Filière Hévéa

Côte d'Ivoire

Analyse du Cycle de Vie

Rapport d'expertise

Décembre 2020

Montpellier, France

FIRCA, Filière Hévéa
Analyse du Cycle de Vie

Anthony BENOIST[1,2], Antoine LECONTE[3,4], Cécile BESSOU[3,4]

[1] CIRAD, UPR BioWooEB, F-34398 Montpellier, France.
[2] BioWooEB, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France.
[3]CIRAD, UPR Systèmes de Pérennes, F-34398 Montpellier, France.
[4] Systèmes de Pérennes, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France.

Décembre 2020

Montpellier, France

Résumé exécutif

Avec 780.000 tonnes produites en 2019, la Côte d'Ivoire est le premier pays producteur de caoutchouc en Afrique et le sixième à l'échelle mondiale. Le verger d'hévéa de Côte d'Ivoire est caractérisé par un secteur villageois prédominant et en pleine expansion, représentant environ 550.000 ha de plantations en 2019, soit plus de 90 % des surfaces plantées à l'heure actuelle. Les plantations agro-industrielles d'hévéa correspondent ainsi à moins de 10 % des surfaces plantées. L'usinage du caoutchouc en Côte d'Ivoire consiste très majoritairement à sa première transformation, pour la production de balles de caoutchouc. En 2019, 570.000 tonnes de caoutchouc ont ainsi été transformées et exportées, principalement vers le marché européen ; 25 à 30 % des exports l'ont été directement sous forme de coagulums. Dans un contexte d'évolution structurelle et de forte croissance, un état des lieux de la filière doit permettre d'identifier les principaux risques environnementaux associés à la filière actuelle et d'apporter un éclairage sur les leviers d'action potentiels pour accroître les performances du secteur. Dans ce contexte, le FIRCA et l'APROMAC ont commandité une étude Analyse du Cycle de Vie (ACV) sur la filière palmier à huile. L'ACV compte parmi les méthodes d'évaluation environnementale les plus complètes. Sa méthodologie normée ISO 14 440/44 permet de quantifier de nombreux impacts environnementaux tout au long d'une filière afin d'identifier les principales sources d'impact et les changements de pratiques permettant de les réduire.

Sur les bases du diagnostic de la filière, les ACV de la production de balles de caoutchouc et de coagulums ont été réalisées, en comparant également les impacts en fonction des différents types de plantations industrielles et villageoises. Pour les deux produits exportés, la phase de production de latex en plantation est le principal contributeur aux divers impacts environnementaux. L'usinage des balles contribue essentiellement à l'épuisement des ressources fossiles via la consommation d'électricité et le séchage. L'impact changement climatique est déterminé à ~35% par la phase de plantation et à ~43% par les émissions liées au lagunage. Lorsque les coagulums sont exportés directement, en sus de la phase de plantation, le transport ne contribue que marginalement au changement climatique (9%) et plus significativement à l'épuisement des ressources fossiles (83%). L'impact lié à l'approvisionnement par des plantations villageoises est globalement plus important que celui des plantations industrielles. Ces plus forts impacts des plantations villageoises sont notamment dus aux rendements plus faibles par rapport aux industrielles ; une différence de rendement qui impacte directement l'impact usage des sols mais également linéairement les autres catégories d'impact. Une grande partie des impacts des plantations villageoises sont dus au brûlis couramment effectué en préparation des plantations et qui contribue à différentes catégories d'impact notamment les particules fines, la formation d'ozone photochimique et l'acidification terrestre. L'analyse de sensibilité a mis en évidence l'importance de mieux caractériser les rendements moyens des plantations villageoises et l'impact primordial de potentiels changement d'usage des sols sur le changement climatique.

Au vu des résultats des ACV, les principales recommandations concernent en tout premier lieu l'amélioration des pratiques en plantations villageoises tout d'abord pour éviter le brûlis puis augmenter les rendements. Il s'agit d'accompagner la réduction du brûlis d'un suivi strict de la maladie du Fomès pour trouver les meilleurs compromis en considérant que l'impact des traitements associés reste faible au regard seulement des autres contributeurs. L'acquisition de données complémentaires permettra de mieux caractériser les pratiques et impacts du lagunage ainsi que les risques de changement d'usage à l'échelle régionale afin de définir les stratégies de développement et les pratiques les plus durables.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble des acteurs de la filière hévéa en Côte d'Ivoire pour leur accueil chaleureux sur le terrain et le temps consacré aux entretiens et aux visites.

L'accompagnement du FIRCA tout au long de l'étude a été déterminant pour la bonne conduite du travail. Les auteurs remercient la Direction du FIRCA, en particulier Mme. Assita Chérie TRAORE, Directrice du Département Cultures d'Exportation et Productions Forestières, et M. Oumar N'DIAYE, Directeur Exécutif Adjoint, ainsi que M. Brice TOGUILA, Chargé de Programmes Hévéa. Les auteurs remercient également la Direction de l'APROMAC, en particulier M. Akpangni ATTOBRA, Secrétaire Général, et M. Albert KOFFI KONAN, Secrétaire Exécutif du FDH/APROMAC.

Citation du rapport :

Benoist A., Leconte A., Bessou C. 2020. Filière Hévéa en Côte d'Ivoire : Analyse du Cycle de Vie, réalisée pour le FIRCA et l'APROMAC, 38 p., Décembre 2020, Montpellier, France

ACRONYMES

ACV	Analyse de Cycle de Vie
APROMAC	Association des Professionnels du Caoutchouc Naturel de Cote d'Ivoire
CCP	Compagnie des Caoutchoucs du Pakidié
CIRAD	Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement
CNRA	Centre National de Recherche Agronomique
COV	Composés Organiques Volatils
DRC	*Dry Rubber Content*, ou teneur en caoutchouc sec
FDH	Fonds de Développement de l'Hévéa
FIRCA	Fonds Interprofessionnel pour la Recherche et le Conseil Agricoles
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (voir aussi IPCC)
HWSD	*Harmonized World Soil Database*
ILCD	*International reference Life Cycle Data system*
IPCC	*Intergovernmental Panel on Climate Change* (voir aussi GIEC)
IRSG	*International Rubber Study Group*
JBG	Jardin à Bois de Greffe
PI	Plantations Industrielles
PV	Plantations Villageoises
SAPH	Société Africaine de Plantations d'Hévéa
SOCATCI	Société des Caoutchoucs de Côte d'Ivoire
SODHEVEA	Société de Développement de l'Hévéa
SOGB	Société des Caoutchoucs de Grand-Béréby
TSR	*Technically Specified Rubber*

Table des matières

1 Introduction 9

2 Méthodologie de l'étude 10

2.1 Introduction à l'ACV 10

2.2 Objectifs de l'étude 11

2.3 Définition des systèmes d'étude 12

2.3.1 Choix des systèmes étudiés 12

2.3.2 Définition des fonctions et des frontières des systèmes 12

2.4 Champs géographique et temporel de l'étude 13

2.5 Principales sources de données utilisées 13

2.6 Choix des modèles et indicateurs relatifs à l'évaluation de l'impact du cycle de vie 13

3 Inventaire de cycle de vie 15

3.1 Plantations d'hévéa 15

3.1.1 Modélisation adoptée du verger d'hévéa 15

3.1.2 Production des plants d'hévéa en pépinière 16

3.1.3 Production de coagulums par les plantations d'hévéa 16

3.1.4 Hypothèses relatives aux changements d'usages des sols et aux émissions au champ 18

3.2 Usinage des coagulums 22

3.3 Transport des coagulums et des balles de caoutchouc (type TSR) 23

4 Evaluation de l'impact environnemental de cycle de vie 24

4.1 Analyse des impacts environnementaux de la filière hévéa 24

4.1.1 Analyse préliminaire : principaux enjeux environnementaux de la filière 24

4.1.2 Exportation de balles de caoutchouc de type TSR 25

4.1.3 Exportation de coagulums frais 26

4.2 Analyse comparée des impacts des PI et des PV 27

4.3 Analyses de sensibilité 28

4.3.1 Influence des changements d'usages des sols sur les performances de la filière 28

4.3.2 Sensibilité des résultats au rendement des PV 29

5 Conclusions et perspectives de l'étude 32

6 Références 34

Annexe 1 : Détail des visites de terrain réalisées au cours de la mission CIRAD d'avril 2019 37

Index des figures

Figure 1 : Représentation des 4 étapes de l'Analyse de Cycle de Vie (Source : S. Payen@CIRAD) 11

Figure 2 : Représentation schématique des deux systèmes considérés, de leurs principales étapes, et de leurs frontières 12

Figure 3 : Représentation schématique du verger d'hévéa, adoptée pour la modélisation de cette étude 16

Figure 4 : Représentation simplifiée du procédé d'usinage des coagulums en Côte d'Ivoire 22

Figure 5 : Contributions des différents enjeux environnementaux aux indicateurs *endpoints* d'impacts du système d'exportation de balles TSR 24

Figure 6 : Contributions des différentes étapes du cycle de vie aux résultats d'indicateurs *midpoints* des principaux enjeux environnementaux retenus pour l'analyse du système d'exportation des balles TSR 25

Figure 7 : Contributions des différentes étapes du cycle de vie aux résultats d'indicateurs *midpoints* des principaux enjeux environnementaux retenus pour l'analyse du système d'exportation des coagulums 26

Figure 8 : Comparaison des résultats d'indicateurs d'impacts *midpoints* de l'approvisionnement en coagulums des unités d'usinage par les PI ou les PV 27

Figure 9 : Comparaison des contributions à l'épuisement des ressources fossiles de l'approvisionnement en coagulums des unités d'usinage par les PI ou les PV 28

Figure 10 : Sensibilité des impacts du système d'exportation de balles de caoutchouc sur le changement climatique, selon le scénario de changements d'usages des sols retenu 29

Figure 11 : Comparaison des résultats d'indicateurs d'impacts *midpoints* du système d'exportation de balles, selon le rendement retenu pour les PV 30

Figure 12 : Influence du rendement des PV sur la comparaison des résultats d'indicateurs d'impacts *midpoints* de l'approvisionnement en coagulums des unités d'usinage par les PI ou les PV 31

Figure 13 : Localisation des sites visités lors de la mission CIRAD d'avril 2019 37

Index des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des enjeux environnementaux considérés par chacun des trois indicateurs *endpoints* de la méthode ReCiPe 2016 14

Tableau 2 : Description succincte des différents enjeux et mécanismes environnementaux considérés par la méthode ReCiPe 2016 14

Tableau 3 : Principales caractéristiques des interventions menées dans les différents types de plantation d'hévéa 17

Tableau 4 : Principales sources de données utilisées pour quantifier les impacts des interventions menées dans les différents types de plantation d'hévéa 18

Tableau 5 : Détail de construction du scénario national moyen de changements d'usages des sols 19

Tableau 6 : Estimation des stocks potentiels de carbone dans le sol (horizon 0-30 cm) et la végétation, pour les usages des sols considérés dans cette étude, selon les lignes directrices et données de l'IPCC (Dong et al., 2019) 20

Tableau 7: Modèles d'émissions azotées au champ 21

Tableau 8 : Types d'acteurs rencontrés par site visité au cours de la mission CIRAD d'avril 2019 .. 37

1 Introduction

L'hévéa (*Hevea brasiliensis*) est un arbre originaire d'Amazonie, dont la culture a été introduite en Asie du Sud-Est et en Afrique à la toute fin du 19ème siècle, et s'y développe au début du 20ème siècle. En Côte d'Ivoire, les premières Plantations Industrielles (PI) voient le jour à partir du milieu des années 1950, avec la création en 1956 de la Société Africaine de Plantations d'Hévéa (SAPH), en 1960 de la Compagnie des Caoutchoucs du Pakidié (CCP), et en 1969 de la Société de Développement de l'Hévéa (SODHEVEA), qui devient, en 1973, la Société des Caoutchoucs de Côte d'Ivoire (SOCATCI) puis, en 1979, la Société des Caoutchoucs de Grand-Béréby (SOGB) (Anghui et al., 1976 ; Pillet-Schwartz, 1980). L'Etat ivoirien est alors fortement engagé dans le secteur, via notamment une participation majoritaire dans la SAPH et la création de la SOGB (Colin, 1990). Parallèlement, entre la fin des années 1960 et la fin des années 1980, des Programmes Villageois sont mis en place par l'Etat afin de développer les Plantations Villageoises (PV). Néanmoins, ces plantations restent minoritaires pendant cette période et la filière est essentiellement structurée autour de complexes agro-industriels, regroupant PI et usines de première transformation du latex (Colin, 1990 ; Ruf, 2012).

Au cours des années 1990, l'Etat ivoirien se désengage de nombreux secteurs économiques, dont la filière hévéa, avec notamment, la diminution de sa participation dans la SAPH, et la privatisation de la SOGB et des plantations d'Anguédédou, Bettié et Cavally (Brindoumi Atta, 2015). Pendant cette même période, les surfaces en PV augmentent régulièrement jusqu'à finalement dépasser celles des PI au cours des années 2000 (Ruf, 2012). Ainsi, entre 1990 et 2010, le caoutchouc ivoirien passe d'une production de moins de 100.000 tonnes dominée par les PI, à une production de plus de 200.000 tonnes issue de manière relativement équilibrée entre PI et PV (Ruf, 2012 ; FAO, 2020). Néanmoins, à partir de 2010, cette production s'accélère fortement, portée par le secteur villageois, et en 2019, plus de 90 % des surfaces plantées sont villageoises et la production totale de caoutchouc du pays s'élève à 780.000 tonnes (APROMAC, 2020). Ce niveau de production permet de placer la Côte d'Ivoire au 1er rang des producteurs africains, avec près de 70 % de la production de caoutchouc naturel du continent, et au 6ème rang mondial, avec environ 5 % de la production de caoutchouc, le marché étant dominé par la Thaïlande et l'Indonésie, représentant respectivement 37 % et 25 % de la production mondiale selon l'*International Rubber Study Group* (IRSG, 2020).

Dans ce contexte d'évolution structurelle et de forte croissance, le Fonds Interprofessionnel pour la Recherche et le Conseil Agricoles (FIRCA) et l'Association des Professionnels du Caoutchouc Naturel de Cote d'Ivoire (APROMAC) souhaitent se doter d'un état des lieux agronomique et environnemental de la filière hévéa en Côte d'Ivoire. Cet état des lieux doit permettre à la fois d'identifier les principaux risques et bénéfices agronomiques et environnementaux associés à la filière actuelle, et d'apporter un éclairage sur les leviers d'action potentiels pour accroître les performances du secteur.

L'objectif de la présente étude est de réaliser cet état des lieux, à travers la production de deux livrables complémentaires : une analyse fonctionnelle et un diagnostic agronomique, qui ont fait l'objet d'un précédent livrable (Benoist, Leconte, 2020), et une étude d'Analyse de Cycle de Vie (ACV), qui constitue le présent livrable. La méthodologie générale de l'ACV et les choix spécifiques à cette étude sont présentés à la section 2. Le détail des données utilisées est ensuite donné à la section 3, avant de pouvoir décrire les résultats obtenus en section 4. Enfin, à partir de ces résultats, la section 5 synthétise les principales conclusions et perspectives de cette étude.

2 Méthodologie de l'étude

2.1 Introduction à l'ACV

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) compte parmi les méthodologies d'évaluation environnementale les plus complètes. Elle permet d'évaluer les impacts environnementaux des activités anthropiques tout au long d'une filière. L'ACV repose sur deux principes fondamentaux. Tout d'abord les impacts environnementaux sont quantifiés tout au long de la chaîne de production ou du « cycle de vie », de l'extraction des matières premières (« berceau ») à la fin de vie du produit ou service (« tombe »). Ensuite ces impacts sont quantifiés relativement à une unité fonctionnelle, soit une quantité de produit (kg, une voiture, etc.), soit un usage ou service (h, km parcouru, etc.). Sur ces bases, il est possible de comparer les impacts environnementaux de filières produisant une même fonction. Depuis les années 1990, l'ACV est une méthode standardisée, selon les normes ISO 14040 et 14044 (ISO, 2006a ; 2006b), qui permettent de garantir l'harmonisation des pratiques en ACV. La présente étude ACV a été réalisée en conformité avec ces normes ISO[1].

De par l'intérêt et la robustesse de ses principes, l'ACV est devenue une méthodologie de référence, préconisée à l'échelle internationale dans la mise en œuvre de programmes de déclaration environnementale sur les produits (ISO 14025 Type III Environmental Declarations). Elle est par ailleurs recommandée par la Commission Européenne pour évaluer les performances environnementales de produits (European Commission, 2018).

L'ACV est ainsi une méthode d'aide à la décision qui présente les avantages majeurs suivants :

- Elle se base sur une approche holistique qui aborde de nombreux impacts environnementaux et rend visible d'éventuels transferts de pollution entre plusieurs technologies/alternatives qui remplissent la même fonction ;
- Le cycle de vie complet du produit étudié est considéré, permettant l'identification des « hot-spots » environnementaux (les étapes qui contribuent le plus aux impacts) et des améliorations possibles sans créer de transfert d'impact caché ;
- La caractérisation des impacts est basée sur une modélisation scientifique des mécanismes environnementaux, reposant sur les meilleures connaissances disponibles ; et
- La méthodologie est opérationnalisée via divers outils (e.g. logiciel SimaPro) et des bases de données spécifiques (e.g. ecoinvent, Agribalyse).

L'ACV repose sur un cadre conceptuel qui définit les impacts environnementaux d'un produit comme la résultante linéaire de la contribution à divers impacts des ressources utilisées et substances émises tout au long de la chaîne de production. La méthodologie, qui en découle, comprend quatre étapes définies dans la série de normes ISO 1404x (ISO, 2006b) (voir Figure 1) :

- La définition des objectifs et champs de l'étude, précisée dans la présente section ;
- L'inventaire de tous les flux de ressources utilisées et substances émises dans les limites de ce système, détaillé en section 3 ;
- La caractérisation des impacts, ou modélisation des impacts à partir de l'inventaire, donnée en section 4 ; et
- L'interprétation des résultats, présentée également en section 4.

[1] Cette étude ACV n'a pas donné lieu à une revue critique externe étant donné qu'elle a été réalisée pour les commanditaires uniquement et n'a pas vocation à faire des comparaisons publiques avec d'autres études ACV. Selon les normes ISO, une revue critique ultérieure pourrait être envisagée dans le cas où les résultats seraient réutilisés dans le cadre d'une comparaison publique avec d'autres résultats d'ACV.

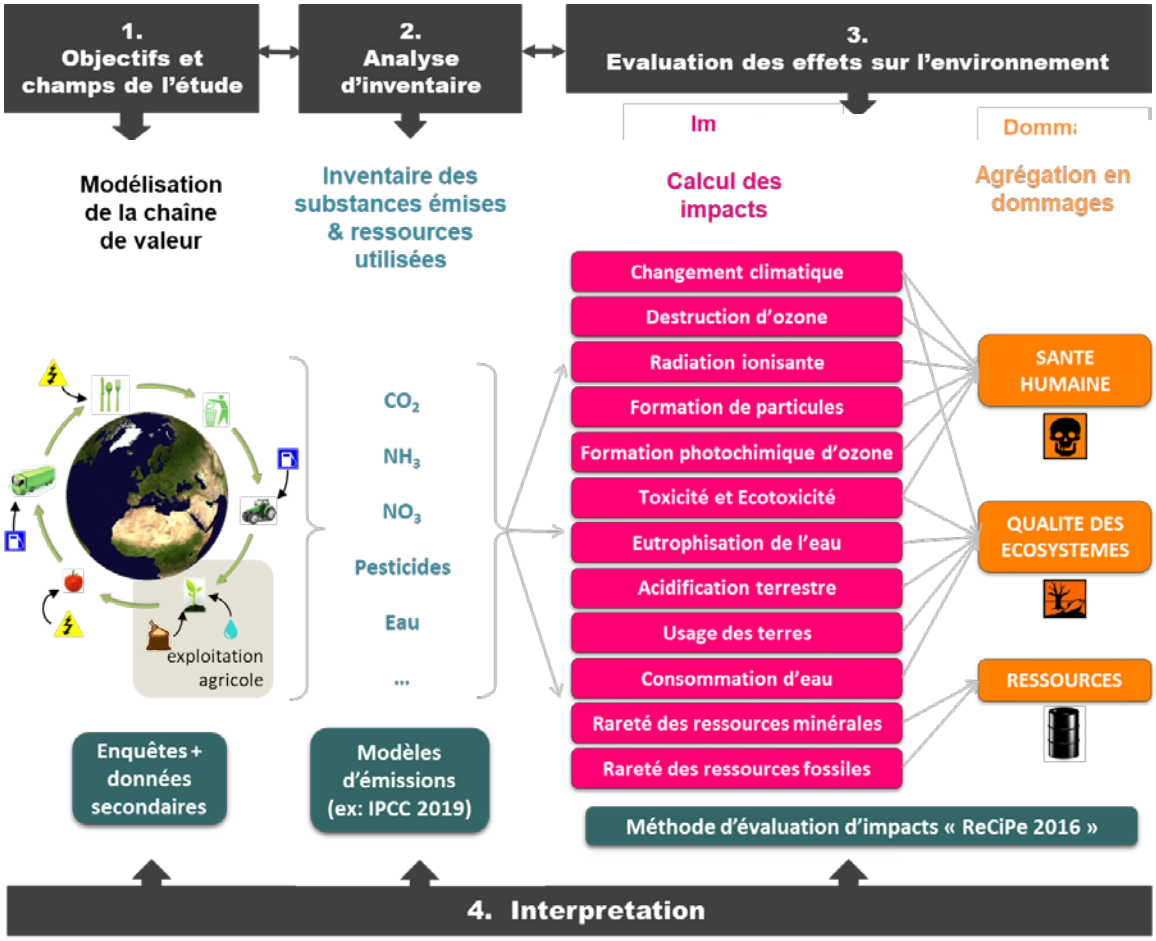

Figure 1 : Représentation des 4 étapes de l'Analyse de Cycle de Vie (Source : S. Payen@CIRAD)

2.2 Objectifs de l'étude

L'objectif général de la présente étude est de caractériser les impacts et bénéfices environnementaux de la filière hévéa en Côte d'Ivoire. Plus précisément, deux objectifs spécifiques sont définis pour l'étude d'ACV réalisée :

- Quantifier les impacts et bénéfices environnementaux de la filière hévéa actuelle en Côte d'Ivoire, en identifiant les principales sources d'impacts et les principaux leviers d'amélioration ; et
- Déterminer, à travers l'analyse des données disponibles et des analyses de sensibilité, les principaux manques en données et en connaissances de la filière.

D'un point de vue méthodologique, selon la classification d'objectifs définis par l'*International reference Life Cycle Data system* (ILCD), cette étude se positionne comme une étude d'aide à la décision d'échelle micro (EC-JRC, 2010 ; Benoist et al., 2015). En effet, son objectif est d'apporter au FIRCA et à l'APROMAC des éléments d'éclairage environnemental quant au développement actuel et à venir de la filière hévéa en Côte d'Ivoire. Toutefois, il n'est pas attendu que cet éclairage engendre des conséquences structurelles sur les infrastructures ou capacités de production d'autres filières. L'ensemble des choix méthodologiques réalisés dans le cadre de cette étude se réfèrent donc en premier lieu aux recommandations de l'ILCD pour ce type d'étude (EC-JRC, 2010).

2.3 Définition des systèmes d'étude

2.3.1 Choix des systèmes étudiés

En accord avec les objectifs décrits à la section 2.2 précédente, le système considéré pour cette étude vise à prendre en compte l'ensemble de la filière hévéa de Côte d'Ivoire. Celle-ci a été décrite plus en détails dans l'analyse fonctionnelle du premier livrable de cette étude (Benoist, Leconte, 2020). D'après ces travaux, trois sous-filières peuvent actuellement être distinguées en Côte d'Ivoire, par degré croissant de transformation :

- La production de coagulums frais, pour exportation directe ;
- La production de balles de caoutchouc, de type TSR, pour exportation ;
- La production de produits finis en caoutchouc, tels que gants, matelas ou ballons, principalement pour la consommation locale.

Quantitativement, cette dernière voie, correspondant aux produits de deuxième transformation, est extrêmement marginale en Côte d'Ivoire, représentant quelques dixièmes de pourcents de la production nationale de caoutchouc. Par conséquent, et en l'absence de données sur les unités de seconde transformation, cette sous-filière est négligée pour la présente étude.

La production de caoutchouc de Côte d'Ivoire est donc destinée en quasi-totalité à l'exportation, sous forme soit de coagulums, pour environ 30 % de la production nationale, soit de balles, pour environ 70 %. L'exportation directe de coagulums est un phénomène très récent en Côte d'Ivoire, qui s'explique en grande partie par une sous-capacité des unités d'usinage par rapport à la production des plantations. Cette sous-filière n'a donc pas, à l'heure actuelle, vocation à perdurer. L'exportation de balles de caoutchouc constitue donc la principale sous-filière considérée dans cette étude, et l'exportation de coagulums n'est traitée ici que de façon ponctuelle.

2.3.2 Définition des fonctions et des frontières des systèmes

Les deux systèmes considérés dans cette étude concernent l'exportation de caoutchouc, sous forme de balles ou de coagulums. Leur fonction principale est donc la production de caoutchouc, et l'Unité Fonctionnelle associée est la tonne de caoutchouc sec, disponible au niveau des ports d'Abidjan ou de San Pedro. Compte tenu des différences importantes de qualité entre les deux produits, les impacts environnementaux de ceux-ci ne sont pas comparés pour cette étude.

Les deux systèmes sont représentés schématiquement à la Figure 2. Ceux-ci incluent l'ensemble des étapes de la production du caoutchouc, depuis les plantations d'hévéa, incluant la production des plants en pépinières, jusqu'au transport des balles ou des coagulums aux ports d'Abidjan et de San Pedro. L'exportation depuis les ports est exclue des frontières du système.

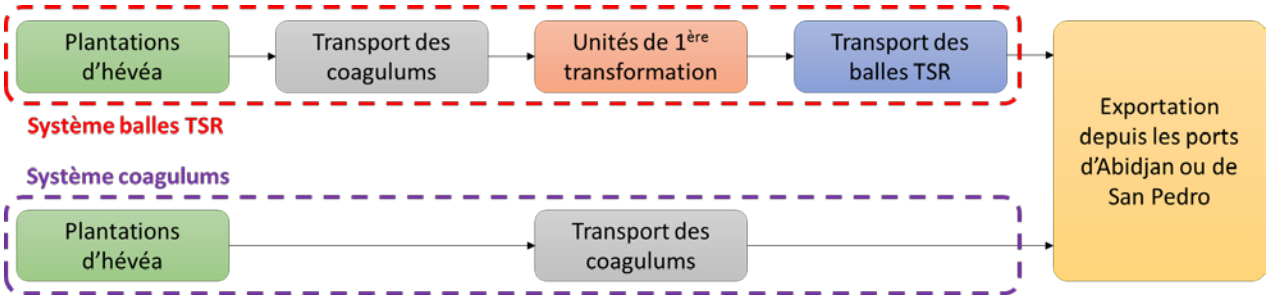

Figure 2 : Représentation schématique des deux systèmes considérés, de leurs principales étapes, et de leurs frontières

Chacun de ces deux systèmes est décrit plus en détail à la section 3.

2.4 Champs géographique et temporel de l'étude

En accord avec les objectifs donnés à la section 2.2, la présente étude d'ACV se veut représentative de la filière hévéa sur l'ensemble de la Côte d'Ivoire, en 2019. La collecte des données nécessaires à l'analyse environnementale a donc été réalisée en accord avec cette ambition, et selon les données disponibles (voir sections 2.5 suivante et 3).

Ainsi, malgré la disparité des conditions de production du caoutchouc, notamment au niveau des plantations, les données collectées visent à refléter au mieux l'état moyen de la filière, incluant en particulier PI et PV, dans l'ensemble des 18 secteurs hévéicoles d'encadrement. Les répartitions géographiques des PV, des PI, et des unités industrielles sont présentées dans l'analyse fonctionnelle du premier livrable de cette étude (Benoist, Leconte, 2020).

2.5 Principales sources de données utilisées

L'inventaire de cycle de vie constitué pour cette étude se base sur trois sources de données principales :

- Des données primaires, collectées au cours de la mission de terrain ayant eu lieu du 9 au 18 avril 2019 (voir Annexe 1), ou au travers d'échanges ultérieurs avec les différents acteurs de la filière ;
- Des données secondaires, issues principalement de statistiques nationales ou de recommandations publiées par le FIRCA et l'APROMAC, complétées lorsque nécessaire par des références de la littérature scientifique ; et
- Des données dites d'arrière-plan, plus précisément les bases de données ecoinvent (version 3, cut-off) et ACV-CIRAD, pour décrire les impacts environnementaux associés à la production des différents intrants de la filière tels que les fertilisants ou la production électrique de Côte d'Ivoire.

Le détail et l'origine des différentes informations, données et hypothèses utilisées dans le cadre de cette étude, sont donnés à la section 3.

2.6 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* (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., 2016 ; 2017). De plus, cette méthode permet de quantifier les impacts sur l'environnement selon deux types d'indicateurs :

- Des indicateurs dits *midpoints*, qui caractérisent les impacts des systèmes selon différents grands enjeux environnementaux d'intérêt, tels que le changement climatique, la destruction de la couche d'ozone ou l'épuisement des ressources ; et
- Des indicateurs dits *endpoints*, qui considèrent l'ensemble des enjeux environnementaux précédents et les expriment selon leurs effets sur trois grandes aires de protection : l'état des ressources, la qualité des écosystèmes, et la santé humaine.

Bien que les indicateurs *endpoints* souffrent d'incertitudes plus grandes que celles des indicateurs *midpoints*, le fait qu'ils permettent d'agréger différents enjeux environnementaux facilite la lecture et

la comparaison des résultats. Pour cette étude, les indicateurs *endpoints* sont donc privilégiés pour une première analyse des résultats. L'analyse est ensuite approfondie à l'aide des indicateurs *midpoints*, mais uniquement pour ceux contribuant significativement aux indicateurs *endpoints*.

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*		
	Etat des ressources	*Qualité des écosystèmes*	*Santé humaine*
Changement climatique		×	×
Destruction de la couche d'ozone			×
Effets des radiations ionisantes			×
Formation de particules fines			×
Formation d'ozone photochimique		×	×
Acidification terrestre		×	
Eutrophisation des eaux douces et marine		×	
Toxicité et écotoxicité		×	×
Consommation d'eau		×	×
Usage des sols		×	
Epuisement des ressources minérales	×		
Epuisement des ressources fossiles	×		

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

3 Inventaire de cycle de vie

Les données et hypothèses utilisées pour décrire les deux systèmes étudiés, relatifs à l'exportation de balles ou de coagulums, sont détaillées dans la présente section. Celle-ci est découpée selon les grandes étapes de la filière : plantations d'hévéa (section X), usinage des coagulums (section Y), et transport des coagulums et balles (section Z).

3.1 Plantations d'hévéa

3.1.1 Modélisation adoptée du verger d'hévéa

Compte tenu de la disparité des pratiques et des performances des plantations d'hévéa en Côte d'Ivoire, la modélisation du verger a nécessité d'adopter une typologie de plantations, en groupes relativement homogènes en termes de pratiques. D'après les visites de terrain réalisées en avril 2019, trois types de plantations ont pu être distinguées :

- Les petites Plantations Villageoises (PV), qui n'ont pas recours aux intrants ;
- Les PV moyennes et grandes, qui ont recours de façon limitée aux intrants ; et
- Les Plantations Industrielles (PI), qui ont recours aux intrants en accord avec les recommandations nationales pour le bon entretien des plantations.

Bien que nécessaire à la modélisation, cette typologie constitue une simplification des pratiques réelles, certaines petites PV pouvant avoir recours aux intrants, et inversement pour certaines PV moyennes. De plus, la distinction entre petites et moyennes PV peut poser des difficultés et un travail d'enquête poussé sur les pratiques des planteurs villageois serait nécessaire pour mieux définir ces deux groupes. Dans le cadre de cette étude, en l'absence d'une base de données exhaustives sur la taille des plantations villageoises et les pratiques associées, il a été estimé à partir des visites de terrain réalisées que petites et moyennes PV se différencient à partir d'environ 7 ha de plantations, et que les petites PV représentent plus de 50 % des planteurs et environ 15 % des surfaces plantées. Ce seuil de 7 ha n'est pas structurel et peut varier en fonction des zones de production. Il est ici utilisé à titre indicatif pour matérialiser une différence entre types de producteurs en fonction de leurs pratiques moyennes, étant entendu qu'en agriculture la taille des parcelles est souvent un facteur déterminant dans le choix des pratiques (*e.g.* plus la parcelle est grande, plus le désherbage manuel est coûteux et peut devenir un facteur limitant). La valeur de ce seuil de 7 ha n'intervient aucunement dans les calculs ACV, seules les pratiques et leurs impacts sont quantifiées et varient selon les types de producteurs.

Sur la base de cette typologie proposée, le modèle utilisé pour représenter le verger d'hévéa de Côte d'Ivoire est donné schématiquement à la Figure 3. Chaque partie de ce modèle est détaillée dans les sections suivantes :

- La production des plants d'hévéa en pépinière, étape supposée similaire quel que soit le type de plantations fournies (section 3.1.2) ;
- La production de coagulums frais dans les plantations d'hévéa (3.1.3) ; et
- Les hypothèses transversales relatives aux changements d'usages des sols et aux émissions au champ (section 3.1.4).

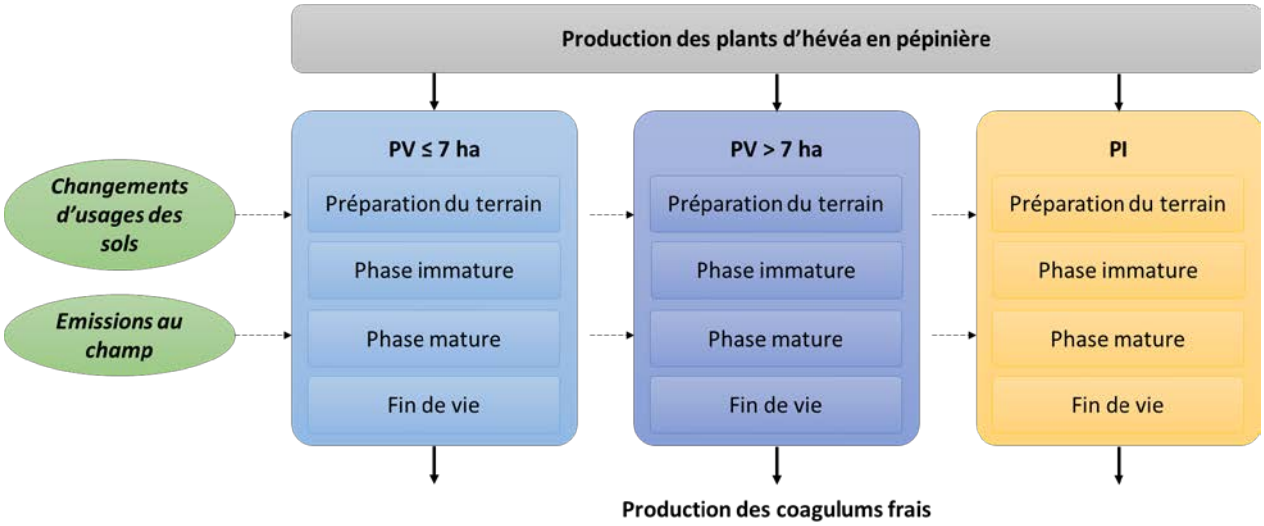

Figure 3 : Représentation schématique du verger d'hévéa, adoptée pour la modélisation de cette étude

3.1.2 Production des plants d'hévéa en pépinière

Comme indiqué à la section 3.1.1 précédente, compte tenu du contrôle rigoureux réalisé par le Fonds de Développement de l'Hévéa (FDH) pour l'agrément des pépinières, la production des plants d'hévéa en pépinière a été supposée être réalisée de façon similaire pour la fourniture de l'ensemble des plantations, villageoises comme industrielles. Les pratiques de production des plants ont alors été modélisées à partir des recommandations du FIRCA et de l'APROMAC, pour les pépinières en jauges (Attobra et al., 2013a). Ces recommandations ont été complétées par les données récoltées lors des visites de terrain d'avril 2019, notamment en ce qui concerne la consommation des motopompes pour l'irrigation.

Les impacts du germoir et du Jardin à Bois de Greffe (JBG) ont été négligées devant les impacts de la pépinière en tant que telle.

3.1.3 Production de coagulums par les plantations d'hévéa

Les surfaces plantées en hévéa sont en pleine expansion en Côte d'Ivoire, en particulier depuis une quinzaine d'années (Benoist, Leconte, 2020). En termes de verger, cela se traduit notamment par une prépondérance de jeunes arbres. Afin d'éviter que cette situation ne déséquilibre l'évaluation des impacts des plantations, la modélisation des plantations d'hévéa a été réalisée selon une approche dite modulaire (Bessou et al., 2013), qui représente équitablement chaque étape du cycle pérenne au prorata de sa durée dans le cycle, et non selon l'état du verger à une année donnée.

Ainsi, pour chaque type de plantations, l'ensemble du cycle pérenne a été modélisé, incluant les interventions suivantes :

- Lors de la mise en place de la plantation : la préparation du terrain et la transplantation des plants d'hévéa depuis la pépinière ;
- Au cours des phases immatures et matures : la fertilisation des arbres, le désherbage des lignes, et la détection et le traitement des cas de Fomès ;
- Au cours de la phase mature : la stimulation chimique des arbres ; et
- Au moment de la fin de vie de la plantation : le nettoyage du terrain.

Les hypothèses retenues pour chacune de ces interventions sont explicitées dans le Tableau 3, pour chaque type de plantation.

Tableau 3 : Principales caractéristiques des interventions menées dans les différents types de plantation d'hévéa

	PV ≤ 7 ha	PV > 7 ha	PI
Superficie totale	82.500 ha	467.500 ha	50.000 ha
Préparation du terrain	Manuelle, avec brûlage		Mécanique, sans brûlage
Pertes de plants lors de la transplantation	10 % au cours du transport, et 15 % après transplantation		5 % au cours du transport, et 10 % après transplantation
Pratiques de fertilisation en phase immature	Pas de fertilisation en phase immature	Fertilisation chimique	Fertilisation chimique
Pratiques de désherbage en phase immature	Désherbage manuel	50 % de désherbage manuel, 50 % de désherbage chimique	Désherbage chimique
Pratiques de fertilisation en phase mature	Pas de fertilisation en phase mature		Fertilisation chimique
Pratiques de désherbage en phase mature	Pas de désherbage chimique en phase mature		Désherbage chimique
Détection des cas de Fomès	0,1 foyer détecté par hectare et par an		0,01 foyer détecté par hectare et par an
Traitement des cas de Fomès	Arbre malade : Isolation, traitement chimique ou abattage Arbres voisins : Traitement chimique		
Stimulation des arbres	Chimique, à l'étéphon		
Cycle pérenne	30 ans de plantation, dont 6 ans en phase immature		
Rendement moyen en caoutchouc sec, au cours de la phase mature	Scénario de base : 1,2 t/ha/an Analyse de sensibilité : 1,7 t/ha/an		2,0 t/ha/an

Le Tableau 4 détaille ensuite les principales sources de données utilisées pour quantifier les impacts de chacune des interventions considérées. De façon générale, pour les PV ayant recours aux intrants, les doses et types de produits utilisés sont issus des recommandations FIRCA-APROMAC (Attobra et al., 2013b ; 2013c ; 2013d). Dans le cas des PI, les doses et types de produits utilisés sont issus d'une moyenne pondérée par les surfaces, entre les données, confidentielles, communiquées par les PI au cours de cette étude, et les recommandations FIRCA-APROMAC pour les données manquantes. Lorsque nécessaire, ces deux sources principales de données ont été complétées par des estimations CIRAD, réalisées sur la base des observations faites lors des visites de terrain d'avril 2019, et par des données de la littérature.

Tableau 4 : Principales sources de données utilisées pour quantifier les impacts des interventions menées dans les différents types de plantation d'hévéa

	PV ≤ 7 ha	PV > 7 ha	PI
Caractérisation des émissions lors de la préparation du terrain	Littérature pour le brûlage de la biomasse (Andreae, Merlet, 2001)		Base ACV-CIRAD
Pertes de plants lors de la transplantation	Estimations CIRAD		
Pratiques de fertilisation et de désherbage en phase immature	N/A	Recommandations FIRCA-APROMAC	Recommandations FIRCA-APROMAC et PI
Pratiques de fertilisation et de désherbage en phase mature	N/A		Recommandations FIRCA-APROMAC et PI
Détection des cas de Fomès	Estimation CIRAD à partir des données collectées au cours des visites de terrain réalisées en avril 2019		
Traitement des cas de Fomès	Recommandations FIRCA-APROMAC		
Stimulation des arbres	Variable selon l'âge de l'arbre et le clone Moyenne retenue à partir des recommandations FIRCA-APROMAC : 10 stimulations par an, à 1 g d'étéphon par stimulation		
Rendement moyen en caoutchouc sec, au cours de la phase mature	Diagnostic agronomique et analyse fonctionnelle réalisés dans le cadre de cette étude (Benoist, Leconte, 2020)		Données PI

3.1.4 Hypothèses relatives aux changements d'usages des sols et aux émissions au champ

3.1.4.1 Changements d'usages des sols

La forte expansion, au cours des dernières décennies, des surfaces plantées en hévéa en Côte d'Ivoire, implique qu'il y a eu des changements dans les usages des sols, au profit des plantations d'hévéa. Ce phénomène peut avoir des effets sur l'environnement, positifs ou négatifs, en termes notamment de stockage de carbone ou de biodiversité. Dans le cadre de cette étude, les effets sur la biodiversité ont été pris en compte à l'aide de la méthode ReCiPe 2016 (voir section 2.6), sans modification (Huijbregts et al., 2016). Concernant le stockage de carbone, des hypothèses spécifiques, détaillées ci-après, ont dû être formulées pour pouvoir prendre en compte cet aspect.

Avant de pouvoir prendre en compte les conséquences environnementales des changements d'usages des sols, il est tout d'abord nécessaire d'identifier et de quantifier les changements qui ont eu lieu. De façon générale, en comparant les surfaces actuellement plantées en hévéa à celles d'il y a 30 ans, il est possible d'estimer que près de 95 % des PV actuelles et environ 20 % des PI actuelles sont issues d'un changement d'usages des sols, le reste des surfaces étant par conséquent issues de replantations (Benoist, Leconte, 2020). Afin d'affiner ces chiffres globaux, il faut ensuite déterminer à quels usages des sols les plantations d'hévéa se sont substituées. Pour cela, un scénario national moyen a été construit, à partir des informations recueillies au cours des visites de terrain d'avril 2019, en estimant tout d'abord, par grandes zones géographiques, les types et proportions de changements d'usages des sols, puis en pondérant ces différents sous-scénarios par les surfaces plantées dans chacune de ces zones géographiques. Le détail de la construction de ce scénario national moyen est donné dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Détail de construction du scénario national moyen de changements d'usages des sols

Zones géographiques	Part de la zone dans les surfaces plantées nationales, en 2012	Types d'usages précédents rencontrés dans chaque zone	Part de chaque type de changements d'usages dans la zone
Ouest (secteurs de Man et Guiglo)	14,0 %	Forêt	100 %
Sud-Ouest (secteurs de Grand-Béréby, San Pedro, et Soubré)	23,2 %	Forêt	50 %
		Cacao	25 %
		Cultures vivrières	25 %
Centre Ouest (secteurs de Gagnoa et Issia)	10,5 %	Jachère	50 %
		Forêt	25 %
		Cacao	25 %
Sud (secteurs de Grand-Lahou, Dabou, Tiassalé, et Anguédédou)	29,3 %	Jachère	34 %
		Cultures vivrières	33 %
		Palmier à huile	33 %
Centre (secteurs de Yamoussoukro, et Daoukro)	3,5 %	Jachère	100 %
Est (secteurs de Bettié, Abengourou, et Bondoukou)	10,2 %	Jachère	100 %
Sud-Est (secteurs de Bonoua et Aboisso)	9,3 %	Palmier à huile	67 %
		Forêt	33 %

D'après les hypothèses considérées dans le Tableau 5, le scénario national moyen serait alors composé des changements d'usages des sols suivant :

- Forêt – hévéa, pour 31 % des surfaces ;
- Jachère – hévéa, pour 29 % ;
- Palmier à huile – hévéa, pour 16 % ;
- Cultures vivrières – hévéa, pour 16 % ; et
- Cacao – hévéa, pour 8 %.

Néanmoins, il est important de noter que compte tenu des fortes hypothèses qu'il a été nécessaire de formuler pour la construction de ce scénario, celui-ci souffre d'incertitudes importantes. Par conséquent, ce scénario ne sera pas pris en compte dans les résultats de base de la présente étude d'ACV, mais sera considéré en analyse de sensibilité.

Afin d'estimer l'effet de ces changements d'usages des sols sur le stockage de carbone, les lignes directrices de l'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, ou Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) en français), pour la réalisation des inventaires nationaux de gaz à effet de serre, ont été utilisées. D'après ces lignes directrices, le stockage de carbone potentiel sous différents usages peut être estimé à partir du climat, du type de sol, et de différents facteurs prenant en compte le type d'usage des sols et de pratiques (Aalde et al., 2006).

Avec des pluviométries annuelles comprises entre 1000 et 2000 mm (Benoist, Leconte, 2020), les zones de plantations d'hévéa se situent dans la zone climatique tropicale humide (*Tropical moist*) selon la classification IPCC. Concernant le type de sol, les informations de la base de données HWSD (*Harmonized World Soil Database*) ont été utilisées et croisées avec la classification IPCC des types de sols (FAO / IIASA / ISRIC / ISSCAS / JRC, 2012). D'après ce travail, les sols de la moitié Sud de la Côte

d'Ivoire, propices à la culture de l'hévéa, sont en quasi-totalité classés parmi les sols argileux peu actifs (acrisols et ferralsols, voire lixisols).

Ces conditions pédoclimatiques permettent de déterminer un stock dit natif, qui sert de référence aux différentes estimations de stock potentiel. Le Tableau 6 détaille ensuite les différents facteurs et résultats utilisés pour l'estimation des stocks de carbone sous les différents usages des sols considérés dans cette étude.

Pour le test des scénarios de changement d'usage en analyse de sensibilité, seuls les émissions ou stockages de carbone biogénique ont été considérés et donnent une estimation *a minima* de l'impact additionnel lié au changement d'usage des sols. Pour une évaluation plus précise, les émissions directes et indirects de N_2O liées à la minéralisation de la matière organique du sol devraient être également incluses dans le cas de changement d'usage entraînant des pertes de stocks de carbone. L'inclusion de ces émissions peut entraîner une augmentation supplémentaire de l'impact jusqu'à 18% (Bessou et al., 2018). Pour l'évaluation plus fine d'un scénario précis de changement d'usage, ces émissions de carbone et azote devraient être basées sur un ratio C/N représentatif du ou des sols où a lieu le changement. *A contrario*, un stockage de carbone biogénique pourrait être également considéré dans le cadre d'une exploitation de bois de la forêt remplacée par les plantations. Toutes ces hypothèses peuvent influencer le bilan net d'un changement d'usage et requièrent des informations précises sur les usages réels des sols et les pratiques de changement d'usage. Dans le contexte de l'étude, les scénarios hypothétiques visent uniquement à mettre en lumière l'ordre de grandeur de l'impact potentiel de changements d'usage des sols par rapport aux autres sources d'impact sur l'ensemble de la filière. Une étude locale plus précise serait nécessaire pour établir des plans de développement de plantations à l'échelle régionale.

Tableau 6 : Estimation des stocks potentiels de carbone dans le sol (horizon 0-30 cm) et la végétation, pour les usages des sols considérés dans cette étude, selon les lignes directrices et données de l'IPCC (Dong et al., 2019)

Types d'usages	Stock natif (tC/ha)	*Facteur d'usage*	*Facteur de pratique*	*Facteur d'intrant*	Stock du sol (tC/ha)	Stock aérien (tC/ha)	Biomasse morte et résidus (tC/ha)	Stock total (tC/ha)
Forêt secondaire	38,0 ± 5 %	*1*	*1*	*1*	38,0 ± 5 %	42,1	13,9	94,0
Jachère	38,0 ± 5 %	*0,82 ± 17 %*	*1*	*1*	31,2 ± 22 %	28,0	0	59,2
Palmier à huile	38,0 ± 5 %	*1,01 ± 25 %*	*1,10 ± 5 %*	*1,11 ± 10 %*	46,9 ± 45 %	37,3	4,7	88,9
Cultures vivrières	38,0 ± 5 %	*0,83 ± 11 %*	*1,10 ± 5 %*	*1*	34,7 ± 21 %	0	0	34,7
Cacao	38,0 ± 5 %	*1,01 ± 25 %*	*1,10 ± 5 %*	*1*	42,2 ± 35 %	29,8	2,8	74,8
Hévéa	38,0 ± 5 %	*1,01 ± 25 %*	*1,10 ± 5 %*	*1*	42,2 ± 35 %	49,7	0	91,9

Les résultats du Tableau 6 tendent à montrer que les plantations d'hévéa permettraient un stockage de carbone important, proche de celui d'une forêt secondaire. Néanmoins, ces résultats sont soumis à de fortes incertitudes, qui doivent être prises en compte dans l'interprétation des résultats.

3.1.4.2 Modèles d'émissions au champ

L'application d'intrants dans les plantations peut engendrer différentes émissions, telles que nitrates, pesticides ou protoxyde d'azote, ce dernier ayant un fort pouvoir de réchauffement climatique. Le déterminisme de ces émissions est complexe car il dépend de très nombreux facteurs variables dans le temps et l'espace. Dans le cadre de cette étude d'ACV, des modèles empiriques reconnus internationalement sont appliqués, sur la base de jeux de données couvrant de nombreux pays et systèmes.

Pour les émissions azotées liées aux apports d'engrais synthétiques ou organiques, ainsi qu'à la décomposition des résidus de culture, les lignes directrices de l'IPCC pour l'établissement des inventaires nationaux de gaz à effet de serre sont de nouveau utilisées (Dong et al., 2019). Concernant les émissions d'oxydes d'azote (NO_x), le modèle développé par Stehfest et Bouwman a été utilisé (Stehfest, Bouwman, 2006) (voir Tableau 7).

Le stockage de carbone biogénique à court terme n'a pas été considéré, en cohérence avec les normes internationales (*e.g.* PAS2050 ou ISO 14467). Ainsi, les émissions de dioxyde de carbone (CO_2) biogénique, capté initialement dans l'atmosphère par la photosynthèse, sont considérées comme neutres d'un point de vue de leur contribution au changement climatique. C'est le cas notamment des émissions de CO_2 lors de la décomposition aérobie et rapide des résidus organiques. Inversement, dans le cas d'un changement d'affectation des terres, pour lequel le stockage ou déstockage de carbone biogénique a des effets de long terme, ceux-ci ont bien été pris en compte, comme recommandé dans les lignes directrices de l'IPCC (Dong et al., 2019) (voir section 3.1.4.1 précédente). Concernant les autres émissions agricoles au champ, les modèles SALCA, couramment utilisés dans la base de données ecoinvent, ont été utilisés.

Tableau 7: Modèles d'émissions azotées au champ

Emissions	*Compartiments*	*Références*	*Formules de calcul par hectare et par an*	
N_2O	Air	(Dong et al., 2019)	Engrais synthétiques	kg N_2O = (44/28) * kg N-engrais * [0.016 + $Frac_{GASF}$ (=15% pour l'urée) * 0.014 + $Frac_{LEACH}$ (=24%) * 0.011]
			Résidus organiques	kg N_2O = (44/28) * kg N-résidus * [0.006 + $Frac_{GASM}$ (=21% pour tout apport organique) * 0.014 + $Frac_{LEACH}$ (=24%) * 0.011]
NH_3^+	Air	(Bouwman et al., 2002)	Engrais synthétiques	kg NH_3^+ = (17/14) * kg N-engrais * 0.21 (pour l'urée)
			Résidus organiques	kg NH_3^+ = (17/14) * kg N-résidus * 0.23 (résidus organiques d'origine animale)
NO_3^-	Eau	(Dong et al., 2019)	Engrais synthétiques	kg NO_3^- = (62/14) * kg N-engrais * $Frac_{LEACH}$ (= 24%)
			Résidus organiques	kg NO_3^- = (62/14) * kg N-résidus * $Frac_{LEACH}$ (= 24%)
NO_x (in NO)	Air	(Stehfest, Bouwman, 2006)	Engrais synthétiques	kg NO = (30/14) * kg N-engrais * 0.0055
			Résidus organiques	kg NO = (30/14) * kg N-résidus * 0.0055

3.2 Usinage des coagulums

Le procédé d'usinage des coagulums utilisé en Côte d'Ivoire est représenté de façon schématique à la Figure 4, en indiquant les principales opérations du procédé ainsi que les consommables utilisés. Selon l'unité d'usinage, ce procédé peut varier dans ses opérations (présence ou non d'un pré-traitement des coagulums, usinage par crêpeuses et/ou extrudeuses) ou dans les consommables utilisés (séchoir au DDO ou au GPL, traitement à l'acide phosphorique ou oxalique, recours plus ou moins important au réseau électrique national, utilisation de gasoil ou de plaquettes de biomasse pour la génération *in situ* d'électricité).

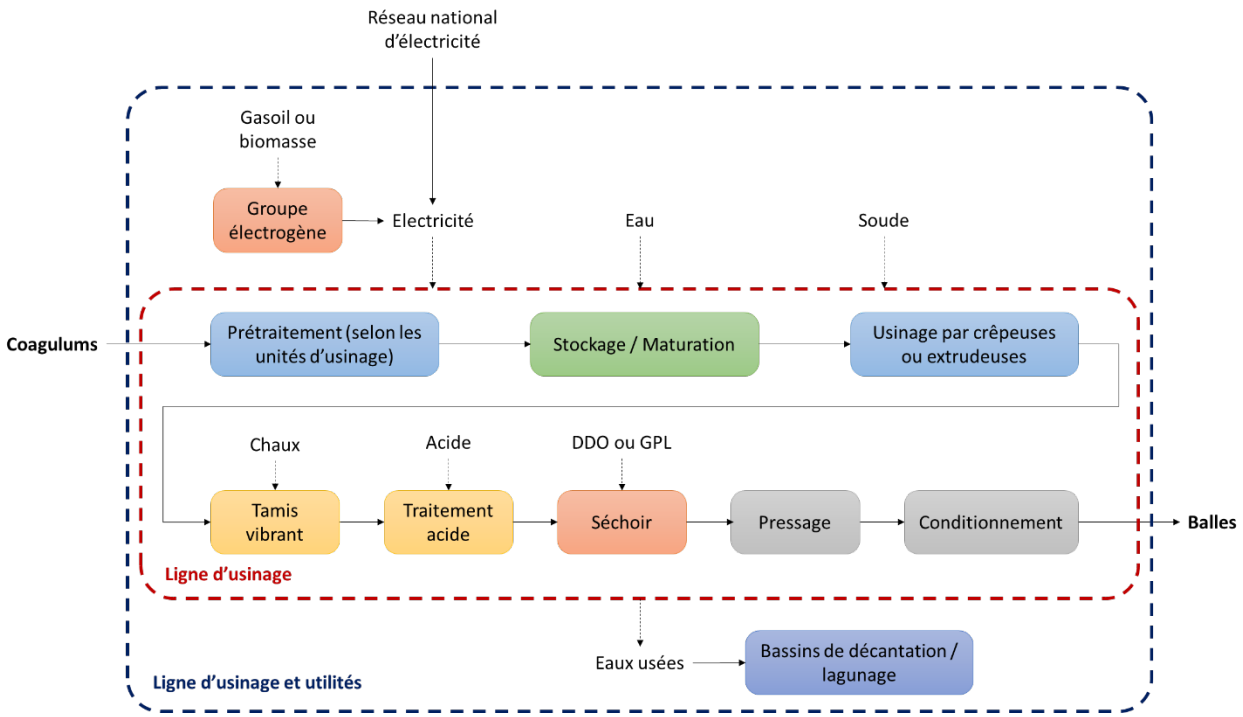

Figure 4 : Représentation simplifiée du procédé d'usinage des coagulums en Côte d'Ivoire

Des données de fonctionnement des unités d'usinage de Côte d'Ivoire ont pu être obtenues lors de la mission de terrain d'avril 2019. Malgré les différences existantes entre les sites et mentionnées ci-dessus, la variabilité de ces données reste modérée, avec des écarts-types de moins de 30 %, l'écart-type maximum étant de 28 % dans le cas de la consommation électrique des unités. Les moyennes des données collectées ont alors été utilisées pour représenter le fonctionnement des sites d'usinage et renseigner les éléments suivants : la consommation électrique totale du procédé et la part de celle-ci issue du groupe électrogène, la consommation en gasoil du groupe, la consommation de GPL et de DDO pour le fonctionnement des séchoirs, et les consommations en eau, acide phosphorique ou oxalique, chaux, et soude. Faute d'éléments chiffrés, les pertes matière au cours du procédé ont été négligées.

Concernant le traitement des eaux usées, il n'a malheureusement pas été possible de récolter de données de terrain quant aux performances des bassins de lagunage mis en place sur les sites d'usinage. Des données de la littérature ont donc été utilisées pour estimer l'efficacité du traitement et les émissions associées, en particulier :

- La composition moyenne des effluents en sortie de procédé de production de balles de caoutchouc de type TSR (Mathew et al., 2000) ;
- Les taux d'abattement des polluants classiquement observés après lagunage (Racault et al., 1997) ; et

- Les quantités de méthane biogénique (CH_4) et d'oxyde nitreux (N_2O) émises au cours du lagunage et de la gestion des boues (Tanikawa et al., 2016 ; Flores et al., 2020).

Enfin, l'impact des infrastructures et équipements a été estimé à partir de la base de données ecoinvent.

3.3 Transport des coagulums et des balles de caoutchouc (type TSR)

Le transport des coagulums frais entre les PV et les unités d'usinage peut se faire selon différents modes de transport, généralement de taille réduite. Dans le cadre de cette étude, des camions de capacité utile de 4 t ont été considérés. Le rayon moyen d'approvisionnement des unités d'usinage a été estimé à 40 km, en considérant un bassin d'approvisionnement moyen des unités de 5.400 km^2, obtenu à partir des statistiques nationales. Au niveau des PI, une distance moyenne de 1 km, en tracteur, a été considérée pour l'acheminement des coagulums des zones de plantations à l'usine. Dans les deux cas, une humidité moyenne de 70 % des coagulums (soit une DRC de 30 %) a été supposée.

Après usinage, le transport des balles de caoutchouc a été considéré être réalisé par des camions de capacité utile de 8 t. La distance moyenne de transport a été estimée à partir des différentes distances entre les unités d'usinage et les ports d'Abidjan ou de San Pedro, pondérées par les capacités de ces unités, d'après les données collectées lors de l'analyse fonctionnelle (Benoist, Leconte, 2020), soit 116 km.

Enfin, dans le cas de l'exportation directe des coagulums frais, il a été considéré que la production de ces coagulums provient exclusivement des PV, et que cette exportation est réalisée selon une logistique similaire à celle exposée ci-dessus : 40 km en camions de 4 t, puis 116 km en camions de 8 t.

4 Evaluation de l'impact environnemental de cycle de vie

Les résultats d'évaluation des impacts environnementaux de la filière hévéa sont présentés dans cette section. La première section 4.1 détaille les impacts environnementaux des deux systèmes considérés dans cette étude : l'exportation de balles de caoutchouc d'une part, et de coagulums d'autre part. La section 4.2 approfondit ensuite cette analyse en comparant plus spécifiquement les performances environnementales des PI et des PV. Enfin, la section 4.3 présente les résultats de plusieurs analayses de sensibilité, afin de mieux appréhender les limites de cette étude et les approfondissements à envisager.

4.1 Analyse des impacts environnementaux de la filière hévéa

4.1.1 Analyse préliminaire : principaux enjeux environnementaux de la filière

Les contributions des différents enjeux environnementaux pris en compte dans cette étude, aux résultats des trois indicateurs *endpoints* d'impacts sont données à la Figure 5, pour le système d'exportation des balles de type TSR.

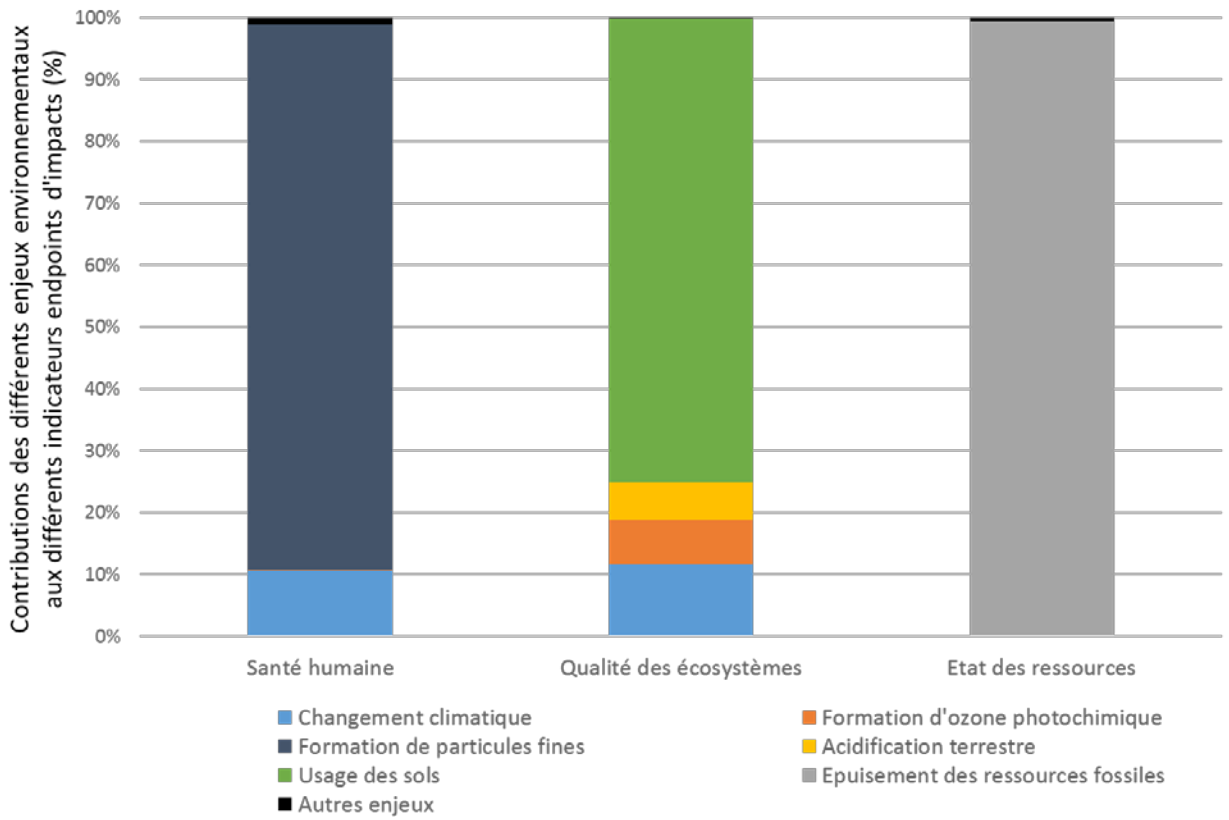

Figure 5 : Contributions des différents enjeux environnementaux aux indicateurs *endpoints* d'impacts du système d'exportation de balles TSR

Les résultats de la Figure 5 montrent que les impacts environnementaux de la filière hévéa sont principalement dus à six enjeux environnementaux :

- La formation de particules fines, pour la santé humaine ;
- L'usage des sols, la formation d'ozone photochimique, et l'acidification terrestre, pour la qualité des écosystèmes ;
- L'épuisement des ressources fossiles, pour l'état des ressources ; et
- Le changement climatique, pour la qualité des écosystèmes et la santé humaine.

Par souci de simplification, les analyses d'impacts des sections suivantes se concentrent donc sur ces six enjeux environnementaux.

4.1.2 Exportation de balles de caoutchouc de type TSR

La Figure 6 détaille, dans le cas du système d'exportation des balles de caoutchouc, et pour les six enjeux environnementaux retenus à la section 4.1.1 précédente, les contributions aux résultats d'indicateurs *midpoints* des quatre grandes étapes du cycle de vie présentées à la Figure 2 : la plantation d'hévéa, le transport des coagulums, leur usinage, et le transport des balles avant exportation.

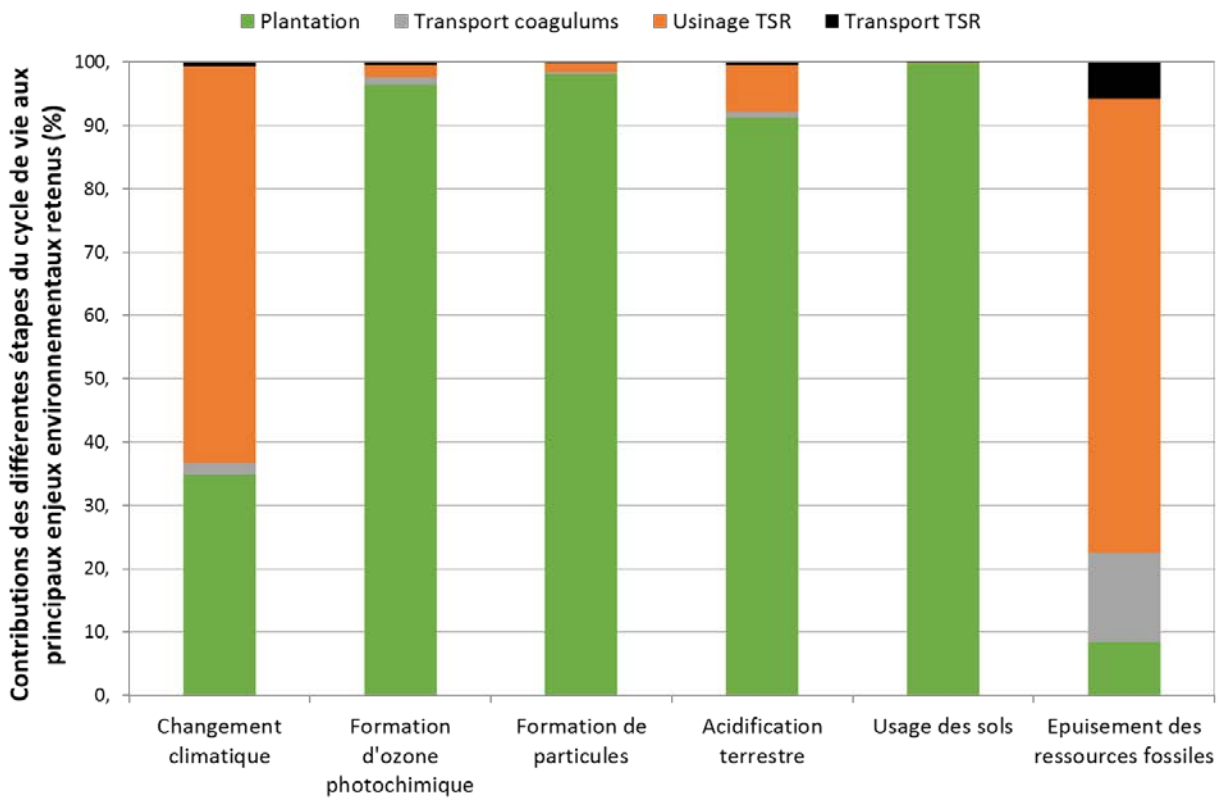

Figure 6 : Contributions des différentes étapes du cycle de vie aux résultats d'indicateurs *midpoints* des principaux enjeux environnementaux retenus pour l'analyse du système d'exportation des balles TSR

Les résultats de la Figure 6 montrent que les plantations d'hévéa jouent un rôle prépondérant sur quatre des six enjeux environnementaux considérés : la formation d'ozone photochimique et de particules, l'acidification terrestre, et l'usage des sols. Pour les trois premiers indicateurs, l'impact des plantations est très majoritairement lié aux fumées de combustion lors des brûlis réalisés en PV, lors de la préparation ou du nettoyage du terrain. En effet, ces fumées génèrent :

- Plus de 95 % de l'impact total sur la formation d'ozone photochimique, du fait des émissions d'oxydes d'azote et de Composés Organiques Volatils (COV) ;
- Plus de 97 % de l'impact total sur la formation de particules, du fait de l'émission de particules fines de moins de 2,5 microns ; et
- Plus de 85 % de l'impact total sur l'acidification terrestre, du fait de l'émission d'ammoniac et d'oxydes d'azote.

L'impact des plantations sur l'usage des sols s'explique à près de 95 % par l'occupation des sols des PV, du fait à la fois de leur prépondérance dans les surfaces plantées et des moindres rendements obtenus, en comparaison avec les PI. Comme expliqué en section 2.6 (Tableau 2), les impacts de

l'usage des sols pris en compte en ACV concernent notamment les pertes potentielles de biodiversité, liées ici au potentiel de biodiversité moindre dans les plantations d'hévéa par rapport à une forêt naturelle.

Concernant le changement climatique, la source principale d'émissions de gaz à effet de serre de la filière est l'usinage des coagulums, pour plus de 60 %. Au sein des unités de transformation, plus de 85 % des émissions sont dues au lagunage, devant la production de l'électricité consommée (7 %) et la consommation de DDO ou de GPL au niveau des séchoirs (5 %). Sur le reste de la filière, les plantations représentent près de 35 % des émissions totales de gaz à effet de serre, du fait principalement du méthane émis lors des brûlis en PV.

Enfin, l'épuisement des ressources fossiles est causé à plus de 70 % par l'usinage des coagulums, du fait notamment de la production de l'électricité consommée (41 % des consommations totales de la filière) et du fonctionnement des séchoirs (27 %). Le transport des coagulums représente ensuite 14 % des consommations totales d'énergie fossile, les plantations un peu plus de 8 %, pour la production des fertilisants utilisés en PV et en PI, et le transport des balles de caoutchouc jusqu'aux ports un peu moins de 6 %.

4.1.3 Exportation de coagulums frais

La Figure 7 détaille, dans le cas du système d'exportation directe des coagulums, les contributions aux résultats d'indicateurs *midpoints* des plantations d'hévéa et du transport des coagulums.

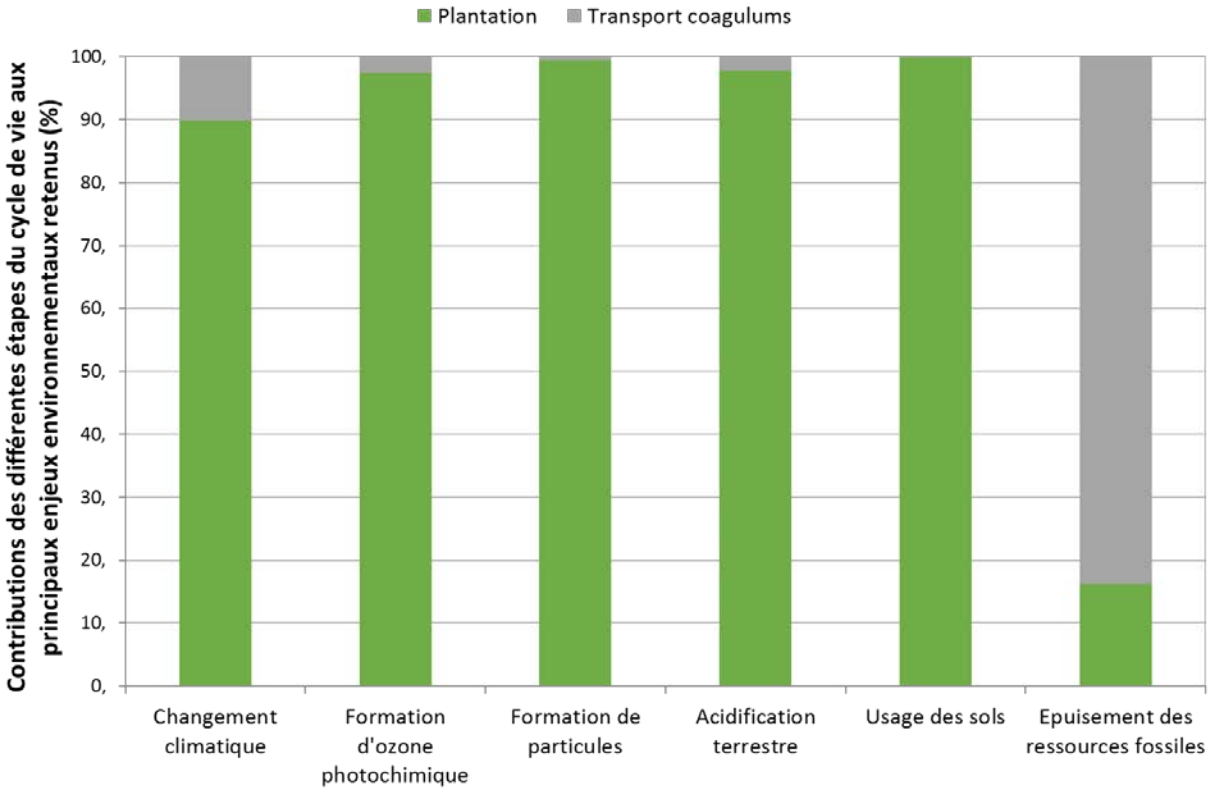

Figure 7 : Contributions des différentes étapes du cycle de vie aux résultats d'indicateurs *midpoints* des principaux enjeux environnementaux retenus pour l'analyse du système d'exportation des coagulums

De façon similaire au cas de l'exportation de balles (voir section 4.1.2 précédente), les plantations constituent la contribution principale aux impacts sur la formation d'ozone photochimique (97 %) et de particules (99 %), d'acidification terrestre (97 %), et d'usage des sols (99 %). Compte tenu de l'absence d'usinage dans ce système, les plantations représentent également la première source

d'émissions de gaz à effet de serre (89 %). Comme précédemment, ces impacts ont pour origine principale les fumées émises lors des brûlis et l'occupation des sols.

Concernant l'épuisement des ressources fossiles, le transport des coagulums frais constitue la principale source de consommations d'énergie, avec 83 % des consommations totales du système.

4.2 Analyse comparée des impacts des PI et des PV

Dans cette section, l'approvisionnement des unités d'usinage par les PI et les PV est comparée. Ces deux sous-systèmes sont comparés sur la base d'une tonne de coagulums frais, sur base sèche, livrée aux unités de transformation, sans prise en compte de différences de qualité des coagulums entre les deux origines. Les sous-systèmes étudiés incluent donc les plantations elles-mêmes, et le transport des coagulums jusqu'aux sites d'usinage. La Figure 8 présente les résultats de cette comparaison.

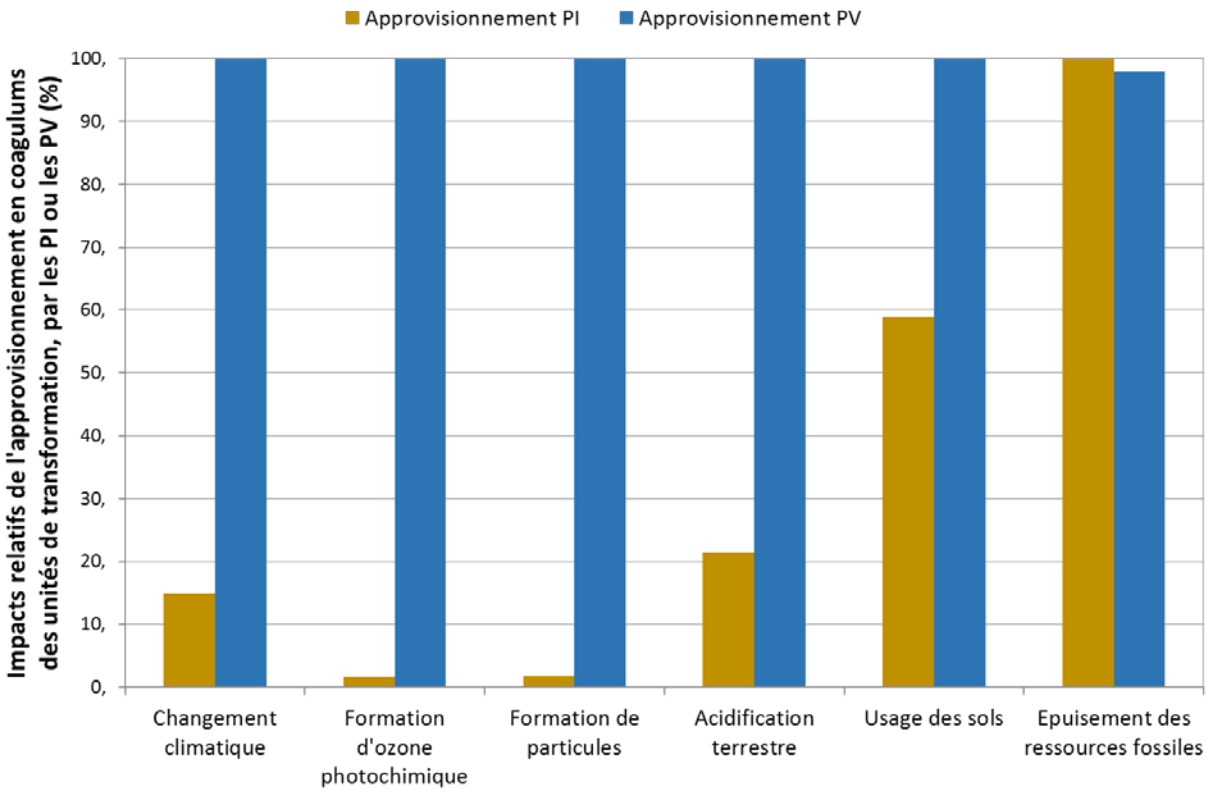

Figure 8 : Comparaison des résultats d'indicateurs d'impacts *midpoints* de l'approvisionnement en coagulums des unités d'usinage par les PI ou les PV

Les résultats de la Figure 8 montrent que les impacts des PV sont globalement plus importants, voire équivalents, que ceux des PI, avec des différences plus ou moins marquées selon les indicateurs :

- Concernant le changement climatique, la formation d'ozone photochimique et de particules, et l'acidification terrestre, les impacts des PV sont entre 5 et 60 fois plus grands que ceux des PI : comme expliqué à la section 4.1.2, l'impact des plantations sur ces indicateurs est principalement dû aux émissions associées aux opérations de brûlis, qui ne sont généralement pas pratiquées en PI ;
- Concernant l'usage des sols, l'impact des PV est 70 % plus grand que celui des PI, du fait des différences de rendements entre les deux types de plantations, le rendement des PI ayant été supposé 70 % plus grand que celui des PV en hypothèse de base (voir analyse de sensibilité sur ce sujet en section 4.3.2) ; et

- Concernant l'épuisement des ressources fossiles, les impacts des PV et des PI sont proches, bien que l'origine de ces impacts soit différente pour chaque type de plantation (voir Figure 9 ci-dessous) : transport des coagulums (70 %) et fertilisation (26 %) dans le cas des PV, et fertilisation (65 %) et préparation du terrain (33 %) dans le cas des PI.

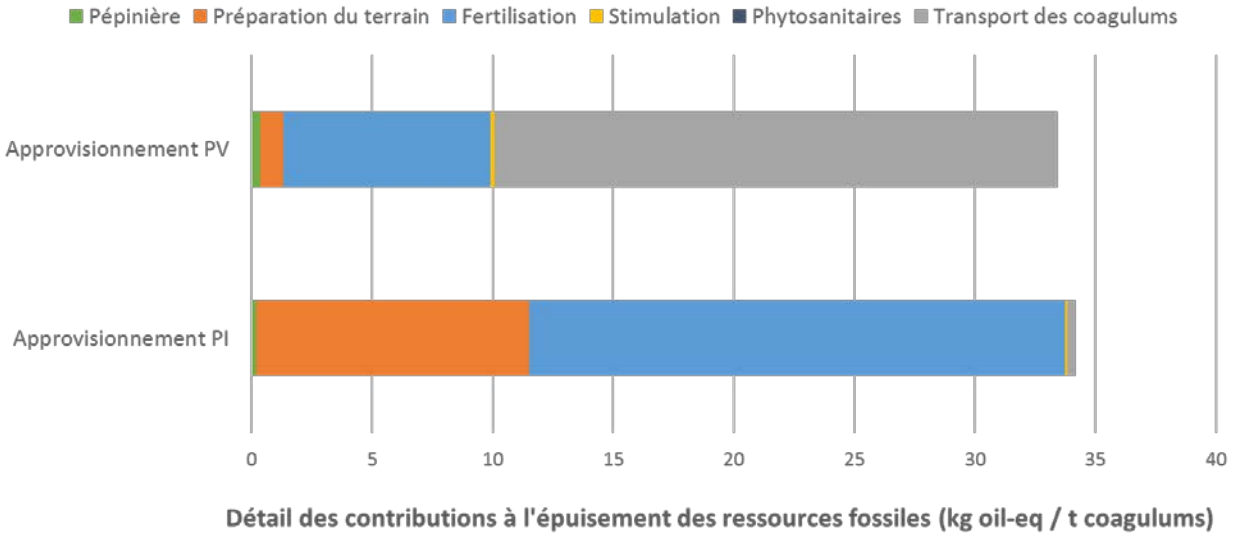

Figure 9 : Comparaison des contributions à l'épuisement des ressources fossiles de l'approvisionnement en coagulums des unités d'usinage par les PI ou les PV

4.3 Analyses de sensibilité

4.3.1 Influence des changements d'usages des sols sur les performances de la filière

L'effet des changements d'usages des sols concernant essentiellement le stockage ou déstockage potentiel de carbone, seul l'indicateur relatif au changement climatique est considéré dans cette section, afin de simplifier l'analyse des résultats. La Figure 10 présente les résultats d'impacts sur le changement climatique obtenus selon différents scénarios de changements d'usages des sols :

- Un scénario de référence, analysé à la section 4.1.2, sans changement d'usages des sols ;
- Un scénario national moyen de changements d'usages des sols, combinant différents changements, décrit à la section 3.1.4.1 ; et
- Cinq scénarios théoriques, considérant indépendamment chacun des cinq changements d'usages pris en compte dans la construction du scénario national : forêt, jachère, palmier à huile, cultures vivrières, et cacao.

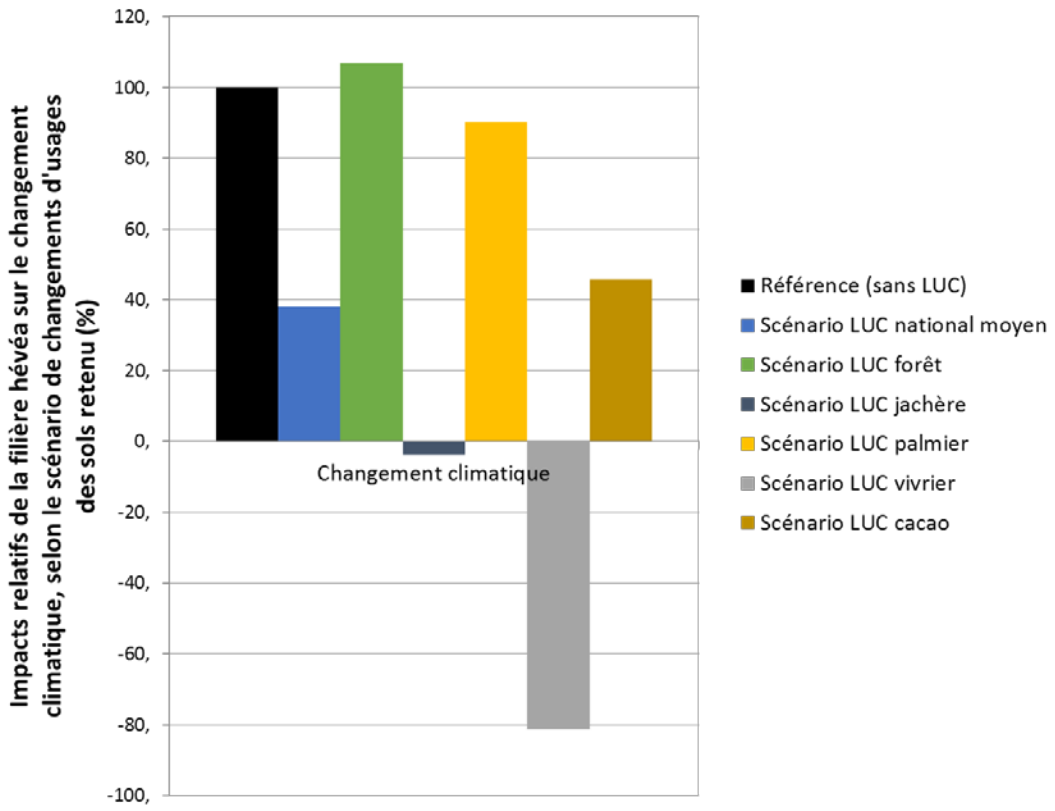

Figure 10 : Sensibilité des impacts du système d'exportation de balles de caoutchouc sur le changement climatique, selon le scénario de changements d'usages des sols retenu

Les résultats de la Figure 10 montrent que les hypothèses relatives aux changements d'usages des sols ont un effet majeur sur les résultats d'impact sur le changement climatique. En effet, si les scénarios relatifs à la forêt et au palmier à huile ont des effets relativement limités sur le changement climatique, inférieurs à 10 %, les autres scénarios peuvent générer une réduction importante des émissions de gaz à effet de serre de la filière, de 55 % à 180 %, dans les cas, respectivement, du cacao et des cultures vivrières. Lorsque ces scénarios sont combinés selon les hypothèses exposées à la section 3.1.4.1 (Tableau 5), il vient que l'expansion récente du verger d'hévéa de Côte d'Ivoire aurait permis une séquestration nette de carbone, qui pourrait compenser environ 60 % des émissions de gaz à effet de serre de la filière.

Lorsque les plantations d'hévéa se substituent à une jachère ou à des cultures vivrières, les résultats de la Figure 10 montrent que la séquestration de carbone est telle que celle-ci compense entièrement les émissions de la filière, pouvant alors créer un bénéfice net, contribuant à l'atténuation du changement climatique. Toutefois, si l'intérêt de cet effet est notable dans le cas de la substitution d'une jachère, il est important de préciser qu'à l'inverse, cet intérêt est plus discutable dans le cas de la substitution de cultures vivrières, à la fois pour les conséquences sociales de ce phénomène, mais aussi car le bénéfice potentiel de séquestration peut être compensé par un déplacement des cultures substituées.

4.3.2 Sensibilité des résultats au rendement des PV

L'analyse fonctionnelle et le diagnostic agronomique du premier livrable de cette étude ont montré que l'estimation du rendement des PV pouvaient générer certaines difficultés, variant entre 1,2 et 1,7 t/ha/an selon l'approche de calcul adoptée (ascendante ou descendante) (Benoist, Leconte, 2020). Le cas de base analysé en sections 4.1 et 4.2 correspond à l'hypothèse d'un rendement de 1,2 t/ha/an, issue du diagnostic agronomique. L'objectif de cette section est alors d'évaluer l'influence de

cette hypothèse en comparant les résultats précédents avec ceux obtenus lorsqu'un rendement de 1,7 t/ha/an est retenu.

La Figure 11 compare alors les résultats d'impacts du système d'exportation de balles de caoutchouc selon l'hypothèse de rendement retenue.

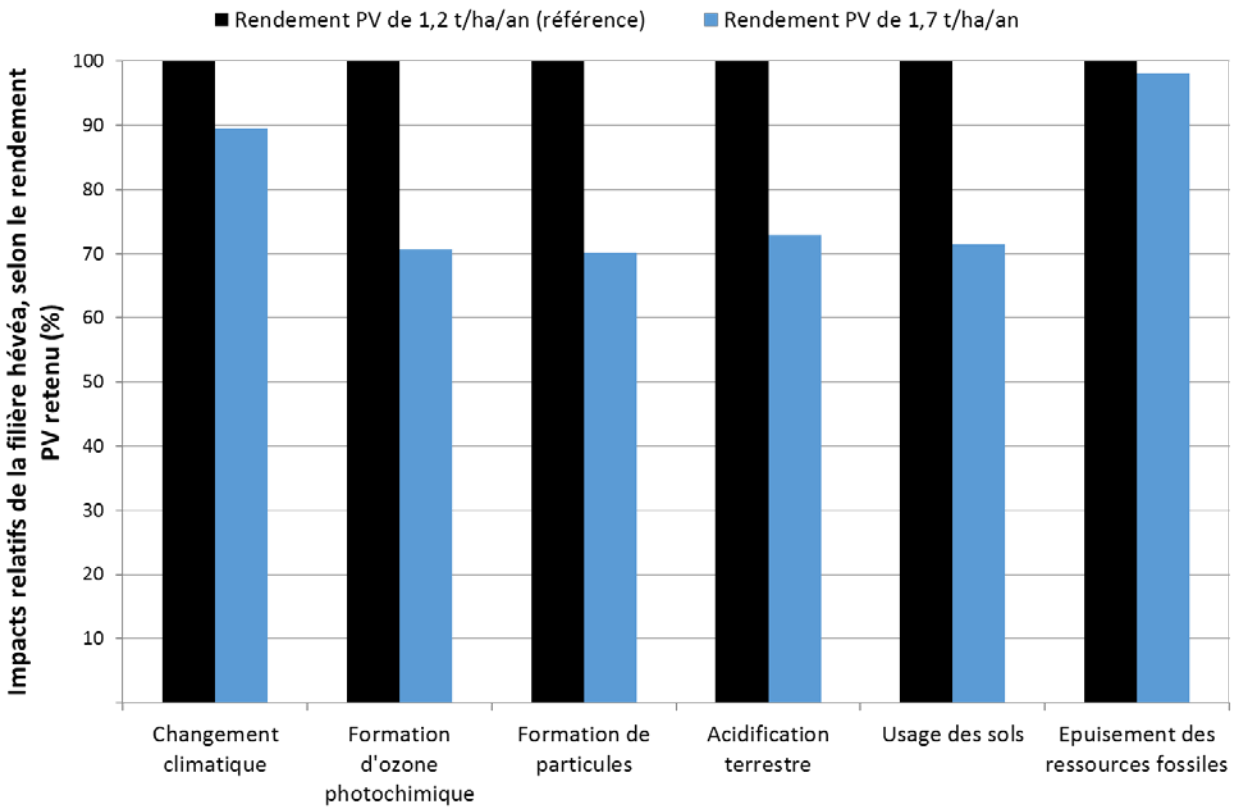

Figure 11 : Comparaison des résultats d'indicateurs d'impacts *midpoints* du système d'exportation de balles, selon le rendement retenu pour les PV

En cohérence avec les résultats de la section 4.1.2, les résultats de la Figure 11 montrent que l'hypothèse de rendement influence principalement les résultats d'indicateurs pour lesquels l'étape de plantation contribue le plus. Ainsi, par rapport à une hypothèse de rendement de 1,2 t/ha/an, une hypothèse de 1,7 t/ha/an engendre une réduction d'impacts d'environ 30 % sur la formation d'ozone photochimique et de particules, l'acidification terrestre et l'usage des sols, d'environ 10 % sur le changement climatique, et a un effet très limité sur l'épuisement des ressources fossiles.

De la même façon que ce qui a été fait en section 4.2, les résultats de la Figure 12 montrent ensuite l'influence de l'hypothèse de rendement sur les résultats de la comparaison entre PI et PV pour l'approvisionnement des unités d'usinage.

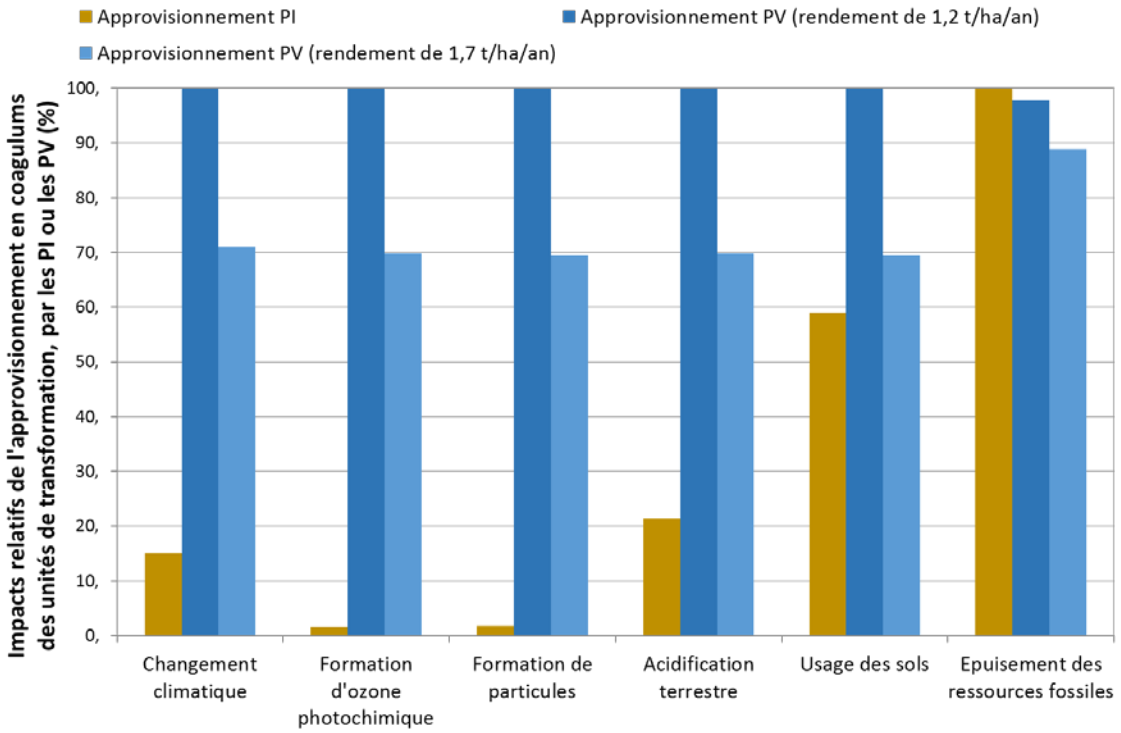

Figure 12 : Influence du rendement des PV sur la comparaison des résultats d'indicateurs d'impacts *midpoints* de l'approvisionnement en coagulums des unités d'usinage par les PI ou les PV

Les résultats de la Figure 12 montrent que, malgré des différences plus faibles, avec un rendement des PV de 1,7 t/ha/an, l'approvisionnement en coagulums par les PI génère toujours des impacts moindres que l'approvisionnement par les PV pour le changement climatique, la formation d'ozone photochimique et de particules, et l'acidification terrestre. Le même effet est observable pour l'usage des sols, mais la différence entre PI et PV devient alors plus limitée, la valeur de 1,7 t/ha/an étant relativement proche du rendement de 2,0 t/ha/an retenu pour les PI (voir section 3.1.3, Tableau 3).

5 Conclusions et perspectives de l'étude

L'objectif général de l'étude d'ACV réalisée ici a été de caractériser les impacts et bénéfices environnementaux de la filière hévéa en Côte d'Ivoire, en identifiant les principales sources d'impacts et les principaux leviers d'amélioration, mais aussi en déterminant les principaux manques en données et en connaissances de la filière. Pour cela, un modèle de la filière a été réalisé, à partir des données collectées auprès des acteurs de la filière, du FIRCA et de l'APROMAC, complétées lorsque nécessaire par des références de la littérature scientifique.

Les résultats obtenus ont permis de mettre en valeur quatre sources principales d'impacts environnementaux potentiels :

- Les opérations de brûlis réalisées sur les PV, pour le nettoyage et la préparation du terrain, dont les émissions jouent un rôle majeur sur la santé humaine, via notamment la formation de particules fines, et contribuent également à la dégradation de la qualité des écosystèmes, via la formation d'ozone photochimique et l'acidification terrestre ;
- L'occupation des sols, par ses effets sur la biodiversité qui pourrait exister en l'absence de plantations ;
- Le traitement des eaux usées par lagunage, qui peut générer d'importantes quantités de gaz à effet de serre, malheureusement mal quantifiées à l'heure actuelle ; et
- La consommation d'électricité et de combustibles, pour le fonctionnement des séchoirs, au niveau des unités de transformation des coagulums, qui contribuent à l'épuisement des ressources.

Les pratiques de brûlis et les moindres rendements en coagulums des PV, par rapport aux PI, expliquent qu'à l'heure actuelle, les performances environnementales des PV sont nettement inférieures à celles des PI, en termes de santé humaine et de qualité des écosystèmes. Néanmoins, comme mis en valeur par le premier livrable de cette étude (Benoist, Leconte, 2020), il existe aujourd'hui une incertitude importante sur les rendements obtenus en PV, qui joue également fortement sur les résultats d'ACV.

Concernant les opérations de brûlis observées en PV, s'il paraît nécessaire de réduire ces pratiques, à l'instar de ce qui a été fait ces dernières années dans les PI, il apparaît important d'accompagner cette évolution d'un suivi strict de la maladie du Fomès. Si un arrêt du brûlis conduisait à une augmentation des cas de Fomès et donc des traitements associés, les résultats d'ACV obtenus ici indiquent que l'effet environnemental resterait positif, compte tenu de l'impact très limité de ces traitements.

Enfin, deux sources principales d'incertitudes ont pu être identifiées au cours de ce travail :

- Les changements d'usages des sols et ses effets sur les stocks de carbone :
  Compte tenu de la forte expansion du verger d'hévéa observée au cours des dernières décennies, la question des changements d'usages des sols est cruciale. Malheureusement, les informations disponibles à ce sujet sont peu nombreuses, et il conviendrait d'améliorer ce point à deux niveaux :
  - Une meilleure compréhension des dynamiques à l'œuvre dans l'évolution des surfaces plantées en hévéa, en identifiant plus précisément les types d'usages des sols substitués par les nouvelles plantations d'hévéa ; et
  - Un approfondissement des données disponibles à l'échelle internationale (IPCC) sur les stocks de carbone potentiels en plantations d'hévéa, les travaux en cours au niveau

du CNRA montrant une grande variabilité dans le stockage potentiel de carbone des plantations, en fonction notamment du clone utilisé[2].

- Les émissions générées au cours du lagunage des effluents d'usinage :
  Les résultats d'ACV obtenus au cours de cette étude ont souligné l'importance potentielle de cette source d'émissions pour le bilan de gaz à effet de serre de la filière. Toutefois, peu de données sont disponibles à ce sujet et ces émissions ont dû être extrapolées à partir de références scientifiques de la littérature internationale. L'acquisition de mesures et de données spécifiques aux conditions de Côte d'Ivoire permettrait alors de valider l'importance potentielle de cet enjeu et de proposer des solutions de réduction.

[2] Communication FIRCA, 15 avril 2020.

6 Références

Aalde, Harald, Gonzalez, Patrick, Gytarsky, Michael, Krug, Thelma, Kurz, Werner A., Lasco, Rodel D., Martino, Daniel L., Mcconkey, Brian G., Ogle, Stephen, Paustian, Keith, Raison, John, Ravindranath, N.H., Schoene, Dieter, Smith, Pete, Somogyi, Zoltan, Van Amstel, Andre Et Verchot, Louis, 2006. Generic Methodologies Applicable To Multiple Land-Use Categories. In : Eggleston, Simon, Buendia, Leandro, Miwa, Kyoko, Ngara, Todd Et Tanabe, Kiyoto (éd.), *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use* [en ligne]. June 2014. Hayama, Japan : Institute for Global Environmental Strategies (IGES). p. 2.1-2.59. Disponible à l'adresse : http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html.

Andreae, M.O. Et Merlet, P., 2001. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. In : *Global Biogeochemical Cycles*. 2001. Vol. 15, n° 4, p. 955 - 966. DOI http://dx.doi.org/10.1029/2000GB001382.

Anghui, Aka, Kanon, Bra Et Houphouët-Boigny, Félix, 1976. *L'économie ivoirienne*. Paris, France : s.n. ISBN 9782402228510.

APROMAC, 2020. Statistiques - APROMAC. In : [en ligne]. 2020. [Consulté le 12 juin 2020]. Disponible à l'adresse : https://apromac.ci/statistiques/.

Attobra, Akpangni, N'diaye, Oumar, Toguila, Brice, Konan, Albert, Dian, Kouadio, Obouayeba, Samuel, Gnagne, Michel, Soumahoro, Bouake, Doumbia, Amadou, Kouame, N'da Valery, Yapi, Hervé, Bouadou, Adingra, Adje, Martin, Tieha, Venance, Sangare, Hamed, Mobio, Nicomède, Kouassi, Bonzou Et Konan, N'goran, 2013a. *Guide du conseiller agricole hévéa - Tome 1 - Production de matériel végétal d'hévéa* [en ligne]. Abidjan, Côte d'Ivoire. Disponible à l'adresse : https://firca.ci/publications/guides-didactiques/#.

Attobra, Akpangni, N'diaye, Oumar, Toguila, Brice, Konan, Albert, Dian, Kouadio, Obouayeba, Samuel, Gnagne, Michel, Soumahoro, Bouake, Doumbia, Amadou, Kouame, N'da Valery, Yapi, Hervé, Bouadou, Adingra, Adje, Martin, Tieha, Venance, Sangare, Hamed, Mobio, Nicomède, Kouassi, Bonzou Et Konan, N'goran, 2013b. *Guide du conseiller agricole hévéa - Tome 2 - Mise en place et entretien des cultures immatures d'hévéa* [en ligne]. Abidjan, Côte d'Ivoire. Disponible à l'adresse : https://firca.ci/publications/guides-didactiques/#.

Attobra, Akpangni, N'diaye, Oumar, Toguila, Brice, Konan, Albert, Dian, Kouadio, Obouayeba, Samuel, Gnagne, Michel, Soumahoro, Bouake, Doumbia, Amadou, Kouame, N'da Valery, Yapi, Hervé, Bouadou, Adingra, Adje, Martin, Tieha, Venance, Sangare, Hamed, Mobio, Nicomède, Kouassi, Bonzou Et Konan, N'goran, 2013c. *Guide du conseiller agricole hévéa - Tome 3 - Gestion des plantations matures d'hévéa* [en ligne]. Abidjan, Côte d'Ivoire. Disponible à l'adresse : https://firca.ci/publications/guides-didactiques/#.

Attobra, Akpangni, N'diaye, Oumar, Toguila, Brice, Konan, Albert, Dian, Kouadio, Obouayeba, Samuel, Gnagne, Michel, Soumahoro, Bouake, Doumbia, Amadou, Kouame, N'da Valery, Yapi, Hervé, Bouadou, Adingra, Adje, Martin, Tieha, Venance, Sangare, Hamed, Mobio, Nicomède, Kouassi, Bonzou Et Konan, N'goran, 2013d. *Guide du conseiller agricole hévéa - Tome 4 - Maladies et ravageurs de l'hévéa* [en ligne]. Abidjan, Côte d'Ivoire. Disponible à l'adresse : https://firca.ci/publications/guides-didactiques/#.

Benoist, Anthony, Cornillier, Claire Et Piednoir, Brice, 2015. *Etude préliminaire à la réalisation de bilans environnementaux sur le chauffage au bois - Partie 1 : Etat de l'art* [en ligne]. Angers, France. Disponible à l'adresse : http://www.ademe.fr/etude-preliminaire-a-realisation-bilans-environnementaux-chauffage-bois.

Benoist, Anthony Et Leconte, Antoine, 2020. *Filière Hévéa en Côte d'Ivoire : Analyse fonctionnelle et diagnostic agronomique*. Montpellier, France.

Bessou, Cécile, Basset-Mens, Claudine, Tran, Thierry Et Benoist, Anthony, 2013. LCA applied to perennial cropping systems: a review focused on the farm stage. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment* [en ligne]. 2013. Vol. 18, n° 2, p. 340 - 361. DOI 10.1007/s11367-012-0502-z. Disponible à l'adresse : http://www.springerlink.com/index/10.1007/s11367-012-0502-z.

Bouwman, A.F., Boumans, L.J.M. Et Batjes, N.H., 2002. Modeling global annual N2O and NO emissions from fertilized fields. In : *Global Biogeochemical Cycles* [en ligne]. 2002. Vol. 16, n° 4, p. 28.1-28.9. DOI 10.1029/2001GB001812. Disponible à l'adresse : http://doi.wiley.com/10.1029/2001GB001812.

Brindoumi Atta, Kouamé Jacob, 2015. Les facteurs du developpement de l'héveaculture en Côte d'Ivoire de 1994 à 2012. In : *European Scientific Journal*. 2015. Vol. 11, n° 17, p. 202-219.

Colin, Jean-Philippe, 1990. *La mutation d'une économie de plantation en basse Côte d'Ivoire*. Paris, France : s.n. ISBN 2709909944.

Dong, Hongmin, Macdonals, James Douglas, Ogle, Stephen Michael, Sanz Sanchez, Maria José Et Rochamarcelo, Theoto, 2019. Volume 4: Agriculture, Forestry And Other Land Use. In : Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukada, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. Et Federici, S. (éd.), *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* [en ligne]. Switzerland : s.n. Disponible à l'adresse : https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html.

EC-JRC, 2010. *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance* [en ligne]. Luxembourg City, Luxembourg. Disponible à l'adresse : http://eplca.jrc.ec.europa.eu/?page_id=86.

European Commission, 2018. *Product Environmental Footprint Category Rules Guidance (version 6.3)* [en ligne]. Brussels, Belgium. Disponible à l'adresse : https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCR_guidance_v6.3.pdf.

FAO, 2020. FAOSTAT. In : [en ligne]. 2020. [Consulté le 12 juin 2020]. Disponible à l'adresse : http://www.fao.org/faostat/en/#home.

FAO / IIASA / ISRIC / ISSCAS / JRC, 2012. Harmonized World Soil Database (version 1.2). In : [en ligne]. 2012. [Consulté le 1 juillet 2018]. Disponible à l'adresse : http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/.

Flores, Laura, García, Joan, Pena, Rocío Et Garfí, Marianna, 2020. Carbon footprint of constructed wetlands for winery wastewater treatment. In : *Ecological Engineering* [en ligne]. 2020. Vol. 156, n° February, p. 105959. DOI 10.1016/j.ecoleng.2020.105959. Disponible à l'adresse : https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105959.

Huijbregts, Mark A.J., Steinmann, Zoran J.N., Elshout, Pieter M.F., Stam, Gea, Verones, Francesca, Vieira, Marisa D.M., Hollander, A., Zijp, Michiel Et Van Zelm, Rosalie, 2016. *ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and enpoint level - Report I: Characterization* [en ligne]. Bilthoven, The Netherlands. Disponible à l'adresse : https://www.rivm.nl/en/Documents_and_publications/Scientific/Reports/2016/december/ReCiPe_2016_A_harmonized_life_cycle_impact_assessment_method_at_midpoint_and_endpoint_level_Report_I_Characterization/Download:Qy96lACkQzG3bNWtnPVvmg/ReCiPe_2

016_A_harmoniz.

Huijbregts, Mark A.J., Steinmann, Zoran J.N., Elshout, Pieter M.F., Stam, Gea, Verones, Francesca, Vieira, Marisa, Zijp, Michiel, Hollander, Anne Et Van Zelm, Rosalie, 2017. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. In : *International Journal of Life Cycle Assessment* [en ligne]. 2017. Vol. 22, n° 2, p. 138 - 147. DOI 10.1007/s11367-016-1246-y. Disponible à l'adresse : http://dx.doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y.

IRSG, 2020. International Rubber Study Group. In : [en ligne]. 2020. [Consulté le 26 juin 2020]. Disponible à l'adresse : http://www.rubberstudy.com/welcome.

ISO, 2006a. *Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework*. S.l.

ISO, 2006b. *Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines*. S.l.

Mathew, Jacob, Kumaran, M.G., Joseph, Kochuthresiamma Et George, Elsie S., 2000. waste management. in : george, p.j. et kuruvilla jacob, C. (éd.), *Natural rubber - Agromanagement and crop processing*. S.l. : Rubber Research Institute of India. p. 479-492.

Pillet-Schwartz, Anne-Marie, 1980. Une tentative de vulgarisation avortée : l'hévéaculture villageoise en Côte d'Ivoire. In : *Cahiers d'études africaines*. 1980. Vol. 20, n° 77 - 78, p. 63 - 82. DOI 10.3406/cea.1980.2351.

Racault, Y., Bois, J.-S., Carré, J., Duchêne, P., Lebaudy, B., Lesavre, J., Lickel, P., Rateau, M. Et Vachon, A., 1997. *Le Lagunage naturel - Les leçons tirées de 15 ans de pratique en France* [en ligne]. Cachan, France : s.n. Disponible à l'adresse : https://epnac.irstea.fr/wp-content/uploads/2012/08/Lagunage_15ans_de_pratique_en_france.pdf.

Ruf, François, 2012. L'adoption de l'hévéa en Côte d'Ivoire. Prix, mimétisme, changement écologique et social. In : *Economie rurale* [en ligne]. 2012. Vol. 330 - 331, p. 103 - 124. Disponible à l'adresse : https://doi.org/10.4000/economierurale.3527.

Stehfest, Elke Et Bouwman, Lex, 2006. N2O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: Summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. In : *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2006. Vol. 74, n° 3, p. 207 - 228. DOI 10.1007/s10705-006-9000-7.

Tanikawa, Daisuke, Syutsubo, Kazuaki, Watari, Takahiro, Miyaoka, Yuma, Hatamoto, Masashi, Iijima, Sou, Fukuda, Masao, Nguyen, Ngoc Bich Et Yamaguchi, Takashi, 2016. Greenhouse gas emissions from open-type anaerobic wastewater treatment system in natural rubber processing factory. In : *Journal of Cleaner Production* [en ligne]. 2016. Vol. 119, p. 32-37. DOI 10.1016/j.jclepro.2016.02.001. Disponible à l'adresse : http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.001.

Annexe 1 : Détail des visites de terrain réalisées au cours de la mission CIRAD d'avril 2019

Les visites de terrain qui ont servi de support à la collecte d'informations de cette étude ont eu lieu du 9 au 18 avril 2019. Celles-ci ont été précédées d'un briefing le 8 avril et d'un débriefing le 19 avril, à Abidjan, avec le FIRCA et l'APROMAC.

La Figure 13 ci-dessous positionne les sites visités lors de ces visites de terrain. Les types d'acteurs rencontrés pour chacun de ces sites sont ensuite détaillés dans le Tableau 8.

Figure 13 : Localisation des sites visités lors de la mission CIRAD d'avril 2019

Tableau 8 : Types d'acteurs rencontrés par site visité au cours de la mission CIRAD d'avril 2019

	Pépinières	PV	PI	Coopératives	Usines de 1ère transformation
Daoukro		6			
Bettié			1		1
Aboisso		2		1	1
Grand Lahou	1	2			1
Dabou		2	1		1
Gagnoa		2			
San Pedro	1	3	1		1
Grand Béréby	1	1	1		1
Total	**3**	**18**	**4**	**1**	**6**

Département, unité, direction régionale : Persyst, UR34 Systèmes de Pérennes, Montpellier

Adresse : Av. Agropolis - TA B-34/02 (Bât. 2, Bur. 147C), F-34398 Montpellier CEDEX 5

Tél. : +33 4 67 61 44 87

www.cirad.fr