodiversité
Epuisement des ressources minérales	Epuisement des minerais
Epuisement des ressources fossiles	Consommation cumulée d'énergie primaire fossile et nucléaire

2. Inventaire du cycle de vie

Cette deuxième partie vise à préciser les différents choix de données et hypothèses formulées pour la description technique des différents systèmes définis à la partie 1 précédente. Après quelques éléments généraux sur les co-produits étudiés, peaux et noyaux de mangue, chaque voie de valorisation est ainsi détaillée. L'inventaire de cycle de vie ainsi obtenu permet d'évaluer ensuite les impacts environnementaux de chaque scénario, dont les résultats sont donnés à la partie 3 suivante.

2.1. Description générale du gisement en co-produits

2.1.1. Estimation du potentiel disponible de co-produits

Des entretiens réalisés en novembre 2021 auprès des deux principaux transformateurs de fruits à La Réunion, RBI et PMI, ont permis de préciser le gisement de co-produits de transformation de fruits pour la campagne 2020-2021. Les résultats obtenus sont donnés dans le Tableau 3.

Tableau 3 - Gisement en co-produits de transformation de fruits pour la campagne 2020-2021, selon des entretiens réalisés auprès des deux principaux industriels du secteur (RBI et PMI)

Fruit	Quantité transformée (t/an)	Rendement en co-produit	Quantité de co-produits (t/an)
Ananas	830 - 840	45 - 50 %	375 - 380
Litchi	300 - 320	55 - 60 %	160 - 190
Mangue	100 - 130	45 %	45 - 60
Banane	100	35 - 45 %	35 - 45
Passion	50	75 %	35 - 40
Goyavier	190	10 - 20 %	20 - 40

Ces chiffres montrent qu'avec 45 à 60 tonnes disponibles lors de la campagne 2020-2021, le gisement de co-produits de transformation de la mangue est modeste, mais qu'il serait intéressant, d'un point de vue économique notamment, pour rentabiliser les investissements à réaliser, d'envisager des voies de valorisation conjointes avec d'autres filières de fruits. Il apparaît également que cette estimation de gisement est plus faible que celle réalisée en début de projet, où un gisement potentiel de 75 à 100 t/an de co-produits de transformation de la mangue avait été considéré (Bianchi, 2020). Cette différence peut s'expliquer par plusieurs facteurs :

- La variabilité naturelle de la production de fruits, liée notamment aux conditions climatiques ;
- La différence de périmètre entre les deux estimations, l'étude de Bianchi (2020) ayant considéré également des transformateurs plus modestes tels que *Purée Premium* ; et
- Des effets potentiels de transfert entre transformateurs, l'augmentation de capacité de production observée ces dernières années chez PMI, et prise en compte dans les travaux de Bianchi (2020), s'étant accompagnée d'une baisse de la production chez RBI.

En termes de composition du gisement, les travaux de Bianchi (2020) ont évalué que les co-produits sont composés de 50 % de peaux et de 50 % de noyaux, en masse brute. De plus, les entretiens complémentaires réalisés en novembre 2021 ont permis de déterminer que 70 % de la demande de transformation concernent la variété *José*, suivie d'autres variétés telles l'*Early Gold*. Pour la présente étude, deux variétés ayant été étudiées dans le cadre du projet *Mangoval*, la *José* et la *Cogshall*, les caractéristiques moyennes des co-produits ont été estimées en considérant des proportions de 70 % de *José* et de 30 % de *Cogshall*.

2.1.2. Caractérisation des peaux et noyaux de mangue

Différentes analyses d'humidité des co-produits, peaux et noyaux, et de leurs constituants, c'est-à-dire les coques et amandes des noyaux, ont été réalisées au cours du projet (Atheaux et al., 2020; Bianchi, 2020; Diop and Danflous, 2020; Przybylski et al., 2021). Les valeurs retenues dans le cadre de cette étude sont précisées dans le Tableau 4.

Il est supposé qu'un premier séchage, naturel ou forcé, a lieu au niveau des transformateurs, en préalable à toutes les solutions *Mangoval* et à la référence améliorée R2. D'après les tests réalisés en première année du projet, un séchage solaire sur claies est techniquement possible et est considéré dans cette étude (Atheaux et al., 2020). Aucun impact n'est alors associé à ce séchage. Toutefois, l'influence de cette hypothèse est étudiée en analyse de sensibilité (voir section 3.3.1).

Tableau 4 - Synthèse des teneurs en humidité des co-produits retenues pour la présente étude d'ACV

Produit	En sortie de procédé de transformation		Après un premier séchage, naturel ou forcé	
	Teneur en humidité (% MB)	*Source*	*Teneur en humidité (% MB)*	*Source*
Peaux	76 %	(Bianchi, 2020)	5,3 %	(Atheaux et al., 2020)
Noyaux	52 %	(Bianchi, 2020)	14,2 %	(Atheaux et al., 2020)
Coques	*Non mesurée*		12,3 %	(Atheaux et al., 2020)
Amandes	*Non mesurée*		15,7 %	(Atheaux et al., 2020)

A partir des teneurs en humidité précisées dans le Tableau 4, le gisement estimé en co-produits de 45 à 60 tonnes de matière brute (MB) correspond alors à 29 à 38 tonnes de matière sèche (MS), dont deux tiers correspondant aux noyaux, ou, en matière brute après séchage, à 18 à 24 t MB dont 69 % correspondant aux noyaux. La répartition entre *José* et *Cogshall* est supposée inchangée.

La composition des noyaux a également été analysée à plusieurs reprises au cours du projet, avec des proportions d'amande par rapport au noyau variant de 45 % à 66 %, selon notamment l'humidité des noyaux (Bianchi, 2020; Diop and Danflous, 2020; Przybylski et al., 2021). Afin de conserver une cohérence entre cette composition des noyaux et les données d'humidité retenues pour les noyaux, coques et amandes, une valeur de 56 % MB d'amande par rapport au noyau, parfaitement compatible avec la gamme de valeurs obtenues au cours du projet, est retenue pour cette étude.

Au sein des amandes, les teneurs en huile retenues sont également issues des analyses réalisées au cours du projet : 10,3 % MS pour la variété *José*, et 10,6 % MS pour la *Cogshall* (Przybylski et al., 2021). En considérant 70 % d'amandes issues de mangues *José*, il vient une teneur en huile moyenne des amandes de 10,4 % MS.

Les Pouvoirs Calorifiques Inférieurs (PCI) des différents produits considérés au cours de cette étude sont donnés dans le Tableau 5, et sont eux aussi issus d'analyses réalisées au cours du projet (Atheaux et al., 2020). Dans le cas des tourteaux issus du pressage des amandes, l'analyse a été réalisée de façon complémentaire en 2022 par le *CIRAD BioWooEB*, selon le même protocole que les analyses précédentes.

Pour garantir une homogénéité entre les différentes données utilisées dans le modèle d'ACV, le PCI des noyaux a été corrigé afin d'être compatible avec les PCI mesurés pour les coques et noyaux.

Tableau 5 - Pouvoirs Calorifiques Inférieurs (PCI) des différents produits considérés dans le projet Mangoval

Produit	PCI mesuré (MJ / kg MS)	Humidité mesurée (% MB)	PCI mesuré (MJ / kg MB)	PCI considéré pour cette étude (MJ / kg MB)
Peaux	16,1	5,3 %	15,1	15,1
Noyaux	18,0	14,2 %	15,1	15,2
Coques	17,7	12,3 %	15,2	15,2
Amandes	18,5	15,7 %	15,2	15,2
Tourteaux	17,7	7,4 %	16,2	16,2

Enfin, les teneurs en éléments minéraux N, P et K des peaux et noyaux mangues considérées pour la présente étude d'ACV sont données dans le Tableau 6. Les valeurs pour l'azote N sont directement issues d'analyses menées au cours du projet *Mangoval* (Atheaux et al., 2020). Concernant le phosphore P et le potassium K, faute de données spécifiques, les teneurs considérées dont issues de données d'autres projets ou de la littérature :

- Dans le cas des peaux, les teneurs en P et K ont été extrapolées à partir de la teneur en N et des ratios P/N et K/N de digestat de méthanisation de résidus de mangue, disponibles dans la littérature (Alrefai et al., 2020). Cette extrapolation suppose donc que les éléments N, P et K sont affectés de la même façon par le procédé de digestion anaérobie et se retrouvent donc dans les mêmes proportions dans la biomasse avant méthanisation et dans le digestat.
- Dans le cas des noyaux, les valeurs déterminées par le *CIRAD BioWooEB* pour des noyaux de mangue provenant du Burkina Faso[1] ont été utilisées.

Tableau 6 - Teneurs en éléments minéraux N, P et K considérées dans cette étude

Produit	Teneur en N (% MS)	Teneur en P (% MS)	Teneur en K (% MS)
Peaux	0,63 %	0,12 %	0,20 %
Noyaux	0,72 %	0,12 %	0,81 %

2.2. Description des scénarios de référence (R)

2.2.1. Scénario de référence actuelle (R1)

La description du scénario de référence actuelle est basée principalement sur les informations collectées en novembre 2021 au cours des entretiens avec les transformateurs PMI et RBI. D'après ceux-ci, les peaux et noyaux de mangue sont récupérées par les agriculteurs afin d'être épandus dans les parcelles à proximité des unités de transformation, principalement des vergers ou des champs de canne à sucre, et incorporés au sol. Un aller-retour en tracteur, sur une distance totale de 10 km, a alors été considéré pour acheminer les co-produits aux parcelles.

D'après les entretiens réalisés, l'épandage et l'incorporation au sol seraient réalisés à travers un travail léger du sol. Le passage d'un équipement de type cultivateur rotatif a alors été considéré, et décrit à partir des données *ecoinvent*. Faute de données précises sur les quantités épandues par hectare, celles-ci ont été estimées à partir des masses et dimensions moyennes des noyaux, mesurées au cours du projet (Diop and Danflous, 2020). Une valeur de 25 t MB épandues par hectare a alors été considérée.

[1] Voir : https://www.biostar-afrique.org/les-filieres/caracterisation-des-residus/la-filiere-mangue [Dernier accès : 16/12/2022]

En termes de bénéfice agronomique, l'observation de parcelles épandues tend à montrer que les noyaux se dégradent peu et donc contribuent peu à la fertilité des sols. Seuls les éléments NPK constitutifs des peaux sont alors considérés avoir un effet fertilisant sur les parcelles. En accord avec la méthodologie retenue (voir section 1.2.1), ce bénéfice est pris en compte dans cette étude ACV en considérant une substitution d'une quantité équivalente d'éléments NPK qui seraient apportés par des engrais synthétiques, dont l'impact est déterminé à l'aide de la base de données *ecoinvent*.

2.2.2. Scénario de référence améliorée (R2)

Le scénario amélioré R2 a été construit de façon à considérer une variante de la référence R1 où la finalité actuelle des peaux et noyaux est inchangée, mais avec une meilleure mise à profit de la valeur agronomique des noyaux. Les seules différences entre les scénarios R1 et R2 consistent alors en :

- L'ajout d'une étape de broyage au niveau des transformateurs, avant la collecte des co-produits par les agriculteurs, et
- La prise en compte des éléments nutritifs des noyaux, en complément de ceux des peaux, pour déterminer l'effet fertilisant de l'épandage des co-produits et donc l'effet de substitution.

Faute de données sur les consommations d'énergie liées au broyage des co-produits, et des granulométries à atteindre pour assurer une bonne qualité fertilisante de ceux-ci, une étape standard de broyage a été considérée, à partir de données *ecoinvent* disponibles pour l'obtention de plaquettes de bois. Ces hypothèses sont identiques à celles des autres scénarios requérant un broyage des co-produits (N1, N2 et N3).

2.3. Description des scénarios *Mangoval* pour les peaux (P)

2.3.1. Scénario d'extraction à l'eau subcritique (P1)

Le scénario P1 s'intéresse principalement à la valorisation des peaux par extraction à l'eau subcritique. Aucune unité d'extraction à l'eau subcritique n'est aujourd'hui présente à La Réunion. Compte tenu de l'investissement nécessaire et du potentiel d'utilisation de cette unité relativement faible sur l'île en l'état actuel, l'option d'une installation d'une telle unité à La Réunion n'a pas été considérée pour l'étude d'ACV. Une option régionale a alors été préférée, mettant à profit le site *Lubrizol* existant à Durban, en Afrique du Sud.

2.3.1.1. Alimentation et fonctionnement de l'unité d'extraction à l'eau subcritique

Dans ce scénario, les co-produits sont transportés après séchage des unités de transformation à La Réunion jusqu'à Durban en considérant un aller-retour en camion à La Réunion sur une distance de 75 km, un transport en porte-conteneurs entre Le Port à La Réunion et Durban en Afrique du Sud sur une distance de 3000 km, et enfin un transport en camion à Durban sur une distance de 20 km jusqu'au site *Lubrizol*.

La description du fonctionnement de l'unité d'extraction combine des informations communiquées par *Lubrizol* au cours du projet concernant les conditions opératoires et rendements obtenus à l'échelle laboratoire, et des données de la littérature, adaptée aux conditions de cette étude, pour l'estimation des quantités d'énergie consommée (Todd and Baroutian, 2017). D'après les éléments communiqués par *Lubrizol*, il est considéré dans cette étude une consommation d'eau de 10 l / kg de peaux pour un rendement d'extraction de 60 % MS.

Les besoins en énergie du procédé d'extraction à l'eau subcritique ont été estimées à partir des résultats d'une étude technico-économique sur l'extraction à l'eau subcritique de marc de raisins (Todd and Baroutian, 2017). Cette étude a évalué le besoin énergétique de l'extraction à l'eau subcritique (100 bar et 125 °C), pour un débit d'eau de 20 l / kg MS de biomasse, à 312,5 Wh d'électricité par kg MS de biomasse entrante pour la mise en pression de l'eau, et 8,87 MJ de chaleur par kg MS de biomasse entrante pour le chauffage de l'eau. Considérant que ces besoins énergétiques sont proportionnels au débit d'eau, ces valeurs ont été divisées par 2 avant d'être appliquées aux quantités de peaux traitées dans la présente étude.

2.3.1.2. Valorisation des extraits de peaux

Comme indiqué ci-dessus, le rendement considéré pour la production d'extraits est de 0,6 kg d'extrait sec par kg MS de peaux. La composition et le potentiel de valorisation sur le marché de ces extraits n'ayant pas été étudiés dans le cadre du projet *Mangoval*, des données de la littérature ont été utilisées pour estimer l'effet de substitution de la valorisation des extraits obtenus (Sogi et al., 2013).

Dans l'étude par Sogi et al. (2013), des peaux et noyaux de mangues de la variété *Tommy Atkins* ont été séchés selon différentes méthodes (lyophilisation à froid, air chaud, sous vide, ou par infrarouge), puis leurs teneurs en acide ascorbique, en caroténoïdes et en phénols ont été mesurées. Afin de tenir compte du bénéfice de l'extraction, les teneurs les plus

importantes mesurées sur les peaux ont été considérées pour être appliquées aux extraits, soit 84,74 mg / 100 g MS d'acide ascorbique, 4,05 mg / 100 g MS de caroténoïdes, et 3185 mg / 100 g MS de phénols.

Le bénéfice environnemental potentiel de ces composés a alors été évalué en considérant une substitution de produits similaires issus de la base *ecoinvent*. Dans le cas des caroténoïdes, aucun produit immédiatement similaire n'étant disponible dans la base, un processus de production de butadiène a été considéré par défaut.

2.3.1.3. Méthanisation des résidus de peaux

Dans le scénario P1, il est considéré que les peaux résiduelles issues de l'extraction à l'eau subcritique sont méthanisées, sur le site même d'extraction. En termes de rendement et de composition du biogaz et du digestat produits, aucune différence n'a été faite, faute de données spécifiques, entre les peaux brutes et les peaux résiduelles après extraction. La méthanisation des peaux de mangues n'ayant pas été étudiée directement dans le cadre du projet *Mangoval*, la description retenue se base sur des données de la littérature (Alrefai et al., 2020; Puligundla et al., 2014).

La revue réalisée par Puligundla et al. (2014) a tout d'abord permis d'estimer la production de biogaz issu de peaux de mangue à 0,26 m^3 / kg MS de peaux, pour un contenu en méthane de 53 %. Compte tenu du besoin de chaleur de l'unité d'extraction à l'eau subcritique, il est supposé que le biogaz obtenu est valorisé par cogénération, l'électricité et la chaleur produites se substituant respectivement au mix électrique sud-africain et à la chaleur nécessaire pour le procédé d'extraction. Le fonctionnement et les rendements électrique (37 %) et en chaleur (53 %) considérés ont directement été repris de la base de données *ecoinvent*.

Concernant le digestat obtenu, il a été considéré que les éléments N, P et K présents dans les peaux se retrouvaient en totalité dans le digestat, et les valeurs issues d'Alrefai et al. (2020) ont alors été utilisées (voir Tableau 6). Les hypothèses de substitution de fertilisants liée à la valorisation du digestat sont identiques à celles retenues pour la valorisation directe des peaux (voir section 2.2.1).

Enfin, la description du fonctionnement du méthaniseur est issue de la base de données *ecoinvent*, et adaptée au mix électrique sud-africain.

2.3.2. Scénario de méthanisation (P2)

Le scénario P2 se focalise exclusivement sur la valorisation des peaux de mangue par méthanisation, à La Réunion. La méthanisation pour la production de biogaz est déjà pratiquée à La Réunion, et a été à l'origine en 2021 de 17,6 GWh d'électricité et 14,4 GWh de chaleur (Gilboire et al., 2022). Toutefois, la production de chaleur est spécifique au cas d'une unité implantée sur un site de distillation, et les trois autres unités présentes à La Réunion produisent exclusivement de l'électricité. Par conséquent, il est considéré dans ce scénario P2 une valorisation du biogaz pour la génération d'éléctricité uniquement.

Compte tenu des investissements actuellement réalisés à Pierrefonds pour le projet de pôle de valorisation RUN'EVA[2], il est supposé que la valorisation des peaux par méthanisation a lieu sur ce site. Les peaux de mangue sont alors transportées sur une distance aller-retour moyenne de 150 km entre les transformateurs et Pierrefonds. De la même façon que pour le scénario P1 (voir section 2.3.1.3 précédente), les hypothèses de fonctionnement et de rendement en biogaz de l'unité de méthanisation, ainsi que de valorisation du digestat, sont issues de la base de données *ecoinvent* et de la littérature (Alrefai et al., 2020; Puligundla et al., 2014).

Comme indiqué ci-dessus, la principale différence avec le scénario P1 tient au fait que le biogaz est ici considéré être valorisé dans une turbine à gaz, pour la production d'électricité uniquement. La description du fonctionnement de la turbine, de rendement électrique de 29 %, est issue de la base *ecoinvent*.

2.4. Description des scénarios *Mangoval* pour les noyaux (N)

2.4.1. Scénario de pressage (N1)

Le scénario N1 s'intéresse en particulier à la production de beurre de mangue par pressage des amandes. Compte tenu des équipements agroalimentaires requis, décortiqueuse et presse, il est considéré que la production de beurre est réalisée par les transformateurs de mangue eux-mêmes.

[2] Voir : https://runeva.re/ [Dernier accès : 18/12/2022]

2.4.1.1. Production du beurre de mangue

Dans ce scénario, les noyaux doivent tout d'abord être décortiqués afin de pouvoir ensuite accéder aux amandes où sont contenus les acides gras du beurre. Au cours du projet *Mangoval*, ce décorticage a été réalisé manuellement lorsque nécessaire, mais à une échelle industrielle, un décorticage automatique est envisagé. Faute d'équipements spécifiques existants, la description du décorticage des noyaux de mangue a été adaptée d'équipements relatifs à différents types de noix. D'après les spécifications techniques du modèle *yk-5* de *Zhengzhou Runxiang Machinery Equipment Co.*[3], il est supposé qu'une décortiqueuse nécessiterait une puissance électrique de 0,75 kW pour un débit en sortie de 50 kg/h, soit une consommation électrique de 15 Wh / kg d'amandes, ou 8,4 Wh / kg de noix pour un rendement de décorticage de 56 % (voir section 2.1.2). Les amandes obtenues sont ensuite broyées, la description du broyage étant supposée identique à celle du scénario R2 (voir section 2.2.2).

La description du pressage des amandes est basée sur les expérimentations réalisées au *CIRAD Qualisud*, et en particulier sur les spécifications techniques de la presse *Monforts Oekotec CA59G* utilisée[4]. D'après celles-ci, une puissance électrique de 1,1 kW pour un débit d'amandes de 4 kg/h a été considérée, soit une consommation électrique de 275 Wh / kg d'amandes. D'après les résultats obtenus au laboratoire, le rendement d'extraction du beurre a été supposé de 70 %, soit une production de beurre de 73 g / kg MS d'amandes (Atheaux et al., 2020).

L'intérêt environnemental du beurre ainsi produit a été estimé à partir de la littérature, en le considérant comme un substitut potentiel de beurre de cacao (Naeem et al., 2019). Dans leur étude, Naeem et al. (2019) ont montré que le beurre de mangue pouvait ainsi se substituer au beurre de cacao sans altération majeure de qualité jusqu'à des teneurs de 60 %. Faute d'éléments dans la base de données *ecoinvent*, les impacts évités par la substitution de beurre de cacao ont été évalués à l'aide de la *World Food LCA Database*.

2.4.1.2. Valorisation énergétique des coques et tourteaux

Dans ce scénario, les coques et tourteaux produits respectivement lors du décorticage des noyaux et du pressage des amandes sont mobilisés pour une valorisation énergétique. En accord avec le Schéma Régional Biomasse de la Réunion, le débouché retenu est la production d'électricité dans les centrales thermiques d'*Albioma* à Bois Rouge et Le Gol (Gilboire et al., 2022).

Les coques et tourteaux ont ainsi été supposés être transportés sur une distance aller-retour moyenne de 90 km, entre les unités de transformation et les centrales thermiques. D'après les informations disponibles, le rendement électrique de ces centrales a été estimé à 25 % (Gilboire et al., 2022). Les émissions liées à la combustion des coques et tourteaux ont été estimées à partir de la base de données *ecoinvent*, pour la combustion de plaquettes de bois dans des centrales thermiques.

2.4.2. Scénario d'extraction assistée par micro-ondes (N2)

Le scénario N2 met l'accent sur la valorisation des noyaux par extraction assistée par micro-ondes. Au cours du projet *Mangoval*, un pilote d'extraction a notamment été mis en place au Port, à La Réunion. Ce scénario se base ainsi sur une production industrielle potentielle à la Réunion, au même endroit.

2.4.2.1. Extraction assistée par micro-ondes

Dans ce scénario, les noyaux sont tout d'abord transportés sur une distance aller-retour moyenne de 75 km, entre les unités de transformation et Le Port à La Réunion. A réception des noyaux, ceux-ci sont broyés, selon les mêmes hypothèses que précédemment (voir section 2.2.2).

La description du fonctionnement de l'unité d'extraction assistée par micro-ondes se base principalement sur les données expérimentales collectées à l'échelle pilote au cours du projet par *Bioval Océan Indien*, et sur les spécifications techniques de l'équipement utilisé, l'*Extractor 200* d'*IDCO*[5]. Les résultats de référence de *Bioval Océan Indien* retenus pour cette étude, ont été obtenus en batch, pour 480 g de noyaux plongés dans un bain de 4 l d'eau, sous une puissance micro-ondes de 300 W pendant 30 minutes. D'après la littérature, l'efficacité d'un générateur micro-ondes dépend peu de la puissance demandée (Wang et al., 2015), ce qui permet d'estimer celle-ci à partir des puissances nominales de l'équipement : une consommation de 4 kW électrique pour une puissance micro-ondes maximale de 1,95 kW, soit une efficacité du générateur micro-ondes de 49 %. Il vient alors une consommation électrique de 640 Wh / kg de noyaux. Ces conditions opératoires ont permis l'extraction de 7 g d'acide gallique par kg de noyaux.

---

[3] Voir : http://www.rxgoldenmachine.com/nut-processing-machine/cashew-nut-processing-machine.html [Dernier accès : 19/12/2022]

[4] Voir : https://m.europages.com/filestore/gallery/8a/5/19959473_e04a99ae.pdf [Dernier accès : 19/12/2022]

[5] Voir : http://www.idco-france.com/en/25-p-extractor.html [Dernier accès : 19/12/2022]

En cohérence avec la modélisation de l'extraction à l'eau subcritique (voir section 2.3.1.2), l'intérêt environnemental de l'extrait produit a été évalué en considérant une substitution d'acide ascorbique, de butadiène et de phénols, assimilés ici à l'acide gallique mesurée par *Bioval Océan Indien*. Les résultats de Sogi et al. (2013) ont alors été utilisés pour estimer la teneur extraite d'acide ascorbique et de caroténoïdes, en supposant les mêmes proportions relatives par rapport aux phénols dans l'extrait ou dans les noyaux. De la même façon que précédemment, les teneurs les plus importantes mesurées par Sogi et al. (2013) sur les noyaux ont été considérées, soit 74,48 mg / 100 g MS d'acide ascorbique, 0,79 mg / 100 g MS de caroténoïdes, et 20035 mg / 100 g MS de phénols.

2.4.2.2. Valorisation énergétique des noyaux résiduels

Après extraction, les noyaux résiduels sont égouttés, et éventuellement séchés au soleil afin de retrouver une teneur en humidité similaire aux conditions initiales, soit 14,2 % MB (voir Tableau 4 de la section 2.1.2). Comme précédemment, aucun impact n'est associé à ce séchage solaire.

Ces noyaux résiduels sont ensuite transportés aux centrales thermiques où elles sont brûlées pour la production d'électricité. Les hypothèses de distance de transport, de rendement électrique et d'émissions sont identiques à celles présentées pour la valorisation énergétique de coques et de tourteaux (voir section 2.4.1.2). Compte tenu des faibles quantités extraites, le contenu énergétique des noyaux résiduels est supposé identique à celui des noyaux avant extraction (voir Tableau 5 de la section 2.1.2).

2.4.3. Scénario combiné de pressage et extraction (N3)

Dans une idée de valorisation en cascade, le scénario N3 combine les deux scénarios précédents N1 et N2 : les noyaux de mangue sont ici décortiqués afin d'en extraire les amandes puis le beurre de mangue, puis une extraction assistée par micro-ondes est appliquée aux tourteaux, et enfin les coques des noyaux et les tourteaux résiduels sont valorisés pour la production d'électricité.

Les hypothèses descriptives des différentes étapes de transformation sont alors identiques à celles exposées ci-dessus dans les sections 2.4.1 et 2.4.2 ci-dessus, à l'exception du rendement d'extraction obtenu sur les tourteaux. En effet, les expérimentations réalisées par *Bioval Océan Indien* ont mis en valeur dans ce cas un rendement inférieur à celui obtenu sur les tourteaux, de 3 g d'acide gallique par kg de tourteaux, contre 7 g par kg de noyaux. En termes de valorisation des extraits obtenus, il a également été considéré une présence d'acide ascorbique et de caroténoïdes, dans les proportions mesurées par Sogi et al. (2013), bien qu'il soit grandement probable dans le cas des tourteaux que ces molécules soient dégradées lors du pressage des amandes, compte tenu notamment de la montée en température au cours du procédé.

2.4.4. Scénario de combustion (N4)

Enfin, le dernier scénario N4 considère une valorisation des noyaux exclusivement pour la production d'électricité. Les mêmes hypothèses de transport, de rendement électrique et d'émissions que celles présentées pour la valorisation énergétique des coques et des tourteaux (voir section 2.4.1.2), sont alors appliquées.

3. Evaluation de l'impact du cycle de vie

Après avoir détaillé les principales hypothèses et choix réalisées, du point de vue méthodologique en partie 1 et des données en partie 2, cette troisième partie détaille les résultats d'ACV obtenus. Les différents scénarios sont tout d'abord étudiés individuellement en section 3.1 afin de mieux comprendre l'origine de leurs impacts, avant d'être comparés entre eux à la section 3.2. Enfin, la section 3.3 discute les principales sources d'incertitudes de ces résultats.

Afin de simplifier la lecture et l'interprétation des résultats, les résultats de cette partie sont donnés selon les trois indicateurs *endpoints* de la méthode *ReCiPe 2016* : épuisement des ressources, qualité des écosystèmes et santé humaine (voir section 1.6). Si nécessaire, l'annexe A détaille, par scénario, la contribution des différents indicateurs *midpoints* aux résultats *endpoints* présentés ici.

3.1. Analyse détaillée des différents scénarios

3.1.1. Analyse des scénarios de référence (R)

Les résultats relatifs *endpoints* des deux scénarios de référence R1 et R2 sont présentés à la Figure 5. Globalement, à l'exception de l'indicateur de santé humaine pour le scénario R1, les résultats d'ACV des scénarios R1 et R2 sont négatifs, ce qui traduit un bénéfice pour l'environnement : les impacts évités liés à la substitution de fertilisants sont dans ces cas plus importants que les impacts liés au transport, à l'épandage et à l'éventuel broyage des co-produits.

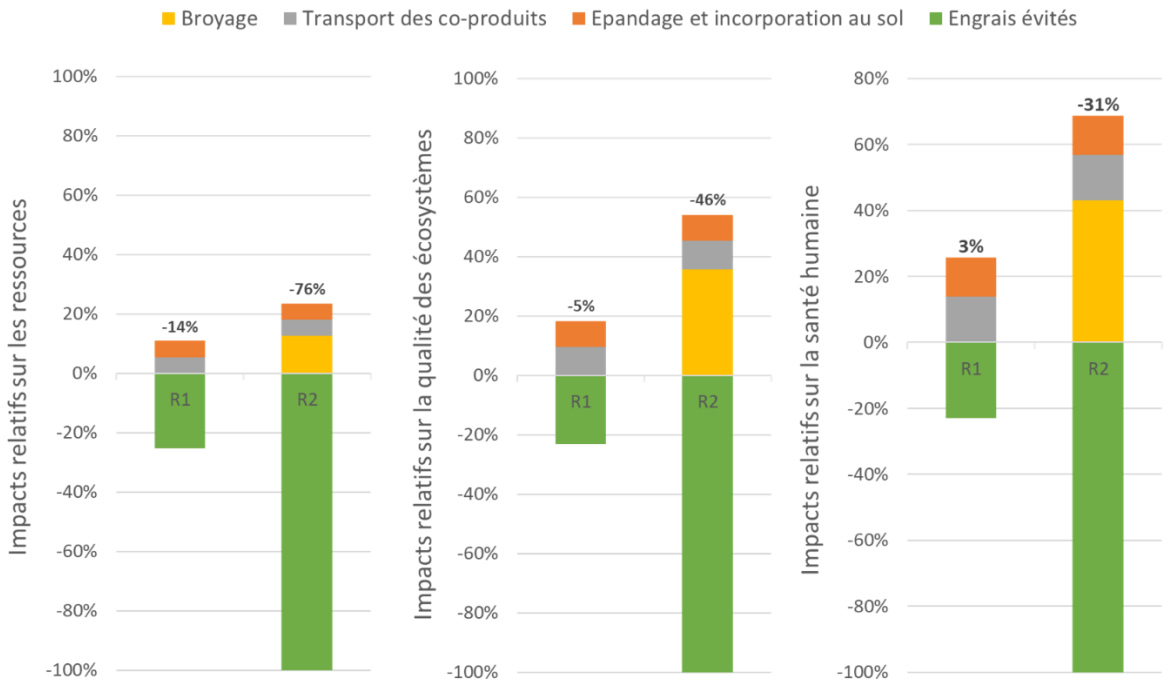

Figure 5 - Résultats ACV des scénarios R1 et R2 de gestion des peaux et noyaux (méthode ReCiPe 2016 Endpoint H*)*

Les résultats de la Figure 5 montrent que, pour les trois indicateurs, les impacts du transport des co-produits d'une part, et de leur épandage et leur incorporation au sol d'autre part, sont sensiblement équivalents. Dans le cas du scénario R1, ces impacts cumulés sont également similaires au bénéfice permis par la substitution d'engrais : légèrement inférieurs dans le cas de l'épuisement des ressources, traduisant un faible bénéfice global, et sensiblement équivalents dans le cas de la qualité des écosystèmes et de la santé humaine, soit aucun effet significatif sur l'environnement. La gestion actuelle des co-produits de la mangue, représentée par ce scénario R1, ne présente donc, si elle permet effectivement une économie de fertilisants, ni intérêt ni risque environnemental marqué.

L'ajout d'un broyage dans le scénario R2 constitue une augmentation significative des impacts de la gestion des co-produits, les impacts de celui-ci étant 1,1, 2,0 et 1,7 fois plus importants que ceux du transport et de l'épandage des co-produits, pour, respectivement, l'épuisement des ressources, la qualité des écosystèmes et la santé humaine. Toutefois, en rendant accessible les éléments minéraux des noyaux, le broyage des co-produits permet également une augmentation significative du bénéfice environnemental potentiel lié à la substitution d'engrais. Ce bénéfice compense largement l'impact

supplémentaire lié au broyage, ce qui se traduit par un intérêt environnemental du scénario R2 plus important que celui du scénario R1, résultant en un bénéfice environnemental net pour les trois indicateurs.

3.1.2. Analyse des solutions *Mangoval* de valorisation des peaux (P)

3.1.2.1. Analyse de la solution P1 d'extraction à l'eau subcritique

Les résultats relatifs *endpoints* de la solution *Mangoval* P1 sont présentés à la Figure 6. Ces résultats d'impacts sont positifs pour les trois indicateurs, ce qui traduit un dommage potentiel net sur l'environnement.

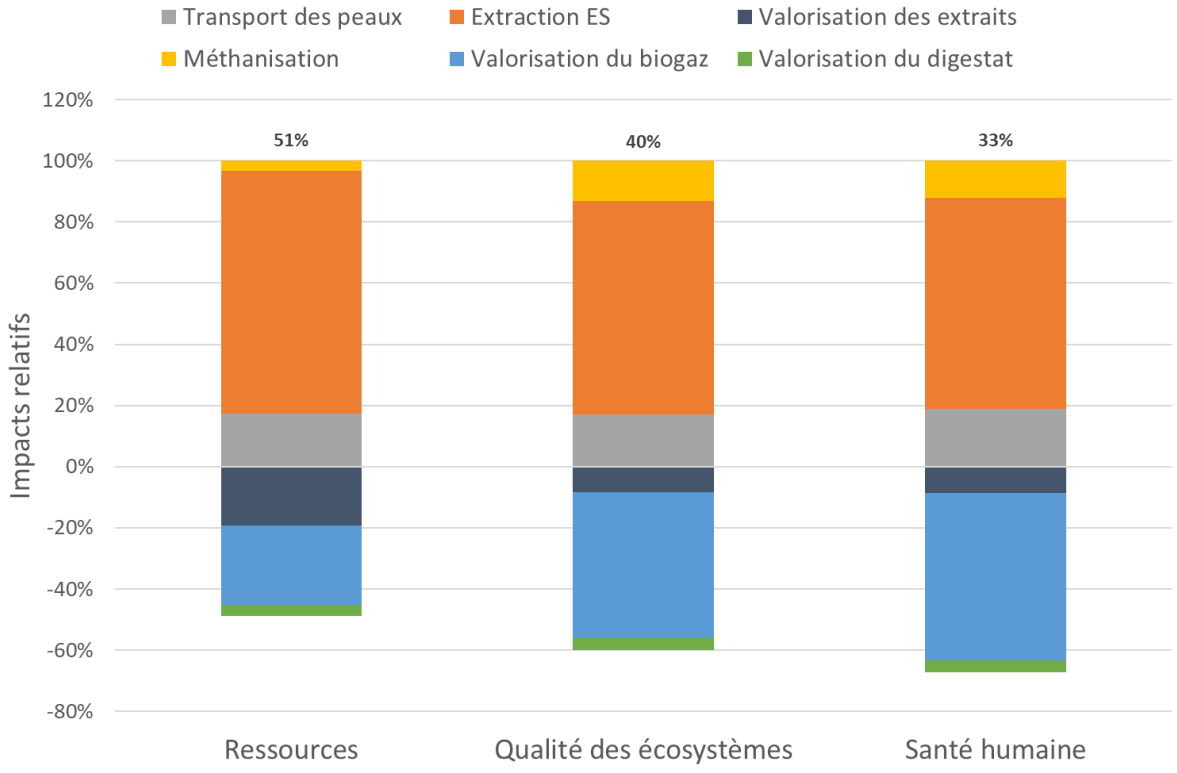

Figure 6 - Résultats ACV du scénario P1 de valorisation des peaux (méthode ReCiPe 2016 Endpoint H*)*

Les résultats d'impacts de la Figure 6 (partie positive du graphe) montrent que les impacts du scénario P1 sont principalement dominés par le fonctionnement de l'unité d'extraction à l'eau subcritique, du fait notamment des besoins en chaleur du procédé. Les impacts de ce procédé contribuent à 69 % à 79 % des impacts de la solution, devant le transport des peaux (17 % à 19 %) et le procédé de méthanisation (3 % à 13 %).

Les bénéfices cumulés de la valorisation des extraits, du biogaz et du digestat, représentent de 49 % à 67 % des impacts des procédés et du transport, ce qui ne permet pas de les compenser. Ces bénéfices sont majoritairement dus à la valorisation du biogaz, qui représente de 53 % à 81 % des bénéfices cumulés. Le bénéfice de la valorisation des extraits est notable en particulier pour l'indicateur d'épuisement des ressources, pour lequel il contribue à 39 % des bénéfices cumulés. Inversement, la contribution de la valorisation du digestat à ces bénéfices est faible, comprise entre 6 % et 7 %.

3.1.2.2. Analyse de la solution P2 de méthanisation

Les résultats relatifs *endpoints* de la solution *Mangoval* P2 sont présentés à la Figure 7. Ces résultats d'impacts sont négatifs pour les trois indicateurs, ce qui traduit un bénéfice potentiel net sur l'environnement.

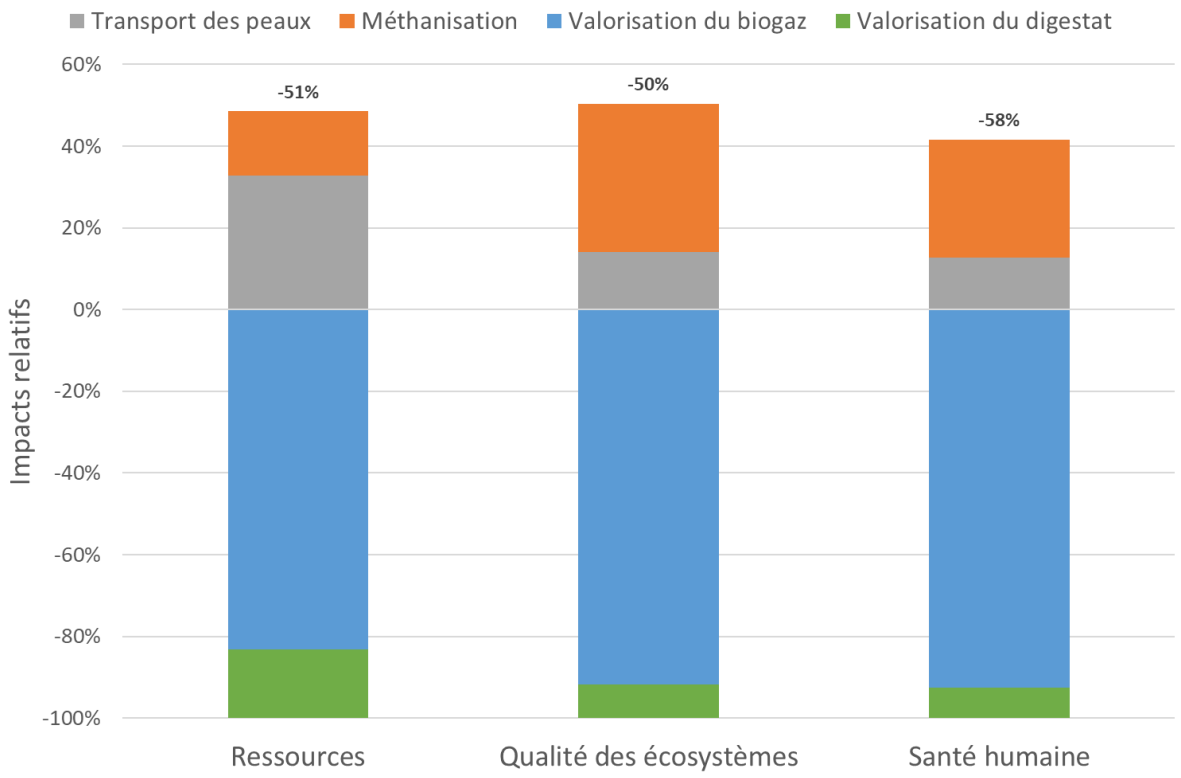

Figure 7 - Résultats ACV du scénario P2 de valorisation des peaux (méthode ReCiPe 2016 Endpoint H*)*

Les résultats de la Figure 7 montrent que les bénéfices environnementaux du scénario P2 sont principalement dus à la valorisation du biogaz, qui représente 83 % à 93 % des bénéfices cumulés. Ceci est en accord avec ce qui a été observé pour le scénario P1 précédent (voir section 3.1.2.1), malgré le fait que le biogaz n'est valorisé que pour la production d'électricité dans ce cas, alors qu'il produit de la chaleur et de l'électricité dans le scénario P1.

Les impacts cumulés du transport des peaux et de la méthanisation représentent entre 42 % et 49 % des bénéfices cumulés de la solution. L'origine de ces impacts varie selon l'indicateur considéré : le transport des peaux représente 68 % des impacts de la solution P2 sur l'épuisement des ressources, tandis que le procédé de méthanisation représente entre 70 % et 72 % des impacts sur la qualité des écosystèmes et la santé humaine.

3.1.3. Analyse des solutions *Mangoval* de valorisation des noyaux (N)

3.1.3.1. Analyse de la solution N1 de pressage des amandes

Les résultats relatifs *endpoints* de la solution *Mangoval* N1 sont présentés à la Figure 8. Ces résultats d'impacts sont négatifs pour les trois indicateurs, ce qui traduit un bénéfice potentiel net sur l'environnement.

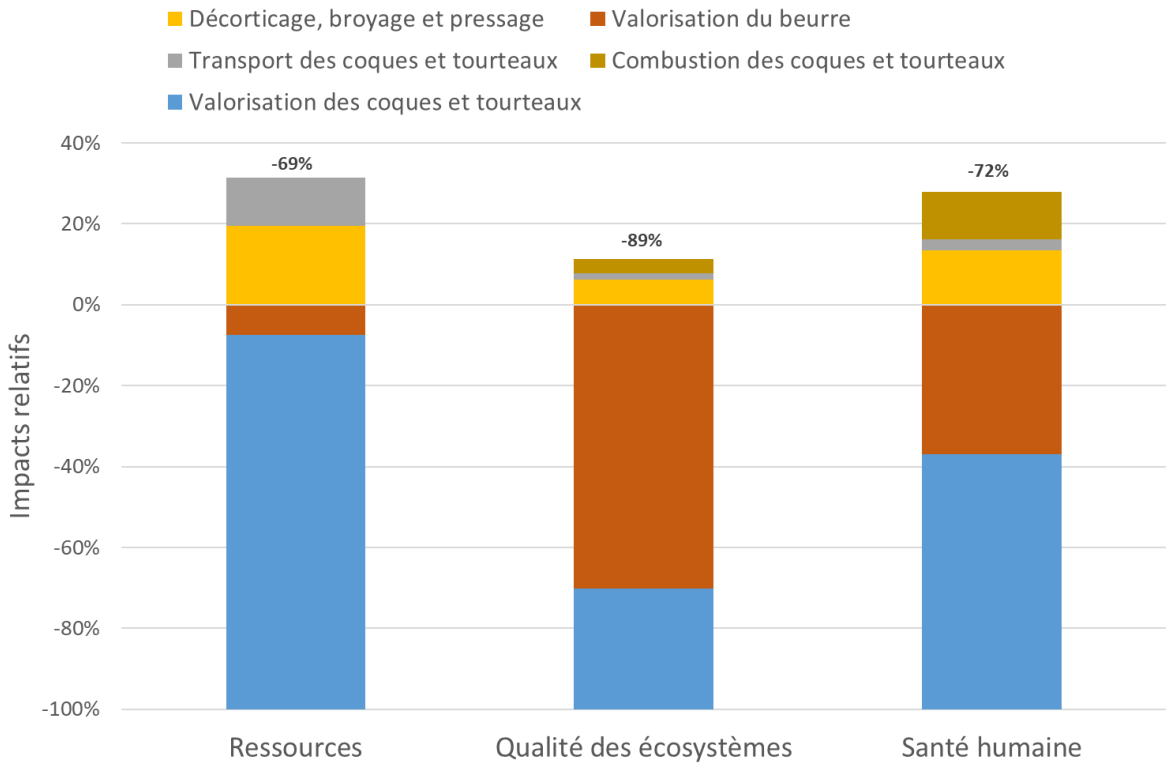

Figure 8 - Résultats ACV du scénario N1 de valorisation des noyaux (méthode ReCiPe 2016 Endpoint H*)*

Les résultats de la Figure 8 montrent que les différents produits de la solution N1, beurre de mangue d'un côté et coques et tourteaux de l'autre, contribuent aux bénéfices environnementaux du scénario de façon différente selon les indicateurs. En effet, les bénéfices cumulés sont dominés par la valorisation énergétique des coques et tourteaux pour l'épuisement des ressources et la santé humaine, avec des contributions respectives de 93 % et 63 %, et par la valorisation du beurre pour la qualité des écosystèmes, avec une contribution de 70 %. Cette variabilité d'un indicateur à l'autre s'explique en partie par l'hypothèse de substitution de beurre de cacao par le beurre de manque, le beurre de cacao étant être partiellement issu de zones déforestées selon la base de données *World Food LCA Database*, ce qui a un effet important sur la qualité des écosystèmes.

A l'opposé de ces bénéfices, les impacts du transport et de la transformation des noyaux compensent 11 % à 31 % des bénéfices de la valorisation. Parmi ces impacts, la production du beurre, incluant décorticage des noyaux, et broyage et pressage des amandes, est l'étape la plus contributrice, représentant entre 48 % et 62 % des impacts. Plus en détails, près de 90 % de l'impact de la production du beurre est dû au pressage pour les trois indicateurs. La deuxième étape la plus contributrice dépend ensuite de l'indicateur considéré : le transport des coques et tourteaux pour l'épuisement des ressources, avec une contribution de 38 %, et les émissions liées à la combustion des coques et tourteaux pour la qualité des écosystèmes et la santé humaine, avec des contributions respectives de 31 % et 42 %.

3.1.3.2. Analyse de la solution N2 d'extraction assistée par micro-ondes

Les résultats relatifs *endpoints* de la solution *Mangoval* N2 sont présentés à la Figure 9. Ces résultats d'impacts sont faibles pour les indicateurs de santé humaine ou de qualité des écosystèmes, voire légèrement négatifs pour l'indicateur d'épuisement des ressources, ce qui traduit un léger bénéfice potentiel net sur l'environnement.

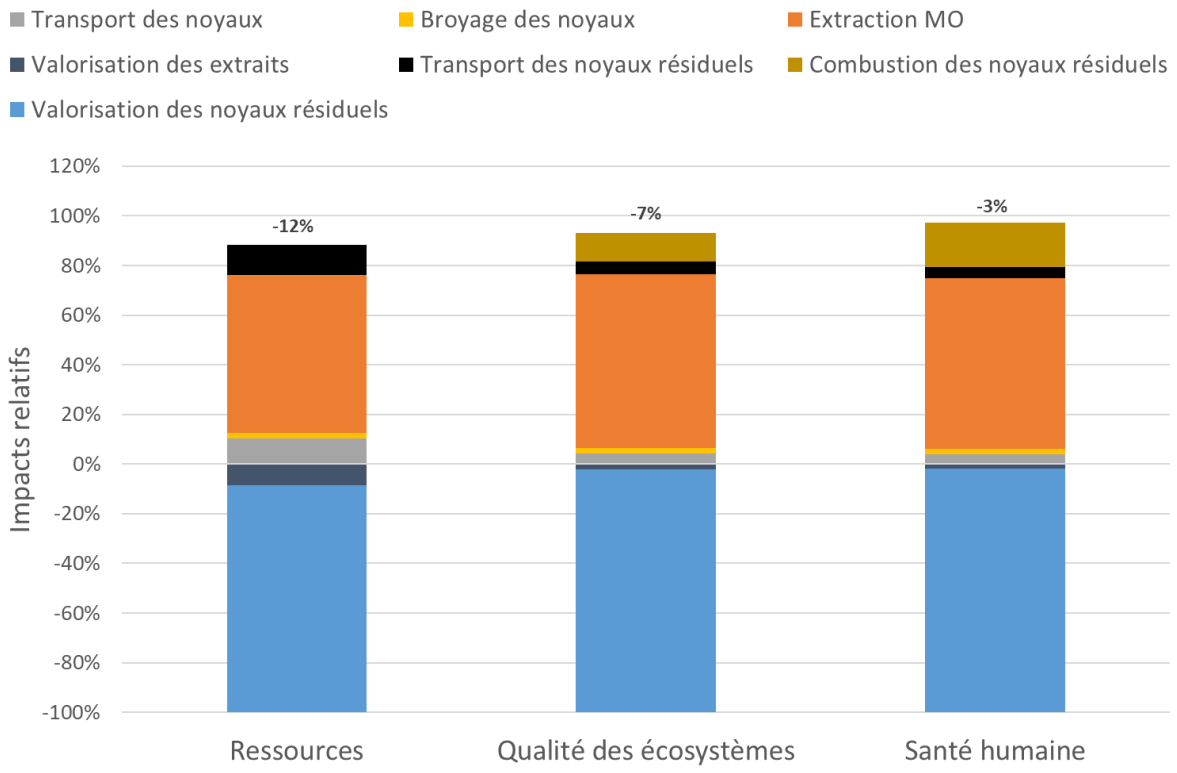

Figure 9 - Résultats ACV du scénario N2 de valorisation des noyaux (méthode ReCiPe 2016 Endpoint H*)*

Les résultats de la Figure 9 montrent que les bénéfices environnementaux de la solution N2 sont principalement dus à la valorisation énergétique des noyaux résiduels après extraction, avec une contribution aux bénéfices cumulés de 91 % à 98 %.

Les impacts liés au transport et à la transformation des noyaux sont d'un ordre de grandeur similaire aux bénéfices observés, et les compensent en quasi-totalité, rendant l'intérêt environnemental de la solution N2 limité. La majeure partie des impacts du scénario sont liés à l'extraction assistée par micro-ondes, avec une contribution de 71 % à 75 %, et en particulier à la consommation électrique nécessaire à la génération des micro-ondes. La deuxième source d'impact de ce scénario dépend de l'indicateur considéré : il s'agit, dans le cas de l'épuisement des ressources, des étapes de transport des noyaux, avant et après extraction, avec une contribution cumulée de 25 %, et dans le cas de la qualité des écosystèmes et de la santé humaine, des émissions liées à la combustion des noyaux, avec une contribution respective de 12 % et 19 %.

3.1.3.3. Analyse de la solution N3 combinée de pressage et d'extraction

Les résultats relatifs *endpoints* de la solution *Mangoval* N3 sont présentés à la Figure 10. Ces résultats d'impacts sont négatifs pour les trois indicateurs, ce qui traduit un bénéfice potentiel net sur l'environnement.

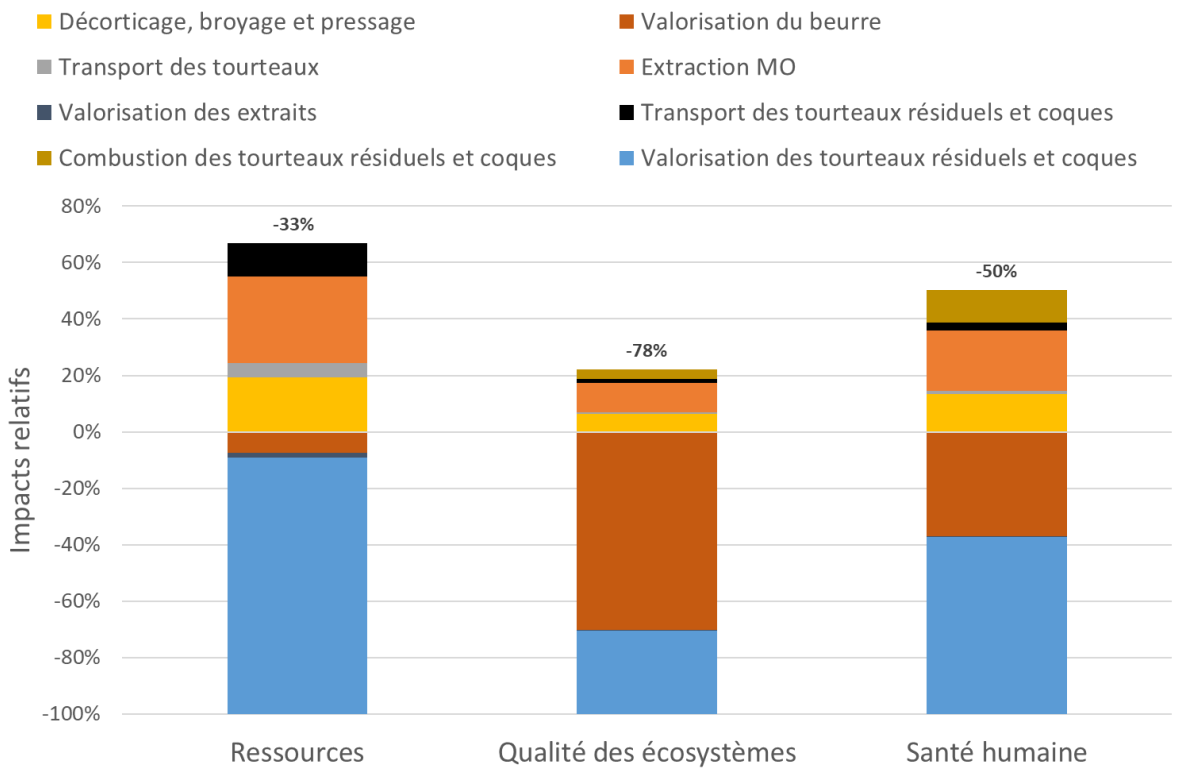

Figure 10 - Résultats ACV du scénario N3 de valorisation des noyaux (méthode ReCiPe 2016 Endpoint H*)*

Les résultats de la Figure 10 montrent que les bénéfices du scénario N3 sont similaires à ceux du scénario N1 (voir section 3.1.3.1), avec des contributions de la valorisation du beurre d'une part, et des coques et tourteaux d'autre part, proches de celles observées précédemment. En effet la valorisation des extraits issus de l'extraction des tourteaux contribue peu aux bénéfices du scénario, avec une contribution inférieure à 2 % quel que soit l'indicateur considéré, et ne modifie donc que peu la structure des résultats.

En accord avec les résultats des scénarios N1 et N2, les impacts du scénario N3 sont principalement liés aux étapes de transformation des noyaux. Au sein de celles-ci, l'extraction assistée par micro-ondes est l'étape la plus contributrice, avec des contributions de 42 % à 46 %, devant la production du beurre, avec des contributions entre 27 % et 29 %. De façon similaire encore, la troisième étape contributrice aux impacts du scénario est le transport, notamment des tourteaux résiduels, pour l'épuisement des ressources, et la combustion des coques et tourteaux pour la qualité des écosystèmes et la santé humaine.

3.1.3.4. Analyse de la solution N4 de combustion des noyaux

Enfin, les résultats relatifs *endpoints* de la solution *Mangoval* N4 sont présentés à la Figure 11. Ces résultats d'impacts sont négatifs pour les trois indicateurs, ce qui traduit un bénéfice potentiel net sur l'environnement.

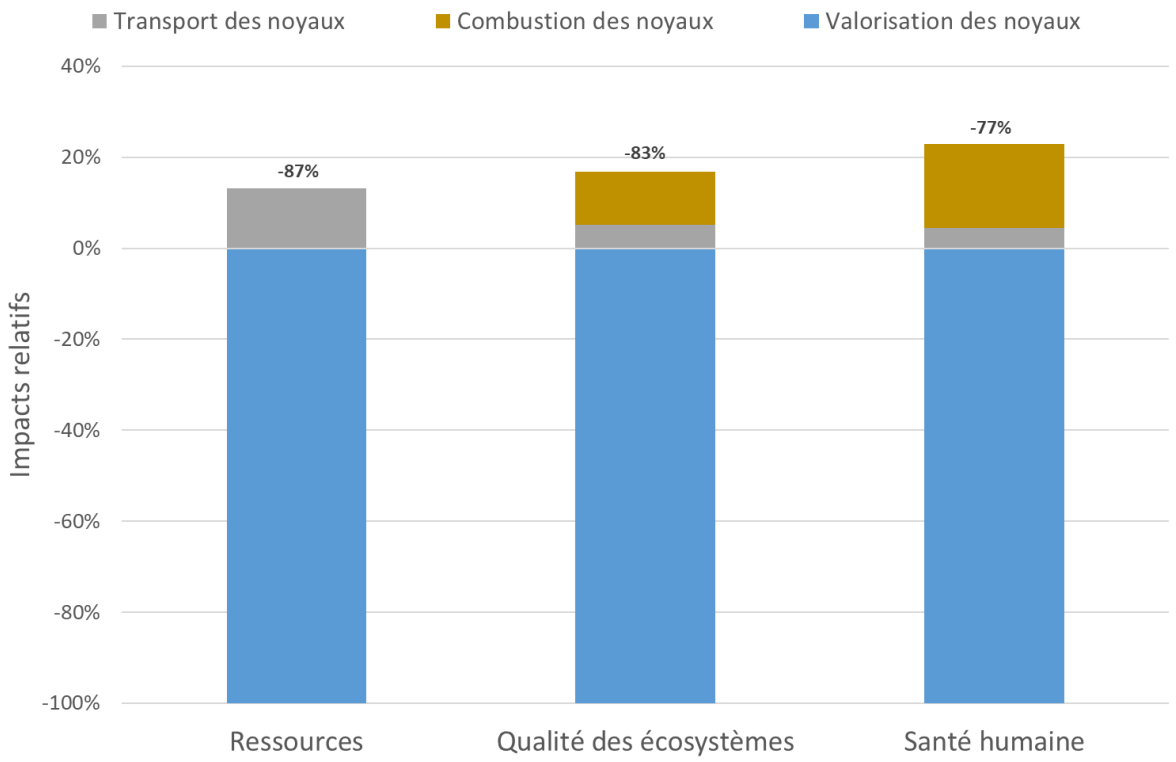

Figure 11 - Résultats ACV du scénario N4 de valorisation des noyaux (méthode ReCiPe 2016 Endpoint H*)*

Les impacts environnementaux de ce dernier scénario N4 sont faibles devant le bénéfice de la valorisation énergétique, n'en compensant que 13 % à 23 %. Comme vu précédemment, ces impacts sont principalement liés au transport pour l'épuisement des ressources, et à la combustion des noyaux pour la qualité des écosystèmes et la santé humaine, avec des contributions respectives de 70 % et 80 % par rapport aux impacts cumulés.

3.2. Analyse comparée des solutions *Mangoval*

3.2.1. Valorisation des peaux de mangue

La Figure 12 compare les résultats nets d'ACV des différents scénarios de valorisation des peaux de mangue. Dans cette partie, les scénarios R1 et R2 sont simulés comme si le gisement de co-produits était uniquement composé de peaux. Les résultats R1 et R2 sont alors parfaitement équivalents car le scénario R2 est construit en particulier pour une meilleure valorisation des noyaux.

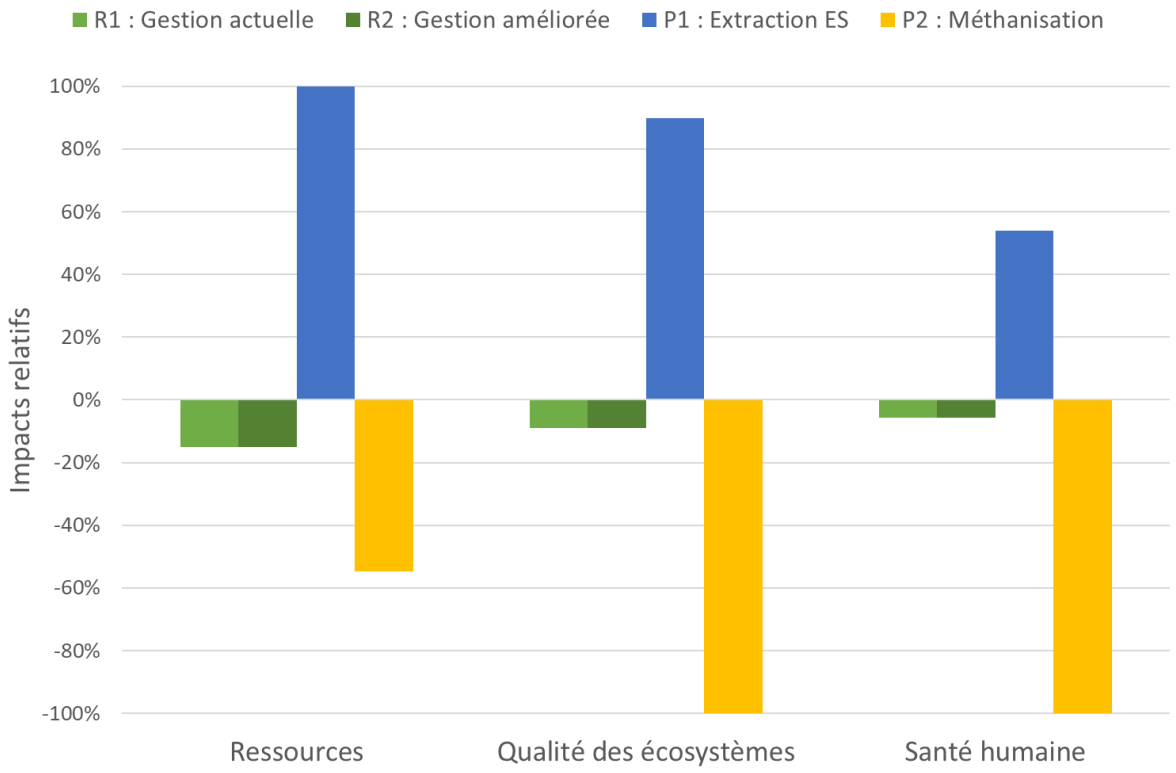

Figure 12 - Comparaison des différents scénarios de valorisation des peaux (méthode ReCiPe 2016 Endpoint H*)*

Les résultats de la Figure 12 montrent que le scénario P2 se démarque particulièrement pour son intérêt environnemental. Les bénéfices environnementaux nets permis par ce scénario P2 sont ainsi près de 4 fois plus importants que ceux des scénarios de référence R1 et R2 pour l'épuisement des ressources, et entre 10 et 20 fois plus importants pour la qualité des écosystèmes et la santé humaine. Cet intérêt peut s'expliquer à la fois par l'impact limité du procédé de méthanisation, et par l'intérêt marqué de la valorisation du biogaz (voir section 3.1.2.2). De plus, il peut être noté que le scénario P2 n'entre pas directement en concurrence avec les scénarios de référence car, à travers la production du digestat, il permet également un retour des matières minérales vers les sols agricoles.

A l'inverse, en l'état actuel, le scénario P1 ne présente pas de réel intérêt environnemental par rapport aux scénarios de référence. Toutefois, la modélisation de ce scénario souffre de différentes incertitudes, dont le fait que celle-ci est basée sur des données de laboratoire exploratoires, qui présentent donc une marge d'optimisation, contrairement à la méthanisation pour laquelle les données disponibles sont plus robustes. Les principales pistes d'amélioration de ce scénario sont présentées à la section 3.3.2.

3.2.2. Valorisation des noyaux de mangue

La Figure 13 compare les résultats nets d'ACV des différents scénarios de valorisation des noyaux de mangue. Dans cette partie, les scénarios R1 et R2 sont simulés comme si le gisement de co-produits était uniquement composé de noyaux. Le scénario R1 ne présente alors plus d'intérêt environnemental, contrairement au scénario R2, car il est supposé que les noyaux non broyés n'ont aucune valeur agronomique (voir section 2.2.1).

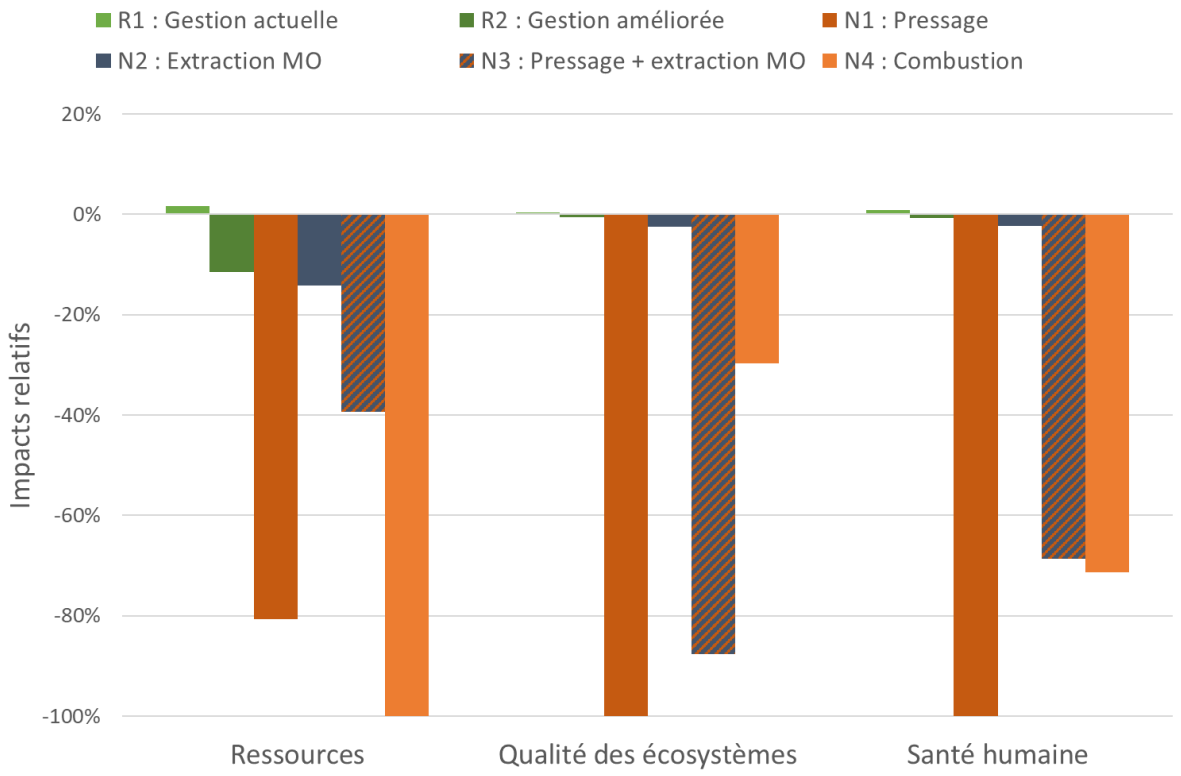

Figure 13 - Comparaison des différents scénarios de valorisation des noyaux (méthode ReCiPe 2016 Endpoint H*)*

Les résultats de la Figure 13 montrent que, contrairement au scénario de référence R1, l'ensemble des solutions *Mangoval* et le scénario R2 présentent un intérêt environnemental net. De plus, malgré des écarts faibles dans le cas du scénario N2, l'ensemble des solutions *Mangoval* présentent également un intérêt net plus marqué que le scénario de référence améliorée R2.

Deux solutions *Mangoval* se distinguent comme les plus intéressantes, en fonction de l'indicateur considéré : la solution N4 de combustion directe des noyaux pour l'épuisement des ressources, et la solution N1 de production de beurre de mangue pour la qualité des écosystèmes et la santé humaine. Comme vu à la section 3.1.3.1, ceci peut notamment s'expliquer par l'hypothèse de substitution de beurre de cacao par le beurre de mangue, qui génère des impacts évités importants, notamment vis-à-vis de la qualité des écosystèmes du fait de la déforestation potentielle liée au beurre de cacao.

Concernant la solution N2 d'extraction assistée par micro-ondes, de la même façon que précédemment pour le scénario P1 (voir section 3.2.1), son intérêt environnemental limité par rapport aux autres solutions est à nuancer avec les incertitudes qui affectent sa modélisation, basée sur des données de laboratoire exploratoires. Enfin, le scénario N3, qui combine les scénarios N1 et N2, présente des performances systématiquement comprises entre ces deux solutions. De la même façon que pour le scénario P1, les principales pistes d'amélioration de ces scénarios sont présentées à la section 3.3.2.

3.3. Limites et sensibilité des résultats ACV obtenus

3.3.1. Séchage des peaux et noyaux

Comme indiqué en section 2.1.2, un séchage solaire sur claies, sans impact environnemental associé, est systématiquement supposé au niveau des transformateurs, pour les scénarios R2, P et N, afin de préparer la biomasse avant sa transformation et son transport. Toutefois, cette hypothèse peut s'avérer forte, notamment si les capacités de production des transformateurs sont importantes, ce qui nécessiterait d'être en mesure de mettre en œuvre ce séchage solaire sur de grandes surfaces.

Cette partie s'intéresse à l'influence de cette hypothèse, en ajoutant à ces scénarios une étape de séchage au gaz naturel. Cette étape a été modélisée simplement à partir de la quantité d'eau à évaporer, soit respectivement 2,95 kg par kg de peau à 5,3 % d'humidité et 0,79 kg par kg de noyau à 14,2 % d'humidité, d'après les humidités retenues en sortie de transformation (voir Tableau 4), de la capacité calorifique et la chaleur latente de vaporisation de l'eau, et de la base de données *ecoinvent* pour le fonctionnement de la chaudière au gaz. Les comparaisons des résultats ACV des différents scénarios, obtenus après l'ajout de cette étape de séchage des co-produits, sont données aux Figure 14 et Figure 15 suivantes, à comparer avec les Figure 12 et Figure 13 précédentes (voir section 3.2).

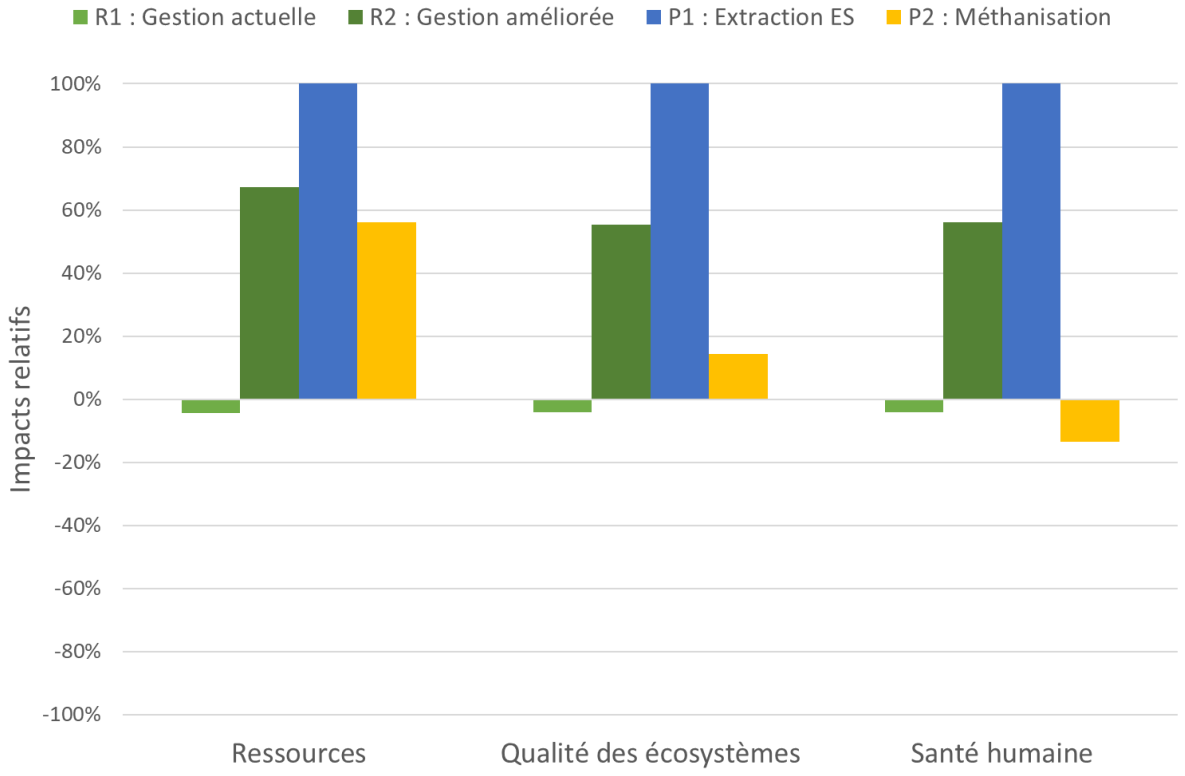

Figure 14 - Comparaison des différents scénarios de valorisation des peaux, avec séchage au gaz naturel (méthode ReCiPe 2016 Endpoint H*)*

Les résultats de la Figure 14, comparés avec ceux de la Figure 12, montrent que, dans le cas d'un séchage des peaux au gaz naturel avant valorisation, le scénario de gestion actuelle est généralement le plus intéressant, notamment pour les indicateurs d'épuisement des ressources et de qualité des écosystèmes. Dans le cas de la santé humaine, le scénario P2 de méthanisation des peaux conserve un intérêt environnemental plus marqué que celui de la gestion actuelle, d'un facteur 3,3.

Toutefois, dans un tel cas où un séchage des peaux au gaz naturel serait nécessaire, d'autres scénarios de valorisation pourraient être explorés, tels qu'une variante au scénario P2 de méthanisation décentralisée, chez les transformateurs. Cette solution permettrait ainsi d'éviter le séchage et le transport des peaux, mais devrait être réfléchie localement selon les autres gisements mobilisables issus des autres filières de fruits des transformateurs (voir section 2.1.1, et notamment le Tableau 3), des autres activités économiques à proximité, voire des ménages.

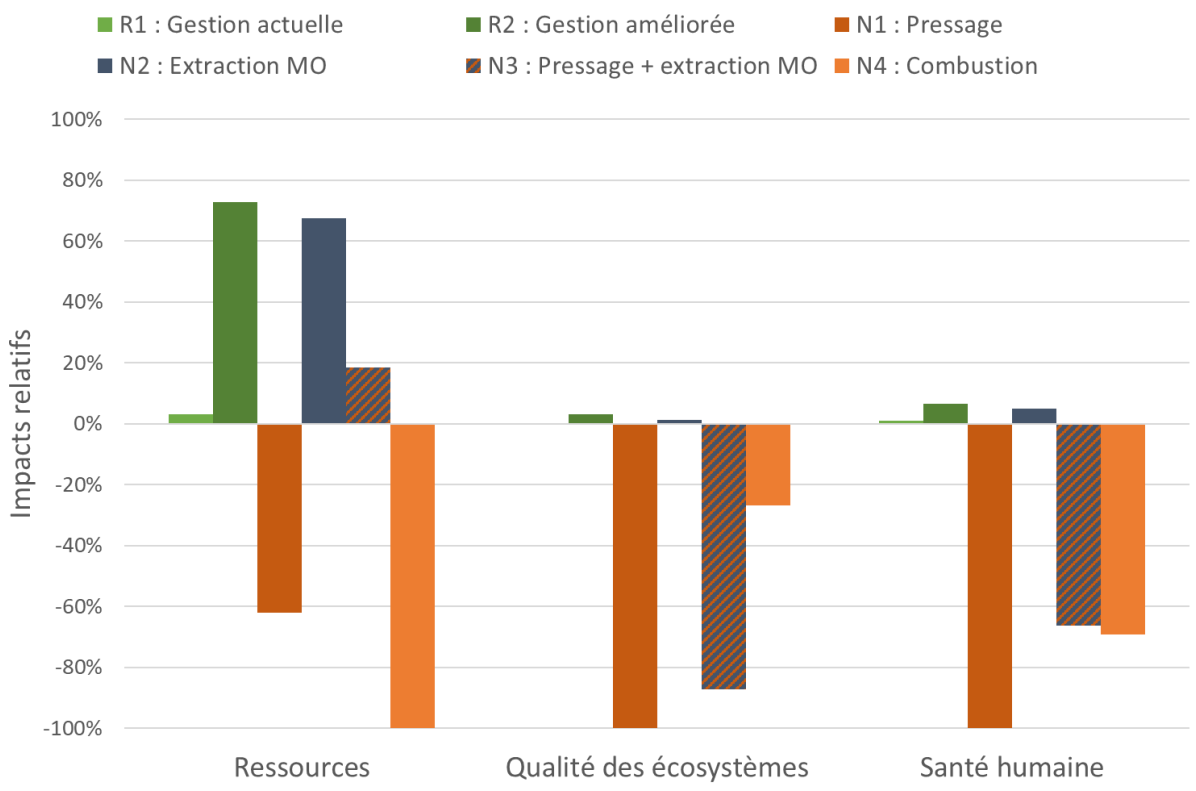

Figure 15 - Comparaison des différents scénarios de valorisation des noyaux, avec séchage au gaz naturel (méthode ReCiPe 2016 Endpoint H*)*

Concernant les noyaux, les résultats de la Figure 15, comparés à ceux de la Figure 13, montrent qu'un séchage des noyaux au gaz naturel serait particulièrement pénalisant pour le scénario de référence R2 et la solution N2, qui perdraient alors leur intérêt environnemental, voire la solution N3, qui aurait alors un impact plus important que celui de la référence R1 sur l'épuisement des ressources, mais conserverait un impact inférieur sur la qualité des écosystèmes et la santé humaine.

Toutefois, les deux scénarios identifiés précédemment comme les plus intéressants, N1 et N4, conserveraient leur intérêt environnemental par rapport à la gestion actuelle R1 même dans le cas d'un séchage des noyaux au gaz naturel.

3.3.2. Potentiel d'amélioration des scénarios d'extraction P1 et N2

Avec les hypothèses considérées dans cette étude pour la description des procédés d'extraction, à l'eau subcritique sur les peaux ou assistée par micro-ondes sur les noyaux, les scénarios correspondants P1 et N2, voire N3 dans une moindre mesure, ont généralement des performances environnementales plus faibles que celles des autres scénarios considérés dans cette étude. Toutefois, comme précisé précédemment, ces scénarios étant plus exploratoires, l'évaluation de leurs performances environnementales souffrent d'incertitudes a priori plus fortes que les autres scénarios.

Les sections 3.1.2.1 et 3.1.3.2 montrent toutes les deux qu'avec les hypothèses actuelles, les deux procédés d'extraction souffrent d'une situation similaire : des impacts environnementaux liés au fonctionnement des procédés d'extraction bien plus importants que les bénéfices espérés par l'effet de substitution permis par la valorisation des extraits. Toutefois ces deux aspects, fonctionnement du procédé et effet de substitution, souffrent d'incertitudes différentes, qui doivent donc être traitées de façon différente :

- Dans le cas du fonctionnement des procédés, seule l'optimisation des conditions opératoires peut permettre d'affiner les résultats obtenus et réduire les incertitudes liées aux hypothèses qui ont été prises pour cette étude. Dans une logique d'éco-conception, différentes pistes d'amélioration peuvent néanmoins être cités, en accord avec les résultats obtenus dans cette étude :
    - Concernant l'extraction à l'eau subcritique, le besoin en chaleur s'est avéré particulièrement important pour les impacts du procédé (voir section 3.1.2.1). Une réduction du débit d'eau, bien que déjà inférieur à celui de la littérature utilisée (voir section 2.3.1.1), ou la modification de la source de chaleur utilisée, ici considérée comme du gaz naturel, par une source générant moins d'impacts environnementaux voire par un recyclage de chaleur résiduelle, seraient alors particulièrement intéressants. De plus, dans une vue d'ensemble, une amélioration de la sélectivité de l'extraction, le rendement considéré ici étant de 60 %

MS, permettrait d'augmenter la part de peaux résiduelles valorisable en méthanisation et donc le bénéfice global de la filière.

  - Concernant l'extraction assistée par micro-ondes, l'électricité nécessaire à la génération des micro-ondes constitue la principale source d'impact du procédé. Des modifications de conditions opératoires telles qu'une réduction du temps d'extraction, de 30 minutes ici, ou une augmentation de la quantité de biomasse traitée par batch, de 480 g pour un bain de 4 l d'eau ici, permettraient alors de réduire la consommation électrique du procédé et donc son impact environnemental.

- Concernant l'effet de substitution, les hypothèses prises ici ont été relativement grossières faute d'informations et de données spécifiques. Une meilleure caractérisation des extraits obtenus ainsi qu'une étude de marché sur les principaux produits alternatifs existants permettraient alors de mieux prendre en compte les bénéfices environnementaux de la valorisation des extraits. Toutefois, un tel travail ne garantit pas une amélioration des performances environnementales des procédés d'extraction, puisqu'il n'est pas possible en l'état de déterminer si les hypothèses prises ici sous-estiment ou sur-estiment les bénéfices environnementaux.

4. Conclusions et perspectives de l'étude

Cette étude d'ACV a permis de construire et évaluer six scénarios de valorisation des peaux et noyaux de mangue à La Réunion, dits solutions *Mangoval*, et de les comparer à deux scénarios de référence, l'un représentant la situation actuelle où les peaux et noyaux sont épandus au champ, et l'autre une version améliorée visant à mieux mettre à profit la valeur agronomique des noyaux. Les résultats obtenus montrent qu'en l'état des connaissances disponibles, les solutions les plus intéressantes d'un point de vue environnemental sont la méthanisation pour la valorisation des peaux d'une part, et la production de beurre ou la combustion pour la production d'électricité pour la valorisation des noyaux d'autre part.

Néanmoins, ces conclusions sont sujettes à différentes incertitudes. La première source d'incertitudes considérée dans ce travail concerne le type de séchage envisageable pour préparer peaux et noyaux avant leur transport ou leur transformation. Si un séchage solaire sur claies a été considéré comme hypothèse de base, les quantités de co-produits générées par les transformateurs pourraient s'avérer trop importantes pour pouvoir mettre en œuvre ce type de séchage. Un séchage au gaz naturel a alors été envisagé et les résultats obtenus montrent qu'une telle solution ne modifierait pas les conclusions de l'étude quant à l'intérêt environnemental des deux solutions identifiées de valorisation des noyaux, mais pourrait remettre en cause la valorisation des peaux en comparaison avec leur gestion actuelle. De nouveaux scénarios pourraient alors être explorés, tels qu'une méthanisation des peaux au niveau des transformateurs, qui permettrait alors de valoriser l'ensemble des co-produits de transformation fruitière.

La deuxième source importante d'incertitude considérée ici est la modélisation des solutions d'extraction considérées dans le projet. En effet, le projet visait la production de connaissances nouvelles sur ces procédés, et les données qui en sont issues ne sont donc pas optimisées. Si ce travail ne permet malheureusement pas de quantifier les incertitudes associées aux hypothèses faites et donc d'évaluer leur influence sur les conclusions de l'étude, les résultats obtenus ont permis d'identifier les principales pistes d'amélioration environnementale de ces procédés. Concernant l'extraction à l'eau subcritique, les deux leviers les plus intéressants a priori sont le couplage du procédé avec une source de chaleur à faible impact environnemental, et l'amélioration de la sélectivité de l'extraction, qui permettrait à la fois de mieux valoriser les extraits et de produire une quantité plus importante de peaux résiduelles pour d'autres usages. Concernant l'extraction assistée par micro-ondes, l'enjeu principal de la réduction des impacts environnementaux du procédé est la diminution de la consommation électrique liée à la génération des micro-ondes, qui peut passer par une réduction des temps de séjour ou une augmentation des quantités de biomasse traitées à chaque opération.

Une troisième et dernière source d'incertitudes analysée dans ce travail est la valorisation des extraits produits. Une meilleure caractérisation de ces extraits et une étude de marché spécifique seraient alors nécessaires afin de mieux représenter les effets de substitution attendus sur le marché et donc leurs conséquences environnementales. De plus, une telle étude de marché serait également nécessaire pour une évaluation économique des différentes solutions *Mangoval* proposées. Une telle évaluation serait d'ailleurs nécessaire pour compléter les résultats de l'évaluation environnementale réalisée ici. En effet, certaines conclusions sur le plan économique pourraient différer des conclusions dressées ici, notamment sur la valorisation des extraits, dont les prix de marché sont généralement plus importants que ceux constatés sur le marché de l'énergie.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Alrefai, R., Alrefai, A.M., Benyounis, K.Y., Stokes, J., 2020. Enhancing the economic viability of anaerobic digestion by exploiting the whole biomass of mango waste and its residues after digestion. Energies 13, 23. https://doi.org/10.3390/en13246683

Atheaux, G., Gaboriaud Kolar, N., Przybylski, R., Vitrac, X., Danflous, J.-P., Chillet, M., Broust, F., Benoist, A., Blin, J., 2020. Mangoval - Rapport d'avancement 2020. Angers, France.

Benoist, A., Cornillier, C., Piednoir, B., 2015. Etude préliminaire à la réalisation de bilans environnementaux sur le chauffage au bois - Partie 1 : Etat de l'art. Angers, France.

Bianchi, C., 2020. Analyse préliminaire de la filière mangue à La Réunion en vue d'une valorisation énergétique des résidus et coproduits. Sainte-Clotilde de la Réunion, France.

Diop, F.T., Danflous, J.-P., 2020. Extraction mécanique du beurre de mangue. Montpellier, France.

EC-JRC, 2010. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. Luxembourg City, Luxembourg. https://doi.org/10.2788/38479

García-Villegas, A., Rojas-García, A., Villegas-Aguilar, M.D.C., Fernández-Moreno, P., Fernández-Ochoa, Á., Cádiz-Gurrea, M. de la L., Arráez-Román, D., Segura-Carretero, A., 2022. Cosmeceutical Potential of Major Tropical and Subtropical Fruit By-Products for a Sustainable Revalorization. Antioxidants 11, 37. https://doi.org/10.3390/antiox11020203

Gilboire, G., Belleville, M., Vergoz, W., 2022. Bilan énergétique de La Réunion. Saint Leu, France.

Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., van Zelm, R., 2017. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Int. J. Life Cycle Assess. 22, 138–147. https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y

Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M.D.M., Hollander, A., Zijp, M., van Zelm, R., 2016. ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and enpoint level - Report I: Characterization, National Institute for Public Health and the Environment. Bilthoven, The Netherlands.

ISO, 2006. Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework.

Kleinpeter, V., Vayssières, J., Alison, C., van de Kerchove, V., Degenne, P., Vigne, M., 2019. Inventaire et quantification des flux de biomasses locales valorisées ou valorisables en agriculture à La Réunion. Saint-Pierre de La Réunion, France.

Manhongo, T.T., Chimphango, A., Thornley, P., Röder, M., 2021. An economic viability and environmental impact assessment of mango processing waste-based biorefineries for co-producing bioenergy and bioactive compounds. Renew. Sustain. Energy Rev. 148, 15. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111216

Naeem, A., Shabbir, M.A., Khan, M.R., Ahmad, N., Roberts, T.H., 2019. Mango Seed Kernel Fat as a Cocoa Butter Substitute Suitable for the Tropics. J. Food Sci. 84, 1315–1321. https://doi.org/10.1111/1750-3841.14614

Przybylski, R., Atheaux, G., Vitrac, X., Danflous, J.-P., Rivier, M., Chillet, M., Broust, F., Blin, J., Benoist, A., Lanvin, C., 2021. Mangoval - Rapport d'avancement 2021. Angers, France.

Puligundla, P., Obulam, V.S.R., Oh, S.E., Mok, C., 2014. Biotechnological potentialities and valorization of mango

peel waste: A review. Sains Malaysiana 43, 1901–1906. https://doi.org/10.17576/jsm-2014-4312-12

Sogi, D.S., Siddiq, M., Greiby, I., Dolan, K.D., 2013. Total phenolics, antioxidant activity, and functional properties of “Tommy Atkins” mango peel and kernel as affected by drying methods. Food Chem. 141, 2649–2655. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.05.053

Todd, R., Baroutian, S., 2017. A techno-economic comparison of subcritical water, supercritical CO2 and organic solvent extraction of bioactives from grape marc. J. Clean. Prod. 158, 349–358. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.043

Wang, W., Zhao, C., Sun, J., Wang, X., Zhao, X., Mao, Y., Li, X., Song, Z., 2015. Quantitative measurement of energy utilization efficiency and study of influence factors in typical microwave heating process. Energy 87, 678–685. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.036

Zuñiga-Martínez, B.S., Domínguez-Avila, J.A., Robles-Sánchez, R.M., Ayala-Zavala, J.F., Villegas-Ochoa, M.A., González-Aguilar, G.A., 2022. Agro-Industrial Fruit Byproducts as Health-Promoting Ingredients Used to Supplement Baked Food Products. Foods 11, 22. https://doi.org/10.3390/foods11203181

Annexe A : Identification des principaux enjeux environnementaux des scénarios étudiés

Les résultats ACV présentés dans la partie 3 sont donnés selon les indicateurs *endpoints* de la méthode *ReCiPe 2016 H*. Afin de mieux comprendre les principaux enjeux environnementaux sous-jacents, les Tableau 7 et Tableau 8 suivants détaillent les contributions nettes des indicateurs *midpoints* à chacun des trois indicateurs *endpoints* pour, respectivement, les scénarios de valorisation des peaux et des noyaux.

De la même façon que pour la section 3.2, les scénarios de référence R1 et R2 sont simulés pour chacun de ces tableaux comme s'ils ne concernaient uniquement des peaux ou des noyaux. Ceci explique les différences de résultats pour ces scénarios entre les deux tableaux.

Tableau 7 - Contributions des indicateurs midpoints *aux résultats d'indicateurs* endpoints *des scénarios de valorisation des peaux (méthode* ReCiPe 2016 H*)*

Enjeux environnementaux	R1	R2	P1	P2
Epuisement des ressources				
Epuisement des ressources minérales	1 %	1 %	0 %	1 %
Epuisement des ressources fossiles	99 %	99 %	100 %	99 %
Qualité des écosystèmes				
Changement climatique	57 %	57 %	74 %	24 %
Formation d'ozone photochimique	1 %	1 %	8 %	11 %
Acidification terrestre	20 %	20 %	8 %	51 %
Eutrophisation des eaux douces	3 %	3 %	-2 %	8 %
Eutrophisation marine	0 %	0 %	0 %	0 %
Ecotoxicité terrestre	1 %	1 %	0 %	0 %
Ecotoxicité des eaux douces	1 %	1 %	0 %	0 %
Ecotoxicité marine	0 %	0 %	0 %	0 %
Usage des sols	5 %	5 %	2 %	3 %
Consommation d'eau	12 %	12 %	9 %	2 %
Santé humaine				
Changement climatique	50 %	50 %	68 %	13 %
Destruction de la couche d'ozone	0 %	0 %	0 %	0 %
Effets des radiations ionisantes	0 %	0 %	0 %	0 %
Formation d'ozone photochimique	0 %	0 %	0 %	0 %
Formation de particules fines	34 %	34 %	25 %	76 %
Toxicité humaine cancérigène	4 %	4 %	3 %	4 %
Toxicité humaine non-cancérigène	7 %	7 %	0 %	7 %
Consommation d'eau	5 %	5 %	4 %	0 %

Tableau 8 - Contributions des indicateurs midpoints *aux résultats d'indicateurs* endpoints *des scénarios de valorisation des noyaux (méthode* ReCiPe 2016 H*)*

Enjeux environnementaux	R1	R2	N1	N2	N3	N4
Epuisement des ressources						
Epuisement des ressources minérales	2 %	2 %	1 %	0 %	1 %	0 %
Epuisement des ressources fossiles	98 %	98 %	99 %	100 %	99 %	100 %
Qualité des écosystèmes						
Changement climatique	49 %	67 %	31 %	127 %	28 %	56 %
Formation d'ozone photochimique	17 %	- 6 %	1 %	- 72 %	- 1 %	3 %
Acidification terrestre	17 %	6 %	7 %	47 %	4 %	31 %
Eutrophisation des eaux douces	5 %	0 %	2 %	1 %	1 %	7 %
Eutrophisation marine	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Ecotoxicité terrestre	1 %	3 %	0 %	- 5 %	0 %	0 %
Ecotoxicité des eaux douces	1 %	1 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Ecotoxicité marine	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Usage des sols	10 %	11 %	59 %	2 %	67 %	3 %
Consommation d'eau	0 %	16 %	0 %	0 %	0 %	1 %
Santé humaine						
Changement climatique	26 %	89 %	51 %	216 %	60 %	38 %
Destruction de la couche d'ozone	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Effets des radiations ionisantes	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Formation d'ozone photochimique	0 %	0 %	0 %	- 3 %	0 %	0 %
Formation de particules fines	47 %	- 21 %	42 %	- 156 %	35 %	48 %
Toxicité humaine cancérigène	13 %	5 %	3 %	24 %	2 %	6 %
Toxicité humaine non-cancérigène	14 %	16 %	4 %	22 %	3 %	7 %
Consommation d'eau	0 %	11 %	0 %	- 2 %	0 %	0 %

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1 - Synthèse des enjeux environnementaux considérés par chacun des trois indicateurs endpoints de la méthode ReCiPe 2016 11
Tableau 2 - Description succincte des différents enjeux et mécanismes environnementaux considérés par la méthode ReCiPe 2016 12
Tableau 3 - Gisement en co-produits de transformation de fruits pour la campagne 2020-2021, selon des entretiens réalisés auprès des deux principaux industriels du secteur (RBI et PMI) 13
Tableau 4 - Synthèse des teneurs en humidité des co-produits retenues pour la présente étude d'ACV 14
Tableau 5 - Pouvoirs Calorifiques Inférieurs (PCI) des différents produits considérés dans le projet Mangoval 15
Tableau 6 - Teneurs en éléments minéraux N, P et K considérées dans cette étude 15
Tableau 7 - Contributions des indicateurs midpoints aux résultats d'indicateurs endpoints des scénarios de valorisation des peaux (méthode ReCiPe 2016 H) 35
Tableau 8 - Contributions des indicateurs midpoints aux résultats d'indicateurs endpoints des scénarios de valorisation des noyaux (méthode ReCiPe 2016 H) 36

FIGURES

Figure 1 - Représentation schématique des systèmes étudiés dans le cadre de cette étude d'ACV, et de leurs frontières 7
Figure 2 - Représentation simplifiée des scénarios de référence (R) 9
Figure 3 - Représentation simplifiée des scénarios de valorisation des peaux (P) 9
Figure 4 - Représentation simplifiée des scénarios de valorisation des noyaux (N) 10
Figure 5 - Résultats ACV des scénarios R1 et R2 de gestion des peaux et noyaux (méthode ReCiPe 2016 Endpoint H) 20
Figure 6 - Résultats ACV du scénario P1 de valorisation des peaux (méthode ReCiPe 2016 Endpoint H) 21
Figure 7 - Résultats ACV du scénario P2 de valorisation des peaux (méthode ReCiPe 2016 Endpoint H) 22
Figure 8 - Résultats ACV du scénario N1 de valorisation des noyaux (méthode ReCiPe 2016 Endpoint H) 23
Figure 9 - Résultats ACV du scénario N2 de valorisation des noyaux (méthode ReCiPe 2016 Endpoint H) 24
Figure 10 - Résultats ACV du scénario N3 de valorisation des noyaux (méthode ReCiPe 2016 Endpoint H) 25
Figure 11 - Résultats ACV du scénario N4 de valorisation des noyaux (méthode ReCiPe 2016 Endpoint H) 26
Figure 12 - Comparaison des différents scénarios de valorisation des peaux (méthode ReCiPe 2016 Endpoint H) 27
Figure 13 - Comparaison des différents scénarios de valorisation des noyaux (méthode ReCiPe 2016 Endpoint H) 28
Figure 14 - Comparaison des différents scénarios de valorisation des peaux, avec séchage au gaz naturel (méthode ReCiPe 2016 Endpoint H) 29
Figure 15 - Comparaison des différents scénarios de valorisation des noyaux, avec séchage au gaz naturel (méthode ReCiPe 2016 Endpoint H) 30

SIGLES ET ACRONYMES

ACV	Analyse de Cycle de Vie
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
CIRAD	Centre de coopération Internationale de Recherche en Agronomie pour le Développement
Extraction ES	Extraction à l'eau subcritique
Extraction MO	Extraction assistée par micro-ondes
ILCD	International Life Cycle Data system
ISO	International Organization for Standardization
MB	Matière Brute
MS	Matière Sèche
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur
PMI	Pulpes Mascareignes Industrie
RBI	Royal Bourbon Industries

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols… - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'**ADEME**

FAITS ET CHIFFRES
L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.

CLÉS POUR AGIR
L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.

ILS L'ONT FAIT
L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.

EXPERTISES
L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard

HORIZONS
L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ADEME
AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

EXPERTISES

ANALYSE DE CYCLE DE VIE DE LA VALORISATION DES CO-PRODUITS DE TRANSFORMATION DE LA MANGUE A LA REUNION

Cette étude d'Analyse de Cycle de Vie s'inscrit dans le cadre du projet *Mangoval*, dont l'ambition est de contribuer à une meilleure valorisation des co-produits de la transformation de la mangue, peaux et noyaux, sur l'île de La Réunion.

L'évaluation réalisée ici a pour objectifs principaux d'évaluer l'intérêt environnemental des solutions proposées dans le cadre du projet et d'en identifier les principales sources d'impacts et les leviers potentiels d'amélioration.