

Table de matière

Remerciements	ii
Résumé	iv
Abstract	v
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xi
Abréviations	xii
Chapitre 1 : Introduction générale.....	1
1. Situation de l'accès à l'énergie au Burkina Faso et du Mali.....	2
2. Les causes de l'essor des biocarburants au Burkina Faso et au Mali.....	3
3. La problématique de la production de biocarburants et de l'approvisionnement en biomasse au Burkina Faso et au Mali.....	4
4. Objectifs et plan de recherche	7
4.1. Objectifs de recherche.....	7
4.2. Plan de recherche	7
Chapitre 2 : Généralités et état de l'art.....	9
Introduction	10
1. Chaîne logistique et chaîne logistique dans les systèmes de production de bioénergies	10
1.1. Définitions et enjeux	10
1.2. Conception du réseau logistique	14
1.3. Chaîne logistique inverse : valorisation des déchets et sous-produits	17
1.4. Cas particulier de l'approvisionnement en biomasse des filières de production de biocarburants oléagineux à base de Jatropha et de Balanites en Afrique de l'Ouest.....	19
2. Optimisation des chaînes d'approvisionnement en biomasse dans les systèmes de production de bioénergies	27
2.1. Conception de réseau logistique : modélisation, critères de d'optimisation et approches de résolution	27
2.2. Problèmes de conception de réseau logistique.....	29
2.3. Revue de littérature sur la conception du réseau logistique dans les systèmes de production de bioénergies.....	34
2.4. Contribution de nos travaux de recherche	36

Conclusion.....	37
Chapitre 3 : Modélisation de la chaîne logistique des systèmes de production de biocarburants oléagineux	38
Introduction	39
1. Définition du problème modélisé.....	39
1.1. Les critères d'optimisation.....	41
1.2. Hypothèses et limitation du problème	42
1.3. Le système modélisé	47
1.4. Données du problème à optimiser.....	48
1.5. Les attributs du modèle.....	48
2. Complexité du problème modélisé.....	49
3. Formulation mathématique du problème	50
3.1. Les ensembles	50
3.2. Les paramètres	51
3.3. Les variables de décision	53
3.4. Fonctions objectif.....	55
Conclusion.....	62
Chapitre 4 : Implémentation du modèle d'optimisation.....	63
Introduction	64
1. Description du cas d'étude	64
1.1. Demande en biomasse.....	65
1.2. Réseau d'approvisionnement en biomasse	66
1.3. Production de la biomasse	67
1.4. Collecte, stockage et manutention de la biomasse.....	70
1.5. Prétraitement de la biomasse	71
1.6. Valorisation des sous-produits.....	72
1.7. Transport de la biomasse et des sous-produits.....	74
1.8. Extraction de l'HVC	75
1.9. Scénarios implémentés et analyse de sensibilité.....	77
2. Résultats et discussions	77
2.1. Résultats et discussion de l'implémentation de la fonction économique	79

2.2. Résultats et discussion de l'implémentation de la fonction environnement	94
2.3. Analyse de sensibilité	104
Conclusion.....	110
Conclusion générale	112
Bibliographie.....	117
Annexes.....	128
Annexe 1. Évaluation environnementale	129
1. Hypothèses pour le calcul des émissions de GES liés à l'utilisation des fertilisants	129
2. Hypothèses pour le calcul des émissions de GES liés à l'utilisation des tourteaux comme fertilisant.....	129
3. Hypothèses de calcul des émissions des moyens de transport	129
Annexe 2. Extraction de l'huile végétale carburant	130
1. Équations de calcul du prix d'achat des équipements d'une unité d'extraction d'HVC.....	130
2. Hypothèses et calculs pour des différents coûts considérés dans la phase d'extraction de l'HVC. 130	
3. Formule de calcul des coûts annualisé	131
Annexe 3. Résultats de performance de l'algorithme de résolution du problème d'optimisation ...	131
1. Implémentation de la fonction économique	131
2. Implémentation de la fonction environnement.....	132

Liste des figures

Figure 1 : Composantes de la chaîne logistique des systèmes de production de bioénergie	13
Figure 2 : Flux de matières dans la chaîne logistique en boucle fermée d'un système exploitant la biomasse.....	18
Figure 3 : Composition du fruit du <i>Jatropha Curcas</i>	20
Figure 4 : Composition du fruit du <i>Balanites aegyptiaca</i>	21
Figure 5 : Problème de localisation à trois échelons (Hammami, 2003).	32
Figure 6. Découpage de la chaîne logistique de la biomasse.....	43
Figure 7. Flux possible des sous-produits dans la chaîne logistique.	45
Figure 8 : Principales données d'entrée et de sortie des opérations de la chaîne logistique.....	47
Figure 9. Vue générique de la structure du réseau logistique avec les variables de décision.....	55
Figure 10. Bilan de matière jusqu'à la production de l'HVC de Balanites	65
Figure 11. Bilan de matière jusqu'à la production de l'HVC de Jatropha.....	66
Figure 12. Aspect du réseau contenant l'ensemble des sites potentiels pour l'approvisionnement en amandes de Balanites et de Jatropha.....	67
Figure 13. Jatropha : Répartition des coûts d'approvisionnement pour les quatre scénarios	80
Figure 14. Balanites : Répartition des coûts d'approvisionnement pour les quatre scénarios.....	80
Figure 15. Pourcentage de sites de culture du Jatropha sélectionnés en fonction de leur superficie.....	82
Figure 16. Pourcentage de sites de production de fruit de Balanites sélectionné en fonction du nombre d'arbres par unité de surface.....	82
Figure 17. Jatropha : réseau d'approvisionnement pour le Scénario 1	85
Figure 18. Jatropha : réseau d'approvisionnement pour le Scénario 2	85
Figure 19. Jatropha : réseau d'approvisionnement pour le Scénario 3	86
Figure 20. Jatropha : réseau d'approvisionnement pour le Scénario 4	86
Figure 21. Balanites : Réseau d'approvisionnement pour le Scénario 1	86
Figure 22. Balanites : Réseau d'approvisionnement pour le Scénario 2	86
Figure 23. Balanites : Réseau d'approvisionnement pour le Scénario 3	86
Figure 24. Balanites : Réseau d'approvisionnement pour le Scénario 4	86
Figure 25. Légende des figures 17 à 24	87
Figure 26. Coûts d'approvisionnement en biomasse du scénario 3 pour les deux biomasses	88
Figure 27. Pourcentage de sites de la biomasse sélectionnée dans les cas 1 et 2 lorsque les tourteaux de Jatropha sont retournés sur les sites de production de la biomasse	93
Figure 28. Pourcentage de sites de la biomasse sélectionnée dans les cas 1 et 2 lorsque les tourteaux de Balanites sont retournés sur les sites de production de la biomasse	93

Figure 29. Jatropha : répartition des impacts des émissions de GES de l’approvisionnement en biomasse pour les quatre scénarios.....	95
Figure 30. Balanites : répartition des impacts des émissions de GES de l’approvisionnement en biomasse pour les quatre scénarios.....	95
Figure 31. Jatropha : réseau d’approvisionnement pour le Scénario 1	99
Figure 32. Jatropha : réseau d’approvisionnement pour le Scénario 2	99
Figure 33. Jatropha : réseau d’approvisionnement pour le Scénario 3	99
Figure 34. Jatropha : réseau d’approvisionnement pour le Scénario 4	99
Figure 35. Balanites : Réseau d’approvisionnement pour le Scénario 1	99
Figure 36. Balanites : Réseau d’approvisionnement pour le Scénario 2	99
Figure 37. Balanites : Réseau d’approvisionnement pour le Scénario 3	100
Figure 38. Balanites : Réseau d’approvisionnement pour le Scénario 4	100
Figure 39. Légende des figures 31 à 38.....	100
Figure 40. Pourcentage de sites de culture du Jatropha sélectionnés en fonction de leur superficie.....	100
Figure 41. Pourcentage de sites de production de fruit de Balanites sélectionné en fonction du nombre d'arbres par unité de surface.....	100
Figure 42. Impact des émissions de GES de l'approvisionnement en biomasse du scénario 3 pour le Balanites et le Jatropha	102
Figure 43. Jatropha : variation des coûts d’approvisionnement en biomasse en fonction de la taille du réseau logistique.....	104
Figure 44. Balanites : variation des coûts d’approvisionnement en biomasse en fonction de la taille du réseau logistique.....	104
Figure 45. Jatropha : variation des impacts des émissions de GES en fonction de la taille du réseau logistique.....	105
Figure 46. Balanites : variation des impacts des émissions de GES en fonction de la taille du réseau logistique.....	105
Figure 47. Évolution du coût de revient de la biomasse lorsque les sous-produits du Jatropha sont vendus	107
Figure 48. Évolution du coût de revient de la biomasse lorsque les sous-produits du Balanites sont vendus	107
Figure 49. Évolution du coût de l’HVC lorsque les sous-produits du Jatropha sont vendus	109
Figure 50. Évolution du coût de l’HVC lorsque les sous-produits du Balanites sont vendus	109

Liste des tableaux

Tableau 1: Rendements du Jatropha dans quelques pays d’Afrique.....	23
Tableau 2 : Productivité individuelle par pied de Balanites	23
Tableau 3 : Quantité de fruit et de graines de Jatropha récoltée par unité de temps et par homme dans la littérature	24
Tableau 4. État de la biomasse selon le niveau de localisation du prétraitement	44
Tableau 5. Les ensembles	51
Tableau 6. Données sur la récolte du Balanites	68
Tableau 7. Données de culture et de récolte du Jatropha.....	69
Tableau 8. Données du stockage.....	71
Tableau 9. Coûts du prétraitement (calculés sur la base des paramètres de fonctionnement).....	72
Tableau 10. Données relatives à l’utilisation du tourteau de Jatropha comme engrais organique dans le système de culture intercalaire intensif.....	73
Tableau 11. Données sur les moyens de transport.....	75
Tableau 12. Paramètres de fonctionnement des huileries.....	75
Tableau 13. Composition et rémunération du personnel des huileries	76
Tableau 14. Description des scénarios d’implémentation	77
Tableau 15 : Plage de valeur du prix de vente des sous-produits.	77
Tableau 16. Coûts totaux d’approvisionnement en biomasse et des coûts totaux d’obtention de l’HVC des quatre scénarios	79
Tableau 17. Jatropha : résultats relatifs aux éléments du réseau logistique.....	80
Tableau 18. Balanites : résultats relatifs aux éléments du réseau logistique	81
Tableau 19. Résultats de l’implémentation des options de valorisation des sous-produits issus du prétraitement	90
Tableau 20. Résultats de l’implémentation des options de valorisation des tourteaux	91
Tableau 21. Impact total des émissions de GES générées par l’approvisionnement en biomasse des quatre scénarios.....	94
Tableau 22. Jatropha : résultats relatifs aux éléments du réseau logistique.....	95
Tableau 23. Balanites : résultats relatifs aux éléments du réseau logistique	96
Tableau 24. Résultats des impacts d’émissions de GES de l’approvisionnement en biomasse avec valorisation du tourteau.....	103

Abréviations

AIE : Agence Internationale de l'Énergie

CL : Chaîne Logistique

DDO : Distillate Diesel Oil

EEHV : Esters Éthyliques d'Huile Végétale

EMHV : Esters Méthyliques d'Huile Végétale

GES : Gaz à Effet de Serre

HFO : Heavy fuel oil

HVC : Huiles Végétales Carburants

NPK : Azote Phosphore Potassium

ONEA : Office Nationale de l'Eau et de l'Assainissement

PME : Petites et Moyennes Entreprises

PRG : Potentiel de Réchauffement Globale

SONABEL : Société Nationale d'Electricité du Burkina

SONABHY : Société Nationale Burkinabè des Hydrocarbures

Rapport-Gratuit.com

Chapitre 1 : Introduction générale

Ce chapitre introductif présente d'abord le contexte énergétique des pays de l'Afrique de l'Ouest et le contexte ayant favorisé l'essor des projets de production de biocarburant au Burkina Faso et au Mali. La problématique de la production de biocarburants et de l'approvisionnement en biomasse au Burkina Faso et au Mali est ensuite présentée tout en soulignant les raisons de la promotion du *Jatropha curcas* et les échecs relatifs à son exploitation pour la production de biocarburants. Les stratégies pour pallier ces échecs, notamment les études sur l'agronomie du *Jatropha* et l'intérêt pour d'autres plantes telles que le *Balanites* sont également abordés. Le chapitre se termine par la présentation des objectifs de la thèse et par la présentation de la méthodologie et du plan de recherche mise en place pour l'atteinte des objectifs fixés.

1. Situation de l'accès à l'énergie au Burkina Faso et du Mali

L'accès à l'énergie et aux services énergétiques modernes, bien qu'en augmentation, reste limité en Afrique subsaharienne. Malgré les efforts qui y ont été déployés, 590 millions de personnes dans cette partie du monde n'ont toujours pas accès à l'électricité en 2017, ce qui en fait la plus grande concentration de personnes dans le monde sans accès à l'électricité (IEA., 2017).

Cette situation traduit la pauvreté énergétique¹ que connaissent de nombreux pays d'Afrique Subsaharienne tels que le Burkina Faso et le Mali ; pauvreté énergétique qui est visible à travers le faible taux de couverture du territoire de ces pays en électricité. En effet, selon l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) (IEA, 2014) en 2014, au Burkina Faso, le taux d'électrification nationale était de 18% dont seulement 1% en milieu rural. Au Mali en 2014 également, ce taux était de 26% dont 9% en milieu rural. Ces taux sont faibles comparés au taux moyen d'électrification pour toute l'Afrique qui était toujours selon l'AIE de 45 % la même année 2014.

En raison de ce faible taux d'électrification, les personnes vivant sans électricité au Burkina Faso et au Mali dépendent de l'utilisation traditionnelle de la biomasse solide (bois et charbon de bois) pour la production d'énergie (IEA., 2017). En effet, le bois énergie occupe une importante place dans la balance énergétique de ces deux pays et représentait 83% de la consommation énergétique nationale au Burkina Faso (Dabat et al., 2009) et 78% au Mali en 2008 (Département régional Ouest II (ORWB), 2010; l'Énergie, 2008). Les besoins énergétiques des populations (surtout pour des usages domestiques tels que la cuisson des aliments) sont majoritairement satisfaits par la biomasse traditionnelle à base de bois ou de charbon de bois (plus de 95% de la population de ces deux pays selon l'AIE en 2014). La biomasse traditionnelle est même parfois utilisée pour satisfaire les besoins énergétiques dans certaines activités productives en milieu artisanal et pour les petites et moyennes entreprises (PME) et est pratiquement la seule source d'énergie des populations en milieu rural. Cette consommation de la biomasse ligneuse provoque de fortes pressions sur les ressources forestières en contribuant considérablement à la déforestation (Sulaiman et al., 2017).

Si les besoins énergétiques des populations au Burkina Faso et au Mali sont satisfaits majoritairement par l'utilisation traditionnelle de la biomasse solide, les besoins en énergies des secteurs économiques clés

¹ La pauvreté énergétique est définie par le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) comme l'absence de choix qui donnerait à un pays l'accès à des énergies adéquates, abordables, efficaces et durables pour supporter son développement économique et humain (Derra, 2014)).

tels que le transport, la production d'électricité et l'industrie sont quant à eux satisfaits en grande partie par les énergies hydrocarbures (Burnod et al., 2010). Or n'ayant pas de réserves d'hydrocarbures, le Burkina Faso et le Mali sont totalement dépendants des importations de produits pétroliers afin de s'approvisionner en hydrocarbures. Ces importations de produits pétroliers entraînent une pression sur l'économie et sur le budget des États de ces deux pays en raison du poids des dépenses en hydrocarbures sur la balance commerciale. En plus de contribuer à aggraver le déficit de la balance commerciale, ce déficit en matière d'accès à l'énergie a aussi des conséquences négatives sur le bien-être socio-économique des États tels que le Burkina Faso et le Mali qui les subissent. En effet, l'accès à l'énergie est considéré comme une composante importante du développement et sa consommation est considérée comme un indicateur du degré de bien-être d'une communauté (Giannini Pereira et al., 2011). Le manque d'énergie dans une économie ou son inadéquation aux besoins des populations peut donc conduire entre autres à la pauvreté sociale et économique, au sous-développement, au chômage et à la sous-utilisation des ressources humaines vivant en milieu rural. Ces conséquences négatives peuvent également inclure la stagnation économique, la sous-performance des industries et des secteurs industriels, le taux élevé de l'analphabétisme, et l'augmentation des migrations (Pereira et al., 2011; Uduma and Arciszewski, 2010). Les conséquences négatives du manque d'énergie peuvent également expliquer l'intérêt du Burkina Faso et du Mali pour les bioénergies et plus particulièrement pour les biocarburants. L'utilisation des biocarburants dans ces deux pays pourrait effectivement contribuer au développement du secteur de l'énergie et à la réduction de leur dépendance vis-à-vis des importations d'hydrocarbures (Dabat et al., 2010) (Kple et al., 2010) en y diversifiant les sources d'énergie et en y substituant ou remplaçant le bois énergie et les produits pétroliers importés. Cet intérêt pour ces biocarburants s'est traduit par le développement de nombreux projets de production de biocarburants depuis les années 2000 en Afrique de l'Ouest et notamment au Burkina Faso et au Mali.

2. Les causes de l'essor des biocarburants au Burkina Faso et au Mali

Les biocarburants ont en effet connu un vif engouement dans le monde et en Afrique à partir des années 2000 (Gatete and Dabat, 2014). Les raisons de cet engouement au Burkina Faso, au Mali comme dans beaucoup de pays en voie de développement sont les suivantes :

- La flambée des prix des carburants dans les années 2007-2008 qui positionne les biocarburants comme une source d'énergie renouvelable, économiquement viable qui pourrait renforcer la sécurité énergétique nationale et locale (von Maltitz et al., 2014). En effet, comme mentionné dans le paragraphe précédent, la situation énergétique au Burkina Faso et au Mali est marquée par une forte dépendance aux importations des énergies fossiles entraînant une pression sur l'économie et sur le budget des États en raison du poids des dépenses en hydrocarbures sur la balance commerciale.

- La possibilité de substituer les carburants liquides importés par les biocarburants dans le secteur du transport. Le transport est en effet l'un des secteurs clé de l'économie de ces pays et occupe une part importante dans la consommation des hydrocarbures importés (Burnod et al., 2010).

- La possibilité d'utiliser les biocarburants pour l'électrification rurale. Les huiles végétales extraites localement pourraient en effet remplacer les carburants conventionnels dans les générateurs diesel qui alimentent les réseaux électriques au niveau des villages (Gasparatos et al., 2015).

- La stagnation du secteur agricole qui a poussé les gouvernements à chercher des solutions pour revitaliser ce secteur. Les biocarburants semblaient pouvoir être un élément de relance, car ils offraient des perspectives de valorisation des cultures alimentaires (par des apports au niveau de la transformation ou la conservation des produits), d'intensification de la production agricole (à travers la mécanisation de celle-ci), et d'augmentation de l'accès aux biens alimentaires (via l'amélioration du transport dans le secteur agricole) (Dabat, 2011).

- La potentialité d'exporter les biocarburants et la biomasse comme matières premières vers les marchés internationaux. En effet, avec la crise pétrolière, la crise alimentaire en 2008 et la directive sur les énergies renouvelables UE 2009/28/CE (Gasparatos et al., 2012), la disponibilité des terres dans de nombreux pays africains ont attiré de nombreux pays développés (Castel and Kamara, 2009). La production de biocarburants représentait ainsi pour ces pays africains une occasion pour stimuler les économies rurales en fournissant des marchés internationaux pour les cultures destinées à la production de biocarburants qui sont nombreuses et variées. C'est ainsi que de nombreuses plantes ont été ciblées pour la production de biocarburants dans les pays ayant manifesté un intérêt pour cette production.

3. La problématique de la production de biocarburants et de l'approvisionnement en biomasse au Burkina Faso et au Mali

Pour la production de biocarburants en Afrique de l'Ouest, plusieurs plantes, alimentaires et non alimentaires ont en effet été envisagées. Ce sont entre autres, le Jatropha, le coton, le tournesol, l'arachide, le soja, le Balanites, le neem, le moringa, le sésame, le karité... (Blin et al., 2008; Gatete and Dabat, 2014). Ces plantes produisent toutes des graines oléagineuses, mais ont des modes de culture différents. Le *Jatropha curcas L* (Jatropha) (voir paragraphe 1.4 ci-dessous pour plus de détails sur l'espèce *Jatropha curcas*) est cependant la plante qui a suscité le plus d'intérêt pour la production des biocarburants au Burkina Faso et au Mali (Djerma and Dabat, 2013; Samaké, 2007).

L'une des raisons principales de cet intérêt pour le Jatropha est le principe de précaution à travers le fait que la plante soit non comestible. En effet, dans ces pays où l'autosuffisance alimentaire n'a pas encore été atteinte et où l'agriculture de subsistance est majoritairement pratiquée, il est difficilement envisageable de cultiver une plante comestible pour produire du biocarburant. Pour ne pas concurrencer la production alimentaire, le Jatropha donc a été plébiscité par de nombreux investisseurs privés et promoteurs de projets communautaires (Maes et al., 2009). Cette promotion du Jatropha pour la production de biocarburant a cependant été faite sur la base d'hypothèses et sans études préalables sur l'exploitation de la plante qui n'est pas une espèce végétale native des régions africaines. La plante avait ainsi été décrite dans les années 2000, comme possédant de multiples atouts pour la production de biocarburants (rendements élevés en graines, capacité à pousser sur les sols marginaux (ne rentrant donc pas en compétition pour l'occupation des terres destinées aux cultures vivrières et de rente), faibles

besoins en eau...). Ce discours vantant les performances du *Jatropha* a été infléchi par la suite avec les retours d'expériences de terrain sur la culture et de l'extraction de l'huile de *Jatropha*. Ces expériences ont montré entre autres que, les rendements en graines du *Jatropha* étaient non seulement très hétérogènes, mais aussi très variables en fonction du contexte de culture (Lama et al., 2017) et que ceux-ci étaient également très inférieurs à ceux escomptés en Afrique de l'Ouest (qui étaient de l'ordre de 1000 à 1500 kg/ha (Janin and Ouedraogo, 2009)) et qui se sont avérés souvent inférieurs à 200kg/ha en milieu paysan (Rérolle, 2014). De plus, la plante étant toxique, les sous-produits (coques et tourteaux) générés par la production de biocarburant constituaient des déchets difficilement valorisables. Cela s'est traduit par des difficultés d'approvisionnement des unités de production de biocarburant en graines, et par un coût de production de l'huile sans subvention qui était élevé et supérieur au prix des fiouls lourds (HFO Heavy fuel oil 465 XOF²/l et Distillate Diesel Oil (DDO) 392 XOF/l (Chapuis, 2014)) pris comme référence (Konaté et al., 2017).

Par suite de ces difficultés d'approvisionnement en graines et à ce coût élevé de production de l'huile, le constat aujourd'hui est que la majorité des projets développés au Burkina Faso et au Mali pour la production de biocarburants à base de *Jatropha* a une faible rentabilité. D'après le rapport final de l'étude sur la structuration, l'organisation et le fonctionnement des filières *Jatropha* en Afrique de l'ouest (Groupe e-sud, 2014), de nombreux projets de culture et d'exploitation du *Jatropha* ont arrêté leurs activités ou ont été contraints à la faillite en raison de la non-rentabilité de la production de biocarburants à base de *Jatropha*.

Pour pallier ces échecs, certains promoteurs de projets de production de biocarburant se sont concentrés sur le développement des performances agronomiques du *Jatropha*. À ce sujet, les études ont concerné entre autres, l'amélioration des rendements de culture et des pratiques culturales ainsi que l'amélioration biologique et génétique du *Jatropha*. (Achten et al., 2010; Behera et al., 2010; Carels, 2009; Divakara et al., 2010; C S Everson et al., 2013; Ghosh et al., 2011; Iiyama et al., 2012; Jingura et al., 2011; Karanam and Bhavanasi, 2012; Kesava Rao et al., 2012; Maes et al., 2009; Rajaona et al., 2011; Tjeuw et al., 2015). Certaines études ont été réalisées sur l'optimisation des procédés de conversion des graines de *Jatropha* en vecteurs énergie (extraction de l'HVC, estérification, transestérification), caractéristiques de l'huile végétale et du biodiesel. (Blin et al., 2013; Chapuis et al., 2014; Meher et al., 2006; Navarro-Pineda et al., 2016; Pramanik, 2003; Rodrigues et al., 2013), et sur les cadres politiques et institutionnels pouvant favoriser le développement des biocarburants (Favretto et al., 2015, 2012; Gatete and Dabat, 2014; Hazelton et al., 2013; Tatsidjodoung et al., 2012).

Toujours pour pallier les échecs de production de biocarburants à base de *Jatropha*, d'autres promoteurs de projets de production de biocarburants se sont tournés vers d'autres plantes oléagineuses telle que le *Balanites aegyptiaca* (*Balanites*) afin de rentabiliser les investissements déjà réalisés pour la production de biocarburants et en vue de respecter les engagements pris pour la fourniture d'électricité aux populations en milieu rural. Le *Balanites* est une plante endémique du Sahel dont les caractéristiques pourraient permettre une production de biocarburants plus rentable qu'avec le *Jatropha*. En effet, cette plante produit des fruits contenant des graines riches en huile (46% et 55% de son poids en huile

² XOF : Franc CFA, monnaie utilisée en Afrique de l'Ouest

(Varshney and Anis, 2014)) qui peuvent être cueillies et transformées pour produire de l'HVC et/ou du biodiesel (voir paragraphe 1.4 ci-dessous pour plus de détail sur la description de l'espèce végétale *Balanites aegyptiaca*). La plante est d'autant plus intéressante qu'elle pousse dans les régions sahéliennes au contexte pédoclimatique non favorable à la culture du Jatropha. Elle est une plante sauvage, abondante et dominante dans les régions sahéliennes d'Afrique de l'Ouest (Boffa, 2000)). Son avantage pour la production de biocarburants est qu'en tant que plante sauvage, aucun investissement n'est nécessaire pour la culture des graines oléagineuses. Les arbres poussent naturellement sans irrigation ni apport d'engrais et sans entretien. Autre avantage du *Balanites* est que son exploitation n'engendre pas de compétition avec les cultures alimentaires pour l'occupation des sols. De plus, à la différence du Jatropha, les tourteaux du *Balanites* sont valorisables en aliments pour bétail.

Cependant, malgré ce changement de biomasse pour certains promoteurs de projets biocarburant et malgré toutes les études en vue de l'amélioration de l'exploitation du Jatropha pour d'autres, rares ont été les études traitant des problématiques de la mobilisation et de l'approvisionnement de la biomasse (que ce soit pour le *Balanites*, pour le Jatropha ou pour toute autre plante).

Des études économiques très intéressantes ont été réalisées sur la viabilité économique des filières Jatropha. C'est le cas de l'étude de Bouffaron (Bouffaron et al., 2012) qui a développé un outil d'aide à la décision nommé « JEALE » pour l'estimation de la viabilité économique de la production d'huile de Jatropha et de l'utilisation de cette huile pour alimenter des générateurs électriques en milieu rural. Borman et al. (Gareth D., Borman et al., 2013) ont développé un modèle pour l'évaluation des retombés économiques de la culture du Jatropha en Afrique australe et en Inde. Ces études ne permettent cependant pas de définir les canaux qui permettent de rendre la biomasse disponible en quantité et qualité aux unités de transformation. Pourtant, il a été reconnu ces dernières années que les systèmes de production de bioénergie possèdent des chaînes d'approvisionnements complexes et multidimensionnelles nécessitant un examen minutieux (Rentizelas, 2013). En effet contrairement à son équivalent pétrolier qui est un liquide à haute densité énergétique, la biomasse est une matière solide à faible densité énergétique possédant une répartition géographique dispersée. Cette dispersion géographique est plus prononcée pour les plantes sauvages comme le *Balanites* qui sont pour la plupart des plantes non domestiquées et dont les aires d'occurrences sont très vastes avec des arbres répartis de façon non homogène sur ces aires. Cela rend difficiles et coûteuses les opérations logistiques telles que la collecte et le transport de la biomasse (Eksioglu et al., 2009; Rentizelas et al., 2009). C'est pourquoi il est indispensable de bien concevoir et bien gérer la chaîne d'approvisionnement en biomasse afin d'assurer la disponibilité de la biomasse en qualité et quantité requise et à des coûts acceptables et dans les délais appropriés. De plus, les biocarburants étant une source d'énergie renouvelable, les questions de durabilité doivent aussi être prises en compte afin d'éviter l'introduction d'effets néfastes sur l'écosystème et la société humaine.

4. Objectifs et plan de recherche

4.1. Objectifs de recherche

Au vu de ce constat ci-dessus sur la problématique de la production de biocarburants et de l’approvisionnement en biomasse, l’objectif de cette étude est de déterminer les conditions de durabilité de l’approvisionnement en biomasse dans les systèmes de production de biocarburants oléagineux en Afrique de l’Ouest. Les conditions de durabilité considérées dans cette étude sont celles qui permettent d’atteindre la rentabilité économique dans le respect de l’environnement.

La finalité de nos travaux de recherche est de contribuer au développement social et à la croissance économique en Afrique de l’ouest (surtout en milieu rural) en favorisant l’accès à l’énergie dans ces zones pour la production de force motrice et d’électricité dans le respect de l’environnement et des Hommes.

Les objectifs spécifiques sont :

- Déterminer les paramètres, et variables techniques, économiques, environnementaux qui caractérisent (i) les processus de la chaîne logistique d’approvisionnement en biomasse oléagineuse et (ii) la valorisation des sous-produits dans le contexte ouest-africain caractérisé par un faible développement des infrastructures dédiées à l’approvisionnement de biens et par la pratique de l’agriculture de subsistance ;
- Concevoir un modèle d’optimisation de la configuration de l’approvisionnement des filières de production de biocarburants oléagineux qui sera un système d’aide à la décision pour les acteurs du domaine de la production des biocarburants en Afrique de l’Ouest.

4.2. Plan de recherche

Pour l’atteinte des objectifs fixés, une méthodologie de recherche a été définie et les travaux de recherche ont été divisés en trois grandes parties.

La première partie a consisté en une recherche bibliographique sur les thèmes relatifs au sujet de la thèse combinée de travaux d’enquêtes et d’expériences *in situ* en vue de compléter les données manquantes. Ainsi dans cette première partie des travaux de la thèse, les concepts relatifs aux bioénergies et à la biomasse ont été premièrement introduits et définis. La chaîne logistique des systèmes de production de façon générale et la chaîne logistique dans les systèmes de production de bioénergies ont été également définis tout en soulignant les particularités de la matière première « biomasse » et de sa chaîne d’approvisionnement ainsi que des différentes opérations y afférant. Les enjeux de la conception du réseau logistique ont ensuite été présentés et les notions de durabilité, notamment la réutilisation et le recyclage des déchets et sous-produits dans chaîne logistique ont été présentés tout en définissant le concept de chaîne logistique inverse et de chaîne logistique en boucle fermée. Dans cette première partie, un état des connaissances sur les systèmes de production de biocarburants oléagineux à base de *Jatropha* et de *Balanites* en Afrique de l’Ouest a été également présenté. Cette analyse des connaissances sur les filières de production de biocarburant oléagineux à base de *Jatropha* et de *Balanites* a été réalisée afin de rassembler des données sur les systèmes d’approvisionnement de la biomasse en Afrique de l’Ouest et

avec pour objectif de déterminer les hypothèses, paramètres et variables techniques, économiques et environnementaux pertinents à prendre en compte pour la construction d'un modèle d'optimisation.

Après la définition des concepts relatifs au sujet de la thèse, les problèmes de conception de réseau logistique ont été abordés. Ces problèmes concernent la conception de la chaîne logistique de façon générale. Les modèles courants ainsi que les approches de résolution des problèmes de conceptions de la chaîne logistique ont ensuite été présentés. Ces problèmes sont entre autres les problèmes de conception générale et de localisation et allocation d'installations. Les travaux existant dans le domaine des bioénergies et ayant abordé ces problèmes de conception de réseau logistique ont été revus selon la nature de la biomasse étudiée et selon la prise en compte des retours dans la chaîne logistique. Quelques vides dans la littérature concernant la conception de la chaîne d'approvisionnement ont enfin été évoqués avant de clore cette première partie par la présentation des contributions des travaux de thèse objet de ce document.

La deuxième partie du travail de thèse, a concerné la construction du modèle d'optimisation de la configuration de l'approvisionnement des systèmes de production de biocarburants oléagineux en Afrique de l'Ouest. Par conséquent, le problème à modéliser notamment, les hypothèses et les limites qui soutiennent la construction du modèle, les critères d'évaluation des performances de la chaîne logistique ainsi que les données et attributs du modèle, ont été présentés et définis. La formulation mathématique du problème à savoir : les différentes alternatives possibles pour l'approvisionnement de la biomasse, les paramètres et les variables ont ensuite été recensés et modélisés à travers un programme linéaire à variable mixte. En plus des paramètres économiques et environnementaux, la modélisation a pris en compte certains aspects techniques de la production de la biomasse et de sa logistique d'approvisionnement que sont le type de technologie employée, l'efficacité ou le rendement ainsi que la taille ou capacité de traitement liée à la technologie.

La troisième partie du travail a porté sur la résolution du problème d'optimisation par l'implémentation du modèle construit sur un cas d'étude de l'approvisionnement en graine de *Jatropha* et en amande de *Balanites* et pour chacun des critères d'optimisation. Les résultats obtenus ont été analysés et interprétés afin de démontrer l'aptitude du modèle développé à trouver les meilleures alternatives et options de configuration de la chaîne d'approvisionnement en biomasse oléagineuse dans le contexte ouest-africain.

Chapitre 2 : Généralités et état de l'art

Introduction

Ce chapitre présente une revue de la littérature sur les thèmes relatifs au sujet de la thèse et sur les sujets connexes qui ont été étudiés afin de mener au mieux ce travail de recherche.

Ainsi donc dans la première partie de ce chapitre, les concepts relatifs aux bioénergies, à la biomasse et aux biocarburants oléagineux ont été introduits et définis. La chaîne logistique de façon générale et la chaîne logistique dans les systèmes de production de bioénergies ont été également définies tout en soulignant les particularités de la biomasse et de sa chaîne d'approvisionnement ainsi que des différentes opérations y afférant. Les enjeux de la conception du réseau logistique ont ensuite été présentés et les notions de durabilités, notamment la réutilisation et le recyclage des déchets et sous-produits dans chaîne logistique ont été présentés tout en définissant le concept de chaîne logistique inverse et de chaîne logistique en boucle fermée. Pour clore cette première partie, un état des connaissances sur les systèmes de production de biocarburants oléagineux à base de *Jatropha* et de *Balanites* en Afrique de l'Ouest a été présenté.

Après cette première partie sur la définition des concepts relatifs au sujet de la thèse, les problèmes de conception de réseau logistique ont été abordés. Ces problèmes concernent la conception de la chaîne logistique de façon générale. Les modèles courants ainsi que les approches de résolution des problèmes de conceptions de la chaîne logistique ont ensuite été présentés. Ces problèmes sont entre autres les problèmes de conception générale et de localisation et allocation d'installations. Les travaux existant dans le domaine des bioénergies et ayant abordé ces problèmes de conception de réseau logistique ont été revus selon la nature de la biomasse étudiée et selon la prise en compte des retours dans la chaîne logistique.

Quelques carences dans la littérature concernant la conception de la chaîne d'approvisionnement ont enfin été évoquées avant la conclusion du chapitre par la présentation des contributions des travaux de thèse objet de ce document.

1. Chaîne logistique et chaîne logistique dans les systèmes de production de bioénergies

1.1. Définitions et enjeux

Les bioénergies sont l'ensemble des combustibles produits à partir de biomasse. Un système de production de bioénergie quant à lui peut être défini comme l'ensemble du processus permettant de produire de l'énergie à partir de la biomasse.

1.1.1. La biomasse

La biomasse dans le domaine de l'énergie est la matière organique d'origine animale ou végétale utilisée comme source d'énergie. La biomasse utilisée pour la production de bioénergies peut être terrestre (poussant sur la terre) ou aquatique (algues). D'après (Yue et al., 2014) la biomasse terrestre peut être classée en deux groupes. Le premier groupe comprend les biomasses riches en sucre et en amidon (maïs,

canne à sucre, etc.) qui permettent de produire des bio alcools et les biomasses oléagineuses telles que le soja, le tournesol, le colza, etc. qui donnent du biodiesel ou de l'Huile Végétale Carburant (HVC) après conversion. Le deuxième groupe comprend la biomasse cellulosique qui peut être obtenue à partir de diverses sources, telles que les résidus agricoles et les résidus forestiers et qui servent à produire des bio alcools tels que le bioéthanol. Selon la nature de la biomasse et selon les technologies de conversion, la biomasse peut être utilisée directement en combustion pour produire de l'énergie (combustion) ou être convertis en vecteurs énergétiques liquides (biocarburants tel que le biodiesel et le bioéthanol), solides (charbon) ou gazeux (syngaz, biogaz).

Au sujet de la biomasse oléagineuse, celle-ci est produite par des plantes pouvant être issues de cultures pérennes ou de culture annuelles. Cette biomasse peut aussi provenir de la cueillette sur des plantes et arbres sauvages.

La biomasse oléagineuse issue de cultures pérennes : les cultures pérennes sont l'ensemble des plantes qui peuvent vivre plusieurs années après plantation. C'est le cas du *Jatropha* et du *Moringa*. Ce type de culture présente l'avantage de pouvoir être exploitées sur plusieurs années. Par rapport aux cultures annuelles, elles induisent une réduction du travail de labourage, une diminution de la main-d'œuvre nécessaire à la production des fruits et graines avec pour effet, la réduction des coûts relatifs à la phase de culture de la plante (Pimentel et al., 2012). Ces cultures ont également l'avantage d'être en général résistantes à la sécheresse et moins exigeantes en intrants par rapport aux cultures annuelles (Gurtler, 2008; Pimentel et al., 2012). Leurs inconvénients sont cependant l'occupation des terres pour de longues années ce qui peut engendrer une concurrence avec les autres cultures pour l'utilisation de la ressource foncière. En raison du temps de latence entre la plantation et la récolte (Rohde and Bhalerao, 2007), le retour sur investissement de la plantation peut durer plusieurs années.

La biomasse oléagineuse issue de cultures annuelles : une plante annuelle complète son cycle végétatif en une seule année, sur une durée maximum de 12 mois. Ce type de culture ne mobilise pas la terre pour de longues années comme c'est le cas des cultures pérennes, et s'intègre facilement dans les systèmes de culture existants (Gurtler, 2008). Cependant, le labourage étant annuel, la culture de ce type de plante nécessite par rapport aux plantes pérennes, plus de travail, plus de main-d'œuvre à mobiliser chaque année et plus d'intrants par l'utilisation annuelle d'engrais et fertilisants (Pimentel et al., 2012). Cela entraîne des coûts de production des fruits et graines plus élevés par rapport aux cultures pérennes.

La biomasse oléagineuse issue de la cueillette sur des plantes et arbres sauvages : les plantes et les arbres sauvages peuvent être annuels ou pérennes, mais leur particularité est qu'elles poussent spontanément de façon sauvage sans l'action de l'homme. L'avantage de ce genre de plantes pour la production de biocarburants est qu'aucun investissement n'est nécessaire pour la culture. Les arbres poussent naturellement sans irrigation ni apport d'engrais et sans entretien. De plus, Il n'y a pas de compétition avec les cultures alimentaires pour l'occupation des sols. L'inconvénient de ce type de plante est cependant qu'elles ne sont pas domestiquées. Cela entraîne la variabilité de la productivité des arbres et donc une variabilité des rendements de culture. La collecte des graines peut également être problématique, car les aires d'occurrences de ces plantes sont très vastes et les arbres sont répartis de façon non homogène.

Quel que soit son mode de production, la biomasse oléagineuse produit des biocarburants oléagineux après conversion. Comme mentionné plus haut, ces biocarburants oléagineux sont principalement les huiles végétales carburants (HVC) et le biodiesel.

1.1.2. Les biocarburants oléagineux

Les Huiles Végétales Carburants (HVC) sont obtenues par pressages des biomasses oléagineuses ou par extraction aux solvants chimiques (Chapuis et al., 2013). Elles ont une composition chimique qui correspond généralement à 95 % de triglycérides et à 5 % d'acides gras libres avec des composants minoritaires comme les stérols, les cires, et autres et sont utilisables comme carburant dans les moteurs diesels stationnaires (des moteurs de grande taille utilisés pour la production de force motrice ou d'électricité) (Sidibe et al., 2010). Des adaptations de moteurs diesel classiques et des précautions doivent cependant être observées lors de l'utilisation de ces huiles en raison de leur viscosité plus élevée que celle du diesel, de leur indice de cétane plus bas et de la présence de certaines impuretés qui peuvent entraîner des dysfonctionnements du moteur. Les HVC doivent également respecter certaines normes de qualité pour pouvoir être utilisées comme carburant sans endommager le moteur. D'après (Blin et al., 2013) les propriétés qu'il est crucial de contrôler pour l'utilisation des huiles végétales dans un moteur diesel stationnaire sont sa densité, sa viscosité cinématique, son indice d'iode, sa teneur en phosphore, sa contamination totale, sa teneur en eau, et sa teneur en acides gras libres.

Le biodiesel ou les Esters d'Huile Végétale sont produits par transestérification d'huile végétale en présence d'alcool. Des Esters Éthyliques d'Huile Végétale (EEHV) sont obtenus si l'alcool utilisé est de l'éthanol et des Esters Méthyliques d'Huile Végétale (EMHV) si l'alcool utilisé est du méthanol. Le biodiesel est un carburant ayant des caractéristiques combustibles similaires à celles du gasoil. Il peut être mélangé avec le diesel habituellement utilisé comme carburant ou utilisé tel quel dans des moteurs à allumage par compression (FAO, 2008).

Les HVC et le biodiesel sont appelés biocarburants de « première génération », car ils sont produits à partir d'une partie d'une plante, par opposition aux biocarburants de « deuxième génération » qui eux valorisent toute la plante.

Afin de rendre la biomasse disponible pour la production de biocarburant organisation de l'approvisionnement est nécessaire. Cette organisation de l'approvisionnement est définie ci-dessous.

1.1.3. La chaîne logistique

La chaîne logistique (CL) traditionnelle (que nous désignerons souvent dans la suite du document par chaîne logistique directe) est définie comme un processus de production intégré dans lequel des matières premières sont produites et transformées en produits finis et sont ensuite livrées aux clients (Beamon, 1998). C'est un flux de matière et un reflux d'information entre les différents acteurs travaillant ensemble (fournisseurs, fabricants, distributeurs et détaillants) en vue d'acquérir des matières premières, de convertir ces matières premières en produits finaux spécifiés ayant une valeur ajoutée, de fournir ces produits finaux aux détaillants ou aux clients et de faciliter l'échange d'information entre les différentes entités d'affaires (Min and Zhou, 2002). Cette chaîne logistique possède un réseau qui d'après

(Papageorgiou, 2009) est l'ensemble des installations et des mécanismes de distribution qui remplissent les fonctions d'approvisionnement en matériaux, de transformation de ces matériaux en produits intermédiaires et finis et de distribution de ces produits aux clients.

Partant de la définition de la chaîne logistique donnée par (Beamon, 1998), la chaîne logistique des systèmes de production de bioénergie est donc tout le processus qui permet d'acquérir de la biomasse, de la transformer en vecteurs énergétiques (charbon, biocarburant etc.) et de distribuer l'énergie à ses revendeurs ou à ses consommateurs. Selon You (You et al., 2012; Yue et al., 2014), la CL des systèmes de production de bioénergie peut être divisée en cinq composantes que sont (voir Figure 1) : la production de la biomasse, la logistique d'approvisionnement de cette biomasse, la conversion de la biomasse en vecteur énergétique, la distribution des bioénergies produites, la production d'énergie ou encore l'utilisation finale de ces biocarburants.

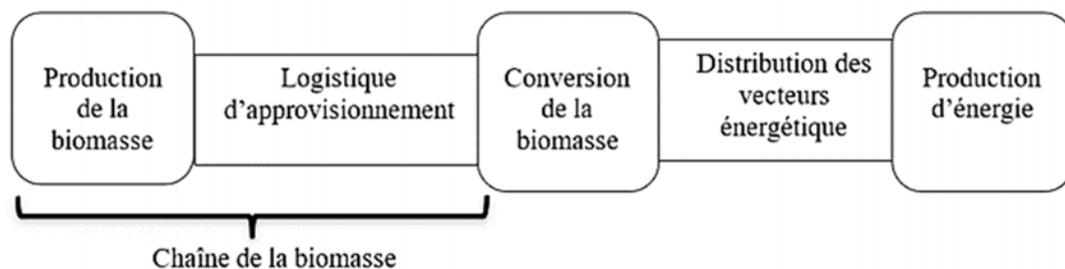


Figure 1 : Composantes de la chaîne logistique des systèmes de production de bioénergie

La chaîne d'approvisionnement de la biomasse est la partie de la CL située en amont de la conversion de la biomasse en bioénergie. Elle concerne tout le processus qui permet d'acquérir de la biomasse (voir Figure 1) qui va de la récolte de la biomasse à l'arrivée de celle-ci à l'unité de conversion de la biomasse en passant par des sites de stockage, et/ou par une unité de prétraitement, tout cela via des modes de transport (B Sharma et al., 2013). Certains auteurs tels que (Rentizelas, 2013) intègrent le processus de production de la biomasse (culture) dans la définition ci-dessus.

Dans le cas de la chaîne d'approvisionnement de la biomasse pour la production de biocarburants, les équivalences suivantes peuvent être établies :

- Matière première = biomasse
- Fournisseurs = producteurs de la biomasse
- Clients = fabricants = unités de production de biocarburants
- Distributeurs ou détaillants = revendeurs de la biomasse
- Produits finis = biocarburants

Cette chaîne possède un caractère unique lié aux caractéristiques de sa matière première qui est la biomasse (Zhu et al., 2011). Ces caractéristiques sont :

- La discontinuité et le caractère saisonnier de la production de la biomasse qui entraînent la variabilité annuelle de l'approvisionnement en biomasse. En effet la majorité des biomasses sont

issues de plantes ayant des cycles de croissance particuliers et qui nécessitent d'être plantées, cultivées, récoltées (Mafakheri and Nasiri, 2014; Yue et al., 2014) ;

- La faible densité énergétique et densité de matière sèche de la biomasse qui induit l'utilisation de grandes quantités de biomasses pour la production de biocarburant et qui influence les coûts du transport (Eksioglu et al., 2009; Rentizelas et al., 2009). Cette caractéristique de la biomasse induit également la nécessité de son prétraitement avant son stockage ou sa conversion ;
- La dispersion spatiale des sites de production de la biomasse ;
- L'organisation des acteurs qui interviennent dans l'approvisionnement de la biomasse (la volonté des producteurs à cultiver la biomasse, la fiabilité, la volonté et la coordination des fournisseurs, etc.) (Gold and Seuring, 2011; B Sharma et al., 2013).

Ces particularités de la biomasse contribuent à rendre complexes et difficiles les opérations de la chaîne logistique. Elles impliquent également que pour pouvoir fournir aux unités de transformation dans des délais de temps appropriés, une biomasse de qualité, en quantité suffisante, et à coûts acceptables, la chaîne d'approvisionnement doit être conçue en prenant en compte les caractéristiques spécifiques de la biomasse.

1.2. Conception du réseau logistique

La conception du réseau de chaîne logistique traditionnel a été définie par (Harris, 2011) comme le processus de détermination de l'infrastructure de la chaîne logistique qui sera utilisée pour satisfaire la demande des clients. Cette conception de la chaîne logistique implique un ensemble de décisions stratégiques et souvent tactiques. Effectivement, dans la gestion et la planification de la chaîne logistique, le niveau stratégique conçoit le réseau logistique en déterminant le nombre, l'emplacement et l'affectation des différents sites et des installations de production, les technologies de production qui seront employées, et la capacité ou taille des installations. Ce niveau concerne les décisions de gestion et de planification à long horizon de temps. Le niveau tactique prescrit les politiques de gestion des flux de marchandises, y compris les niveaux de production dans toutes les usines, les niveaux de stocks, les modes de transport, etc. Les opérations qui nécessitent une planification horaire ou journalière sont traitées par le niveau opérationnel.

La structure du réseau logistique constitue selon (Ivanov, 2010) la base de tous les autres niveaux de décisions et influencent à cet effet, les décisions tactiques et opérationnelles. La structure de la chaîne d'approvisionnement de la biomasse peut varier en fonction des caractéristiques de la biomasse, de ses technologies de conversion et des options de conception du système d'approvisionnement (Rentizelas, 2013). Mais ses principales opérations sont : la récolte, le stockage, la collecte et le transport et le prétraitement (Gold and Seuring, 2011; Rentizelas, 2013; B Sharma et al., 2013).

1.2.1. La récolte de la biomasse

La récolte de la biomasse oléagineuse est une opération de la chaîne d'approvisionnement de la biomasse. Elle est influencée par les méthodes de récolte qui peuvent être manuelles ou motorisées, la

fréquence de récolte, le rayon de collecte (distance parcourue pour la récolte) (Kumar and Singh, 2017). La prise de décision pour cette opération concerne principalement la répartition des sites de récolte et la planification de la récolte en se basant sur les données agronomiques relatives aux plantes étudiées, sur la disponibilité des terres et sur la demande en biomasse (Mafakheri and Nasiri, 2014).

1.2.2. Le stockage de la biomasse

Le stockage permet d'assurer un approvisionnement régulier de l'unité de production de bioénergies en raison de la discontinuité et du caractère saisonnier de la production de la biomasse (Rentizelas, 2013; Yue et al., 2014). La disponibilité de la biomasse est en effet déterminée par la période de récolte, car la majorité des biomasses sont issues de plantes ayant des cycles de croissance particuliers et qui nécessitent d'être plantées, cultivées, récoltées à des moments précis de l'année (Mafakheri and Nasiri, 2014; Yue et al., 2014). La production de la biomasse n'étant pas continue toute l'année, il est nécessaire de stocker de grandes quantités de biomasses pour des durées de temps significatives. Le stockage nécessite d'être bien dimensionné (capacité, durée, conditions de stockage) afin de permettre la planification et la gestion du fonctionnement de l'unité de transformation de la biomasse.

Les conditions de stockage de la biomasse doivent être bien définies afin de réduire les coûts de stockage et d'éviter une perte de matière et la dégradation des propriétés de celle-ci (You et al., 2012). Ces conditions de stockage doivent permettre aussi de contrôler le taux d'humidité des graines. Ces conditions de stockage affectent ultérieurement la qualité des huiles végétales extraites des graines oléagineuses.

Les modes de stockage qui existent sont le stockage à l'air libre, le stockage couvert, et le stockage sous atmosphère contrôlée (Rentizelas et al., 2009). Ces trois modes de stockage peuvent être réalisés sur le site de production de la biomasse, sur un site intermédiaire ou à l'unité de production de biocarburants.

Le stockage doit être organisé de sorte à réduire les coûts sans pour autant altérer la qualité de la biomasse. Les choix à faire se portent donc sur :

- La localisation du stockage ;
- La détermination des conditions de stockage qui dépendent des caractéristiques de la biomasse et des durées de stockage nécessaires ;
- La capacité de stockage et la durée de stockage qui dépendent du fonctionnement de l'unité de production de la biomasse.

1.2.3. Le transport de la biomasse

Le transport de la biomasse est nécessaire afin d'acheminer celle-ci vers son site de demande. La maîtrise du transport est importante en ce sens que les coûts du transport peuvent représenter jusqu'à 50% du coût total d'approvisionnement de la biomasse (Sultana and Kumar, 2011). C'est le cas de l'approvisionnement de la biomasse cellulosique pour la production d'éthanol rapporté par (Fan et al., 2013). Ce coût est influencé par différents facteurs qui sont :

- *La localisation géographique et la répartition spatiale* des différents sites (champs, site de stockage, site de prétraitement, site de production de biocarburants) qui déterminent la distance à parcourir (McKendry, 2002) ;
- *Les caractéristiques de la biomasse* qui sont la densité sèche et énergétique (Dyken et al., 2010; McKendry, 2002; Searcy et al., 2007) ;
- *Les modes de transports utilisés* : transport par train, transport routier motorisé ou non (charrette, tricycle, camion, etc.). Ces moyens de transport sont caractérisés par leur capacité de charge en termes de volume et de poids, leur vitesse de déplacement, leur consommation moyenne de carburant, le coût de maintenance et leur disponibilité. (McKendry, 2002; Searcy et al., 2007; Suurs, 2002).
- *La capacité de charge des moyens de transport et la densité sèche et énergétique* de la biomasse conditionnent le nombre d'aller et retour à effectuer et donc la distance totale à parcourir.
- *La manutention* : la biomasse doit être chargée sur l'engin de transport pour son acheminement vers le site de demande. La biomasse doit ensuite être déchargée une fois arrivée à destination (Rentizelas, 2013). Cette étape de chargement et déchargement des moyens de transport qui peut être exécutée par des hommes ou par un équipement spécialisé engendre également des coûts.

1.2.4. Les prétraitements de la biomasse

Les prétraitements de la biomasse sont des opérations post-récolte. Ces opérations peuvent avoir pour objectifs de réduire les quantités de matière à transporter en termes de volume et de poids, d'empêcher l'altération de la qualité de la biomasse durant le transport et le stockage, de faciliter la conversion de la biomasse en vecteur énergie et améliorer les rendements de conversion (Kumar and Singh, 2017; Wyman et al., 2005). Les opérations de prétraitement peuvent être mécaniques, motorisées ou manuelles. Elles varient en fonction de la biomasse à traiter. Ainsi, les opérations de prétraitements sont entre autres le séchage, le hachage, le déchiquetage, le broyage et la densification, pour la biomasse lignocellulosique (Gold and Seuring, 2011; Uslu et al., 2008) et le décorticage, le dépulpage et le broyage pour la biomasse oléagineuse issue de plantes. Les opérations de prétraitement varient également en fonction des produits finaux désirés et de la technologie qui sera utilisée plus tard pour la conversion de cette biomasse en bioénergie.

Le séchage peut se faire à l'air ambiant au soleil ou à l'ombre ou alors en étuve. Un processus de tri peut être réalisé afin de réduire les impuretés (feuilles, pierres, objet métallique) qui d'après (J Blin et al., 2014) ne doivent pas dépasser 2% en poids de la biomasse totale pour les biomasses oléagineuses.

Les techniques à employer pour chaque opération influencent la qualité des biomasses prétraitées et influencent également le temps de travail du prétraitement.

En raison des caractéristiques propres à la biomasse visible dans la description des opérations relatives à son approvisionnement, l'un des principaux enjeux de la chaîne d'approvisionnement de la biomasse est de garantir la continuité de l'approvisionnement en matière première tout en rendant les coûts de cette matière première concurrentiels (Gold and Seuring, 2011). Un autre enjeu, d'après les

mêmes auteurs (Gold and Seuring, 2011) et de nombreux autres (Chardine-Baumann and Botta-Genoulaz, 2014; Katiyar et al., 2018; Sawadogo and Anciaux, 2011) est la nécessité d'assurer (à travers la prise en compte de la durabilité), que les opérations de la chaîne logistique n'introduisent pas d'impacts négatifs sur l'écosystème et la société humaine. En effet, le développement durable est un développement permettant de répondre aux besoins actuels de l'humanité, sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins (*Our common future*, 1987). Il sous-entend donc l'utilisation rationnelle des ressources naturelles, la protection de l'environnement, la prospérité économique et la qualité de vie des humains. De plus, la durabilité est de nos jours considérée comme un ingrédient clé pouvant donner un avantage concurrentiel aux entreprises qui la prennent en considération dans leurs activités (Chardine-Baumann and Botta-Genoulaz, 2014). C'est pourquoi en plus des aspects économiques tels que la minimisation des coûts et maximisation du profit, des concepts environnementaux comme la réduction, la réutilisation et le recyclage des déchets ont été introduits dans la gestion de la chaîne logistique à travers des notions comme celle de la chaîne logistique inverse.

1.3. Chaîne logistique inverse : valorisation des déchets et sous-produits

La chaîne logistique inverse référence à tout le processus qui gère les flux de matière provenant des points de consommation (clients) en direction des points d'origine de la matière consommée (fabricants) (Rogers and Tibben-Lembke, 1999).

La logistique inverse de la biomasse peut donc être définie comme étant le processus qui gère les flux provenant des points de consommation de la biomasse en direction des points de production de cette biomasse (voir Figure 2). Ces flux inverses concernent, la biomasse (déchets et sous-produits) générée par le prétraitement et/ou par la conversion de la biomasse en vecteur énergétiques.

Selon Rezapour et al. (Rezapour et al., 2015) les activités relatives à la gestion des flux inverses permettent de distinguer trois catégories y afférant, à savoir :

- La chaîne logistique inverse qui se concentrent uniquement sur le flux inverse sans tenir compte des flux directs ;
- La chaîne logistique en boucle ouverte dans laquelle les produits du flux direct quittent la chaîne et les opérations de gestion des flux inverses sont gérées par des tiers et ;
- La chaîne logistique en boucle fermée qui est la combinaison des activités de gestion des flux directs et inverses dans une même chaîne d'approvisionnement.

Selon Guide et Van Wassenhove (Guide and Van Wassenhove, 2009), les chaînes logistiques en boucle fermée s'intéressent à la récupération des produits auprès des clients et à l'amélioration de la valeur ajoutée de ces produits par leur réutilisation totale ou partielle. Elle inclut aussi les actions de gestion, de réduction, de traitement et d'élimination des produits considérés comme déchets. C'est la raison pour laquelle la logistique inverse est considérée comme un élément entrant dans la définition de la chaîne logistique verte (Jayaram and Avittathur, 2015; Sawadogo, 2011).

Concernant la chaîne logistique inverse de la biomasse, elle possède également un caractère unique à cause de sa matière première qui est toujours de la biomasse. Logistique directe et inverse de la biomasse

possèdent aussi des opérations communes que sont la collecte, le transport et le stockage. À ces opérations communes s'ajoutent une opération propre à la chaîne logistique inverse qui est le traitement additionnel que peut subir la biomasse sujette aux flux inverses afin d'accroître sa valeur ajoutée avant sa valorisation.

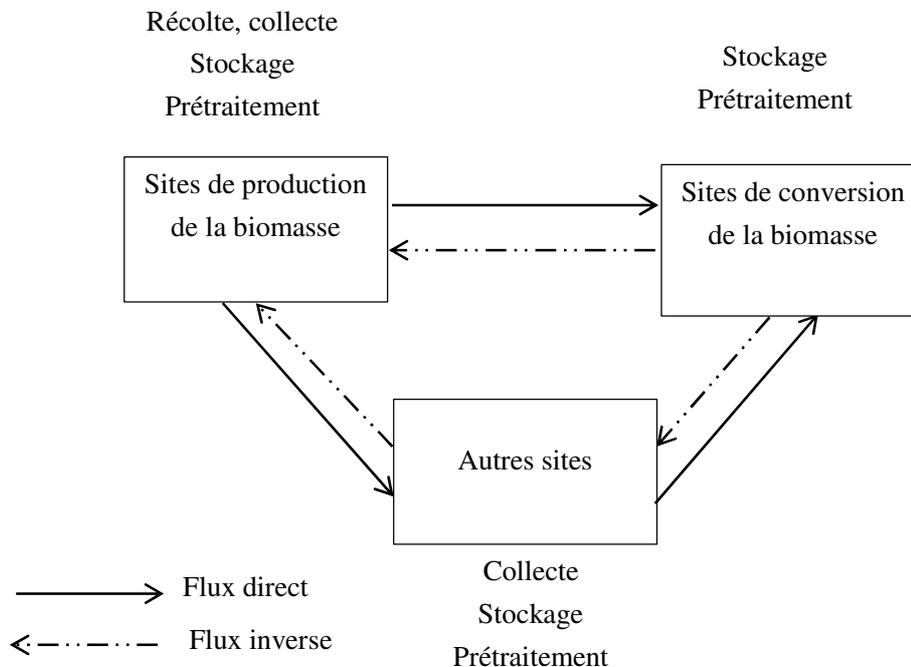


Figure 2 : Flux de matières dans la chaîne logistique en boucle fermée d'un système exploitant la biomasse

Selon la nature des sous-produits, ceux-ci peuvent être réutilisés selon les principales voies de valorisations décrites ci-dessous :

- La valorisation en alimentation animale qui consiste à réutiliser les sous-produits comme matières premières pour la production d'aliments destinés aux animaux de rente.
- La valorisation agronomique qui consiste en un épandage direct ou au compostage des sous-produits. Ceux-ci peuvent aussi servir à la fabrication d'engrais et d'amendements organiques.
- La valorisation énergétique qui consiste au traitement et à la réutilisation des sous-produits possédant un pouvoir calorifique lui permettant de subir une combustion.
- L'extraction de composés d'intérêt qui consiste à séparer les molécules intéressantes présentes dans la biomasse selon diverses techniques par exemple en employant des solvants qui présentent une affinité particulière avec le composé que l'on souhaite extraire.

En plus des problèmes liés à la conception de la chaîne logistique traditionnelle, la chaîne logistique en boucle fermée doit prendre en compte les interactions entre flux directs et inverses et le traitement éventuel des sous-produits avant leur réutilisation (Zerhouni, 2009). Ces interactions concernent l'utilisation des mêmes infrastructures de traitement de la biomasse et des sous-produits à savoir les

centres de collecte, stockage et les moyens de transport. Lorsque les retours de matières doivent être considérés dans la chaîne logistique, la conception la chaîne logistique en boucle fermée vise à transformer la chaîne d'approvisionnement en un système permettant la gestion des flux directs et inverses de façon coordonnée (Akçali et al., 2009). En plus des avantages liés à une bonne conception de la chaîne logistique directe, la bonne conception de la chaîne logistique en boucle fermée permet donc de maximiser la création de valeur sur l'ensemble du cycle de vie du produit considéré dans la chaîne d'approvisionnement (Govindan et al., 2015).

Au vue de tous ces enjeux liés à la bonne gestion de chaîne logistique, la nécessité de développer des modèles de planification au niveau stratégique et tactique afin de résoudre les problèmes relatifs à l'approvisionnement de la matière première a été soulignée par (Shapiro, 2004). Mais avant d'aborder ces modèles de résolution des problèmes d'approvisionnement de la matière première, voyons un cas particulier de chaînes d'approvisionnement en biomasse dans le contexte ouest-africain.

1.4. Cas particulier de l'approvisionnement en biomasse des filières de production de biocarburants oléagineux à base de *Jatropha* et de *Balanites* en Afrique de l'Ouest

Jatropha Curcas Linn est un arbre ou arbuste de la famille des Euphorbiacées dont la taille peut atteindre 10m dépendant des conditions de croissance. L'arbre donne des fruits de couleur jaune qui devient marron foncé en séchant. Les fruits secs sont composés d'une capsule et de graines (entre 1 et 3 graines) riches en huile qui représentent respectivement environ 35 à 40% et 60 à 65% du poids total du fruit sec (Pandey et al., 2012). Les graines pèsent entre 0,5 et 0,8 gramme et ne sont pas comestibles. Elles sont recouvertes d'une coque et contiennent une amande blanche représentant respectivement environ 40 à 42% et 58 à 60% du poids total de la graine (Pandey et al., 2012). Les graines sèches contiennent entre 32% et 40% d'huile (Jongh and Van der Putten, 2010). La Figure 3 ci-dessous présente la composition du fruit du *Jatropha*.

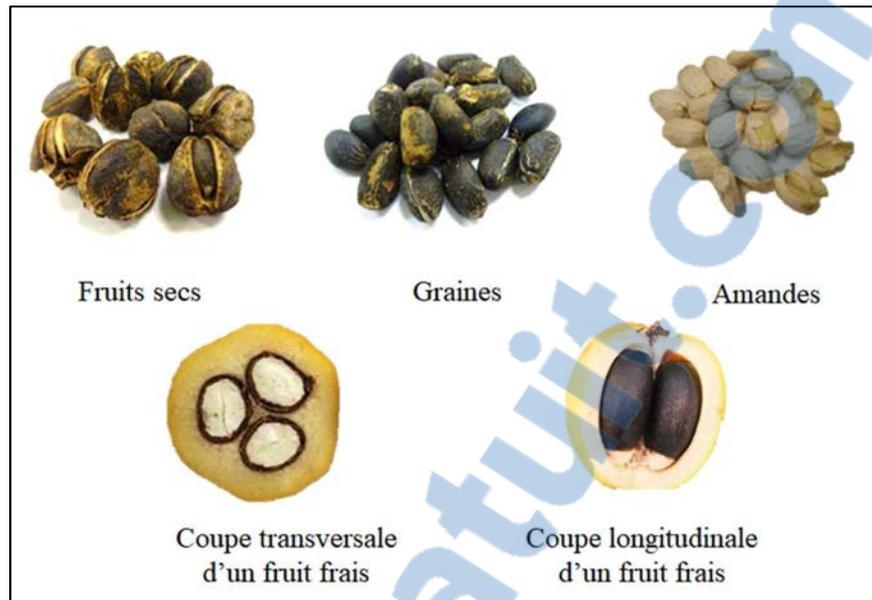


Figure 3 : Composition du fruit du *Jatropha Curcas*

Balanites aegyptiaca (L.) Delile aussi appelé dattier du désert est un arbre épineux de la famille des Zygophyllacées. C'est une plante ligneuse, pérenne dont la taille de l'arbre peut atteindre 12m en fonction de la variété et des conditions de croissance. Cet arbre à feuilles persistantes est très résistant à la sécheresse et pousse sous diverses conditions écologiques (100 mm à 1000 mm de pluie par an) (Ndoye et al., 2004) ; il est particulièrement abondant dans les régions arides et semi arides, principalement dans les régions subsaharienne et sahélienne telles que la région soudano-sahélienne de l'Afrique, le Moyen-Orient, et l'Asie du Sud (Chapagain and Wiesman, 2005). Elle fait partie des espèces dominantes des zones sahéliennes d'après (Boffa, 2000). En Afrique de l'Ouest, le *Balanites* est une plante sauvage qui pousse spontanément sans l'action des hommes. Le fruit du *Balanites aegyptiaca* est une drupe ellipsoïdale pouvant atteindre 4 cm de longueur, de couleur verte puis devenant jaune à maturité, voir brun jaunâtre une fois desséchée. Chaque fruit a un poids d'environ 5 à 8 g et se compose d'un épicarpe (5-9%), d'un mésocarpe ou pulpe comestible (28-33%), d'un endocarpe ayant une nature lignocellulosique (49-54%) qui entoure une amande riche en huile comestible (8- 12%) (Chapagain and Wiesman, 2005; Chapagain, 2006; Okia et al., 2013). L'amande contient entre 46% et 55% de son poids en huile végétale (Varshney and Anis, 2014). La Figure 4 ci-dessous présente la composition du fruit du *Balanites*.



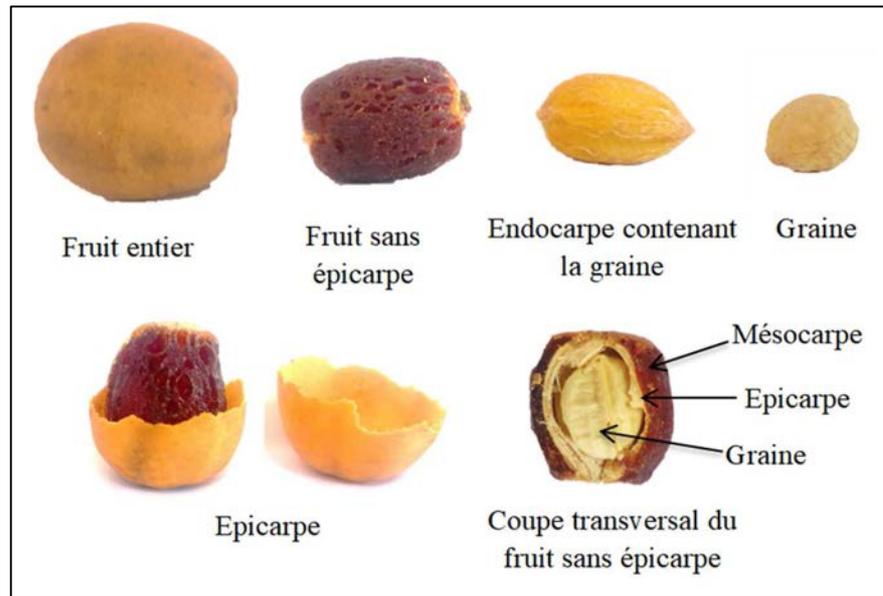


Figure 4 : Composition du fruit du *Balanites aegyptiaca*

1.4.1. Structuration du réseau d'approvisionnement en biomasse

En Afrique de l'Ouest et plus particulièrement au Burkina Faso et au Mali, le constat est qu'il n'existe pas de structure optimisée du réseau d'approvisionnement en biomasse pour la production de biocarburant. Il existe également peu d'études sur le réseau d'approvisionnement en biomasse pour la production de biocarburant dans ces deux pays.

De façon générale, les pratiques courantes observées sur le terrain sont que le réseau d'approvisionnement est composé des sites de production des fruits, des points de collecte et d'unité d'extraction de l'huile qui sont de petite taille et ont des demandes en graines inférieures à 300 tonnes de graines par an (Konaté et al., 2017; Vinay and Vermeulen, 2013). Ces différents sites sont reliés par un réseau de routes le plus souvent en terre. Après la récolte de la biomasse, les acteurs de la récolte transportent la biomasse chez des collecteurs qui ont en général un contrat avec l'unité d'extraction de l'huile et qui sont les seuls habilités à effectuer l'approvisionnement en fruits. Un premier transport de la biomasse a lieu entre les sites de production de la biomasse et les sites de collecte et est assuré par les acteurs de la récolte. Les moyens de transport utilisés sont divers en fonction de la quantité de biomasses collectée. Ces moyens sont les bicyclettes, les charrettes à traction humaine et à traction animale. Le deuxième transport s'effectue entre les sites de collecte et l'unité d'extraction de l'huile et est assuré par les collecteurs. Les moyens de transport sont les camions, les tricycles motorisés, et les charrettes à traction animale selon les distances à parcourir. Concernant le stockage, le plus long a lieu à l'unité d'extraction de l'huile avec des durées de stockage pouvant être supérieures à 12 mois. Les autres stockages sont de courtes durées et sont difficilement quantifiables. Chez les collecteurs, les fruits et graines sont stockés dans des sacs en polypropylène tissés. Ce stockage se fait généralement à l'air libre à ce niveau. Parfois, les graines et fruits peuvent aussi être stockés à l'air libre sans être mis dans les sacs. Ces fruits et graines sont ensuite mis en sac quand vient le moment de les acheminer à l'huilerie. À l'unité

d'extraction de l'huile, les sacs contenant la biomasse sont stockés dans un entrepôt généralement couvert et fermé.

De façon spécifique au *Jatropha* et au *Balanites*, les différentes opérations de la chaîne d'approvisionnement en biomasse observée sont décrites dans la section suivante.

1.4.2. La production des fruits du *Jatropha* et du *Balanites*

1.4.2.1. La culture de la biomasse : environnement et gestion de la culture

Ce paragraphe concerne uniquement le *Jatropha* qui est une plante cultivée à la différence du *Balanites* qui est une plante sauvage.

L'environnement de la culture désigne les conditions pédoclimatiques du milieu où la culture est pratiquée. La gestion de la culture concerne les pratiques culturales ou itinéraires techniques de culture.

Au sujet de l'environnement de culture du *Jatropha*, les sites de culture doivent être choisis en fonction des conditions pédoclimatiques favorables à la croissance de la plante. Les pluviométries de 300mm/an assurent à la plante son besoin minimal en eau et assure sa survie tandis que les pluviométries d'au moins 500mm/an sont nécessaires pour la production de graines. À partir de 500mm/an, la productivité augmente jusqu'au seuil de 1500mm/an et d'après (Achten et al., 2008) jusqu'à 3000mm/an. Le *Jatropha* a la capacité de survivre sur des sols considérés comme marginaux pour l'agriculture c'est-à-dire des sols peu fertiles, ayant une faible teneur en éléments nutritifs, secs, impropres à l'agriculture. Cependant, sa capacité de survie sur ce type de sol n'implique pas la production de fruit, car la croissance et la productivité sont limitées sous ces conditions.

À propos des pratiques culturales, celles-ci regroupent l'ensemble des opérations de choix des semences, de préparation du sol, de multiplication de la plante, d'exploitation de la parcelle, de nutrition de la plante, et d'entretien de la parcelle de culture. Il n'existe pas encore d'itinéraires techniques de référence pour la culture du *Jatropha*. En agriculture familiale au Burkina Faso et au Mali, les opérateurs accompagnent les exploitations agricoles en termes de conseil technique. C'est ainsi que trois principaux modes d'exploitation des parcelles sont rencontrés en ce qui concerne la culture de la plante (Pallièrre and Fauveaud, 2009). Ce sont : les plantations de *Jatropha* en haies vives, les plantations de *Jatropha* en plein champ en cultures associées en ligne ou en couloir et, les plantations de *Jatropha* en plein champ en culture pure. Le système d'association du *Jatropha* avec les cultures vivrières annuelles permet aux agriculteurs d'exploiter le même terrain pour la production alimentaire et énergétique. Les cultures associées les plus rencontrées au Burkina Faso sont les céréales, le coton et les légumineuses (Adecia-FFEM, 2015).

1.4.2.2. La productivité et les rendements en fruits et en graines

Les rendements de culture représentent la productivité en fruits (frais ou secs), ou la productivité en graines (fraîches ou sèches), par unité de surface (généralement par hectare) d'une plantation. Il est important de noter la différence entre le rendement à l'hectare réellement mesuré après la récolte et le rendement calculé à partir d'une extrapolation sur la productivité d'un arbre isolé ou d'une haie. Les

rendements réels qui concernent les graines effectivement récoltées sont généralement inférieurs aux rendements calculés, car une partie des graines produites n'est pas récoltée.

Concernant le Jatropha, les données sur les rendements de culture sont très hétérogènes dans la littérature (Lama et al., 2017) (voir Tableau 1 ci-dessous). En effet, la productivité en graines du Jatropha est fonction du génotype, de l'environnement, et de la gestion de la culture ou pratique culturale, et de l'âge des plants (Minengu et al., 2013; Tjeuw et al., 2015). La description de ces éléments est souvent manquante lorsque les rendements de culture en Jatropha sont mentionnés dans certaines études. De plus, souvent il n'est pas mentionné si les rendements de culture concernent la productivité en fruits frais, la productivité en fruits secs, la productivité en graines fraîches, ou la productivité en graines sèches.

Tableau 1: Rendements du Jatropha dans quelques pays d'Afrique

Rendements (kg/ha de graines sèches)	Âge des plantations (année)	Pluviométrie (mm/an)	Pays/Référence bibliographique
500	3	800	Mali (De Jong and Nielsen, 2011)
250	5	500-1110	Burkina Faso (Adecia-FFEM, 2015)
500	5	180-300	Sénégal (Barbier et al., 2012)
214	3	750	Mozambique/ (De Jong and Nielsen, 2011)
500	3	950	Zambie/ (Trabucco et al., 2010)
348,8	4	630	Afrique du Sud/ (C. S. Everson et al., 2013)
300 - 700	4 - 7	900 - 1200	Burkina Faso (Bazongo et al., 2016)

Concernant le Balanites, les données relatives à sa productivité sont très hétérogènes dans la littérature (voir Tableau 2).

Tableau 2 : Productivité individuelle par pied de Balanites

Productivité moyenne d'un arbre de Balanites (kg/an)	Pays	Source
52	Israël	(Chapagain et al., 2009)
125	Ouganda	(Okia, 2010)
190	Burkina Faso	(John B. Hall, 1992)

1.4.3. La récolte des fruits du *Jatropha* et du *Balanites*

La production de fruits du *Jatropha* est étalée dans le temps et est influencée par la saisonnalité de la pluviométrie. Au Burkina Faso et au Mali, il y a deux périodes de maturité des fruits. La première période de maturation a lieu aux mois d'août et septembre et la deuxième aux mois d'octobre et novembre (Vinay and Vermeulen, 2013). Un arbre peut porter alors à la même période des fleurs, mais aussi des fruits à différents stades de maturité. Mûres, les graines sont plus faciles à décortiquer. Une fois la maturité optimale dépassée, la capsule du fruit adhère aux graines ce qui rend le décortiquage plus difficile, et les graines commencent à être attaquées par des champignons (Domergue and Pirot, 2008; Mergeai et al., 2014).

Du fait de l'étalement de la production des fruits dans le temps, les fruits ne mûrissent pas ensemble, ce qui rend nécessaires une fréquence de cueillette élevée et une main-d'œuvre nombreuse pour réaliser des passages réguliers dans les plantations. Cette maturité échelonnée représente aussi un frein aux méthodes de récoltes mécaniques et explique que toutes les opérations de récolte des fruits se font manuellement (Domergue and Pirot, 2008). Cette récolte manuelle s'effectue soit par cueillette directe des fruits sur l'arbre soit en provoquant leur chute en secouant les branches avec un bâton lorsque l'arbre est très haut. En raison de la maturité échelonnée des fruits, ce sont généralement des fruits totalement desséchés et de couleur noire qui sont récoltés. Or à ce stade de maturation, le décortiquage manuel des fruits est une opération fastidieuse (Domergue and Pirot, 2008).

Les données de quantité de fruit ou de graines récoltés par unité de temps et par homme dans la littérature sont hétérogènes. Le Tableau 3 présente quelques valeurs de temps de récolte référencées dans la littérature. Elles dépendent de nombreux facteurs qui sont : la hauteur et le port de l'arbre, la méthode de ramassage, la densité de plantation et également productivité individuelle de l'arbre (Domergue and Pirot, 2008; Mergeai et al., 2014). En milieu paysan, il y a toujours une partie des graines produites qui est perdue, car elles tombent à terre et germent entre deux passages des personnes qui effectuent la récolte. La quantité réelle de graines récoltées dépend ainsi de la fréquence des récoltes. En milieu paysan, la fréquence de récolte dépend des habitudes de récolte des producteurs (implication des femmes, disponibilité de la main-d'œuvre, priorités entre les différentes activités ...).

Tableau 3 : Quantité de fruit et de graines de *Jatropha* récoltée par unité de temps et par homme dans la littérature

Entité récoltée	Quantité récoltée par homme	Références
Graines sèches	40 kg/jour	(Mergeai et al., 2014)
Graines sèches	20-30 kg/jours	(Jongh and Van der Putten, 2010)
Graines sèches	2 kg/heure	(Henning et al., 1996)
Graines sèches	2,3 kg/heure	(Allard, 2010)

Concernant le *Balanites*, ce sont les fruits et les noyaux qui sont récoltés. Dans les régions sahéliennes d'Afrique de l'Ouest, les fruits mûrissent pendant la saison sèche. La fructification a lieu entre octobre et janvier (Sénégal) d'après (Ndoye et al., 2004) et entre décembre et février d'après (Okia et al., 2011).

D'après (Guinko and Pasgo, 1992) dont l'étude est effectuée au Burkina Faso, la période de récolte des fruits se situe entre avril et mai. Les fruits sont ramassés sous les arbres parents après leur chute. Les noyaux sont ramassés sous les arbres parents, autour des lieux où les fruits ont été consommés et dans les lieux de repos des animaux. Le bétail (chèvres, moutons, bovins) consomme en effet les fruits du Balanites et recrache les noyaux après avoir décapé l'épicarpe et le mésocarpe. La récolte est manuelle et les fruits et noyaux sont recueillis dans des récipients (bassines, paniers, sacs) (Füllemann, 2015). Lorsque le ramassage des fruits tombés sous les arbres ne se fait pas de façon régulière, les fruits peuvent être soumis à des attaques d'insectes ce qui peut dégrader la qualité du fruit dans le cas où une valorisation de la pulpe en aliment est envisagée. De plus, il en résulte plus de travail pour le tri des fruits puisque, dans la plupart des cas, les fruits frais récemment tombés et les anciens fruits sont ramassés ensemble. La fréquence de récolte est alors un facteur déterminant.

1.4.4. Les prétraitements des fruits du Jatropha et du Balanites

Les fruits du Jatropha et du Balanites sont prétraités afin d'obtenir les graines ou amandes pour l'extraction de l'HVC.

Le prétraitement du Jatropha concerne le dépulpage (lorsque le fruit est frais), le décapsulage lorsque le fruit est sec, le séchage et le décorticage des graines. Le dépulpage et le décapsulage consistent à enlever l'épicarpe et le mésocarpe du fruit. Il peut être mécanique ou manuel. Le décorticage de la graine est opération facultative, car il existe des presses capables de triturer la graine tout entière. Les prétraitements manuels du Jatropha sont exigeants en temps et en main-d'œuvre (Lim et al., 2015). C'est la raison pour laquelle des travaux de recherche ont été menés afin d'améliorer la technologie de prétraitement du Jatropha. En Afrique de l'Ouest, plusieurs dépulpeuses/décapsuleuses ont ainsi pu être testées dans le cadre du Programme d'Appui au Développement et à la Structuration de la Filière Paysanne Jatropha/Biocarburant en Afrique de l'Ouest (Sarr, 2015).

Le prétraitement du Balanites consiste au dépulpage, décorticage des fruits et au séchage des amandes. Le dépulpage consiste à enlever l'épicarpe et le mésocarpe ou pulpe. Il peut être mécanique ou manuel. Lors du dépulpage manuel, les fruits sont macérés dans de l'eau. Ils sont ensuite lavés par frottement pour débarrasser le noyau de la pulpe et de l'épicarpe. Qu'il soit manuel ou mécanique, le dépulpage est une opération consommatrice d'eau (Füllemann, 2015). Après l'étape du dépulpage vient le séchage. Les noyaux sont séchés au soleil pendant deux à trois jours. Une fois le noyau obtenu, il est concassé pour le débarrasser de l'endocarpe. Ce concassage peut être mécanique ou manuel. Le décorticage dans le cas du Balanites peut être une opération facultative, car il existe des presses qui sont capables de triturer le noyau tout entier. Le décorticage manuel consiste à casser le noyau avec une pierre sur une autre pierre ou un métal. La position verticale du noyau favoriserait la cassure de l'endocarpe (E. Mamman et al., 2005). Comme dans le cas du Jatropha, les prétraitements manuels du Balanites sont exigeants en temps et en main-d'œuvre (E. Mamman et al., 2005). Il y a cependant peu de recherches pour l'amélioration de la technologie de prétraitement du Balanites.

1.4.5. Déchets, sous-produits et voix de valorisation

Le prétraitement du Jatropha génère des capsules qui lorsqu'elles ne sont pas valorisées constituent un déchet. Il en est de même pour la pulpe et la coque du Balanites obtenue après dépulpage et décorticage des fruits. Le tourteau, obtenu après extraction de l'HVC lorsqu'il n'est pas valorisé constitue également un déchet. Tous ces sous-produits en plus d'occuper de l'espace peuvent contribuer à la pollution de l'environnement notamment par les émissions de gaz à effet de serre (GES) comme le méthane issu de leur fermentation.

Les capsules de Jatropha peuvent pourtant servir de matière première pour la production de biogaz, de syngas et de biocombustibles respectivement par digestion anaérobie, par gazéification et par densification (Navarro-Pineda et al., 2016). (Singh et al., 2008) qui ont travaillé sur l'utilisation de toutes les parties du fruit du Jatropha pour la production d'énergie ont montré également que la densification des capsules de Jatropha permet d'obtenir un biocombustible pour des usages domestiques et industriels. Le tourteau de Jatropha qui contrairement au tourteau du Balanites contient des esters de phorbols toxiques (Rakshit et al., 2008), empêchant sa valorisation dans l'alimentation des animaux, pourrait être utilisé comme engrais organique ou d'amendement. Des études sur le potentiel agronomique du tourteau de Jatropha en tant que fertilisant et amendement menés au Burkina Faso (Sanon et al., 2015; Traore et al., 2015, 2012) ont en effet montré que l'utilisation du tourteau de Jatropha (bruts, composté ou méthanisés) entraînait une augmentation significative des rendements des cultures sur lesquels il a été appliqué. Ces améliorations seraient dues à la teneur en NPK (Azote, Phosphore, Potassium) du tourteau et à sa teneur en matière organique qui entraînerait une amélioration des propriétés du sol (Traore et al., 2015). Le tourteau de Jatropha déshuilé est en effet riche en nutriments NPK dans les portions de 4,4 à 6,5% d'azote, 1,4 à 3% de phosphore et 0,9 à 1,7% de potassium (Achten et al., 2008; Kumar and Sharma, 2008).

Les coques de Balanites sont un bon combustible et peuvent servir à la production de charbon (Council, 2008) en raison de leur nature lignocellulosique (Bambara, 2014) et de leur bon pouvoir calorifique qui est de 18 MJ/kg (Deshmukh et al., 2008). À l'image des tourteaux d'oléagineux tels que le coton, le colza ou le tournesol qui sont valorisés en aliment pour animaux de rente, le tourteau de Balanites possède des valeurs nutritionnelles qui en font un potentiel aliment pour animaux de rente (ONUDI, 1984; Tiétiambou et al., 2015). En effet des recherches sur le tourteau de Balanites ont révélé de bonnes propriétés alimentaires de celui-ci notamment sa haute teneur en protéine (Lohlum et al., 2012; Tayeau et al., 1955) et sa non-toxicité (Obidah et al., 2009).

De tout ce qui a été abordé dans ce paragraphe 1 ci-dessus sur la chaîne logistique de la biomasse, il ressort qu'il n'existe pratiquement pas d'étude sur l'approvisionnement en biomasse en Afrique de l'Ouest et que la structuration de l'approvisionnement observée n'est pas optimisée. Il ressort de cela également qu'il existe de nombreux enjeux liés à la bonne gestion de chaîne logistique et qu'il est indispensable que celle-ci soit bien configurée. C'est la raison pour laquelle les problèmes de conception de la chaîne logistique ainsi que des approches de résolution de ces problèmes ont été abordés dans le paragraphe suivant.

2. Optimisation des chaînes d'approvisionnement en biomasse dans les systèmes de production de bioénergies

Comme vu au paragraphe 1.2 ci-dessus, la conception de la chaîne d'approvisionnement de la biomasse avec prise en compte des flux inverses relève des décisions stratégiques et peuvent intégrer des décisions tactiques. Ces décisions ont pour finalité la recherche dans un contexte bien défini de la meilleure configuration ou encore de la meilleure structure du réseau logistique permettant un approvisionnement optimal des unités de production de bioénergie (pour plus de détails sur les décisions relatives à la conception de réseau logistique, voir (Suon, 2011)).

Les problèmes de prise de décisions pour la conception du réseau logistique sont généralement des problèmes d'optimisation combinatoire qui consiste à trouver la meilleure solution dans un ensemble discret de solutions réalisables. Cet ensemble de solutions est généralement fini, mais contient un grand nombre d'éléments, d'où l'utilisation du terme « combinatoire ».

Afin de traiter ces problèmes de conception de réseau logistique, de nombreuses approches reposant sur l'optimisation et plus particulièrement sur la programmation mathématique en nombre mixtes sont proposées dans la littérature (D'Amours et al., 2011; Johnson et al., 2012). L'optimisation permet en effet de trouver la meilleure solution parmi l'ensemble de solutions réalisables d'un problème défini. C'est un outil permettant l'aide à la décision et l'analyse des systèmes physiques. La programmation mathématique quant à elle, est une approche quantitative qui permet de modéliser les problèmes de prise de décision. Elle s'intéresse à la maximisation ou à la minimisation d'un critère de performance (fonction objectif) sous un ensemble de contraintes.

Dans le processus d'optimisation, la première étape consiste en la construction d'un modèle approprié et représentant au mieux le problème à optimiser. En effet, la modélisation permet d'identifier et d'exprimer en termes mathématiques le problème à optimiser. Si le modèle est bien construit, la solution de l'optimisation peut être qualifiée de « bonne » solution au problème réel. Une fois le problème bien modélisé, l'étape suivante consiste en la résolution du problème d'optimisation par le choix de méthodes de résolution approprié au type de modèle employé pour représenter le problème à optimiser.

Les problèmes courants de conception de réseau logistique, leur méthode de résolution ainsi que leur application dans le domaine de la conception de la chaîne d'approvisionnement de la biomasse sont abordés dans les paragraphes suivants.

2.1. Conception de réseau logistique : modélisation, critères de d'optimisation et approches de résolution

Plusieurs modèles et approches dédiés aux problèmes de conception de chaîne logistique et à leur résolution ont été traités dans la littérature et font partie du domaine bien étudié de la gestion de la chaîne logistique (Ortiz-Astorquiza et al., 2018).

Ces problèmes de conception concernent pour la plupart, la prise de décisions relatives à la localisation des sites, à l'allocation des activités à chaque installation ainsi que des décisions relatives aux

choix de la capacité des installations, des technologies et des modes de transports. Appliqués à l'approvisionnement de la biomasse, les problèmes de conception de réseau logistique concernent donc la détermination du nombre optimal, de la capacité et de l'emplacement optimal des sites de production et de traitement (collecte, stockage, prétraitement, conversion) de la biomasse et des sous-produits. Ils peuvent également intégrer le choix des technologies de traitement ainsi que des modes et des moyens de transport de la biomasse et des sous-produits.

Les problèmes de conception de réseau logistique ont été considérablement modélisés sous la forme de programmes mathématiques où l'objectif consiste à minimiser les coûts (fixes et variables) d'installation des infrastructures sous des contraintes de capacité des infrastructures et de satisfaction de la demande des clients (Johnson et al., 2012). Dans ce genre de modèle, les variables binaires traduisent généralement les décisions de localisation et d'affectation tandis que les variables continues traduisent les flux de matières et les quantités de matières à transformer.

En fonction de la nature des données d'entrée du modèle, ces modèles de programmation mathématique peuvent être déterministes (modèle dans lequel les données d'entrée du modèle sont connues parfaitement et avec précision), ou stochastique (modèle dans lequel il existe une probabilité ou une incertitude sur les données d'entrée du modèle).

En fonction du nombre de critères à optimiser, les modèles d'optimisation peuvent également être mono-objectif (une seule et unique fonction objectif), ou multi-objectifs (plusieurs fonctions objectifs). (Ba et al., 2016; Beamon, 1998; Eskandarpour et al., 2015). Les modèles multi-objectifs ont été utilisés dans la conception de chaîne logistique pour la prise en compte de la durabilité. Cette durabilité a été abordée à travers les critères d'optimisation économique, environnementaux et sociaux. D'après (Cambero and Sowlati, 2014), les émissions de gaz à effet de serre (GES), les coûts de production et le capital, le nombre d'emplois créés sont respectivement les critères environnementaux, économiques et sociaux les plus fréquemment considérés dans les modèles quantitatifs d'optimisation de la chaîne logistique. De pareils résultats ont été trouvés par (Barbosa-Póvoa et al., 2017) qui ont conclu que la durabilité a été principalement abordée dans la littérature à travers les critères économiques et environnementaux, et que les critères sociaux ont été peu étudiés du fait de la difficulté à les représenter par des paramètres et variables quantitatives (Mota et al., 2015).

Au sujet des modèles multi-objectifs dans les systèmes de production de bioénergies (Zamboni et al., 2009) ont étudié une chaîne d'approvisionnement en maïs pour la production de bioéthanol au moyen d'un modèle multi-objectifs, minimisant les coûts d'exploitation et les émissions de gaz à effet de serre (GES). (Mele et al., 2011) ont développé un modèle multi objectif bi critères où les critères environnementaux et financiers étaient tous deux abordés dans la production d'éthanol à partir de la canne à sucre. Ils ont considéré l'éco-indicateur 99 et le potentiel de réchauffement global pour l'évaluation des impacts environnementaux à minimiser. (Osmani and Zhang, 2017) ont développé un modèle d'optimisation multi-périodes multi-objectifs pour concevoir une chaîne d'approvisionnement de biomasse destinée à la production de bioéthanol de deuxième génération sous de multiples incertitudes. L'objectif était de maximiser simultanément les performances économiques, environnementales et sociales. (Santibañez-Aguilar et al., 2014) ont développé un modèle de programmation linéaire à variables mixtes multi-

objectifs pour la planification optimale et l'emplacement d'unités de production de biocarburants dans un réseau de chaîne d'approvisionnement en biocarburants tenant compte des aspects économiques, environnementaux et sociaux.

Tous ces travaux montrent la prise en compte de la durabilité et l'utilisation de la programmation mathématique dans la conception de la chaîne d'approvisionnement de la biomasse.

De nombreux problèmes de conception de la chaîne logistique sont de classe de complexité NP-difficiles (Slabinac, 2013). La classification NP-difficile pour les problèmes de décision se réfère à la difficulté à résoudre ces problèmes. Un problème de décision appartient à la classe NP s'il est possible de vérifier en temps polynomial la validité de toute instance positive de ce problème (Segura, 2011).

Des approches de résolution exactes et approchées ont été proposées pour la résolution de ces problèmes de conception de la chaîne logistique de classe NP-difficile.

Concernant les méthodes exactes, elles procèdent à l'énumération des solutions possibles afin de trouver la meilleure. Par conséquent, elles garantissent l'optimalité au détriment d'un temps de résolution généralement très long. Parmi les méthodes exactes, la méthode de Séparation & Évaluation (Branch-and-bound) est l'algorithme le plus largement utilisé. En effet, il permet généralement la résolution optimale des nombreux problèmes de programmation mathématique (Hillier and Lieberman, 2001). Dans certains cas, la méthode Branch-and-bound est intégrée à des méthodes de relaxation heuristiques ou lagrangiennes, permettant d'accroître son efficacité (Ghaderi et al., 2016).

Les approches heuristiques et méta-heuristiques sont des méthodes approchées qui permettent la recherche de solutions satisfaisantes, mais pas nécessairement optimales, pour résoudre des problèmes complexes dans des délais d'exécution réduits (Koné, 2009). Elles reposent généralement sur un mécanisme de déplacement (aléatoire ou non) dans l'espace des solutions. Une heuristique est une procédure qui exploite la structure du problème considéré afin de trouver une solution de qualité raisonnable dans des délais aussi courts que possible. Une méta-heuristique quant à elle est définie comme un processus de génération itératif qui guide une heuristique en combinant intelligemment différents concepts pour explorer et exploiter l'espace de recherche. Des méthodes d'apprentissage sont utilisées pour structurer l'information dans le but de trouver efficacement des solutions quasi optimales.

De nombreux solveurs commerciaux tels que CPLEX, XPRESS, Lingo se basent sur ces approches de résolution ci-dessus présentées afin de résoudre des problèmes conception de chaîne logistique. Ces solveurs commerciaux ont été utilisés par de nombreux auteurs (Bambara et al., 2017; Ghaderi et al., 2016; Santibañez-Aguilar et al., 2014; Sawadogo et al., 2017) pour la conception de chaîne d'approvisionnement de la biomasse

2.2. Problèmes de conception de réseau logistique.

L'objectif principal lors de la conception des chaînes d'approvisionnement est d'optimiser les investissements engagés afin de satisfaire certains objectifs qui sont pour la plupart de minimiser les coûts de l'ensemble des activités liées à l'approvisionnement et maximiser la satisfaction des consommateurs finaux sous certaines contraintes.

(Melkote and Daskin, 2001a), considérant un ensemble de produits K qui, devant être acheminées entre un ensemble d'origines i et un ensemble de destinations j , et considérant qu'une unité de chaque produit k doit être expédiée de son origine $O(k)$ à sa destination $D(k)$, ont formulé le problème de conception de réseau logistique générale de la façon suivante

Données :

N = ensemble de nœuds

L = ensemble des chemins potentiels entre nœuds

K = ensemble des produits

t_{ij} = coût de transport unitaire sur le chemin (i, j)

c_{ij} = coût lié au choix du chemin (i, j)

Variables de décision :

$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si la connexion } (i, j) \text{ existe avec } i < j \\ 0, & \text{si non} \end{cases}$

Y_{ij}^k et Y_{ji}^k quantité du produit k transitant respectivement sur la connexion (i, j) et (j, i) .

Fonction objectif :

minimiser $\sum_{(i,j) \in L} \sum_{k \in K} (t_{ij} Y_{ij}^k + t_{ji} Y_{ji}^k) + \sum_{(i,j) \in L} c_{ij} X_{ij}$

Sujet à

Contraintes :

$$\sum_{j \in N} Y_{ji}^k - \sum_{j \in N} Y_{ij}^k = f(x) = \begin{cases} -1, & \forall i \in N, \forall k \in K: i = O(k) \\ 1, & \forall i \in N, \forall k \in K: i = D(k) \\ 0, & \text{si non} \end{cases} \quad (1)$$

$$Y_{ij}^k \leq X_{ij}, \forall (i, j) \in L, \forall k \in K \quad (2)$$

$$Y_{ji}^k \leq X_{ij}, \forall (i, j) \in L, \forall k \in K \quad (3)$$

$$Y_{ij}^k, Y_{ji}^k \geq 0, X_{ij} \in \{0,1\}, \forall (i, j) \in L, \forall k \in K \quad (4)$$

La fonction objectif minimise la somme des coûts de transport et des coûts fixes de conception du réseau. L'ensemble des équations (1) sont des équations assurant la conservation de matière dans le réseau. Les équations (2) et (3) permettent le flux de produit uniquement sur les chemins sélectionnés. L'ensemble des équations (4) sont des contraintes d'intégralité et de non-négativité.

En fonction de certaines contraintes additionnelles telles que le nombre maximal ou minimal d'installations à ouvrir, leur capacité, etc., le problème général de conception de réseau logistique peut être reformulé de sorte à obtenir (i) un problème de location et d'allocation d'installations à capacités finies plus connu sous l'expression anglaise de «capacitated facility location problems», (ii) des problèmes de location et d'allocation d'installations à capacités infinies ou «uncapacitated facility location problems» en anglais.

La localisation et l'allocation résultent de deux problèmes de prise de décision l'un au niveau stratégique (décision de localisation) et l'autre au niveau tactique (décision d'allocation). L'expression « localisation » fait référence au choix de l'emplacement des installations et l'expression « allocation »

quant à elle se réfère aux décisions d'affectation des sites entre eux et à l'affectation des activités (taches) à ces sites.

2.2.1. Problèmes de localisation et d'allocation à capacités finies et infinies

Dans un problème de localisation et d'allocation d'installations à capacités finies, il s'agit de déterminer le nombre et le lieu d'emplacement de nouvelles infrastructures afin de répondre à un besoin exprimé dans une zone donnée.

Les problèmes généraux de location et d'allocation d'installations à capacités finies ont été formulés par (Melkote and Daskin, 2001b) de la façon suivante :

Données :

N = ensemble de nœuds

L = ensemble des chemins potentiels entre nœuds

K = ensemble des produits

t_{ij} = coût de transport unitaire sur le chemin (i, j)

c_{ij} = coût lié au choix du chemin (i, j)

d_i = demande au nœud i

$M = \sum_{i \in N} d_i$, la demande totale

f_i = coût fixe d'implantation d'une installation au nœud i

K_i = capacité de l'installation implantée au nœud i

Variables de décision :

$Z_i = \begin{cases} 1, & \text{si une installation est placée au nœud } i \\ 0, & \text{si non} \end{cases}$

$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si la connexion } (i, j) \text{ existe avec } i < j \\ 0, & \text{si non} \end{cases}$

Y_{ij} = quantité de matière transitant sur les connexions (i, j) .

W_i = quantité de matière délivrée par l'installation implantée au nœud i

Fonction objectif :

minimiser $\sum_{(i,j) \in L} t_{ij} Y_{ij} + \sum_{i \in N} f_i Z_i + \sum_{(i,j) \in L} c_{ij} X_{ij}$

Sujet à

Contraintes :

$$\sum_{j \in N} Y_{ji} + d_i = \sum_{j \in N} Y_{ij} + W_i, \forall i \in N \quad (5)$$

$$W_i \leq K_i Z_i, \forall i \in N \quad (6)$$

$$Y_{ij} \leq M X_{ij}, \forall (i, j) \in L \quad (7)$$

$$Y_{ij} \geq 0, X_{ij} \in \{0,1\}, \forall (i, j) \in L$$

$$W_i \geq 0, Z_i \in \{0,1\}, \forall i \in N$$

L'équation (5) est équation de bilan de masse. L'équation (6) assure que la demande au nœud i est pourvue uniquement par l'installation placée en ce nœud et que la capacité de l'installation en question n'est pas dépassée. L'équation (7) assure que les produits peuvent transiter uniquement sur les chemins choisis.

Lorsque le paramètre K_i est supprimé et remplacé dans l'équation (6) par le paramètre M , le problème de location et d'allocation d'installations à capacités finies devient un problème de location et d'allocation d'installations à capacités infinies qui a été largement défini par (Melkote and Daskin, 2001a).

Les problèmes de location et d'allocation d'installations à capacités finies et à capacités infinies font tous deux partis des problèmes NP-difficiles (Melkote and Daskin, 2001a, 2001b).

Lorsqu'une contrainte est rajoutée sur le nombre d'installations à localiser (équation (8) ci-dessous), et lorsque le terme relatif aux coûts fixes est supprimé dans la fonction objectif, le modèle peut être classé dans la catégorie des problèmes P-Médian.

Le problème P-médian est un problème de localisation dans lequel il s'agit de déterminer la localisation de P (entiers naturels) installations de façon à minimiser la distance totale à parcourir entre les points de demande et les installations auxquelles ils sont affectés (Hammami, 2003).

$$\sum_{i \in N} Z_i = P \quad (8)$$

2.2.2. Problèmes de localisation et d'allocation multi échelons

En fonction du nombre d'échelons dans le réseau logistique, les problèmes de localisation et d'allocation peuvent être qualifiés de mono-échelle ou de multi-échelons.

Les problèmes de localisation et d'allocation multi-échelons s'intéressent aux décisions relatives à l'emplacement de différents types d'installations qui interagissent dans une configuration à plusieurs niveaux (Torkestani et al., 2016) (voir Figure 5).

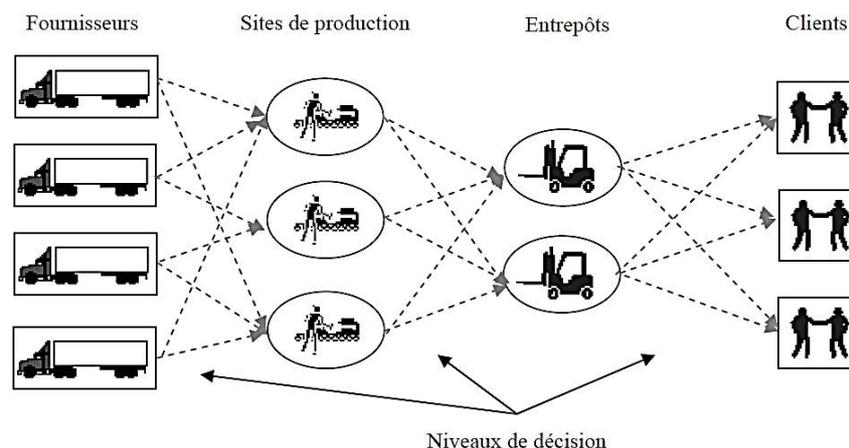


Figure 5 : Problème de localisation à trois échelons (Hammami, 2003).

Une revue de la bibliographie sur ces problèmes a été réalisée par (Şahin and Süral, 2007) qui les ont classés en quatre groupes selon leur nature. Le premier groupe concerne les modèles de flux, qui décrivent

les flux de biens ou de services sur les arcs entre les nœuds du réseau. Les deux autres groupes suivants concernent la disponibilité du service et sa configuration spatiale. Ils expriment l'interaction verticale entre les échelons. Le dernier groupe concerne la localisation des installations.

La formulation d'un système à deux niveaux et à flux unique doté d'installations à capacités finies données par (Şahin and Süral, 2007) est la suivante :

Données :

I et J = ensemble des sites candidats pour les installations respectivement de de niveau 2 et de niveau 1
et

K = ensemble des sites de demande.

C_{ij} et C_{jk} = coûts respectifs des flux unitaires entre les installations aux niveaux 2 et 1, et entre les installations de niveau 1 et le site de demande.

d_k = quantité demandée sur le site k .

M_i et M_j capacité respective de l'installation de niveau 2 sur le site i et le l'installation de niveau 1 sur le site j .

p et q = nombre respectif d'installations à ouvrir au niveau 1 et au niveau 2.

Variables :

y_j et x_i = 1 si les niveaux respectifs 1 et 2 sont situés respectivement en j et i . Sinon = 0.

u_{jk} et v_{ij} = quantité transitant respectivement entre l'installation de niveau 1 j et le site de demande k , et entre l'installation de niveau 2 i et l'installation de niveau 1 j .

Fonction objectif :

Minimise $\sum_j \sum_k u_{jk} C_{jk} + \sum_i \sum_j v_{ij} C_{ij}$

Sujet à

Contraintes :

$$\sum_j u_{jk} = d_k \quad \forall k \in K \quad (9)$$

$$\sum_i v_{ij} = \sum_k u_{jk} \quad \forall j \in J \quad (10)$$

$$\sum_k u_{jk} \leq M_j y_j \quad \forall j \in J \quad (11)$$

$$\sum_j v_{ij} \leq M_i x_i \quad \forall i \in I \quad (12)$$

$$\sum_j y_j = p \quad (13)$$

$$\sum_i x_i = q \quad (14)$$

$$u_{jk} \geq 0 \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (15)$$

$$v_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (16)$$

$$y_j \text{ et } x_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (17)$$

La fonction objectif minimise le coût total de transport entre les sites à la demande et les installations de niveau 1, et entre les installations de niveau 1 et les installations de niveau 2. La contrainte (9) assure que la demande totale d'un site est entièrement satisfaite par les installations de niveau 1. La contrainte (10) assure que la demande livrée à une installation de niveau 2 par une installation de niveau 1 est

équivalente à la demande totale de cette installation de niveau 1. Les contraintes (11) et (12) concernent les capacités de l'installation. Les contraintes (13) et (14) permettent de localiser les nombres d'installations requises au niveau 1 et 2 respectivement. Les contraintes (15) et (16) sont des contraintes de non-négativités et les contraintes (16) et (17), des contraintes d'intégralité.

2.2.3. Problèmes de conception de la chaîne logistique avec retours des produits

De nombreux articles abordent les flux inverses dans la conception optimale de la chaîne logistique (Amin and Baki, 2017; Jerbia et al., 2018; Özceylan, 2016; Ramezani et al., 2014).

De façon générale, les mêmes problèmes de conception de la chaîne logistique traditionnelle sont appliqués à la conception de la chaîne logistique en boucle fermée.

Concernant les retours des produits, dans les systèmes de production de bioénergies, de nombreuses études ont aussi abordé la réutilisation des sous-produits et déchets. C'est le cas de (Alemán-Nava et al., 2018) qui ont passé en revue le traitement industriel et la revalorisation biotechnologique des déchets de Tequila. (Murillo-Alvarado et al., 2015) ont abordé la conception d'une chaîne d'approvisionnement exploitant également les résidus de l'industrie de la tequila au Mexique à travers la conception d'un modèle multi-objectif. (Navarro-Pineda et al., 2016) ont réalisé une étude sur le potentiel d'utilisation complète de la plante entière du *Jatropha* (feuilles, branches, fruits, graines, tourteaux ...) dans les unités de conversion de la biomasse.

Pendant, en dehors des travaux de (De Meyer et al., 2015) peu d'études sur la conception de la chaîne d'approvisionnement intégrant la gestion des flux inverses ont été appliqués aux bioénergies. (Govindan et al., 2015) a pourtant souligné l'avantage lié à une bonne conception de la chaîne logistique en boucle fermée, avantage pouvant être appliqué aux systèmes exploitant la biomasse à savoir : la maximisation la création de valeur sur l'ensemble du cycle de vie du produit considéré dans la chaîne d'approvisionnement.

2.3. Revue de littérature sur la conception du réseau logistique dans les systèmes de production de bioénergies

Concernant les systèmes de production de bioénergie, les problèmes de conception de réseau logistique ci-dessus présentés ont été appliqués à de nombreuses études sur l'approvisionnement de la biomasse.

Ces études ont concerné la conception de réseau d'approvisionnement en biomasse lignocellulosique. À ce propos (Sosa et al., 2015) ont développé un modèle d'optimisation de deux chaînes logistiques, l'une exploitant des morceaux de bois et l'autre, exploitant des arbres entiers. Les auteurs ont considéré dans leur modèle les coûts de récolte, de stockage, de déchetage et de transport de la biomasse. Sur la base de la minimisation des coûts de production de la biomasse et des coûts de conversion de cette biomasse en vecteur d'énergie, (Gan and Smith, 2011) ont développé un modèle générique qui permet de déterminer la taille optimale des unités de conversion et le rayon d'approvisionnement en biomasse correspondant à

cette taille de l'unité de conversion. Toujours au sujet de la biomasse lignocellulosique, (Dyken et al., 2010) ont proposé un modèle de programmation à variable mixte pour modéliser les composants de base dans une chaîne d'approvisionnement en biomasse. Ils ont considéré le transport, le prétraitement, le stockage et les quantités de biomasses demandées. (Bhavna Sharma et al., 2013) ont pour leur part, développé un modèle d'optimisation couplé à des scénarios pour prendre en compte les incertitudes liées au climat dans la chaîne d'approvisionnement de la biomasse. L'objectif de la modélisation était de minimiser le coût de l'approvisionnement en biomasse à l'unité de conversion sur une période d'un an en utilisant des intervalles de temps mensuels selon différents scénarios climatiques.

Les études sur la conception du réseau logistique dans les systèmes de production de bioénergies ont aussi concerné la biomasse oléagineuse. Sur ce sujet des biomasses oléagineuses (Leão et al., 2011) ont proposé un modèle pour la conception optimale et la planification de la chaîne d'approvisionnement d'une usine de production de biodiesel. Leur étude est menée sur de petits agriculteurs au Brésil, et le modèle développé prend en compte la culture, la logistique, la production industrielle et les impacts sociaux. La biomasse étudiée est le ricin. (Andersen et al., 2012) ont proposé dans leur étude, une méthodologie pour la conception optimale et la planification de la chaîne logistique du biodiesel en Argentine. Le modèle multi périodes linéaires à variables mixtes développées prend en compte la compétition pour l'utilisation des terres agricoles. Il prend aussi en compte la production, le stockage, et le transport des graines, de l'huile végétale, du biodiesel, et du glycérol. Les biomasses étudiées sont le soja, le tournesol et le *Jatropha Curcas*. (Babazadeh et al., 2017) ont développé un modèle pour la conception stratégique de la chaîne logistique du biodiesel en Iran. Le modèle linéaire à variables mixtes proposé optimise le nombre, l'emplacement et les capacités des champs de *Jatropha*, des centres de collecte des graines de *Jatropha*, des centres de collecte d'huile de cuisson usagée, des unités de production et des centres de distribution de biodiesel. (Duarte et al., 2014) ont proposé un modèle de programmation linéaire à variable mixte de localisation des unités de production de biocarburant avec une application en Colombie. (Eksioglu et al., 2009) ont développé un modèle de programmation linéaire à variable mixte qui permet de déterminer le nombre, la taille et l'emplacement des unités nécessaires pour produire des biocarburants. Le modèle détermine également la quantité de biomasses expédiée, traitée et inventoriée pendant une période de temps.

De cette revue de la littérature, il est aisé de s'apercevoir qu'il existe plusieurs travaux et auteurs qui ont développé des modèles d'optimisation de la chaîne logistique de la biomasse dans les systèmes de production de bioénergies.

Cependant, en analysant tous ces travaux sur la conception de la chaîne d'approvisionnement en biomasse, il est aisé de s'apercevoir que la biomasse lignocellulosique a été considérablement étudiée par rapport à la biomasse oléagineuse. Ce constat est visible dans les revues de la littérature sur la conception de la chaîne d'approvisionnement de la biomasse réalisée par (Ghaderi et al., 2016) dans laquelle, parmi 146 publications sur la chaîne logistique des systèmes de production de bioénergie, moins de 10 publications concernent la biomasse oléagineuse. Or, dus aux particularités de chaque type de biomasse, les modèles développés pour les biomasses lignocellulosique ne peuvent pas toujours être appliqués à la

conception de la chaîne d'approvisionnement de la biomasse oléagineuse. Ces particularités concernent les systèmes de culture, les opérations du prétraitement, les sous-produits générés et cela réduit les choix d'utilisation de modèles existants dans la littérature pour l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement de la biomasse oléagineuse.

Une analyse de ces travaux sur la conception du réseau d'approvisionnement de la biomasse lignocellulosique montre également que ceux-ci intègrent presque toujours les prétraitements dans la conception du réseau d'approvisionnement. Cela n'est pas le cas des études sur la biomasse oléagineuse.

Toutes natures de biomasse confondues, aucune étude (du mieux de notre connaissance) n'a été réalisée sur la conception de la chaîne d'approvisionnement de biomasses sauvages telles que le *Balanites aegyptiaca*. En outre, rares d'études sur la modélisation et l'optimisation de la CL des systèmes de production de bioénergies ont été appliqués au contexte africain, malgré l'engouement pour les biocarburants (produits à partir de l'exploitation du *Jatropha* surtout) qui a pu être observé sur le continent dans les années 2000. Cela est également perceptible dans la revue de la littérature réalisée par (Ghaderi et al., 2016). Pourtant, dues également au contexte particulier de nombreux pays africains comme le Burkina Faso et le Mali, les conclusions et recommandations des études dans des contextes non similaires ne peuvent pas toujours être prises en considération et appliquées. Ces particularités de contexte concernent le système agricole faiblement mécanisé et caractérisé par une agriculture extensive de subsistance, le faible développement des infrastructures dédiées au transport des biens, le manque d'énergie pour réaliser certaines activités de la chaîne logistique telle que les prétraitements.

Il ressort enfin de cette revue de la littérature que, si la chaîne logistique en boucle fermée a été beaucoup étudiée dans la chaîne logistique des systèmes de production de façon générale, celle-ci a été peu abordée dans la conception de la chaîne d'approvisionnement de la biomasse.

2.4. Contribution de nos travaux de recherche

Au vu de ce qui précède, la contribution de notre travail est donc de proposer un modèle d'optimisation de la configuration de l'approvisionnement des systèmes de production de biocarburants oléagineux avec valorisation des sous-produits en Afrique de l'Ouest. Le modèle intégrera le contrôle des activités de culture de la biomasse. Les acteurs du domaine des bioénergies pourront ainsi de façon intégrée, utiliser ce seul outil pour la détermination des choix au regard de l'organisation des activités de culture et de l'approvisionnement de la biomasse. Le modèle intégrera simultanément également les choix possibles de prétraitement de biomasse oléagineuse et les options de valorisation des sous-produits afin de déterminer la configuration du réseau d'approvisionnement exprimant au mieux les réalités dans le contexte ouest-africain. La finalité du modèle est d'aider à la prise de décisions dans les systèmes de production de bioénergies en Afrique de l'Ouest et de permettre l'accroissement de l'accès à l'énergie dans cette partie du monde.

Les hypothèses scientifiques que nous voulons vérifier à travers cette étude sont les suivantes :

- Hypothèse 1 : il est possible d'obtenir un modèle générique qui permettra d'optimiser la durabilité des filières de production de biocarburants oléagineux en Afrique de l'ouest.

- Hypothèse 2 : la durabilité des filières de production de biocarburants oléagineux est inhérente à la valorisation des coproduits.

Pour orienter les recherches, les questions de recherches que nous avons formulées sont les suivantes :

- Question de recherche 1 : Quels sont pour chaque biomasse les paramètres et variables qui caractérisent (i) les opérations dans la chaîne logistique (ii) la configuration des chaînes logistiques (iii) la valorisation des sous-produits ?
- Question de recherche 2 : Quelle est la typologie de filières de production de biocarburants les plus durables et acceptables dans le contexte ouest-africain ?

Conclusion

Dans ce chapitre, un état de l'art sur la chaîne logistique dans les systèmes de production de bioénergies et un cas particulier de la chaîne d'approvisionnement de la biomasse en Afrique de l'Ouest ont été présentés. Dans cet état de l'art, les concepts relatifs aux bioénergies, à la biomasse, aux biocarburants oléagineux ont d'abord été définis. Les concepts de chaîne logistique inverse et de chaîne logistique en boucle fermée ont été également abordés. Par suite, les enjeux de la conception du réseau logistique, les problèmes de conception de réseau logistique ainsi que les modèles courants et approches de résolution de ces problèmes de conceptions ont été présentés. Les travaux existant dans le domaine des bioénergies et ayant abordé ces problèmes de conception de réseau logistique ont été enfin revus avant de clore le chapitre par la présentation de la contribution des travaux de recherche objet de ce document par les hypothèses et questions de recherche formulées afin de guider ces travaux de recherche.

Le chapitre suivant abordera le modèle proposé afin de vérifier ces hypothèses et répondre à ces questions de recherche formulées.

Chapitre 3 : Modélisation de la chaîne logistique des systèmes de production de biocarburants oléagineux

Introduction

Ce chapitre présente la construction du modèle d'optimisation de la configuration de l'approvisionnement des systèmes de production de biocarburants oléagineux en Afrique de l'Ouest. Comme précisé dans le chapitre précédent, la finalité du modèle est d'aider à la prise de décisions stratégique et tactique dans les systèmes de production de bioénergies afin de permettre l'accroissement de l'accès à l'énergie dans cette partie du monde.

La première partie du chapitre a consisté en la présentation du problème à modéliser. Dans celle-ci, les hypothèses et les limites qui soutiennent la construction du modèle, les critères d'évaluation des performances de la chaîne logistique ainsi que les données et attributs du modèle sont définis.

La deuxième partie du chapitre consiste en la formulation mathématique du problème. Dans celle-ci, différentes alternatives possibles pour l'approvisionnement de la biomasse ainsi que les systèmes de production de biocarburants oléagineux ont été recensés et modélisés à travers un programme linéaire à variable mixte.

En plus des paramètres économiques et environnementaux, la modélisation prend en compte certains aspects techniques de la production de la biomasse et de sa logistique d'approvisionnement. Ces aspects techniques sont le type de technologie employée, l'efficacité ou le rendement ainsi que la taille ou capacité de traitement liée à la technologie.

1. Définition du problème modélisé

Une unité de production de biocarburants oléagineux de petite taille (que nous appellerons huilerie dans la suite du document) située dans une zone géographique d'intérêt doit être approvisionnée en biomasse oléagineuse afin de produire sa demande périodique en Huile Végétale Carburant (HVC).

Afin de produire cette biomasse, des sites potentiels de production de la biomasse ont été ciblés dans la région autour de l'huilerie. Les emplacements de ces sites potentiels de production sont connus. Leur emplacement peut en effet correspondre soit à des champs déjà existants, soit à des zones agricoles ciblées en fonction des facteurs pédoclimatiques favorables à la production de la biomasse voulue.

Pour cette production sur les sites ciblés, deux cas de figure peuvent se présenter :

- La plante énergétique doit être cultivée afin de produire la biomasse qui sera ensuite récoltée ;
- La plante énergétique existe déjà et seule la récolte de la biomasse doit être réalisée.

Lorsque la plante énergétique doit être plantée, différentes pratiques culturales engendrant chacune un rendement de culture spécifique peuvent être considérées.

Toute la biomasse oléagineuse cultivée et récoltée sur les sites de production doit transiter par des points de collecte. En effet, ces points de collecte permettent de rassembler de grandes quantités de biomasses, ce qui facilite sa réception à l'huilerie (notamment la mobilisation de la main-d'œuvre pour le chargement, déchargement et pesée de la biomasse). En raison de contraintes géographiques, plusieurs emplacements potentiels de points de collecte ont été identifiés au préalable et différents moyens de

transport sont disponibles sur les sites de production et aux points de collecte pour le transport de la biomasse.

Afin d'obtenir la biomasse sous sa forme optimale pour l'extraction de l'HVC, celle-ci doit subir un prétraitement. Celui-ci consiste en l'une ou l'ensemble des opérations de tri, décorticage, dépulpage, broyage, etc. que peuvent subir les fruits ou les graines récoltés avant l'extraction de l'huile.

En fonction des choix des décideurs et des contraintes d'accès aux technologies de prétraitement, ces opérations peuvent être manuelles ou mécanisées. Le prétraitement peut être également réalisé à trois niveaux, à savoir :

- Niveau 1 = sur les sites de production de la biomasse ;
- Niveau 2 = aux points de collecte ;
- Niveau 3 = à l'huilerie.

Les opérations de prétraitement de la biomasse et d'extraction de l'HVC génèrent des sous-produits qui sont considérés comme des déchets lorsque ceux-ci ne sont pas traités convenablement. Raison pour laquelle l'huilerie veut également valoriser les sous-produits générés par le prétraitement et par l'extraction de l'HVC afin de réduire le coût de revient de la biomasse à l'entrée de l'huilerie. En effet, selon les sites où ils ont été générés, les sous-produits peuvent être retournés vers des sites de valorisation encore appelés points de retours des sous-produits. Ces flux des sous-produits, dans la chaîne d'approvisionnement de la biomasse, sont appelés flux de retour.

Pour tous ces sous-produits, l'huilerie cherche les quantités à acheminer vers les points de retours. L'huilerie désire également observer l'effet du choix des différents points de retour des sous-produits sur les coûts, les impacts environnementaux et la configuration du réseau logistique. C'est la raison pour laquelle deux cas particuliers sur le retour des sous-produits sont possibles. Dans le cas 1, les points de retour du sous-produit sont inconnus. Dans le cas 2, les sous-produits doivent retourner sur les sites définis par l'huilerie.

Dans l'optique de faciliter la disponibilité de la biomasse pour l'extraction de l'huile, le stockage de longue durée a lieu uniquement à l'huilerie. En effet, les acteurs du transport de la biomasse ne sont pas des salariés de l'huilerie et les moyens de transport n'appartiennent pas toujours à l'huilerie. Le stockage de la biomasse à l'huilerie garantit ainsi la disponibilité des graines en temps voulu. Aussi, en raison des quantités plus importantes de biomasses à traiter, la manutention de la biomasse est prise en compte lorsque celle-ci se déroule entre les points de collecte et l'huilerie.

Au vu de tout ce qui précède, pour un approvisionnement optimal en biomasse aux unités de production de biocarburants et pour une valorisation optimale des sous-produits générés lors du processus de production de ces biocarburants, le problème consiste à déterminer l'organisation de la culture et de sa récolte ainsi que la configuration optimale de la structure de la chaîne logistique permettant des flux de biomasse et des flux de sous-produits optimaux. Cette optimisation doit se faire suivant les critères économiques et environnementaux ci-dessous décrits.

1.1. Les critères d'optimisation

Deux critères, basés sur les piliers économie et environnement du développement durable ont été retenus afin de mesurer les performances économiques et environnementales de la chaîne logistique de la biomasse oléagineuse décrite dans le problème ci-dessus. Les biocarburants étant une source d'énergie renouvelable, la prise en compte de la durabilité permet d'éviter et/ou de réduire l'introduction d'effets néfastes sur l'écosystème et la société humaine. Les critères retenus sont donc les suivants :

1.1.1. Le critère économique

Le critère économique consiste à minimiser la somme des coûts engendrés depuis la culture de la biomasse jusqu'à son entrée à l'huilerie, somme de laquelle est soustrait le gain de valorisation des sous-produits.

Le gain de valorisation des sous-produits est le résultat obtenu en soustrayant les coûts totaux engendrés par la valorisation des sous-produits de la recette totale obtenue de leur valorisation. L'objectif poursuivi est de réduire au maximum le coût de revient de la biomasse à l'entrée de l'huilerie. Les coûts sont composés des coûts d'investissements s'il y'a lieu et des coûts d'exploitation. Ces coûts et ce gain sont :

- Coûts totaux de production de la biomasse ;
- Coûts totaux engendrés par les flux de biomasse ;
- Coûts totaux générés par la production des sous-produits ;
- Coûts totaux engendrés par les flux retour de sous-produits ;
- Coûts totaux engendrés par la configuration de la structure du réseau d'approvisionnement ;
- Coûts totaux des sous-produits considérés comme un déchet ;
- Recette totale obtenue de la valorisation des sous-produits ;
- Gain de valorisation des sous-produits.

La configuration de la structure du réseau logistique s'intéresse à la localisation simultanée des sites de production de la biomasse, des points de collecte de celle-ci, des sites de productions des sous-produits, à l'allocation des points de collecte aux sites de production de la biomasse et à l'allocation des activités de prétraitement aux différents sites de la chaîne logistique.

Chacun des coûts (respectivement gain) totaux cités ci-dessus est linéaire et est fonction de la quantité totale de biomasse traitée. Ces coûts et gain s'expriment selon la relation suivante :

$$\text{Coût (respectivement gain) unitaire} \times \text{quantité totale traitée}$$

1.1.2. Le critère environnemental

Ce critère consiste à minimiser l'impact des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) lié à la production et à l'approvisionnement de la biomasse ainsi qu'à la valorisation des sous-produits duquel est également soustrait l'impact des émissions de GES évitées par la valorisation des sous-produits. Ces impacts sont ceux des émissions de GES :

- Lié à production de la biomasse ;
- Engendrées par les flux de biomasse ;
- Générées par la production des sous-produits ;
- Engendrées par les flux retour de sous-produits ;
- Engendrées par la configuration de la structure du réseau d’approvisionnement ;
- Liées aux sous-produits considérés comme un déchet ;
- Engendrées par la valorisation des sous-produits ;
- Évitées par la valorisation des sous-produits.

L’impact des émissions de GES évitées par la valorisation des sous-produits correspond à l’impact des émissions de GES qui aurait été généré si l’élément par lequel ce sous-produit a été remplacé avait été utilisé.

Afin de calculer les impacts des émissions de GES ci-dessus cités, une approche Analyse du Cycle de vie ACV partielle « du berceau à l’usine » (cradle to gate) a été employée. Cette approche a consisté à utiliser les outils d’ACV pour déterminer les indicateurs d’impact du potentiel de réchauffement global (Indicateur d’impact PRG) des opérations de la chaîne logistique et de la valorisation des sous-produits. Ces indicateurs d’impact ont ensuite été multipliés par les quantités traitées dans chacune des opérations désignées.

Le calcul des indicateurs d’impact PRG prend en compte tous les intrants nécessaires pour chaque opération de la chaîne logistique, ainsi que toutes les émissions de GES associées. Les émissions de GES comprennent les émissions de dioxyde de carbone (CO₂), de protoxyde d’azote (N₂O) et de méthane (CH₄). Toutes ces émissions ont été converties en équivalent CO₂ (kg eq CO₂) en utilisant la méthode de calcul du potentiel de réchauffement planétaire IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2013 (IPCC, 2013) à 100 ans avec CO₂ : 1, CH₄ : 25 et N₂O : 298.

Chacun des impacts d’émission de GES est donc de la forme :

Indicateur d’impact PRG (kg eq CO₂/ quantité unitaire) × quantité totale traitée

1.2. Hypothèses et limitation du problème

Dans le cadre de la présente étude, nous avons modélisé la chaîne logistique de la biomasse dans les systèmes de production de biocarburants oléagineux avec valorisation des sous-produits. Les sous-produits se rapportent aux tourteaux produits lors de l’extraction de l’huile et aux sous-produits issus du prétraitement.

Cette chaîne logistique avec récupération des sous-produits a été divisée en quatre modules interconnectés présentés sur la Figure 6 que sont :

- La production de la biomasse qui est sa culture et sa récolte.
- La logistique d’approvisionnement de la biomasse qui consiste aux opérations de collecte, de prétraitement, de transport, de manutention et de stockage de cette biomasse.
- La conversion de la biomasse en vecteur énergétique (extraction de l’huile végétale carburant (HVC) par pressage à froid des graines oléagineuses) qui génère les tourteaux.

- La valorisation des sous-produits qui consiste en la récupération des sous-produits et en leur réutilisation.

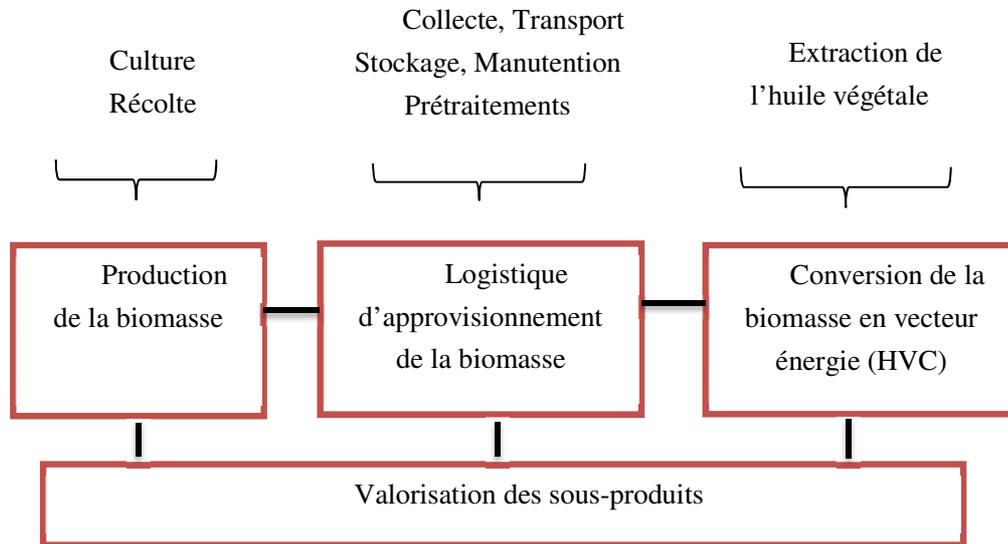


Figure 6. Découpage de la chaîne logistique de la biomasse.

Pour la réalisation de l'ACV partielle, l'unité fonctionnelle a été définie par l'approvisionnement d'une huilerie en biomasse prétraitée pendant un an.

La matière première objet de l'approvisionnement est la biomasse oléagineuse (graines et fruits). Les fournisseurs de la biomasse sont les cultivateurs et/ou récolteurs de la biomasse et il y a qu'un seul client, l'huilerie.

Pour la production de la biomasse sur les sites dédiés, une seule pratique culturale doit être employée pour tous les sites de production de la biomasse. Cette contrainte permet d'harmoniser le coût de revient de la biomasse produite et de fixer ainsi un même prix d'achat de la biomasse auprès des producteurs de la biomasse. De plus, les zones de production de la biomasse doivent être choisies en fonction des conditions pédoclimatiques favorables à chaque plante afin d'obtenir les meilleurs rendements de culture. Cependant, quel que soit le lieu de production de la biomasse, le modèle peut être utilisé, car les conditions pédoclimatiques influencent les rendements de culture qui sont un paramètre d'entrée du modèle.

L'approvisionnement de l'huilerie fonctionne en flux tiré. L'huilerie a en effet une capacité saisonnière de trituration de graines minimale qui est fixée et qui dépend de la demande saisonnière en huile à satisfaire. Cette demande en graine de l'huilerie doit être satisfaite et il est supposé que la consommation et/ou commercialisation de l'HVC extraite doit permettre de rentabiliser (dans le pire des cas de supporter) tous les investissements amont qui auront été réalisés afin de produire la biomasse, d'approvisionner l'unité de production en biocarburant et d'extraire l'HVC. De même que la demande en graines de l'huilerie est saisonnière, il existe une contrainte sur la capacité d'accueil maximale des points de collecte qui est également saisonnière.

Dans toute la suite du document, le terme « biomasse brute » désigne la fraction de la biomasse (fruits ou graines selon les plantes) récoltée et n’ayant subi aucun prétraitement excepté le séchage à l’air libre. Le terme « biomasse prétraitée » désigne les fruits ou les graines récoltés ayant subi un prétraitement. Le terme « biomasse » regroupe la biomasse brute et la biomasse prétraitée. Le terme « sous-produit » désigne les tourteaux et les sous-produits issus du prétraitement (coques, pulpes...).

Le prétraitement est effectué de sorte à obtenir la biomasse sous sa forme optimale pour l’extraction de l’huile végétale. Cependant, selon le choix de valorisation des sous-produits, le prétraitement peut être réalisé de sorte à favoriser la récupération des sous-produits issus du prétraitement sous leur forme la plus facilement valorisable.

Il est supposé que toutes les activités du prétraitement (en dehors du séchage) soient réalisées au même niveau. Il en découle que les opérations du prétraitement ne peuvent être fractionnées. Un séchage peut avoir lieu sur les sites de production de la biomasse (après la récolte) et lors du transport jusqu’à l’huilerie. Nous considérons ce séchage comme un séchage passif. Un séchage de la biomasse peut aussi être nécessaire avant le pressage des graines. Ces séchages ne sont pas directement pris en compte dans la modélisation du problème.

Les différences selon le niveau de localisation du prétraitement se rapportent à la quantité de matière et à l’état de la biomasse transitant dans le réseau d’approvisionnement. L’état de la biomasse fait référence au fait que celle-ci soit brute ou prétraitée et il est supposé que la biomasse soit stockée dans l’état dans lequel elle arrive à l’huilerie. Le Tableau 4 ci-dessous donne l’état de la biomasse transitant dans le réseau logistique en fonction du niveau de localisation du prétraitement.

Tableau 4. État de la biomasse selon le niveau de localisation du prétraitement

	Prétraitement au niveau 1	Prétraitement au niveau 2	Prétraitement au niveau 3
État de la biomasse demandée à l’huilerie	Biomasse prétraitée	Biomasse prétraitée	Biomasse prétraitée
État de la biomasse aux points de collecte	Biomasse prétraitée	Biomasse brute	Biomasse brute
État de la biomasse quittant les sites de production de la biomasse	Biomasse prétraitée	Biomasse brute	Biomasse brute
État de la biomasse à charger et décharger entre les points de collecte et l’huilerie	Biomasse prétraitée	Biomasse prétraitée	Biomasse brute
État de la biomasse à stocker à l’huilerie	Biomasse prétraitée	Biomasse prétraitée	Biomasse brute

Le niveau de localisation du prétraitement conditionne aussi les sites de production des sous-produits issus du prétraitement. Dans le cas où les points de retour (sites de valorisation) des sous-produits sont différents de leur lieu de production, leur transport est nécessaire. La Figure 7 présente les transports possibles des sous-produits en fonction du niveau de localisation du prétraitement.

Il convient de préciser que les tourteaux étant un sous-produit de l'extraction de l'HVC, ils ne peuvent être produits qu'à l'huilerie.

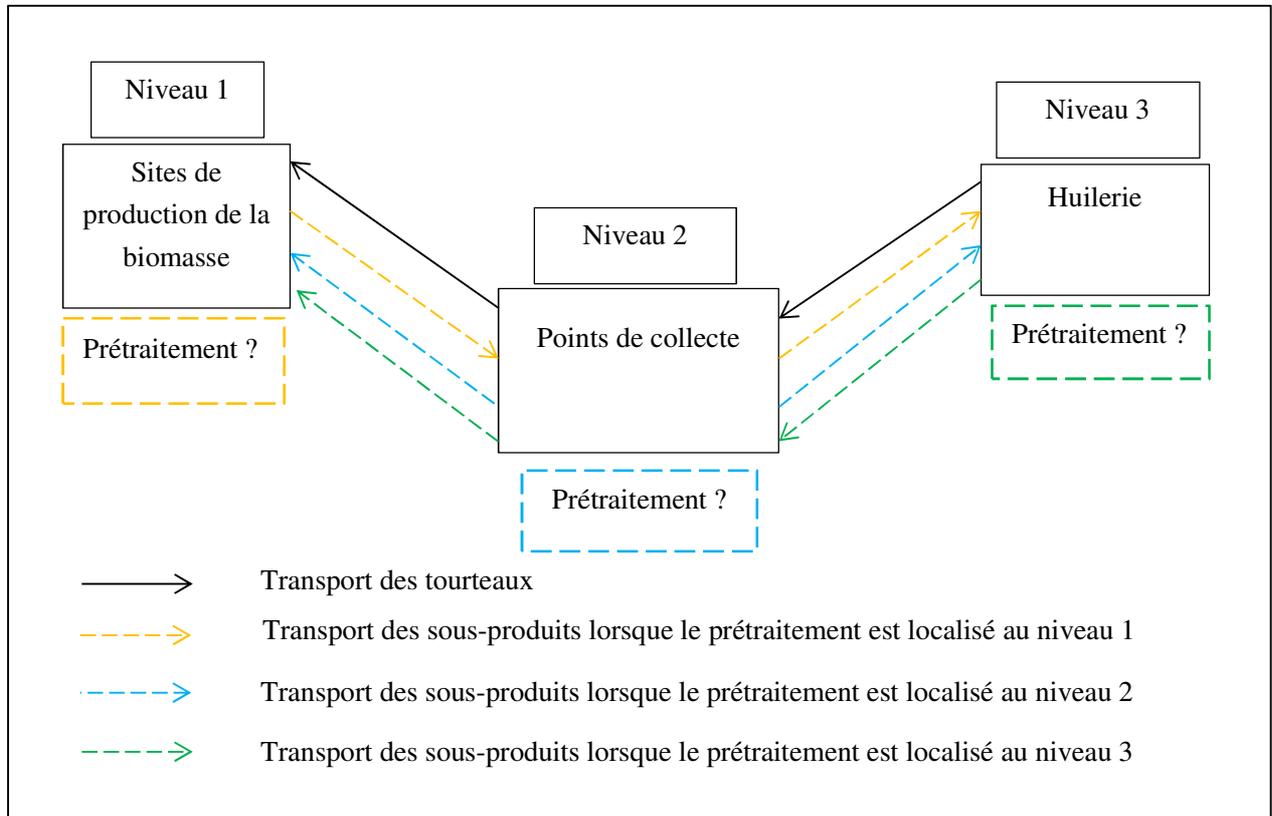


Figure 7. Flux possible des sous-produits dans la chaîne logistique.

Les sous-produits générés par le prétraitement et par l'extraction de l'HVC sont supposés avoir une valeur économique et/ou environnementale. Ils peuvent donc être valorisés par diverses voies tout en générant un gain économique et/ou environnemental aux acteurs de la chaîne logistique. Deux options sont possibles pour la valorisation des sous-produits : ils peuvent être (i) réutilisés dans les opérations de production et d'approvisionnement de la biomasse et/ou (ii) être vendus à des tiers. Avant d'être réutilisés ou avant d'être vendus, les sous-produits peuvent subir un traitement afin d'accroître leur valeur ajoutée.

L'usage de l'huile à la sortie de l'huilerie et l'usage des sous-produits vendus ne seront pas directement abordés. Nous supposons cependant que la production de l'huile dans cette étude est destinée à l'alimentation de moteurs diesels stationnaires ou pour l'alimentation d'unités de production de biodiesel. La norme de qualité des HVC prescrite par (J. Blin et al., 2014) devra donc être respectée pour toute huile à la sortie de l'unité de production de biocarburant. Il n'est cependant pas exclu que l'huile produite puisse alimenter d'autres marchés tels que celui de la savonnerie ou de l'alimentation humaine. Des filières de consommation parallèles de l'huile végétale peuvent en effet supporter les filières de production de biocarburants quand les conditions du marché des carburants ne sont pas favorables. Nous supposons aussi qu'en Afrique de l'Ouest, les tourteaux et sous-produits issus du prétraitement serviront à

la production de biocombustibles solides, à la fertilisation et à l'amendement des sites de production de la biomasse et à l'alimentation des animaux de rente (dans le cas où les sous-produits ne sont pas toxiques).

Les acteurs intervenant dans la chaîne logistique ont été classés selon leur fonction. Nous avons ainsi :

- Les producteurs de la biomasse qui assurent la culture et la récolte de la biomasse. Les transporteurs de la biomasse qui sont tout acteur intervenant dans le déplacement de la biomasse entre les différentes installations dans la chaîne logistique de la biomasse.
- Les collecteurs de la biomasse qui sont tous les acteurs intervenant dans la collecte de la biomasse. Leur rôle est de collecter la biomasse afin de faciliter sa réception à l'huilerie. Ils assurent aussi la liaison entre l'huilerie et les producteurs de la biomasse.
- Les agents de prétraitement sont tout acteur intervenant dans le prétraitement de la biomasse.

Un même acteur peut assurer plusieurs fonctions à la fois. Une partie ou la totalité du transport peut en effet être effectuée par les producteurs de la biomasse. Le prétraitement peut aussi être réalisé par les producteurs de la biomasse, par les agents de transport et par les collecteurs.

Un taux d'utilisation annuel a été attribué à chaque moyen de transport. En effet, dans les zones rurales d'Afrique de l'Ouest où l'agriculture familiale est pratiquée, les moyens de transport utilisés pour le transport de marchandises ne sont pas dédiés à une seule activité.

Les coûts unitaires des différentes opérations de la chaîne logistique ci-dessus décrites, ainsi que leur indicateur d'impact du potentiel de réchauffement climatique ont été estimés sur la base de la charge de travail, des intrants utilisés et des extrants générés (émissions directes et indirectes de CO₂, N₂O, NO, NH₃, CH₄, production de sous-produits) (voir Figure 8).

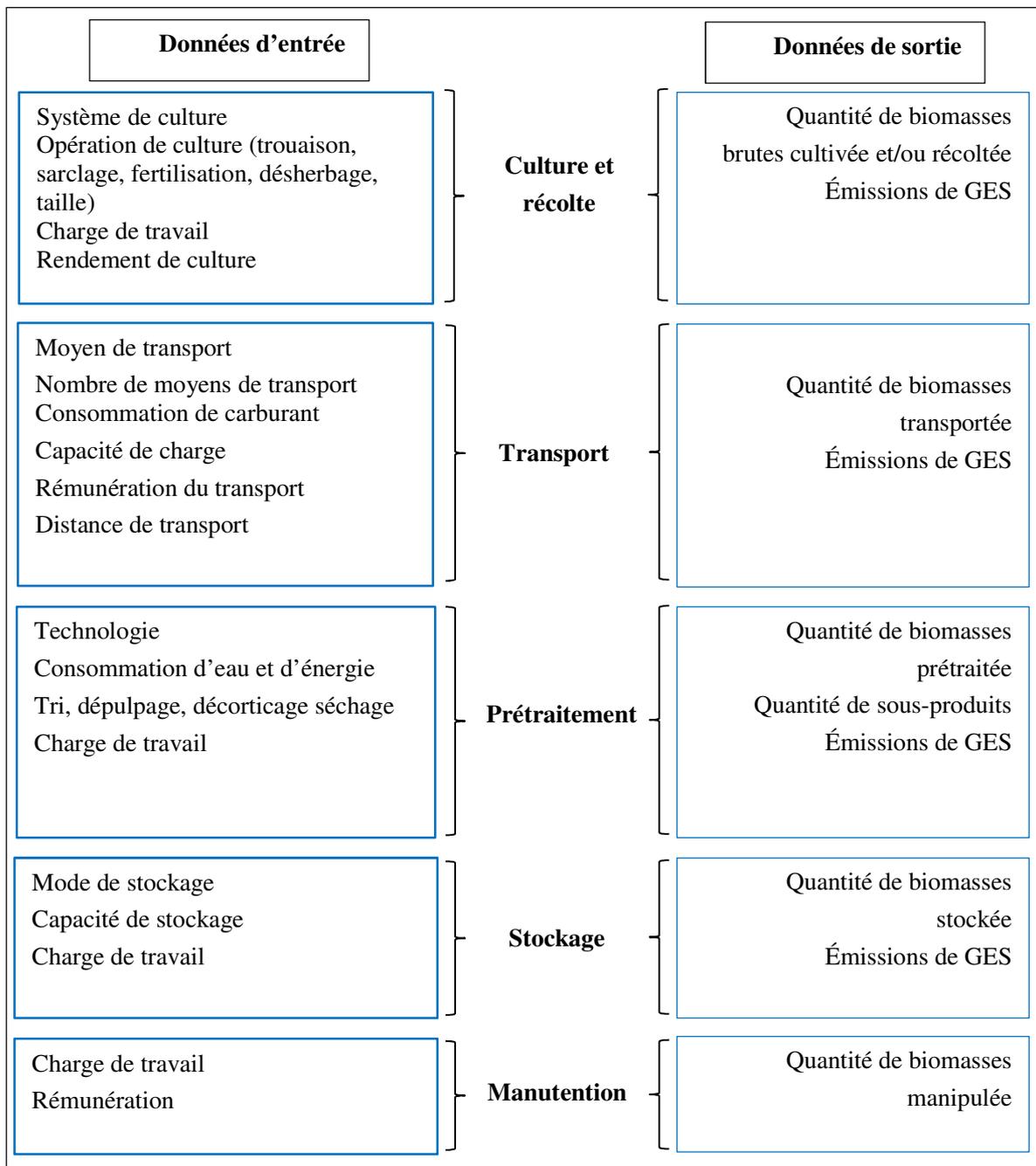


Figure 8 : Principales données d'entrée et de sortie des opérations de la chaîne logistique

1.3. Le système modélisé

Le système modélisé est le réseau d'approvisionnement en matière oléagineuse d'une unité de production de biocarburant. Ce réseau d'approvisionnement possède une structure à 3 niveaux et est composé :

- De sites de production de la biomasse (niveaux 1) (à déterminer).

- De points de rassemblement intermédiaires (niveau 2) (à déterminer).
- De sites d'extraction de l'huile végétale brute (niveau 3) (existants).
- D'un réseau routier reliant les différents sites ci-dessus cités (existants).
- D'infrastructures nécessaires pour cultiver, récolter, transporter, stocker et prétraiter la biomasse (existants).

Sur le plan géographique, le système étudié se restreint au périmètre englobant les éléments du réseau d'approvisionnement ci-dessus décrit.

1.4. Données du problème à optimiser

Les données du problème concernent en premier lieu la demande en biomasse (quantité et état de la biomasse) de l'huilerie qui doit à tout prix être satisfaite. Viennent ensuite les données sur la production de la biomasse, sur sa logistique d'approvisionnement et sur la valorisation des coproduits. Ainsi, les données sur la production de la biomasse se rapportent aux superficies disponibles des sites potentiels de production de la biomasse, aux données agronomiques relatives à chaque biomasse étudiée et aux caractéristiques des pratiques culturales pouvant être adoptées afin de cultiver cette biomasse. Ces pratiques culturales induisent chacune un rendement de culture, un coût de culture et de récolte ainsi que des indicateurs d'impact d'émission de GES qui leurs sont propres.

Les données sur la logistique d'approvisionnement concernent le nombre de sites et leur capacité d'accueil, les distances séparant les différents sites entre eux, les technologies de prétraitement et leur coût unitaire et indicateurs d'impact d'émission de GES. Les distances entre sites peuvent être calculées en ayant les coordonnées géographiques (ou tout autre type de coordonnées) de chacun des sites. Les données sur la logistique d'approvisionnement concernent également les types de moyens de transport disponibles sur chacun des sites dans le réseau logistique et leurs caractéristiques à savoir leur vitesse, capacité de charge, coût d'achat, coût opérationnel, consommation de carburant s'il y'a lieu, et les indicateurs d'impact d'émission de GES lié à leur utilisation.

Les données sur la valorisation des sous-produits sont la demande en sous-produits, le type de valorisation, le prix de vente unitaire et les indicateurs d'impact évités et engendrés résultants du type de valorisation des sous-produits.

1.5. Les attributs du modèle

Suivant le critère économique et suivant le critère environnemental, le modèle doit permettre de déterminer les quantités de fruits à produire et à récolter, sur quels champs potentiels, ainsi que la pratique culturale à adopter afin produire la demande en biomasse de l'huilerie. Il doit aussi permettre de déterminer, le niveau de localisation optimal du prétraitement en tenant compte des options de valorisation des coproduits. Il doit enfin permettre de définir la configuration du réseau d'approvisionnement, l'état et les quantités de biomasses à transporter, ainsi que les quantités de sous-produits à transporter en tenant compte de différents moyens qui peuvent être utilisés pour le transport de la biomasse.

De façon détaillée pour la production et la récolte de la biomasse, le modèle doit permettre de déterminer :

- Les superficies à mobiliser et les quantités de biomasses brutes à produire afin de satisfaire la demande de l'huilerie.
- La pratique culturale à adopter pour la culture de la plante énergétique.

Le choix de la pratique culturale et les quantités de biomasses brutes à produire prennent en compte les pertes de matières qui peuvent survenir entre la récolte et la conversion de la biomasse. Ils prennent aussi en compte le taux d'occupation des sites de production de la biomasse qui traduit le mode de culture de la plante énergétique (culture pure ou agroforesterie). Les contraintes à respecter concernent la superficie disponible des sites de production de la biomasse et la satisfaction de la demande en biomasse de l'huilerie.

Pour la logistique d'approvisionnement, le modèle doit permettre de déterminer :

- La localisation et le nombre de sites de production de la biomasse à choisir afin de produire la demande en biomasse ;
- La localisation des sites et le nombre de points de collecte afin de rassembler la biomasse ;
- Le niveau de localisation du prétraitement ;
- Les quantités par saison et l'état de la biomasse à transporter entre chaque site de production de la biomasse choisi et chaque point de collecte choisi ;
- Les quantités par saison et l'état de la biomasse à transporter entre chaque point de collecte choisi et l'huilerie.

Les contraintes majeures sont des contraintes de distance (distance maximale par voyage que peuvent parcourir les moyens de transport utilisés, les contraintes de capacité (capacité des moyens de transport utilisés, capacité d'accueil de chaque point de collecte) et les contraintes de satisfaction de la demande en biomasse par saison et à chaque niveau du réseau d'approvisionnement.

Concernant la valorisation des sous-produits, selon les choix de valorisation le modèle doit permettre de déterminer :

- Les sites optimaux de production des sous-produits (hors tourteaux) ;
- Les quantités de sous-produits à transporter et à valoriser afin de réduire le prix de revient de la biomasse.

Les choix de valorisation des sous-produits concernent le type de valorisation et les sites de retours des sous-produits qui peuvent soit être une donnée d'entrée du modèle, soit être déterminés par le modèle.

Après avoir défini le problème à modéliser et exposé la nature des données et des résultats attendus du modèle à construire, il est important de s'intéresser à sa nature afin de pouvoir opter pour une approche de modélisation représentant au mieux le problème décrit.

2. Complexité du problème modélisé

Une analyse des données du problème et des résultats que le modèle à construire devrait déterminer permet de s'apercevoir que le problème décrit tout au long du paragraphe 1 est un problème de prise de décisions à la fois stratégiques et tactiques auquel une unité de production de biocarburant peut faire face. Ce problème concerne la conception d'un réseau d'approvisionnement multi échelons (localisation et affectation d'infrastructures dans un système de production de biocarburant à trois niveaux) comportant des

contraintes de capacité et des contraintes sur l'état de la matière première transitant dans le réseau d'approvisionnement. Il concerne aussi l'organisation de la culture et de la récolte de la biomasse.

Un réseau multi-échelon est un réseau ayant différents types d'installations en interaction. Les décisions dans ce cas concernent l'emplacement et l'allocation d'installations qui interagissent dans une configuration à plusieurs niveaux.

Une partie de ce problème peut être réduit à un problème de localisation et d'allocation d'installations à capacité finie qui fait partie de la classe des problèmes NP-difficile (Mirchandani, 1990). En effet, comme pour le problème de localisation et d'allocation d'installations à capacité finie, le problème décrit considère des situations dans lesquelles une marchandise (la biomasse) demandée par un ensemble de clients (l'unité de production de la biomasse) leur est livrée à partir d'un sous-ensemble d'installations (sites de production de la biomasse et points de rassemblement) choisies parmi un ensemble d'installations potentielles. Il y a des coûts fixes liés à la localisation des installations et des coûts de transport pour acheminer la marchandise des sites de localisation potentiels des installations aux clients. De plus, il existe des restrictions de capacité pour les installations limitant ainsi les quantités de marchandise pouvant être produites, transportées et traitées.

Le décideur cherche une combinaison de coûts minimaux en termes d'installation à ouvrir et à affecter aux clients. Ce problème est également un problème d'optimisation combinatoire. C'est la raison pour laquelle il a été formulé sous la forme d'un programme linéaire à variable mixte qui est une approche quantitative permettant de modéliser les problèmes de prise de décision.

3. Formulation mathématique du problème

Le problème a été modélisé sous la forme d'un programme linéaire à variable mixte. Pour chacun des objectifs économique et environnemental, la formulation du problème a la même structure et se compose d'une fonction objectif à optimiser sous un ensemble de contraintes. Les éléments qui composent la formulation du modèle sont décrits dans les paragraphes suivants.

3.1. Les ensembles

Les ensembles sont présentés dans le Tableau 5

Tableau 5. Les ensembles

Ensembles	Indices
I = Sites de production de la biomasse	i
J = Points de rassemblement	j
K = Unité de production de biocarburant	k
B = Système de culture	b
T = Saisons	t
M = Moyens de transport	m
P = Niveaux de localisation du prétraitement	p
E = Sous-produits issus du prétraitement	e
U = Technologie de prétraitement	u

3.2. Les paramètres

Paramètres relatifs à la production de la biomasse.

$Q_{k,p}^t$ = demande en graines prêtes à être triturées de l'huilerie, quel que soit le niveau de localisation du prétraitement. Cette demande peut inclure les pertes potentielles de biomasse qui peuvent survenir pendant l'approvisionnement de la biomasse.

ST_i = superficie potentiellement exploitable d'un site de production de la biomasse i .

$Prod_b$ = productivité des plantes lorsque la pratique culturale b est adoptée.

$Nabr_i$ = nombre d'arbres par unité de surface.

$\eta_{i,b}$ = rendement de culture induit par la pratique culturale b sur le site de production de la biomasse i . Il dépend de la productivité des arbres et de leurs nombres. $\eta_{i,b} = Prod_b \cdot Nabr_i$

$Ccult_{i,b}$ = coût opérationnel de culture par unité de surface lorsque la pratique culturale b est employée sur le site de production de la biomasse i .

$Fcult_{i,b}$ = coût fixe de culture lié à l'adoption de la pratique culturale b sur le site de production de la biomasse i .

$Crec_{i,b}$ = coût de récolte par unité de surface lorsque la pratique culturale b est employée sur le site de production de la biomasse i .

$Frec_{i,b}$ = coût fixe de récolte lié à l'adoption de la pratique culturale b sur le site de production de la biomasse i .

$Icult_b$ = indicateur d'impact PRG de la culture lorsque la pratique culturale b est employée.

$Irec_b$ = indicateur d'impact PRG de la récolte lorsque la pratique culturale b est employée.

Paramètres relatifs à la logistique d'approvisionnement

τ = coefficient de tortuosité qui est le rapport entre la longueur réelle du chemin et sa longueur lorsqu'une ligne droite est considérée entre le point de départ et le point d'arrivée. Il permet de prendre en compte les sinuosités du chemin réel à parcourir.

Cap_j^t = capacité maximale d'accueil d'un point de collecte j à la saison t .

$d_{i,j}$, $d_{j,i}$ = distance aller et distance retour entre un site de production de la biomasse et un point de collecte j .

$d_{j,k}$, $d_{k,j}$ = distance aller et distance retour entre un point de collecte j et l'huilerie

$a_{i,j}$ = paramètre qui indique si un site de production de la biomasse i peut être potentiellement rattaché au point de collecte j . Le paramètre $a_{i,j}$ permet de déterminer les affectations potentielles de chaque site de production de la biomasse i à un point de collecte j . Au cas où un site de production de la biomasse i ne pourra être rattaché à aucun point de collecte j , il est retiré de la liste des sites de production de la biomasse. $a_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{si } d_{i,j} \leq d_m \cdot x_{m,i} \quad \forall i, j, m \\ 0 & \text{si non} \end{cases}$

m = moyens de transport m disponibles sur le site de production de la biomasse i .

d_m = distance maximale par voyage que peut parcourir un moyen de transport m .

$x_{m,i}$ = paramètre binaire qui détermine si un moyen m est disponible sur le site de production de la biomasse i .

$x_{m,j}$ = paramètre binaire qui détermine si un moyen m est disponible au point de collecte j .

C_m = coût de transport unitaire du moyen de transport m .

Q_m = capacité de charge du moyen de transport m .

Pr_m = prix d'achat du moyen de transport m .

I_m = indicateur d'impact PRG engendré par l'utilisation du moyen m .

$CSto_p$ = coût unitaire de stockage en fonction du niveau de localisation du prétraitement

$CMen_p$ = coût unitaire de manutention en fonction du niveau de localisation du prétraitement.

$ISto_p$ = indicateur d'impact PRG engendré par le stockage en fonction du niveau de localisation du prétraitement

$IMen_p$ = indicateur d'impact PRG engendré par la manutention en fonction du niveau de localisation du prétraitement.

$x_{u,p}$ = paramètre binaire qui décide du choix d'une technologie de prétraitement u lorsque le prétraitement p est choisi.

CV_u = coût opérationnel unitaire du prétraitement pour la technologie de prétraitement u .

CF_u = coût fixe unitaire du prétraitement pour la technologie de prétraitement u .

I_u = indicateur d'impact PRG engendré par la technologie de prétraitement u .

Paramètres relatifs à la valorisation des sous-produits

QT_{tourt} = quantité de tourteaux générée par l'extraction de l'huile végétale.

CW_{tourt} = coût unitaire lié au tourteau lorsqu'il est considéré comme un déchet.

IW_{tourt} = indicateur d'impact d'émission de GES lié au tourteau lorsqu'il est considéré comme un déchet.

Pv_{tourt} = prix unitaire de vente des tourteaux.

I_{tourt} = indicateur d'impact PRG de la valorisation des tourteaux.

IE_{tourt} = indicateur d'impact PRG lié aux émissions de GES évitées par la valorisation des tourteaux.

DEM_{tourt_h} = demande en tourteau à l'huilerie

$DEM_{tour_t_j}$ = demande en tourteau à un point de collecte j .

$DEM_{tour_t_i}$ = demande en tourteau sur un site de production de la biomasse i .

δ_e = fraction du sous-produit e obtenue à l'issue du prétraitement.

CW_e = coût unitaire lié au sous-produit e lorsqu'il est considéré comme un déchet.

Pv_e = Prix unitaire de vente du sous-produit e .

I_e = indicateur d'impact PRG de valorisation du sous-produit e .

IE_e = indicateur d'impact PRG lié aux émissions de GES évitées par la valorisation du sous-produit e .

3.3. Les variables de décision

Variables de décisions relatives au choix des sites et du niveau de localisation du prétraitement

$y_b \in \{0,1\}$ = variable binaire qui décide du choix d'une pratique culturale b .

$y_i \in \{0,1\}$ = variable binaire qui décide du choix d'un site de production de la biomasse i .

$y_j \in \{0,1\}$ = variable binaire qui décide du choix d'un point de collecte j .

$y_p \in \{0,1\}$ = variable binaire qui décide du niveau p de localisation du prétraitement.

$N_p \in \mathbb{N}$ = nombre de sites choisis lorsque le prétraitement est localisé au niveau p . Ce nombre dépend du nombre de sites ouverts à chaque niveau de la chaîne logistique.

$$N_p = \begin{cases} \sum_i y_i, & \text{si } p = \text{niveau 1} \\ \sum_j y_j, & \text{si } p = \text{niveau 2} \\ 1, & \text{si } p = \text{niveau 3} \end{cases}$$

Variables de décisions relatives aux flux d'approvisionnement de la biomasse

$S_i \in \mathbb{R}_+$ = superficie cultivée et récoltée du site de production de la biomasse i .

$S_{i,b} \in \mathbb{R}_+$ = résultante du produit $S_i \cdot y_b$ qui est un terme non linéaire dont la linéarisation correspond aux contraintes (2) à (4). $S_{i,b}$ est la superficie cultivée et récoltée du site de production de la biomasse i lorsque la pratique culturale b est employée.

$Q_i \in \mathbb{R}_+$ = quantité de biomasses produite et récoltée sur le site de production de la biomasse i . Il résulte du produit de la superficie et du rendement de culture. $Q_i = \sum_b S_{i,b} \cdot \eta_{i,b} \quad \forall i$.

$Q_{i,p} \in \mathbb{R}_+$ = résultante du produit $Q_i \cdot y_p$ qui est un terme non linéaire dont la linéarisation correspond aux contraintes (9) à (11). $Q_{i,p}$ est la quantité de biomasses disponible sur un site de production de la biomasse i lorsque le prétraitement p est considéré.

$Q_{i,j,p}^t \in \mathbb{R}_+$ = quantité de biomasses à transporter entre un site de production de la biomasse i et un point de collecte j à la saison t en fonction du niveau de localisation du prétraitement.

$Q_{j,k,p}^t \in \mathbb{R}_+$ = quantité de biomasse à transporter entre un point de collecte j et l'huilerie à la saison t en fonction du niveau de localisation du prétraitement.

$ZT_{e,i,p} \in \mathbb{R}_+$ = quantité du sous-produit e retirée sur un site de production de la biomasse i lorsque le prétraitement au niveau p est sélectionné.

$ZT_{e,j,p}^t \in \mathbb{R}_+$ = quantité du sous-produit e retirée sur un point de collecte j à la saison t lorsque le prétraitement au niveau p est sélectionné.

$ZT_{e,k,p}^t \in \mathbb{R}_+$ = quantité du sous-produit e retirée à l'huilerie à la saison t lorsque le prétraitement au niveau p est sélectionné.

Variables de décisions relatives à la valorisation des sous-produits

$Z_{e,i,p} \in \mathbb{R}_+$ = quantité du sous-produit e retirée sur un site de production de la biomasse i et valorisée sur ce même site de production de la biomasse.

$Z_{e,i,j,p}^t \in \mathbb{R}_+$ = quantité du sous-produit e retirée sur un site de production de la biomasse i à la saison t et transportée de ce site à un point de collecte j lorsque le prétraitement au niveau p est sélectionné.

$Z_{e,j,i,p}^t \in \mathbb{R}_+$ = quantité du sous-produit e , retirée sur un point de collecte j à la saison t et transportée de ce point de collecte à un site de production de la biomasse i un lorsque le prétraitement au niveau p est sélectionné.

$Z_{e,j,p}^t \in \mathbb{R}_+$ = quantité du sous-produit e retirée sur un point de collecte j à la saison t et valorisée sur ce même point de collecte.

$Z_{e,j,k,p}^t \in \mathbb{R}_+$ = quantité du sous-produit e retirée sur un point de collecte j à la saison t et transportée de ce point de collecte à l'huilerie lorsque le prétraitement au niveau p est sélectionné.

$Z_{e,k,p}^t \in \mathbb{R}_+$ = quantité du sous-produit e retirée à l'huilerie à la saison t et valorisée à l'huilerie.

$Z_{e,k,j,p}^t \in \mathbb{R}_+$ = quantité du sous-produit e retirée à l'huilerie à la saison t et transportée de l'huilerie à un point de collecte j lorsque le prétraitement au niveau p est sélectionné.

$Q_{tour_{j,i}} \in \mathbb{R}_+$ = quantité de tourteau transportée d'un point de collecte j à un site de production de la biomasse i .

$Q_{tour_{k,j}} \in \mathbb{R}_+$ = quantité de tourteau transportée de l'huilerie à un point de collecte j .

$Q_{tour_{t_i}} \in \mathbb{R}_+$ = quantité de tourteau valorisée sur un site de production de la biomasse i .

$Q_{tour_{t_j}} \in \mathbb{R}_+$ = quantité de tourteau valorisée sur un point de collecte.

$Q_{tour_{t_k}} \in \mathbb{R}_+$ = quantité de tourteau valorisée à l'huilerie.

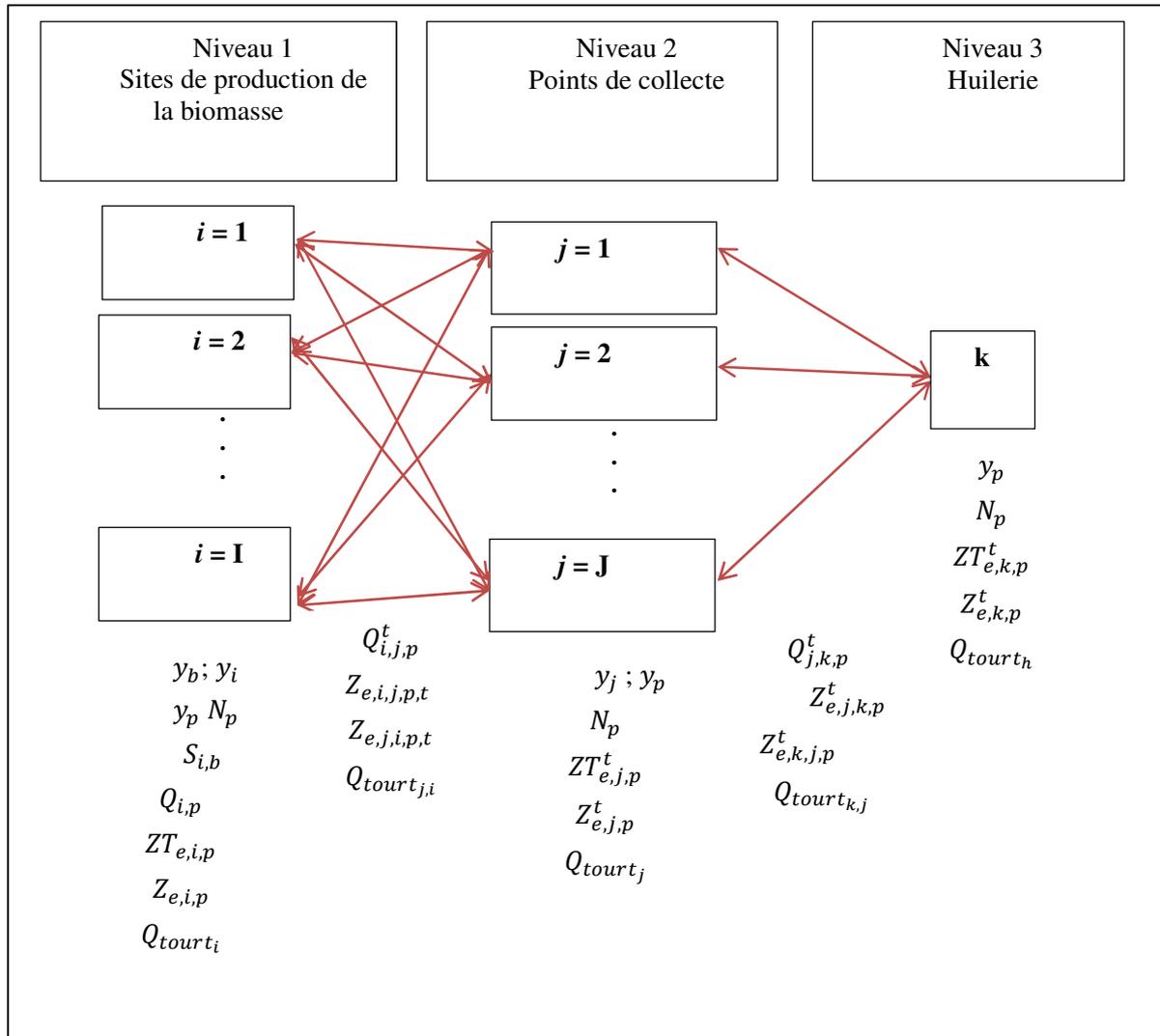


Figure 9. Vue générique de la structure du réseau logistique avec les variables de décision.

3.4. Fonctions objectif

3.4.1. Fonction objectif économique

La fonction objectif économique est composée de la somme d'un ensemble C de coûts élémentaires C_c de laquelle est soustraite le *Gain* de valorisation des sous-produits.

Le gain de valorisation des sous-produits est obtenu en soustrayant la somme de l'ensemble des coûts relatifs à la valorisation des sous-produits de la somme de l'ensemble G des recettes de vente élémentaire G_g (provenant de la valorisation économique des sous-produits).

Fonction objectif économique : $Minimiser(\sum_{c \in C} C_c - \sum_{g \in G} G_g)$

$$Gain = \sum_{g \in G} G_g - \sum_{c=15}^{c=19} C_c$$

Les coûts élémentaires liés à la production de la biomasse sont les suivants :

$C_1 = \sum_{i,b} C_{cult_{i,b}} \cdot S_{i,b}$, coût opérationnel de culture.

$C_2 = \sum_{i,b} F_{cult_{i,b}} \cdot y_{i,b}$, coût fixe de culture.

$C_3 = \sum_{i,b} C_{rec_{i,b}} \cdot S_{i,b}$, coût opérationnel de récolte.

$C_4 = \sum_{i,b} F_{rec_{i,b}} \cdot y_{i,b}$, coût fixe de récolte.

Les coûts élémentaires liés à l'approvisionnement de la biomasse sont les suivants :

$C_5 = \sum_{i,j,p,m,t} C_m \cdot x_{m,i} \cdot Q_{i,j,p}^t \cdot d_{i,j} \cdot \tau$, coût de transport de la biomasse entre les sites de production de la biomasse et les points de collecte.

$C_6 = \sum_{i,m} Pr_m \cdot x_{m,i} \cdot y_i$, coût fixe de transport entre les sites de production de la biomasse et les points de collecte. Il représente aussi le coût d'ouverture d'un site de production de la biomasse.

$C_7 = \sum_{j,k,p,m,t} C_m \cdot x_{m,j} \cdot Q_{j,k,p}^t \cdot d_{j,k} \cdot \tau$, coûts de transport de la biomasse entre les points de collecte et l'unité de production de biocarburant.

$C_8 = \sum_{j,m} Pr_m \cdot x_{m,j} \cdot y_j$, coût fixe de transport entre les points de collecte et l'unité de production de biocarburant. Il représente aussi le coût d'ouverture d'un point de collecte.

$C_9 = \sum_{j,k,p,t} Q_{j,k,p}^t \cdot C_{Sto_p}$, coût de stockage.

$C_{10} = \sum_{j,k,p,t} Q_{j,k,p}^t \cdot C_{Men_p}$, coût de manutention.

$C_{11} = \sum_{i,p,u} CV_u \cdot x_{u,p} \cdot Q_{i,p}$, coût opérationnel du prétraitement.

$C_{12} = \sum_{i,p,u} CF_u \cdot x_{u,p} \cdot N_p$, coût opérationnel du prétraitement.

$C_{13} = (\sum_{e,i,p} Z_{Te,i,p} + \sum_{e,j,p,t} Z_{Te,j,p,t} + \sum_{e,k,p,t} Z_{Te,k,p,t}) \cdot CW_e$, coût lié aux sous-produits considérés comme des déchets.

$C_{14} = Q_{tourt} \cdot CW_{tourt}$, coût lié aux tourteaux considérés comme des déchets.

Les coûts élémentaires liés aux flux inverses sont les suivants :

$C_{15} = \sum_{e,i,j,p,t,m} (Z_{e,i,j,p,t} \cdot d_{i,j} + Z_{e,j,i,p,t} \cdot d_{j,i}) \cdot C_m \cdot x_{m,i} \cdot \tau$, coût de transport des coproduits entre les points de collecte et les sites de production de la biomasse.

$C_{16} = \sum_{e,i,j,p,t,m} (Z_{e,j,k,p,t} \cdot d_{j,k} + Z_{e,k,j,p,t} \cdot d_{k,j}) \cdot C_m \cdot x_{m,j} \cdot \tau$, coût de transport des sous-produits entre l'huilerie et les points de collecte.

$C_{17} = Q_{Tourt} \cdot d_{k,j} \cdot x_{m,j} \cdot C_m \cdot \tau$, coût de transport des tourteaux entre un point de collecte j et un site de production de la biomasse i .

$C_{18} = Q_{Tourt} \cdot d_{k,j} \cdot x_{m,j} \cdot C_m \cdot \tau$, coût de transport des tourteaux entre l'huilerie et un point de collecte j .

Les recettes élémentaires g sont les suivants :

$G_1 = (\sum_{e,i,p} Z_{e,i,p} + \sum_{e,i,j,p,t} Z_{e,j,i,p,t}) \cdot Pv_e$, recette obtenue de la valorisation des sous-produits retournés sur les sites de production de la biomasse.

$G_2 = (\sum_{e,j,p,t} Z_{e,j,p,t} + \sum_{e,i,j,p,t} Z_{e,i,j,p,t} + \sum_{e,k,j,p,t} Z_{e,k,j,p,t}) \cdot Pv_e$, recette obtenue de la valorisation des sous-produits retournés aux points de collecte.

$G_3 = (\sum_{e,k,p,t} Z_{e,k,p,t} + \sum_{e,k,j,p,t} Z_{e,j,k,p,t}) \cdot Pv_e$, recette obtenue de la valorisation des sous-produits retournés à l'huilerie.

$G_4 = \sum_{i,j} Q_{Tourt\ j,i} \cdot P_{tourt}$, recette obtenue de la valorisation des tourteaux retournés sur les sites de production de la biomasse.

$G_5 = \sum_{j,k} Q_{Tourt\ k,j} \cdot P_{tourt}$, recette obtenue de la valorisation des tourteaux retournés aux points de collecte.

$G_6 = Q_{tourt} \cdot P_{tourt}$, recette obtenue de la valorisation des tourteaux à l'huilerie.

3.4.2. Fonction objectif environnement

La fonction objectif environnement est composée de la somme d'un ensemble F d'émissions de GES élémentaires CE_f , de laquelle est soustraite la somme d'un ensemble L de gains environnementaux élémentaires GE_l , généré par la valorisation des sous-produits.

Fonction objectif environnement : $Minimiser(\sum_{f \in F} CE_f - \sum_{l \in L} GE_l)$

Les émissions de GES élémentaires liées à la production de la biomasse sont les suivantes :

$CE_1 = \sum_{i,b} I_{cult_i} \cdot S_{i,b}$, émissions de GES générées par la culture de la biomasse.

$CE_2 = \sum_{i,b} I_{rec_i} \cdot S_{i,b}$, émissions de GES générées par la récolte de la biomasse.

Les émissions de GES élémentaires liées à l'approvisionnement sont les suivantes :

$CE_3 = \sum_{i,j,p,m,t} I_m \cdot x_{m,i} \cdot Q_{i,j,p}^t \cdot d_{i,j} \cdot \tau$, émissions de GES générées par le transport de la biomasse entre les sites de production de la biomasse et les points de collecte.

$CE_4 = \sum_{j,k,p,m,t} I_m \cdot x_{m,j} \cdot Q_{j,k,p}^t \cdot d_{j,k} \cdot \tau$, émissions de GES générées par le transport de la biomasse entre les points de collecte et l'unité de production de biocarburant.

$CE_5 = \sum_{j,k,p,t} Q_{j,k,p}^t \cdot I_{sto_p}$, émissions de GES générées par le stockage de la biomasse.

$CE_6 = \sum_{j,k,p,t} Q_{j,k,p}^t \cdot I_{men_p}$, émissions de GES générées par la manutention de la biomasse.

$CE_7 = \sum_{i,p,u} I_{u,i} \cdot x_{u,p} \cdot Q_{i,p}$, émissions de GES générées par le prétraitement de la biomasse.

$CE_8 = (\sum_{e,i,p} ZT_{e,i,p} + \sum_{e,j,p,t} ZT_{e,j,p,t} + \sum_{e,k,p,t} ZT_{e,k,p,t}) \cdot I_{we}$, émissions de GES liées aux sous-produits considérés comme des déchets.

$CE_9 = Q_{tourt} \cdot I_{wtour}$, émissions de GES liées aux tourteaux considérés comme des déchets.

Les émissions de GES élémentaires liées aux flux inverses sont les suivantes :

$CE_{10} = \sum_{e,i,j,p,t,m} (Z_{e,i,j,p,t} \cdot d_{i,j} + Z_{e,j,i,p,t} \cdot d_{j,i}) \cdot I_m \cdot x_{m,i} \cdot \tau$, émissions de GES générées par le transport des sous-produits entre les points de collecte et les sites de production de la biomasse.

$CE_{11} = \sum_{e,i,j,p,t,m} (Z_{e,j,k,p,t} \cdot d_{j,k} + Z_{e,k,j,p,t} \cdot d_{k,j}) \cdot C_m \cdot x_{m,j} \cdot \tau$, émissions de GES générées par le transport des sous-produits entre l'huilerie et les points de collecte.

$CE_{12} = Q_{Tourt\ j,i} \cdot d_{k,j} \cdot x_{m,j} \cdot C_m \cdot \tau$, émissions de GES générées par le transport des tourteaux entre un point de collecte j et un site de production de la biomasse i .

$CE_{13} = Q_{Tourt\ k,j} \cdot d_{k,j} \cdot x_{m,j} \cdot C_m \cdot \tau$, émissions de GES générées par le transport des tourteaux entre l'huilerie et un point de collecte j .

$CE_{14} = \sum_{e,i,j,k,p,t} (Z_{e,i,p} + Z_{e,j,p}^t + Z_{e,k,p}^t + Z_{e,i,j,p}^t + Z_{e,j,i,p}^t + Z_{e,j,k,p}^t + Z_{e,k,j,p}^t) \cdot IE_e$, émissions de GES générées par la valorisation des sous-produits.

$CE_{15} = (Q_{Tourt} + Q_{Tourt\ k,j} + Q_{Tourt\ j,i}) \cdot IE_{tourt}$, émissions de GES générées par la valorisation des tourteaux.

Les gains environnementaux élémentaires g sont les suivants :

$GE_1 = (\sum_{e,i,p} Z_{e,i,p} + \sum_{e,i,j,p,t} Z_{e,j,i,p,t}) \cdot IE_e$, gain obtenu de la valorisation des sous-produits retournés sur les sites de production de la biomasse.

$GE_2 = (\sum_{e,j,p,t} Z_{e,j,p,t} + \sum_{e,i,j,p,t} Z_{e,i,j,p,t} + \sum_{e,k,j,p,t} Z_{e,k,j,p,t}) \cdot IE_e$, gain obtenu de la valorisation des sous-produits retournés aux points de collecte.

$GE_3 = (\sum_{e,k,p,t} Z_{e,k,p,t} + \sum_{e,k,j,p,t} Z_{e,j,k,p,t}) \cdot IE_e$, gain environnemental de la valorisation des sous-produits retournés à l'huilerie.

$GE_4 = \sum_{i,j} Q_{Tourt\ j,i} \cdot IE_{tourt}$, gain environnemental de la valorisation des tourteaux retournés sur les sites de production de la biomasse.

$GE_5 = \sum_{j,k} Q_{Tourt\ k,j} \cdot IE_{tourt}$, gain environnemental de la valorisation des tourteaux retournés aux points de collecte.

$GE_6 = Q_{tourt} \cdot IE_{tourt}$, gain environnemental de la valorisation des tourteaux à l'huilerie.

3.4.3. Les contraintes

Les contraintes contenant des termes non linéaires ont été linéarisées en utilisant les techniques standards de linéarisation impliquant des variables binaires.

Les contraintes relatives à la production de la biomasse

$$\sum_t S_i \leq ST_i \cdot y_i, \forall i \quad (1)$$

La contrainte (1) assure que la superficie cultivée et récoltée de chaque site de production de la biomasse choisi ne dépassera pas la superficie disponible de ce site.

$$0 \leq S_i \leq ST_i, \forall i \quad (2)$$

$$0 \leq S_{i,b} \leq ST_i \cdot y_b \quad \forall i, b, \quad (3)$$

$$0 \leq S_i - S_{i,b} \leq ST_i \cdot (1 - y_b), \forall i, b \quad (4)$$

Les contraintes (2) à (4) permettent de linéariser le terme $S_i \cdot y_b$ qui calcule la superficie cultivée et récoltée du site de production de la biomasse i lorsque la pratique culturale b est adoptée.

$$\sum_b y_b = 1 \quad (5)$$

Afin d'harmoniser le coût de revient de la biomasse produite, une seule pratique culturale doit être employée pour tous les sites de production de la biomasse. La contrainte (5) assure le choix de cette unique pratique culturale pour tous les sites de production de la biomasse choisis. Étant donné qu'une seule pratique culturale peut être choisie, le remplacement des contraintes (2) à (4) par les contraintes (6) et (7) ci-dessous permet de consolider la relaxation linéaire du problème.

$$0 \leq \sum_b S_{i,b} \leq S_i \cdot \sum_b y_b \quad \forall i \quad (6)$$

$$0 \leq S_i - \sum_b S_{i,b} \leq S_i \cdot (1 - \sum_b y_b) \quad \forall i \quad (7)$$

$$\sum_i y_i \leq q \quad (8)$$

La contrainte (8) permet de limiter le nombre de sites de production de la biomasse, pouvant être choisi. Cette contrainte est facultative dans le cas où aucune limite n'existe sur le nombre de sites de production de la biomasse à choisir.

$$\sum_b S_{i,b} \cdot \eta_{i,b} \geq \sum_m Q_m \cdot x_m \cdot y_i \quad \forall i \quad (9)$$

La contrainte (9) définit la quantité minimale de biomasses à produire et à récolter sur chaque site de production de la biomasse.

Les contraintes relatives aux flux de biomasse

Selon le niveau de localisation du prétraitement, le flux de biomasse entre chaque site du réseau logistique peut correspondre (i) à la biomasse prétraitée, (ii) à la biomasse brute. L'équivalence ci-dessous est valide lorsque les masses de biomasses sont considérées :

Biomasse brute = Biomasse prétraitée + sous-produits issus du prétraitement

La biomasse prétraitée est demandée à l'huilerie, mais afin de permettre les flux de biomasse et de sous-produits, les flux transitant entre chaque site du réseau logistique ont été formulés de la sorte :

Flux entre un site d'origine et un site de destination	=	Quantité disponible sur le site d'origine en fonction du niveau de localisation du prétraitement	-	Quantité de sous- produits retirée au point d'origine en fonction du niveau de localisation du prétraitement
--	---	--	---	--

$$0 \leq Q_i \leq ST_i \cdot \sum_b \eta_{i,b} \quad \forall i \quad (10)$$

$$0 \leq Q_{i,p} \leq ST_i \cdot \sum_b \eta_{i,b} \cdot y_p \quad \forall i, p \quad (11)$$

$$0 \leq Q_i - Q_{i,p} \leq ST_i \cdot \sum_b \eta_{i,b} \cdot (1 - y_p) \quad \forall i, p \quad (12)$$

Les contraintes (10) à (12) permettent la linéarisation du terme $Q_i \cdot y_p$ qui calcule la quantité de biomasses disponible sur un site de production de la biomasse en fonction du niveau de localisation du prétraitement.

$$ZT_{e,i,p} = \begin{cases} Q_{ip} \cdot \delta_e, & \forall e, i, p | p = \text{niveau 1} \\ 0, & \forall e, i, p | p = \text{niveau 2} \\ 0, & \forall e, i, p | p = \text{niveau 3} \end{cases} \quad (13)$$

$$ZT_{e,j,p}^t = \begin{cases} 0, \forall e, j, t, p | p = \text{niveau 1} \\ \sum_i Q_{i,j,p}^t \cdot \delta_e, \forall e, j, t, p | p = \text{niveau 2} \\ 0, \forall e, j, t, p | p = \text{niveau 3} \end{cases} \quad (14)$$

$$ZT_{e,k,p}^t = \begin{cases} 0, \forall e, k, t, p | p = \text{niveau 1} \\ 0, \forall e, k, t, p | p = \text{niveau 2} \\ \sum_j Q_{j,k,p}^t \cdot \delta_e, \forall e, k, t, p | p = \text{niveau 3} \end{cases} \quad (15)$$

Les contraintes (13) à (15) calculent en fonction du niveau de localisation du prétraitement, la quantité de sous-produits retirée respectivement sur chaque site de production de la biomasse, sur chaque point de collecte et à l'huilerie.

$$\sum_j y_j \leq P \quad (16)$$

La contrainte (16) permet de limiter le nombre de points de collecte pouvant être choisi. Comme dans le cas des sites de production de la biomasse, cette contrainte est aussi facultative si aucune limite n'existe sur le nombre de points de collecte à choisir.

$$\sum_p y_p \leq 1 \quad (17)$$

La contrainte (17) assure que le prétraitement ne peut pas être localisé à plusieurs niveaux à la fois.

$$\sum_{j,t} Q_{i,j,p}^t \leq Q_{i,p} - \sum_e ZT_{e,i,p} \quad \forall i, p \quad (18)$$

La contrainte (18) assure que les quantités de biomasses, transportées entre chaque site de production de la biomasse choisi et chaque point de collecte choisi, ne peuvent pas dépasser les quantités de biomasses disponibles pour le transport sur chaque site de production de la biomasse choisi. Cette contrainte définit aussi l'état de la biomasse à transporter entre les sites de production de la biomasse et les points de collecte.

$$\sum_{i,p} Q_{i,j,p}^t \leq Cap_j^t \cdot y_j \quad \forall j, t \quad (19)$$

La contrainte (19) assure que la capacité maximale d'accueil d'un point de collecte choisi ne sera pas dépassée quel que soit le niveau de localisation du prétraitement et quelle que soit la saison.

$$\sum_k Q_{j,k,p}^t = \sum_i Q_{i,j,p}^t \cdot a_{i,j} - \sum_e ZT_{e,j,p}^t \quad \forall j, t, p \quad (20)$$

La contrainte (20) assure que les quantités de biomasses transportées entre chaque point de collecte choisi et l'huilerie, à chaque saison et selon le niveau de localisation du prétraitement ne peuvent pas dépasser les quantités de biomasses disponibles sur chaque point de collecte choisi. Cette contrainte définit aussi l'état de la biomasse à transporter entre les points de collecte et l'huilerie.

$$\sum_p Q_{j,k,p}^t \geq Dem_j \cdot y_j \quad \forall j, k, t \quad (21)$$

La contrainte (21) attribue une valeur minimale à la quantité de biomasses à transporter entre chaque point de collecte et l'huilerie.

$$\sum_j Q_{j,k,p}^t - ZT_{e,k,p}^t = Q_{k,p}^t \cdot y_p \quad \forall t, k, p \quad (22)$$

La contrainte (22) assure la satisfaction de la demande en biomasse prétraitée de l'huilerie.

Les contraintes relatives aux flux de sous-produits

Selon le niveau de localisation du prétraitement, la quantité de sous-produits à valoriser sur chaque site du réseau logistique peut correspondre (i) à la totalité ou à une partie des sous-produits retirés sur ce site, (ii) à la totalité ou à une partie des sous-produits retirés sur un autre site, mais transportés sur ce site.

$$Z_{e,i,p} \leq ZT_{e,i,p}, \forall e, i, p \quad (23)$$

$$Z_{e,i,j,p}^t \leq ZT_{e,i,p}, \forall e, i, p, t \quad (24)$$

$$Z_{e,i,p} + \sum_t Z_{e,i,j,p}^t \leq ZT_{e,i,p}, \forall e, i, p \quad (25)$$

Les contraintes (23) à (25) assurent que les flux de sous-produits provenant de chaque site de production de la biomasse ne dépassent pas la quantité de sous-produits retirée sur chacun de ces sites.

$$Z_{e,j,p}^t \leq ZT_{e,j,p}^t, \forall e, j, p, t \quad (26)$$

$$\sum_k Z_{e,j,k,p}^t \leq ZT_{e,j,p}^t, \forall e, j, p, t \quad (27)$$

$$\sum_i Z_{e,j,i,p}^t \leq ZT_{e,j,p}^t, \forall e, j, p, t \quad (28)$$

$$Z_{e,j,p}^t + \sum_k Z_{e,j,k,p}^t + \sum_i Z_{e,j,i,p}^t \leq ZT_{e,j,p}^t, \forall e, j, p, t \quad (29)$$

Les contraintes (26) à (29) assurent que les flux de sous-produits provenant de chaque point de collecte ne dépassent pas la quantité de sous-produits retirée sur chacun de ces points de collecte.

$$Z_{e,k,p}^t \leq ZT_{e,k,p}^t, \forall e, k, p, t \quad (30)$$

$$\sum_j Z_{e,k,j,p}^t \leq ZT_{e,k,p}^t, \forall e, k, p, t \quad (31)$$

$$Z_{e,k,p}^t + \sum_j Z_{e,k,j,p}^t \leq ZT_{e,k,p}^t, \forall e, k, p, t \quad (32)$$

Les contraintes (30) à (32) assurent que les flux de sous-produits provenant de l'huilerie ne dépassent pas la quantité de sous-produits retirée à l'huilerie.

$$\sum_{i,p} Z_{e,i,p} + \sum_{i,j,p} Z_{e,i,j,p}^t + \sum_{j,p} Z_{e,j,p}^t + \sum_{i,j,p} Z_{e,j,i,p}^t + \sum_{j,k,p} Z_{e,j,k,p}^t + \sum_{k,p} Z_{e,k,p}^t + \sum_{j,k,p} Z_{e,k,j,p}^t = Dem_e^t \quad (33)$$

La contrainte (33) assure que la demande saisonnière en sous-produit e à valoriser sera satisfaite. Cette contrainte est facultative dans le cas où la quantité de sous-produits à valoriser n'est pas connue.

$$Q_{tourt_k} \leq QT_{tourt} \quad (34)$$

$$\sum_{i,j} Q_{tourt_{j,i}} \leq QT_{tourt} \quad (35)$$

$$\sum_{j,k} Q_{tourt_{k,j}} \leq QT_{tourt} \quad (36)$$

$$Q_{tourt_k} + \sum_{i,j} Q_{tourt_{j,i}} + \sum_{j,k} Q_{tourt_{k,j}} \leq QT_{tourt} \quad (37)$$

Les contraintes (34) à (37) assurent que les flux de tourteaux ne dépassent pas la quantité de tourteaux générée à l'huilerie.

$$Q_{tourt_k} = DEM_{tourt_k} \quad (38)$$

$$\sum_{i,j} Q_{tourt_j} = DEM_{tourt_j} \quad (39)$$

$$\sum_{j,k} Q_{tourt_i} = DEM_{tourt_i} \quad (40)$$

Les contraintes (38) à (40) assurent que la demande en tourteau sera satisfaite.

Conclusion

Dans ce chapitre, un modèle d'optimisation de la structure du réseau d'approvisionnement en biomasse oléagineuse intégrant le contrôle des activités de culture de la biomasse a été construit. Ce modèle de programmation mathématique a été construit avec pour objectif de minimiser les coûts totaux et les impacts d'émissions de gaz à effet de serre liés à la production de la biomasse, à sa logistique d'approvisionnement et à la valorisation des sous-produits issus du prétraitement et de l'extraction de l'huile végétale carburant. Ce modèle doit permettre de déterminer la configuration du réseau logistique permettant un approvisionnement optimal des unités de production de biocarburant en biomasse.

Le prochain chapitre est dédié à la résolution du problème d'optimisation et à l'implémentation du modèle construit sur un cas d'étude d'approvisionnement en graines de *Jatropha curcas* et en graines de *Balanites aegyptiaca* pour la production d'huile végétale carburant en Afrique de l'Ouest.

Chapitre 4 : Implémentation du modèle d'optimisation

Introduction

Ce chapitre présente l'implémentation du modèle d'optimisation de l'approvisionnement en biomasse oléagineuse décrit au chapitre 3. L'implémentation du modèle a pour objectif de démontrer l'aptitude du modèle développé à être un système d'aide à la décision pour les acteurs du domaine de la production des biocarburants en Afrique de l'Ouest. Cette aptitude concerne la capacité du modèle développé à trouver les meilleures alternatives et options de configuration de la chaîne logistique permettant de minimiser les coûts et les impacts du potentiel de réchauffement global (PRG) de l'approvisionnement en biomasse oléagineuse dans le contexte ouest africain. L'implémentation du modèle a également pour objectif de définir les conditions de conception de filières de production de biocarburants à base de *Jatropha* et de *Balanites* permettant de minimiser les coûts et impacts des émissions de GES de l'approvisionnement de ces deux biomasses et de biomasses semblables en Afrique de l'ouest.

La première partie de ce chapitre décrit le cas d'étude sur lequel le modèle a été implémenté. Ce cas d'étude a été construit sur la base des filières existantes au Burkina Faso et au Mali et qui ont été décrites au paragraphe 1.4 du chapitre 2. Les données du cas d'étude sont en lien avec le problème d'optimisation objet du modèle d'optimisation et dont la description détaillée a été faite au paragraphe 1 du chapitre précédent. Dans ce cas d'étude, différents moyens de transport de la biomasse et différentes technologies de prétraitement ont été implémentés à travers quatre scénarios. Différentes options de valorisation des sous-produits ont été également implémentés à travers deux cas. Une étude comparative des coûts et impacts environnementaux optimaux des deux biomasses étudiées a été aussi réalisée. Pour chacun des scénarios implémentés, le modèle permet de déterminer le système de culture et la superficie optimale pour la production de la biomasse ; la configuration du réseau logistique (nombre, localisation et allocation des différentes installations) ; l'emplacement optimal des opérations du prétraitement ; les quantités de biomasse à transporter, manipuler et stocker ; les quantités de sous-produits à valoriser et les sites optimaux pour leur valorisation. Le modèle permet également de déterminer pour chaque scénario implémenté les coûts totaux et les impacts du potentiel de réchauffement global de l'approvisionnement en biomasse et de la valorisation des sous-produits ; les gains économique et environnementaux attachés à la valorisation des sous-produits.

La deuxième partie de ce chapitre présente les résultats de l'implémentation du modèle, ainsi que l'analyse et les discussions des résultats obtenus.

1. Description du cas d'étude

Le cas d'étude a été construit dans le contexte socio-économique et environnemental du Burkina Faso et au Mali. En raison du manque de données fiables sur certains paramètres, des hypothèses ont été formulées sur la base des travaux dans la littérature et sur la base d'opinions d'experts. Par conséquent, les coûts calculés peuvent refléter les coûts réels qui pourraient être observés en Afrique de l'Ouest.

Dans tout le cas d'étude, il a été supposé qu'un jour de travail équivaut à huit heures de travail. Le salaire journalier minimum pour les ouvriers agricoles est de 1363,91 XOF / jour au Burkina Faso (XOF est le franc CFA d'Afrique de l'Ouest). Le coût de l'eau est de 1091 XOF/m³ selon l'office nationale de

l'eau et de l'assainissement (ONEA), le coût de l'électricité est de 114 XOF/kWh selon la société nationale d'électricité du Burkina Faso (SONABEL) 2018 et le coût du gasoil est de 526 XOF/L selon la société nationale burkinabè des hydrocarbures (SONABHY).

1.1. Demande en biomasse

Deux huileries, l'une exploitant les graines de *Jatropha curcas* (Jatropha) et l'autre les amandes de *Balanites aegyptiaca* (Balanites) sont considérées pour ce cas d'étude.

Chacune des huileries étudiées a une durée de fonctionnement de 15 ans (qui correspond à la durée de vie des machines présentées au paragraphe 1.5 ci-dessous) et une demande en biomasse prétraitée (amandes de Balanites et graines de Jatropha) de 300 t/an. Pour l'huilerie exploitant le Balanites, 300 t d'amandes correspondent à une quantité de fruits à récolter de 2 500 t/an, car les amandes représentent 12% du poids des fruits secs. Pour l'huilerie exploitant le Jatropha, 300 t de graines correspondent à une demande en fruits d'environ 480 t, car les graines de Jatropha représentent 62,5 % du poids des fruits secs. La Figure 10 et la Figure 11 ci-dessous présentent le bilan de matière considéré dans le cas d'étude pour 100 kg de biomasse brute de chacune des cultures énergétique étudiée.

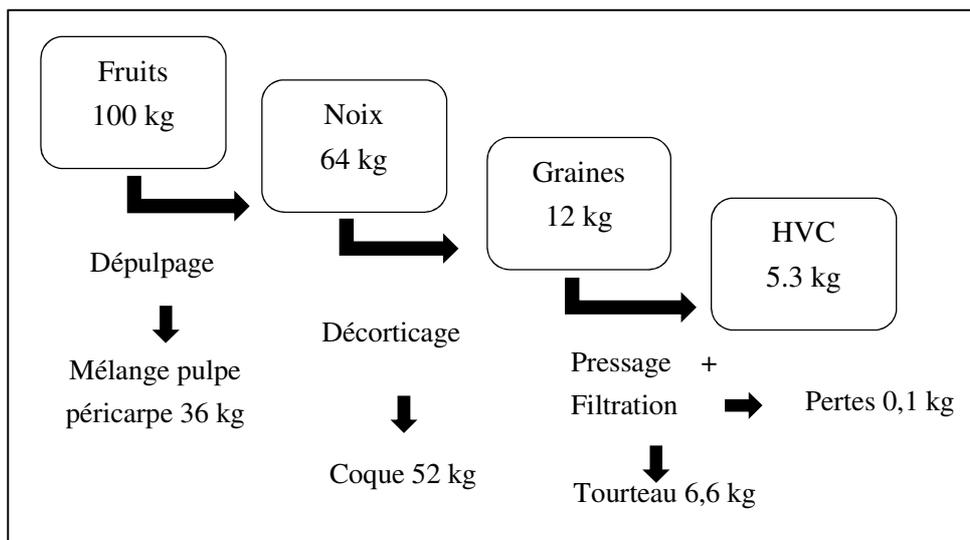


Figure 10. Bilan de matière jusqu'à la production de l'HVC de Balanites

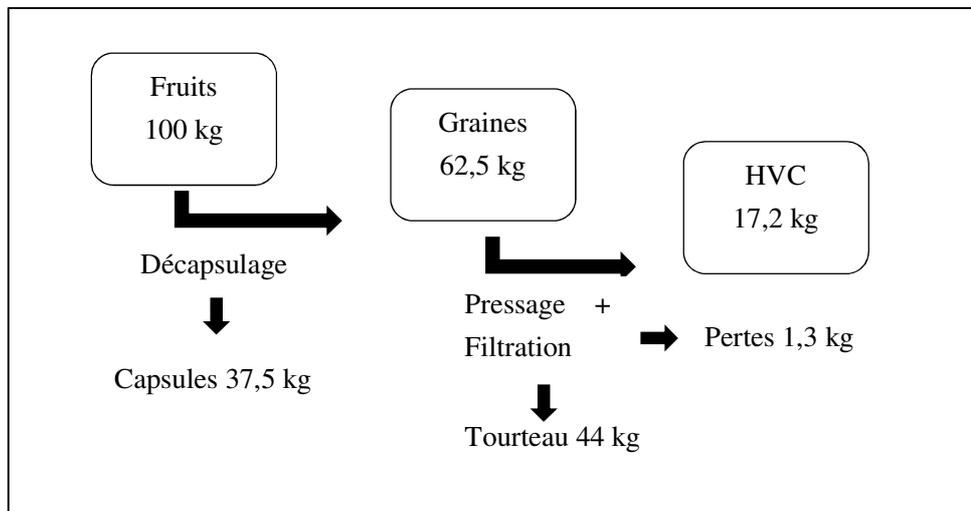


Figure 11. Bilan de matière jusqu'à la production de l'HVC de Jatropha

1.2. Réseau d'approvisionnement en biomasse

L'huilerie exploitant le Jatropha est située dans la région sud-soudanienne (Sud et Sud-Ouest) du Burkina Faso, une région où les conditions pédoclimatiques sont propices à la croissance des arbres de Jatropha et où les meilleurs rendements en graines ont été enregistrés (Bazongo et al., 2016). L'huilerie exploitant le Balanites est située dans la région sahélienne (Nord) du Burkina Faso, région où l'espèce *Balanites aegyptiaca* est abondante (Sop et al., 2011). Ces deux zones sont frontalières avec le Mali. Dans chacune de ces régions, le nombre et les coordonnées géographiques, des sites de production de biomasse, des points de collecte et de l'huilerie ont été choisis de façon aléatoire dans une zone géographique ayant un périmètre de 240 km et une largeur de 60 km, ce qui peut être assimilé au périmètre moyen d'un département au Burkina Faso et au Mali. Le réseau d'approvisionnement résultant (dont la structure est présentée à la Figure 12) a été utilisé pour toute l'étude.

Ces données aléatoires de la configuration du réseau d'approvisionnement n'empêchent pas les résultats obtenus de refléter la réalité au Burkina Faso et au Mali. En effet, pour un quelconque réseau d'approvisionnement réel considéré, il n'y a aucune garantie que sa configuration suivra une logique particulière. Pourtant, le modèle construit et décrit au chapitre précédent doit être capable de traiter un réseau d'approvisionnement, quelle que soit sa configuration. C'est la raison pour laquelle une analyse de sensibilité a été réalisée sur le périmètre du réseau d'approvisionnement.

Toutes les distances dans le réseau d'approvisionnement considéré sont des distances euclidiennes auxquelles un facteur de tortuosité a été appliqué afin de prendre en compte que les routes réelles ne suivent pas des lignes droites. En l'absence de connaissances sur le réseau routier de la zone d'étude, la valeur du facteur de tortuosité ne peut qu'être estimée. Pour cette étude, sa valeur a été fixée à $\sqrt{2}$ en prenant comme hypothèse que la distance en ligne droite est la diagonale d'un carré dont les côtés représentent le chemin réel.

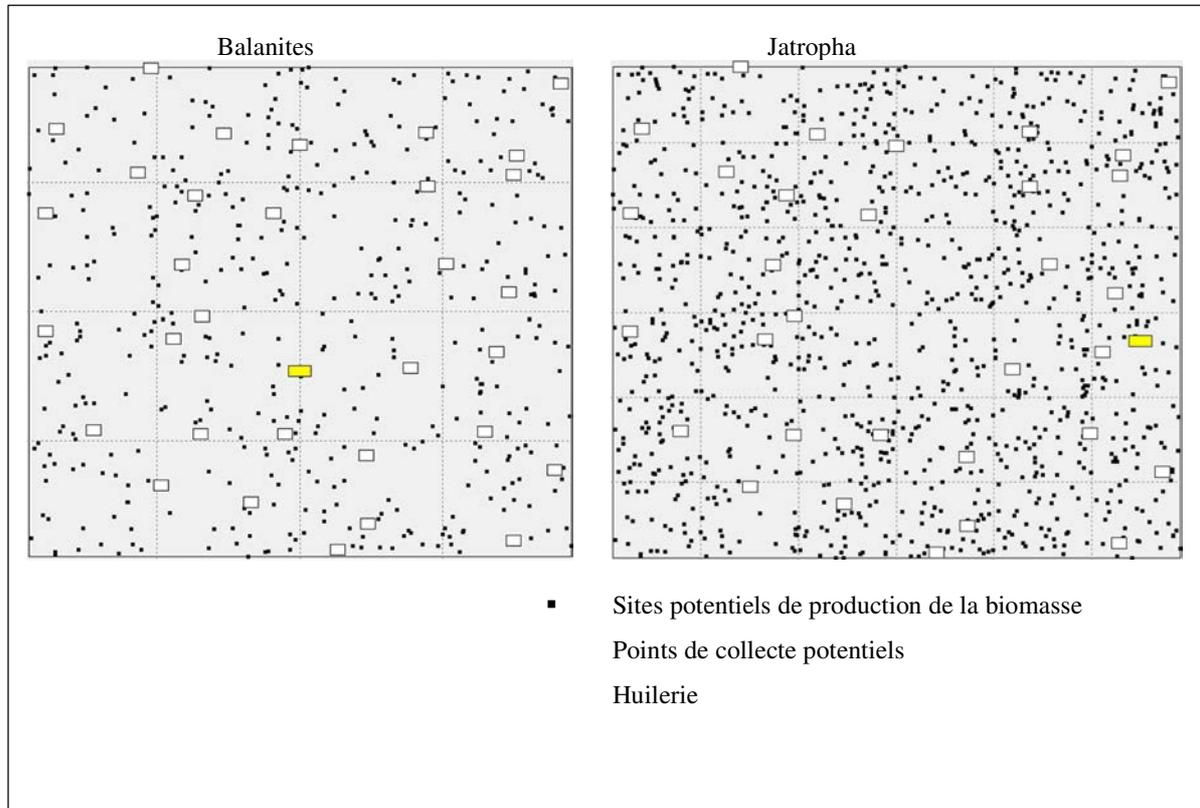


Figure 12. Aspect du réseau contenant l'ensemble des sites potentiels pour l'approvisionnement en amandes de Balanites et de Jatropha

1.3. Production de la biomasse

Autour des huileries, plusieurs sites potentiels pour la production de Balanites ou de Jatropha ont été identifiés.

La superficie des sites de culture du Jatropha a été distribuée aléatoirement dans la fourchette de valeur de 0,25 ha à 4 ha et avec la distribution décrite par (Zongo et al., 2015), de sorte que :

- 56% des sites de culture ayant entre 0,25 et 1 ha,
- 26% des sites de culture ayant 1 ha,
- 13% des sites de culture ayant 2 ha,
- 4% des sites de culture ayant 3 ha,
- 1% des sites de culture ayant 4 ha.

Comme le Balanites est une plante sauvage, la superficie des sites potentiels de production de ses fruits a été distribuée aléatoirement dans une fourchette plus grande allant de 2 ha à 10 ha.

1.3.1. Récolte des fruits du Balanites.

Une densité d'arbres comprise entre 25 et 45 arbres/ha a été affectée aux sites de production de Balanites. En effet, selon (John B Hall, 1992), une densité allant de 25 à 50 arbres est acceptable pour une région où le Balanites est abondant.

Une productivité des arbres de 52 kg de fruits par arbre (Chapagain et al., 2009) a été considérée et le coût unitaire de récolte a été calculé sur la base d'une vitesse de récolte des fruits de 9,24 kg/h trouvés par (Füllemann, 2015) pour une densité de 20 arbres/ha et un rendement en fruit de 545,43 kg/ha. Ce coût unitaire présenté au Tableau 6 est supposé constant, quelle que soit la densité des arbres du Balanites. La raison de cette hypothèse est la maturité décalée des fruits du Balanites qui induit la nécessité de multiples passages pour la récolte des fruits. Cette récolte a lieu pendant la saison sèche (entre octobre et janvier selon (Ndoye et al., 2004)). Étant donné ces multiples passages nécessaires pour la récolte des fruits du Balanites, il a été supposé que la quantité de fruits récoltés par passage puisse varier en fonction de la productivité des arbres.

Tableau 6. Données sur la récolte du Balanites

Densité (arbre/ha)	25	30	35	40	45
Productivité en graines (kg/arbre)	6,24	6,24	6,24	6,24	6,24
Productivité en fruits (kg/arbre)	52	52	52	52	52
Coût unitaire de récolte (XOF/ha)	10 915				

1.3.2. Culture et récolte des fruits du Jatropha

La culture intercalaire (mélange de 2 cultures différentes sur le même terrain) est la pratique majoritairement rencontrée dans la zone sud-soudanienne du Burkina Faso (Bazongo et al., 2016). C'est la raison pour laquelle deux des systèmes de cultures intercalaires du Jatropha (culture intercalaire, culture intercalaire intensive) décrits par (Baumert et al., 2018) au Burkina Faso ont été retenus comme possibles pour le cas d'étude. Dans le système de culture intercalaire, les plants de Jatropha sont plantés en association avec des cultures annuelles. Ces plants de Jatropha bénéficient de l'entretien et de l'engrais qui sont apportés uniquement à la culture annuelle associée. Dans le système de culture intercalaire intensif, les plants de Jatropha sont également plantés en association avec des cultures annuelles. Mais contrairement au système de culture intercalaire, ici, ces plants de Jatropha sont entretenus par les opérations de labourage, désherbage, élagage etc... De l'engrais NPK (azote, phosphore, potassium) et de l'urée sont aussi appliqués aux plants de Jatropha. Pour plus de détails sur ces deux systèmes de culture, voir (Baumert et al., 2018).

Étant donné que la pratique de l'agriculture familiale est considérée dans le cas d'étude, l'irrigation et l'utilisation de pesticides rapportée par (Baumert et al., 2018) n'ont pas été pris en compte. De plus, les opérations de culture effectuées mécaniquement ont été remplacées par leurs équivalents manuels. Les caractéristiques de ces systèmes de culture sont décrites dans le Tableau 7.

Concernant le coût unitaire de culture et de récolte de chacun des systèmes de culture, ceux-ci ont été calculés sur la base de la charge de travail qu'ils induisent et en tenant compte des intrants utilisés. Ces coûts de culture et de récolte sont indiqués au Tableau 7. Le prix d'achat de l'urée et de l'engrais NPK utilisés dans le système de culture avec apport d'engrais est de 12 000 XOF le sac 50 kg chacun (MAAH, 2017) soit 240 XOF par kg d'engrais. L'engrais NPK utilisé est supposé être le NPK 14-23-14 dont l'utilisation a été rapportée dans les travaux suivants au Burkina Faso (AFO, 2016; Koala and Bélem, 2018). Quant à l'urée, sa teneur en azote est estimée à 23% (Baumert et al., 2018). Le modèle proposé par (Gareth D Borman et al., 2013) pour le calcul de la vitesse de récolte du Jatropha (en kg/homme-jour) a été utilisé pour évaluer la charge de travail de récolte. Le système agricole au Burkina Faso étant caractérisé en majorité par la pratique de l'agriculture familiale, il a été supposé que les cultivateurs possèdent déjà les terres et l'équipement nécessaire pour la culture et la récolte de la biomasse brute. Par conséquent, les coûts d'achat d'équipements et le coût d'achat des terres pour la culture n'ont pas été considérés.

Concernant les indicateurs d'impacts du potentiel de réchauffement global (PRG) de la culture du Jatropha, ceux-ci ont été calculés sur la base de la quantité d'azote contenue dans les engrais utilisés et en suivant le modèle d'émission décrit par (Meneghel Fonseca Leticia, 2011). Les émissions de GES considérées sont les émissions directes et indirectes dans l'air d'éléments azotés (NH₃, N₂O, NO) et les potentielles émissions de méthane liées à l'utilisation des animaux pour le travail du sol des sites de production de la biomasse. Les hypothèses pour le calcul des émissions de GES liées à l'utilisation des fertilisants sont présentées en annexe 1

Les indicateurs d'impact du PRG de la culture ont été calculés sur une durée de vie des plantations estimée à 20 ans et sans considérer la fin de vie du Jatropha. Ces indicateurs d'impact du PRG de la culture du Jatropha sont indiqués au Tableau 7.

Tableau 7. Données de culture et de récolte du Jatropha

Systèmes de culture	Système de culture intercalaire	Système de culture intercalaire intensif
Densité d'arbre (arbres/ha)	625	625
Rendement en graines (kg/ha)	810	950
Rendement en fruits (kg/ha)	1296	1520
Productivité en graines (kg/arbre)	1,3	1,5
Productivité en Fruits (kg/arbre)	2,1	2,4
Quantité d'urée par an (kg/ha)	0,0	100,0
Quantité d'engrais NPK par an (kg/ha)	0,0	150,0
Charge de travail de culture par an (h/ha)	97,6	129,4
Charge de travail de récolte des graines par an (kg/homme-jour)	37,7	40,9
Charge de travail de récolte des fruits par an (kg/homme-jour)	60,3	65,5
Coûts		

Coûts de l'urée (XOF/ha)	0	24 000
Coût de l'engrais NPK (XOF/ha)	0	36 000
Coût du travail de culture des fruits (XOF/ha)	16 640	22 061
Coût total de culture (XOF/ha)	16 640	82 061
Coût total du travail de récolte des fruits (XOF/ha)	29 300	31 655
Indicateur d'impact du PRG moyen de la culture (kg eq CO2/ha)	0,000125	0,0643
Indicateur d'impact du PRG moyen de la récolte (kg eq CO2/ha)	0	0

Pour le système de culture intercalaire, les émissions de GES liées à l'utilisation des engrais ne sont pas imputables à la culture du *Jatropha* puisque l'engrais est appliqué à la plante adjacente à la différence du système de culture intercalaire intensif où les engrais sont appliqués aux plants de *Jatropha*.

Les émissions de GES engendrés par l'utilisation des bœufs pour le sarclage dans les deux systèmes de culture ont été prises en compte.

1.4. Collecte, stockage et manutention de la biomasse

Pour la collecte des deux biomasses, chaque potentiel point de collecte de la biomasse est censé pouvoir accueillir la moitié de la demande totale en biomasse brute sur une période d'une année et pour qu'un point de collecte potentiel soit sélectionné, il doit pouvoir collecter au moins 10 tonnes de biomasses par an. Ces 10 t représentent la capacité de charge des camions utilisés pour le transport de la biomasse.

Aux points de collecte, la biomasse est mise dans des sacs en polypropylène avant d'être transportée et stockée à l'huilerie. Un sac plein contenant du *Jatropha* pèse 55 kg s'il contient des fruits et 60 kg s'il contient des graines. Un sac plein contenant du *Balanites* pèse quant à lui 60 kg s'il contient des fruits et 70 kg s'il contient des graines. 17 et 19 sacs sont alors nécessaires pour le transport respectif d'une tonne de graines et d'une tonne de fruits de *Jatropha*. Pour le *Balanites*, 15 et 17 sacs sont nécessaires pour transporter respectivement une tonne de graines et une tonne de fruits. Ces sacs sont utilisables deux fois pour le *Jatropha* contre une seule fois pour le *Balanites*. L'utilisation unique des sacs pour le *Balanites* a été observée et est liée au fait qu'après transport et stockage des fruits, la pulpe adhère aux sacs, provoquant leurs déchirures lorsque les fruits doivent en être retirés.

Le coût du stockage (voir Tableau 8) a été supposé égal au coût total des sacs dans lesquels la biomasse est ensachée pour le transport. Le coût d'un sac est de 250 XOF (Allard, 2010; SP/CPSA, 2002).

Le coût de manutention est de 100 XOF pour un sac plein de biomasses (SP/CPSA, 2002).

L'indicateur d'impact du PRG pour le stockage dans les sacs en polypropylène (voir Tableau 8) a été calculé en considérant le matériau « polypropylen granulate » de la base de données « ecoinvent » (Wernet et al., 2016). Les caractéristiques suivantes ont été considérées pour une face du sac : longueur 0,7 m, largeur 0,5 m, densité 100 g/m².

La manutention étant réalisée manuellement par des hommes, aucune émission de GES ne lui a été attribuée.

Tableau 8. Données du stockage

Biomasse		Coût unitaire (XOF/t)	Indicateur d'impact moyen (kg eq CO ₂ /t)
Balanites	Graines	3570	2,1398
	Fruits	4170	2,4251
Jatropha	Graines	4170	1,2125
	Fruits	4545	1,3552

1.5. Prétraitement de la biomasse

En raison de l'accès difficile à l'électricité dans les zones rurales du Burkina Faso et du Mali et des grandes quantités de biomasses à traiter à l'huilerie, il a été supposé que le prétraitement soit toujours manuel lorsqu'il est localisé au niveau des sites de production de biomasse et toujours motorisé lorsqu'il est localisé au niveau de l'huilerie. Aux points de rassemblement, les opérations de prétraitement peuvent être manuelles ou motorisées. Les coûts du prétraitement pour chaque biomasse ont été calculés sur la base des paramètres de fonctionnement de chaque technologie de prétraitement (Tableau 9).

Les émissions de CO₂ ont été calculées sur la base de la consommation d'énergie de chaque technologie. Le décapsulage manuel du Jatropha permet de produire 2 kg de graines par heure et par personne (Allard, 2010; Tréboux and Desquilbet, 2013) soit 16 kg de graines/homme.jour. Le prétraitement manuel du Balanites a été assimilé au décorticage qui est l'opération la plus difficile et qui nécessite le plus de temps et de main-d'œuvre. Ce décorticage manuel du Balanites permet d'obtenir 2,5 kg d'amandes/homme.jour (Okia, 2010). En absence de données sur la consommation en eau du dépulpage manuel, il a été supposé la même consommation d'eau que pour le dépulpage motorisé.

Le décorticage motorisé du Jatropha avec la décortiqueuse "ENGELBERG" emploie deux personnes, consomme 11 kWh par tonne de graines produite et permet de produire 500 kg de graines par heure (Sarr, 2015).

Le dépulpage motorisé du Balanites emploie 2 personnes, consomme 30 kWh et 2125 L d'eau par tonne de noix produites et permet de produire 278,7 kg de noix par heure (Füllemann, 2015). Le décorticage motorisé du Balanites emploie également 2 personnes, consomme 30 kWh par tonne d'amandes produite et permet de produire 1009,5 kg d'amande par heure (Füllemann, 2015).

Toutes les machines ci-dessus mentionnées ont une durée de vie de 15 ans et leur coût d'investissement est amorti selon la méthode de l'amortissement dégressif au taux de 5%. Les coûts unitaires et les indicateurs d'impact pour chaque type de prétraitement sont décrits dans le Tableau 9 pour les deux biomasses. Ces coûts sont exprimés par tonne (de graine de Jatropha et par tonne d'amande de Balanites) produite.

Tableau 9. Coûts du prétraitement (calculés sur la base des paramètres de fonctionnement)

	Technologie de prétraitement	Manuelle	Motorisée	
	Operations	Décapsulage	Décapsulage	
Jatropha	Coût de personnel (XOF/t)	85 245	680	
	Coût de l'électricité (XOF/t)	-	1 254	
	Coût de l'eau (XOF/t)	-	-	
	Coûts opérationnels (XOF/t)	85 245	1 934	
	Coûts fixes pour une machine (XOF/an)	-	142 455	
	Indicateur d'impact moyen (kg eq CO ₂ /t)	-	0,0108	
Balanites	Operations	Dépulpage et décortilage	Dépulpage	Décortilage
	Coût de personnel (XOF/t)	545565	1 225	340
	Coût de l'électricité (XOF/t)	-	3 420	3420
	Coût de l'eau (XOF/t)	-	2 320	-
	Coûts opérationnels (XOF/t)	545565	6 965	3 760
	Coûts fixes pour une machine (XOF/an)	-	485 645	679 900
	Indicateur d'impact moyen (kg eq CO ₂ /t)	-	0,0294	0,0294

1.6. Valorisation des sous-produits

Au vu des possibilités de valorisation des sous-produits décrites en annexe 1 et afin de pouvoir éventuellement réduire (i) le prix de revient des graines oléagineuses, (ii) l'utilisation d'engrais chimique pour la culture du Jatropha et la culture des plantes adjacentes (iii) la quantité de déchets générée, l'huilerie exploitant le Balanites décide de vendre les coques et les tourteaux de Balanites. L'huilerie exploitant le Jatropha décide également de vendre les capsules et les tourteaux de Jatropha. Deux cas particuliers sur le retour des sous-produits ont été implémentés. Dans le cas 1, les points de retour des sous-produits sont inconnus et leur choix est laissé au modèle. Dans le cas 2, les sous-produits doivent être transportés et vendus sur des sites définis par l'huilerie.

1.6.1. Valorisation du tourteau de Jatropha

Concernant le tourteau du Jatropha, celui-ci peut être vendu à un prix inférieur ou égal à celui de l'engrais NPK au Burkina Faso qui est de 12 000 XOF le sac de 50 kg (MAAH, 2017) soit 240 XOF/ kg.

Pour son utilisation en tant qu'engrais organique, l'indicateur d'impact du PRG pour le système de culture intercalaire intensif présenté au Tableau 10 a été recalculé par la méthode IPCC 2013 en remplaçant l'utilisation de l'engrais NPK par l'utilisation du tourteau. Les quantités de tourteaux de Jatropha nécessaires à la substitution de la demande en engrais NPK du système de culture intercalaire intensif (système de culture intercalaire avec apport d'engrais et entretien des plantes) sont présentées

dans le Tableau 10. Ces quantités ont été calculées en considérant une teneur en élément NPK du tourteau de Jatropha de 5% d'azote, 2% de phosphore et 1% de potassium et en supposant que la substitution se fait uniquement sur la base de la teneur en azote des engrais NPK. De plus, il a été supposé que l'utilisation du tourteau lorsqu'il est vendu comme engrais se ferait à partir de la 5^{ème} année de culture. En effet la récolte des fruits commençant à partir de la 4^{ème} année après l'année de plantation des arbres, cela implique que les tourteaux ne seront disponibles qu'à partir de la 5^{ème} année de culture du Jatropha. L'engrais NPK et l'urée seront donc appliqués aux cultures pendant les 4 premières années de plantation du Jatropha.

Toujours au sujet de l'utilisation du tourteau de Jatropha en tant qu'engrais organique, les émissions de GES résultantes ont été calculées suivant toujours le modèle d'émission décrit par (Meneghel Fonseca Leticia, 2011). Les hypothèses pour le calcul des émissions de GES liées à l'utilisation des tourteaux comme fertilisant sont présentées en annexe 1. L'indicateur d'impact du PRG relatif à la substitution des engrais chimiques par le tourteau est présenté au Tableau 10. L'impact du PRG substitué représente l'impact qui aurait été généré si l'engrais NPK avait été utilisé. Il correspond donc à l'impact des émissions de GES lié à la quantité d'éléments azotés présents dans la quantité équivalente d'engrais chimique qui aurait été utilisée pour la culture du Jatropha et dont la valeur est de 0,0378 (kg eq CO₂/ ha) pour le NPK et de 0,0263 (kg eq CO₂/ ha) pour l'urée.

Tableau 10. Données relatives à l'utilisation du tourteau de Jatropha comme engrais organique dans le système de culture intercalaire intensif

Système de culture intercalaire intensif	Valeur
Quantité de NPK (t/ha)	0,150
Quantité d'urée (t/ha)	0,100
Quantité de tourteau équivalent engrais NPK (t/ha)	0,420
Quantité de tourteau équivalent urée (t/ha)	0,460
Indicateur d'impact du PRG de la culture avec l'utilisation du tourteau à la place de l'engrais NPK (kg eq CO ₂ /ha)	0,0533

1.6.2. Valorisation du tourteau de Balanites

Dans les pays d'Afrique tropicale sèche tels que le Burkina Faso et le Mali l'alimentation du bétail est basée sur le fourrage herbacé des pâturages naturels qui sèche et disparaît pendant la saison sèche ce qui limite le développement de l'élevage (Kaboré-Zoungana et al., 2008). Pour cette raison, le tourteau de Balanites qui a une bonne valeur nutritionnelle (voir paragraphe 1.4.5 du chapitre 2) peut être vendu aux éleveurs de bétails à un prix égal à celui du tourteau de coton utilisé pour l'alimentation du bétail au Burkina Faso qui est de 50 XOF/ kg (Tschirley et al., 2009).

1.6.3. Valorisation des capsules de Jatropha et coques de Balanites

Les coques de Balanites et les capsules de Jatropha peuvent être vendues à un prix égal au prix du bois qui est compris entre 50 et 100 XOF/kg à Ouagadougou (Bensch et al., 2013) soit à un prix maximal de 50 000 XOF/t.

1.7. Transport de la biomasse et des sous-produits

Concernant les moyens de transport, des charrettes à traction animale et des tricycles motorisés ont été considérés pour le transport de la biomasse et des sous-produits entre les sites de production de la biomasse et les points de collecte. Des camions ont été considérés pour le transport de la biomasse et des sous-produits entre les points de collecte et l'huilerie.

Dans cette étude de cas, il a été considéré que les moyens de transport sont consacrés au transport de la biomasse pour une durée égale à 3 mois par an. Ainsi, seuls les coûts et indicateurs d'impact imputables au transport de la biomasse pour la production de biocarburant ont été calculés.

Le coût unitaire du transport par camion sur les routes sans bitume est de 52 XOF/t.km (AMASSA Afrique Verte Mali, 2009). Pour la charrette et le tricycle, les coûts unitaires du transport ont été estimés sur la base de la rémunération journalière du conducteur, de la charge maximale par trajet, de la vitesse de chaque moyen de transport et de la consommation en carburant du tricycle.

La capacité de charge maximale par trajet de la charrette est d'environ 0,5 tonne (Lhoste et al., 2010) et sa distance de couverture (distance maximale qu'elle peut parcourir en une journée de travail) est de 20 km avec une vitesse de 5 km/h (Lhoste et al., 2010). La capacité de charge maximale par trajet du tricycle est de 1,1 t et sa consommation en carburant est de 3,5 l/100km (Füllemann, 2015). Sa distance de couverture est de 160 km à une vitesse de 40 km/h. La capacité de charge maximale du camion est de 10 tonnes. Sa distance de couverture maximale est de 200 km et sa vitesse moyenne est de 50 km/h.

Concernant les émissions de GES, ceux de la charrette et leur impact ont été calculés suivant le modèle d'émission décrit en annexe 1.

Pour le calcul des émissions et impacts du tricycle, l'utilisation du moyen de transport « operation scooter/CH » de la base de données « ecoivent » a été considéré.

Pour le camion, l'utilisation du moyen de transport « operation, lorry 7.5-16t, EURO3/RER S » de la base de données « ecoinvent » a été considérée.

Les coûts, indicateurs d'émission de GES et autres données sur les moyens de transport sont résumés au Tableau 11 ci-dessous. Les coûts fixes annuels de chaque moyen de transport ont été calculés sur la base de la formule d'annualisation décrite en annexe 2.

Tableau 11. Données sur les moyens de transport

Moyens de transport	Charrette	Tricycle	Camion
Charge maximale (t)	0,5	1, 1	10
Distance journalière maximale (km)	20	160	200
Distance journalière moyenne (km)	15	35	45
Taux d'intérêt	0,05	0,05	0,05
Durée de vie (année)	5	5	10
Prix d'achat (XOF)	130 000	1 000 000	4 000 000
Coûts fixes par an (XOF)	7 507	57 744	129 505
Coût opérationnel unitaire (XOF/t.km)	136	27	52
Moyen de transport (ecoivent)	-	Scooter/CH	Lorry 7.5-16t, EURO3/RER S
Indicateur d'impact d'émission moyen (kg eq CO ₂ /t.km)	0,1126	0,0963	0,0619

Concernant le transport des sous-produits, toute quantité retournée sur les sites de production de la biomasse devra obligatoirement passer par un point de collecte. De plus, chaque point de retour sélectionné devra recevoir une quantité de sous-produit proportionnel à la quantité de biomasses qu'il accueille.

1.8. Extraction de l'HVC

En plus des coûts liés à l'approvisionnement de la biomasse, le coût d'extraction de l'huile végétale a été calculé afin de pouvoir estimer le prix de revient de l'HVC à la sortie de l'huilerie pour chacune des biomasses.

Pour ce faire, il a été supposé que les presses pour l'extraction de l'huile fonctionnent en continu. Le fonctionnement continu permet en effet d'éviter les pertes dues au démarrage des presses et d'assurer des conditions de fonctionnement stables, qui garantissent une qualité homogène de l'HVC produite (Chapuis, 2014). Le temps de fonctionnement annuel de l'huilerie est supposé égal à 6 mois dans l'année tels qu'appliqués par les transformateurs de graines de coton au Burkina Faso. Cela correspond à 4000 heures sur une base de 24 heures de fonctionnement en continu par jour et implique l'utilisation d'une presse ayant une capacité de trituration de 75 kg/h. Les paramètres relatifs au fonctionnement des huileries sont présentés au Tableau 12. Sur la base des données du Tableau 12, il faudrait environ 4 kg de graines pour produire un litre d'huile de Jatropha et 2,71 kg d'amandes pour produire un litre d'huile de Balanites.

Tableau 12. Paramètres de fonctionnement des huileries

Paramètres	Jatropha	Balanites
Teneur en huile graine	35%	50%
Rendement d'extraction de l'huile (η)	83,50%	90%

Capacité de la presse (ms) kg/h	75	75
Débit huile (mo) kg/h	23,3 (Chapuis, 2014)	22,9 (Füllemann, 2015)
Masse volumique de l'huile (ρ) kg/l	0,9	0,9
Consommation électricité presse D_{ener} (Wh/kg graines)	42 (Chapuis, 2014)	3 kWh pour 9 kg d'HVC (Boukar, 2014)
Consommation gasoil presse	0	2 L/h (Boukar, 2014)
Rendement électrique presse (η_{pr})	0,8 (Chapuis, 2014)	0,8 (Chapuis, 2014)
Autres consommations d'énergie (Wh/kg graines)	5 (Chapuis, 2014)	5 (Chapuis, 2014)
Consommation totale d'énergie électrique Wh/kg graines	57,6	136,7
Demande en graines de l'huilerie (kg)	300 000	300 000
Quantité d'HVC produite (kg)	82 560	123 000
Quantité d'HVC produite (L)	91 733	136 667
Coût / kg graines (XOF/kg)	77	100
Coût / kg huile (XOF/kg)	280	244
Coût /L huile (XOF/kg)	252	220

Pour le calcul du coût d'extraction de l'HVC, les coûts d'investissement considérés comprennent le coût d'achat de toutes les machines impliquées dans le processus d'extraction de l'HVC. Le coût d'investissement annualisé a été calculé sur la base de la formule d'annualisation décrite en annexe 2. Le taux d'intérêt considéré est de 5%. En absence de données fiables sur les prix d'achat des équipements, ceux-ci ont été estimés sur la base des équations de calcul des prix d'achat des équipements d'une unité d'extraction d'HVC décrit par (Chapuis, 2014). Ces équations sont présentées en annexe 2.

La durée de vie des machines impliquées dans le processus d'extraction de l'HVC est de 15 ans. Concernant les coûts d'exploitation, ils se composent des coûts relatifs aux salaires des employés et des coûts de l'énergie. La composition du personnel des deux huileries ainsi que leur rémunération sont décrites dans le

Tableau 13. Cette composition est supposée identique pour les deux huileries.

Tableau 13. Composition et rémunération du personnel des huileries

Personnel	Nombre (Nbr)	Rémunération horaire (Rém)	Source
Opérateur	4	200	(Füllemann, 2015)
Superviseur	1	700	(Chapuis, 2014)
Administrateur	1	1250	(Chapuis, 2014)

D'autres coûts, tels que les coûts maintenance et d'assurance des machines, ont été également considérés. Les hypothèses formulées pour le calcul de ces différents coûts sont résumées en annexe 2.

1.9. Scénarios implémentés et analyse de sensibilité

Quatre scénarios ont été considérés pour l'implémentation du modèle (Tableau 14). Ces scénarios sont définis de sorte à prendre en compte les options liées :

(i) à la disponibilité de la technologie de prétraitement aux points de collecte mentionnée au paragraphe 1.5 ;

(ii) à la disponibilité des moyens de transport sur les sites de production de la biomasse mentionnée au paragraphe 1.7.

Tableau 14. Description des scénarios d'implémentation

Scénarios	Technologie de prétraitement aux points de collecte	Moyen de transport disponible sur les sites de production de la biomasse
Scénario 1	Prétraitement manuel	Charrette
Scénario 2	Prétraitement manuel	Tricycle
Scénario 3	Prétraitement motorisé	Charrette
Scénario 4	Prétraitement motorisé	Tricycle

En plus de l'implémentation des quatre scénarios ci-dessus présentés, le scénario ayant le coût total le plus bas a été réimplémenté en faisant varier la taille du réseau logistique dans le but d'observer l'influence de la taille du réseau logistique sur les différents coûts et les impacts environnementaux.

Afin également d'observer l'effet de l'évolution du prix de vente des différents sous-produits sur l'évolution du coût de revient de la biomasse et du coût total de l'HVC lorsque les sous-produits sont vendus, le même scénario a été réimplémenté en faisant varier le prix de vente des sous-produits dans la plage de valeur présentée au Tableau 15. Les résultats de toutes ces implémentations sont présentés et discutés au paragraphe suivant.

Tableau 15 : Plage de valeur du prix de vente des sous-produits.

Sous-produit	Plage de prix (XOF/t)	Pas (XOF/t)
Tourteau de Balanites	0 – 50 000	2 500
Coques de Balanites	0 – 50 000	2 500
Tourteau de Jatropha	0 – 120 000	7 500
Capsules de Jatropha	0 – 50 000	2 500

2. Résultats et discussions

Le modèle a été implémenté et résolu avec le logiciel d'optimisation Xpress IVE 8.4. Les implémentations ont été réalisées sur un processeur Intel Core i7- 5500U 2,4 GHz avec 8 Go de RAM sur une plate-forme 64 bits. La solution a été obtenue en utilisant l'algorithme branch and cut disponible dans le solveur du logiciel.

En rappel, le modèle détermine :

- Le nombre et la localisation des sites de production de biomasse parmi les sites potentiels existants ;
- La surface optimale des sites de production de biomasse à cultiver et récolter ;
- Le système de culture optimal pour la production de la biomasse lorsque celle-ci doit être plantée ;
- Le nombre et la localisation des points de collecte parmi les sites potentiels existants ;
- L'allocation des sites de production de biomasse aux points de collecte ;
- La localisation optimale des opérations du prétraitement ;
- Les quantités et l'état de la biomasse à transporter, manipuler et stocker en fonction du lieu de prétraitement ;
- Les quantités de sous-produits à valoriser et si besoin, les sites optimaux pour leur valorisation ;
- Les coûts totaux d'approvisionnement en biomasse ;
- Les coûts totaux de valorisation des sous-produits ;
- Les gains issus de la valorisation des sous-produits ;
- Les impacts d'émission de GES liés à l'approvisionnement en biomasse ;
- Les impacts liés à la valorisation des sous-produits ;
- Les gains environnementaux issus de la valorisation des sous-produits.

Cette section présente dans un premier temps les résultats de l'implémentation de la fonction économique et dans un second temps, les résultats de l'implémentation de la fonction environnement. Pour finir, les résultats de l'étude de l'influence de la taille du réseau d'approvisionnement sur les résultats du modèle ont été présentés et discutés. Les résultats de l'implémentation de chacune des fonctions objectifs ont été présentés et discutés suivant le cheminement suivant :

- (1) Les résultats des coûts d'approvisionnement en biomasse des quatre scénarios implémentés ont été exposés et discutés pour les deux biomasses.
- (2) Une analyse comparative des coûts d'approvisionnement des deux biomasses a été ensuite réalisée sur la base des résultats du scénario ayant le coût total d'approvisionnement le plus bas pour chacune des deux biomasses étudiées.
- (3) À l'issue de cette analyse comparative, les résultats de l'implémentation de l'approvisionnement en biomasse intégrant les flux de retour des sous-produits et leurs options de valorisation ont été présentés et discutés.

Les résultats de performance de l'algorithme du logiciel Xpress IVE 8.4 utilisé pour la résolution du problème d'optimisation sont présentés en annexe 3. Ces résultats concernent les temps de résolution, le nombre de variables et le gap obtenu pour chaque scénario et cas implémenté.

2.1. Résultats et discussion de l'implémentation de la fonction économique

2.1.1. Résultats des coûts d'approvisionnement en biomasse des quatre scénarios

Les résultats des coûts totaux optimaux d'approvisionnement en biomasse et des coûts totaux d'obtention de l'HVC obtenus à l'issue de l'implémentation des quatre scénarios sont présentés dans le Tableau 16 pour les deux biomasses étudiées. Ces coûts optimaux représentent le coût par kg de graine demandée et le coût par litre d'HVC produit à l'huilerie.

Tableau 16. Coûts totaux d'approvisionnement en biomasse et des coûts totaux d'obtention de l'HVC des quatre scénarios

Scénarios	Jatropha		Balanites	
	Coût total d'approvisionnement en biomasse (XOF/kg)	Coût total de l'huile (XOF/L)	Coût total d'approvisionnement en amande (XOF/kg)	Prix de revient de l'huile (XOF/L)
Scénario 1	81,48	518,75	212,08	685,04
Scénario 2	101,75	585,04	222,55	708,04
Scénario 3	76,77	503,36	169,14	590,79
Scénario 4	97,53	571,24	175,63	605,03

Les résultats présentés au Tableau 16 montrent que pour le Jatropha, le coût total optimal d'approvisionnement en graine varie entre 76,77 XOF/kg (scénario 3) et 101,75 XOF/kg (scénario 2). Le coût de revient de l'HVC quant à lui varie entre 503,36 XOF/L (scénario 3) et 585,04 XOF/L (scénario 2). Pour le Balanites, la tendance est la même avec le coût total d'approvisionnement en amande qui varie entre 169,14 XOF/kg (scénario 3) et 222,55 XOF/kg (scénario 2) et le coût de revient de l'HVC qui varie entre 590,79 XOF/L (scénario 3) et 708,04 XOF/L (scénario 2). Il est également observable de ces résultats ci-dessus-présentés que pour le Jatropha, les scénarios avec le tricycle (scénarios 2 et 4), ont les coûts totaux d'approvisionnement les plus élevés alors que pour le Balanites, ce sont ceux dont le prétraitement est manuel aux points de collecte (scénario 1 et 2) qui ont les coûts totaux d'approvisionnement les plus élevés.

L'explication et la compréhension de ces coûts se trouvent dans l'analyse et la discussion des éléments constituant le coût total d'approvisionnement de chaque scénario (présentée à la Figure 13 et à la Figure 14). L'analyse et la discussion des résultats relatifs aux éléments du réseau logistique (présentés au Tableau 17 pour le Jatropha et au Tableau 18 pour le Balanites) contribuent également à la compréhension de ces coûts totaux ci-dessus décrits.

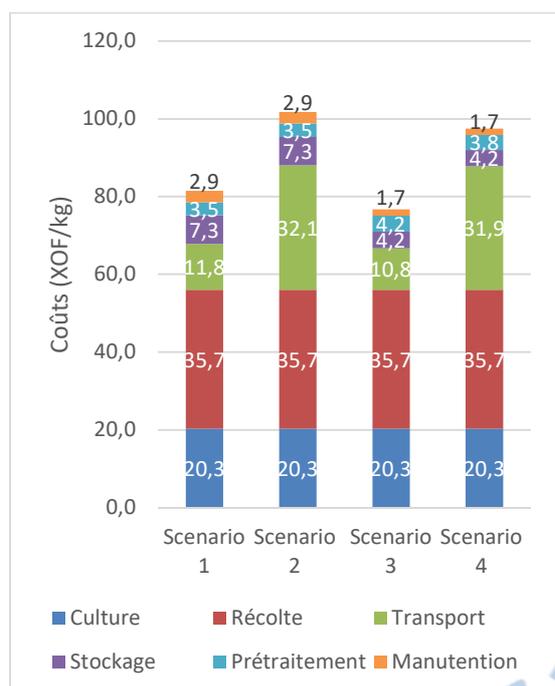


Figure 13. Jatropa : Répartition des coûts d'approvisionnement pour les quatre scénarios

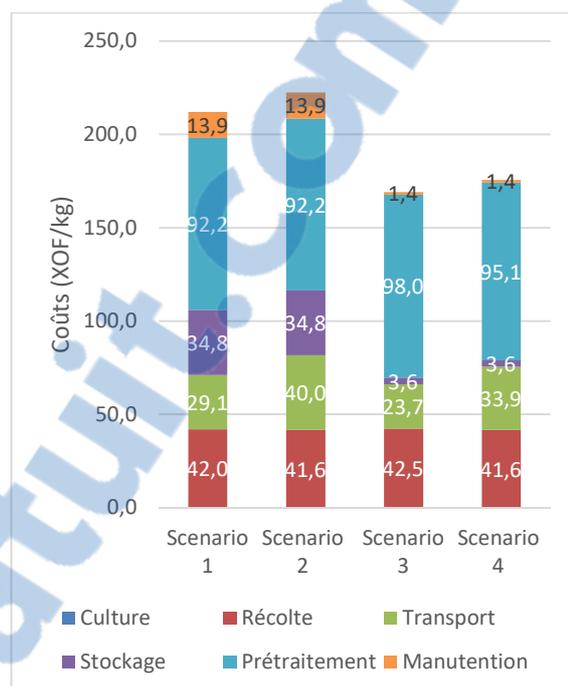


Figure 14. Balanites : Répartition des coûts d'approvisionnement pour les quatre scénarios

Tableau 17. Jatropa : résultats relatifs aux éléments du réseau logistique

Scénarios	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Moyens de transport disponible	Charrette	Tricycle	Charrette	Tricycle
Technologie de prétraitement aux points de collecte	Manuelle	Manuelle	Motorisé	Motorisé
Nombre de sites de production de la biomasse (sur 1120)	188	150	179	150
Nombre de points de collecte (sur 32)	3	2	3	2
Localisation du Prétraitement et technologie disponible	À l'huilerie (Motorisé)	À l'huilerie (Motorisé)	Aux points de collecte (Motorisé)	Aux points de collecte (Motorisé)
Superficie totale cultivée (ha)	365,71	365,71	365,71	365,71
Système de culture choisi	Système de culture intercalaire	Système de culture intercalaire	Système de culture intercalaire	Système de culture intercalaire
Quantité totale transportée entre les champs et les points de collecte (t)	480	480	480	480
Quantité totale transportée entre les points de collecte et l'huilerie (t)	480	480	300	300
Nombre total de voyages à effectuer entre les champs et les points de collecte	960	437	960	437
Nombre total de voyages à effectuer entre les points de collecte et l'huilerie	48	48	30	30

Tableau 18. Balanites : résultats relatifs aux éléments du réseau logistique

Scénarios	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Moyens de transport disponible	Charrette	Tricycle	Charrette	Tricycle
Technologie de prétraitement aux points de collecte	Manuelle	Manuelle	Motorisé	Motorisé
Nombre de sites de production de la biomasse (sur 444)	159	139	166	139
Nombre de points de collecte (sur 32)	8	3	3	2
Localisation du Prétraitement et technologie disponible	À l'huilerie (Motorisé)	À l'huilerie (Motorisé)	Aux points de collecte (Motorisé)	Aux points de collecte (Motorisé)
Superficie totale cultivée (ha)	1155,42	1144,30	1166,80	1144,20
Quantité totale transportée entre les champs et les points de collecte (t)	2500	2500	2500	2500
Quantité totale transportée entre les points de collecte et l'huilerie (t)	2500	2500	300	300
Nombre total de voyages à effectuer entre les champs et les points de collecte	5000	2084	5000	2084
Nombre total de voyages à effectuer entre les points de collecte et l'huilerie	250	250	30	30

2.1.1.1. Composants du coût total d'approvisionnement en biomasse

- Les coûts de culture et de récolte

Les coûts de culture et de récolte sont quasiment identiques dans les quatre scénarios pour chacune des biomasses étudiées. Cette similitude observée s'explique par la superficie totale cultivée du Jatropha et la superficie totale récoltée du Balanites qui ont une valeur similaire en raison du fait que la demande en biomasse brute des huileries a la même valeur dans les quatre scénarios.

Ce résultat implique que ni la technologie de prétraitement ni les moyens de transport de la biomasse n'ont d'influence sur les coûts et impacts PRG de la culture et de la récolte. Ces deux opérations de production de la biomasse sont plutôt influencées par la demande en biomasse de l'huilerie qui définit les quantités de biomasses brutes à produire et par conséquent, la superficie totale à consacrer à la production de culture énergétique.

Spécifiquement pour le Jatropha qui est cultivée, il peut être noté que pour la culture de la plante, le système de culture intercalaire (culture intercalaire sans apport d'engrais) est optimal pour la culture des plants de Jatropha dans les quatre scénarios. L'adoption du système de culture intercalaire s'explique par le coût de culture par unité de surface de ce système de culture qui est cinq fois plus bas que celui du système de culture intercalaire intensif, car il n'inclut pas l'utilisation d'engrais directement sur les plantes (voir Tableau 7). Elle s'explique aussi par la sélection des champs de grande superficie qui permet de produire la demande de la biomasse de l'huilerie malgré le rendement de culture plus bas du système de culture intercalaire (810 kg de graine /ha) comparé à celui du système de culture intercalaire intensif (950 kg de graine /ha). Les résultats sur les Figure 15 et Figure 16 montrent en effet que plus la productivité des sites de production de la biomasse est importante (soit parce qu'ils ont une surface élevée, soit parce qu'ils

ont un grand nombre d'arbres), plus ils sont sélectionnés. La sélection de ce type de sites de production de biomasse à grande productivité induit la réduction du nombre de sites de production de la biomasse à ouvrir. Cela réduit le coût total d'ouverture des sites de production de la biomasse par la réduction du nombre total de moyens de transport à acquérir afin de collecter la biomasse récoltée.

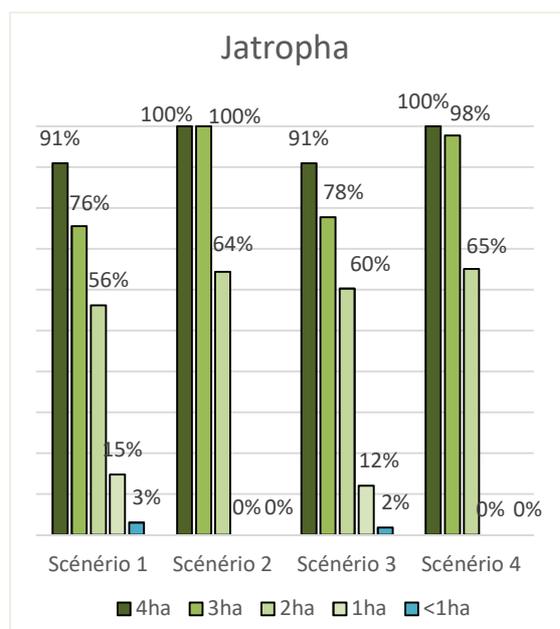


Figure 15. Pourcentage de sites de culture du Jatropha sélectionnés en fonction de leur superficie

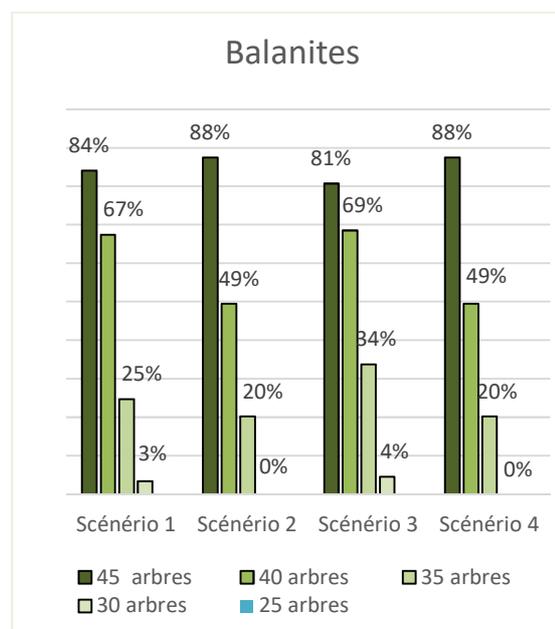


Figure 16. Pourcentage de sites de production de fruit de Balanites sélectionnés en fonction du nombre d'arbres par unité de surface

- *Le coût du prétraitement*

Concernant le prétraitement, pour les deux biomasses étudiées, les scénarios dans lesquels le prétraitement motorisé est disponible aux points de collecte (scénarios 3 et 4) ont des coûts totaux d'approvisionnement inférieurs à ceux dont le prétraitement est manuel aux points de collecte (scénarios 1 et 2). Pour ces scénarios où le prétraitement motorisé était disponible aux points de collecte, ce sont les points de collecte qui sont l'emplacement optimal pour la réalisation des opérations du prétraitement. Pour les autres scénarios où le prétraitement manuel est disponible aux points de collecte, l'huilerie (où le prétraitement est toujours motorisé) est l'emplacement optimal pour la localisation des opérations de prétraitement.

Ces différences de coûts et de localisation des opérations du prétraitement observées s'expliquent par les coûts fixes et opérationnels de chacune des technologies de prétraitement disponibles et par les quantités de matière à manipuler résultant du choix de la localisation du prétraitement. En effet, le prétraitement motorisé des deux biomasses étudiées possède des coûts fixes et opérationnels très inférieurs à ceux du prétraitement manuel (voir Tableau 9) et l'emplacement des opérations de prétraitement a une influence sur les quantités de biomasses à transporter dans l'ensemble du réseau, car il y a moins de

matière à transporter en aval du prétraitement. Les flux de matière concernent en effet les fruits en amont du prétraitement et concernent les graines et les amandes en aval du prétraitement. Comparées aux fruits, ces graines et amandes correspondent à 2 fois et 8 fois moins de quantités de biomasses à transporter, manipuler et stocker respectivement pour le *Jatropha* et pour le *Balanites*. C'est la raison pour laquelle l'emplacement disposant de la technologie de prétraitement motorisé et situé simultanément le plus en amont dans le réseau logistique est optimal pour la localisation du prétraitement dans les quatre scénarios lorsque le critère économique est considéré. Cet emplacement optimal correspond à l'huilerie dans les scénarios 1 et 2. Il correspond aux points de collecte dans les scénarios 3 et 4 (voir Tableau 17 et Tableau 18).

Un point qu'il est important de noter est que lorsque le prétraitement est localisé aux points de collecte, chaque point de collecte ouvert doit être équipé de machines pour le prétraitement. C'est la raison pour laquelle les coûts de prétraitement des scénarios 3 et 4 sont plus élevés que les coûts de prétraitement des scénarios 1 et 2 malgré le fait que la même technologie de prétraitement y soit employée. Cela explique également la différence de structure entre les scénarios 1 et 2 et entre les scénarios 3 et 4 pour le *Balanites* bien que la même technologie de prétraitement soit employée dans ces deux groupes de scénarios pour la fonction économique.

- *Les coûts de stockage et de manutention*

À propos des coûts de stockage et de manutention, ceux-ci sont plus élevés pour les scénarios 1 et 2 dans lesquels le prétraitement manuel est disponible aux points de collecte indépendamment du moyen de transport utilisé et quelle que soit la biomasse considérée. Ce résultat, comme dans le cas du prétraitement est en relation avec les quantités de matière à manipuler résultant du choix de la localisation du prétraitement. En effet, dans les scénarios 1 et 2 où les opérations de prétraitement sont localisées à l'huilerie, les flux de matière dans le réseau logistique concernent les fruits et non les graines ou amandes. Cela engendre des quantités de matière plus importantes à charger, décharger et stocker dans le réseau d'approvisionnement expliquant les coûts de stockage et de manutention plus élevés qui peuvent être observés sur la Figure 13 et sur la Figure 14.

En revanche, dans les scénarios 3 et 4, la réalisation des opérations de prétraitement aux points de collecte conduit à moins de quantités de matières à charger, décharger et stocker entre les points de collecte et l'huilerie, car c'est la biomasse prétraitée (graines et amandes) qui est manipulée dans cette partie du réseau logistique.

- *Le coût du transport*

Concernant le transport, la première observation est que le coût de transport des scénarios 2 et 4 est plus élevé que ceux des scénarios 1 et 3. Cette différence observée est liée au moyen de transport utilisé dans chacun de ces deux groupes de scénarios. En effet les coûts de transport des scénarios 2 et 4 sont plus élevés en raison de l'utilisation du tricycle dont les coûts d'acquisition et les charges fixes sont plus de sept fois plus élevés que ceux de la charrette (voir Tableau 11). Le nombre de voyages à effectuer pour

transporter toute la biomasse récoltée est cependant plus de deux fois moins élevé lorsque le tricycle est utilisé (voir Tableau 17 et Tableau 18).

Ce nombre de voyages moins élevé pour le tricycle s'explique par sa capacité de charge de 1,1 t/voyage qui permet de transporter deux fois plus de biomasses que la charrette dont la capacité de charge est de 0,5 t/voyage.

La deuxième observation concernant le transport est que lorsque les mêmes moyens de transport sont considérés, les scénarios où le prétraitement est motorisé aux points de collecte (scénarios 3 et 4) possèdent les valeurs des coûts de transport les plus bas. Ce dernier résultat est également en rapport avec la réduction des quantités de biomasses à transporter induit par la localisation du prétraitement.

De tout ce qui précède, il peut être retenu que les coûts de culture et de récolte sont influencés par la demande en biomasse de l'huilerie et par le système de culture adopté et non par les options de prétraitement et les moyens de transport utilisés.

Pour chacune des biomasses étudiées, le scénario 3 possède le coût total d'approvisionnement en biomasse et le coût total de revient de l'HVC le plus bas. Cela implique que la charrette à traction animale et la disponibilité du prétraitement motorisé aux points de collecte constituent les options optimales dans ce cas d'étude pour la collecte et le prétraitement de la biomasse. Ces deux options, quoique optimales ne permettent cependant pas d'obtenir un coût de revient de l'HVC ayant une valeur inférieure au prix du fioul lourd de référence qu'est le DDO (Distillate Diesel Oil) dont le prix est de 497 XOF/L à Ouagadougou (SONABHY, 2018).

Toujours concernant le coût de revient de l'HVC et spécifiquement pour le Balanites, il ressort aussi que le coût de revient optimal de l'HVC qui est d'environ 590 XOF/L est inférieur aux coûts de revient rapportés par (Füllemann, 2015) et par (Boukar, 2014) qui se situent entre 1000 et 2000 XOF/L. Cette valeur plus basse du coût de revient trouvée dans la présente étude est liée à la capacité de traitement considérée de l'huilerie et à l'économie d'échelle qu'elle engendre. En effet, dans les études de Füllemann et de Boukar, la demande en biomasse n'excédait pas 300 tonnes de fruits par an. Cet effet de la taille de l'huilerie a déjà été souligné par (Chapuis, 2014) qui a démontré dans son étude sur le Jatropha que l'augmentation de la capacité de traitement des unités de production de biocarburants réduisait considérablement les coûts de production grâce aux économies d'échelle.

De l'analyse des coûts d'approvisionnement, il ressort également que l'influence des options de prétraitement est plus perceptible sur les coûts d'approvisionnement en amandes de Balanites quand les effets des moyens de transport, eux, sont plus perceptibles sur les coûts d'approvisionnement en graines de Jatropha. Cette différence entre le Jatropha et le Balanites est due à la composition du fruit du Balanites (notamment la faible proportion de son amande) qui entraîne la nécessité de récolter et de traiter dans le cas du Balanites une quantité équivalente à cinq fois celle des fruits du Jatropha. L'amande du Balanites ne représente en effet, que 12% du poids du fruit quand la graine de Jatropha, elle, représente 62,5 % du poids du fruit.

2.1.1.2. Structure du réseau logistique

Les Figure 17 à Figure 20 et les Figure 21 à Figure 24 présentent la structure du réseau logistique après l'implémentation de chacun des quatre scénarios, respectivement pour le Jatropha et pour le Balanites. La structure du réseau logistique pour les quatre scénarios et les deux biomasses étudiées montrent que la proximité de l'huilerie n'est pas le paramètre décisif dans la sélection des sites de production de la biomasse. En revanche, les résultats sur la Figure 15 et Figure 16 montrent que, plus la productivité des sites de production est importante (soit parce qu'ils ont une surface élevée, soit parce qu'ils ont un grand nombre d'arbres), plus ils sont sélectionnés. Il résulte donc que les sites de production de la biomasse sont sélectionnés en fonction de leur productivité plutôt qu'en fonction de leur proximité de l'huilerie.

La structure du réseau logistique pour les quatre scénarios par type de biomasse étudiée montre également que celui-ci diffère en fonction du moyen de transport utilisé. Cette différence de structure entre les scénarios avec charrette (scénarios 1 et 3) et ceux avec tricycle (scénarios 2 et 4) s'explique par la distance de couverture de chacun de ces moyens de transport. En effet, plus le moyen de transport permet de parcourir de grande distance, moins il est contraignant et permet d'atteindre les sites de production de la biomasse les plus productifs et les plus éloignés de l'huilerie. En rappel, la distance de couverture du tricycle est de 160 km et celle de la charrette de 20 km. Cette influence de la distance de couverture du moyen de transport, bien que présente dans le cas du Balanites (Figure 21 à Figure 24) est bien plus marquée dans le cas du Jatropha (Figure 17 à Figure 20), car comme souligné plus haut dans le document, les coûts d'approvisionnement du Jatropha sont plus sensibles aux moyens de transport utilisés. Dans le cas du Balanites, pour les scénarios ayant les mêmes moyens de transport, la différence entre le nombre de points de collecte sélectionnés est liée à la localisation du prétraitement qui influence le nombre de points de collecte à ouvrir et donc, le nombre de machines de prétraitement. C'est la raison pour laquelle 8 points de collecte sont ouverts au scénario 1 cf. Figure 21 (où le prétraitement est localisé à l'huilerie) contre 3 points de collecte au scénario 3 cf. Figure 23 (où le prétraitement est localisé aux points de collecte).

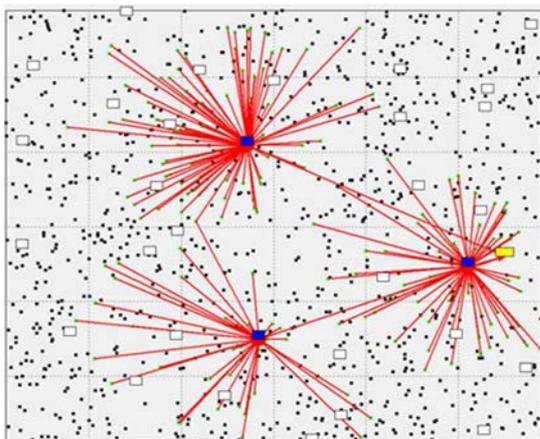


Figure 17. Jatropha : réseau d'approvisionnement pour le Scénario 1

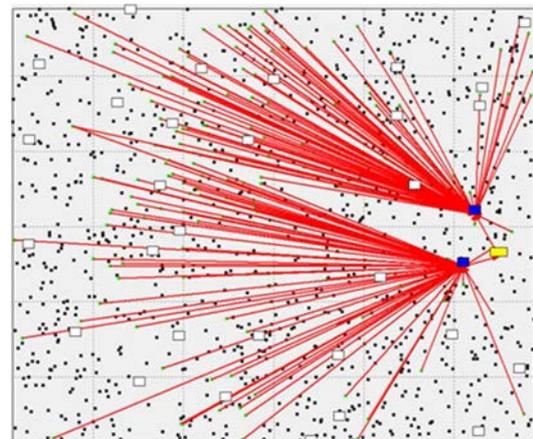


Figure 18. Jatropha : réseau d'approvisionnement pour le Scénario 2

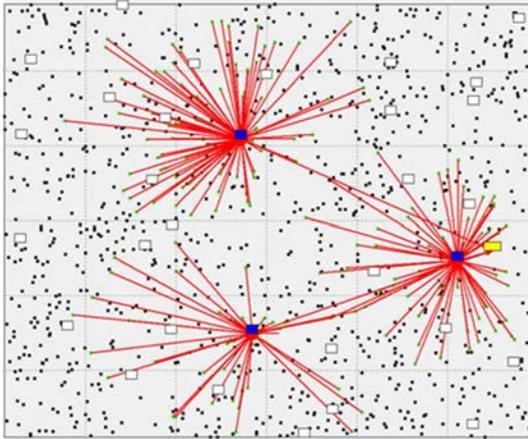


Figure 19. Jatropha : réseau d'approvisionnement pour le Scénario 3

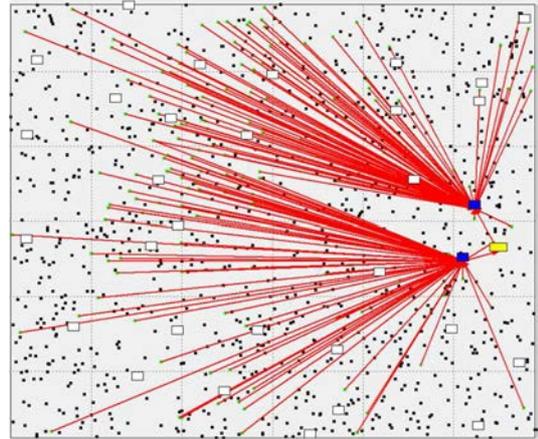


Figure 20. Jatropha : réseau d'approvisionnement pour le Scénario 4

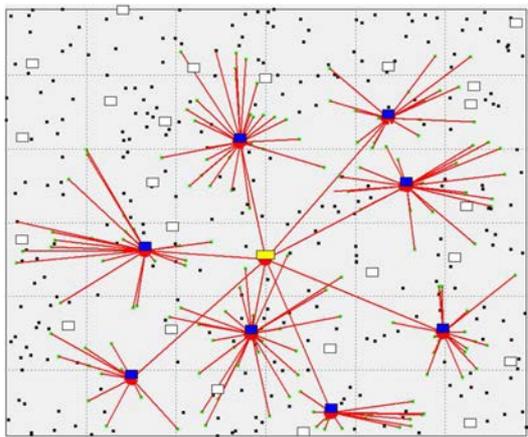


Figure 21. Balanites : Réseau d'approvisionnement pour le Scénario 1

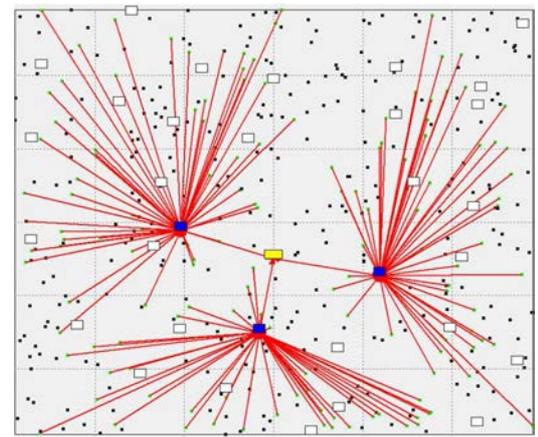


Figure 22. Balanites : Réseau d'approvisionnement pour le Scénario 2

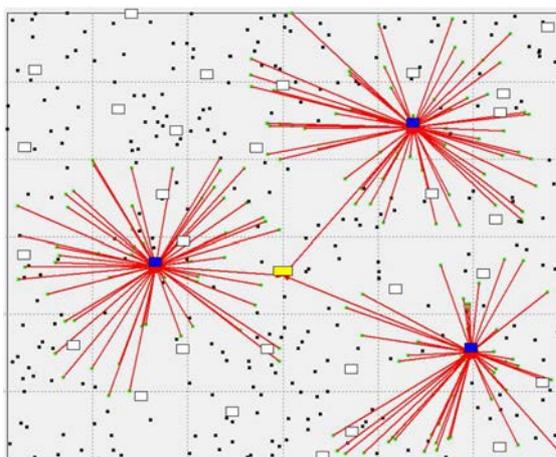


Figure 23. Balanites : Réseau d'approvisionnement pour le Scénario 3

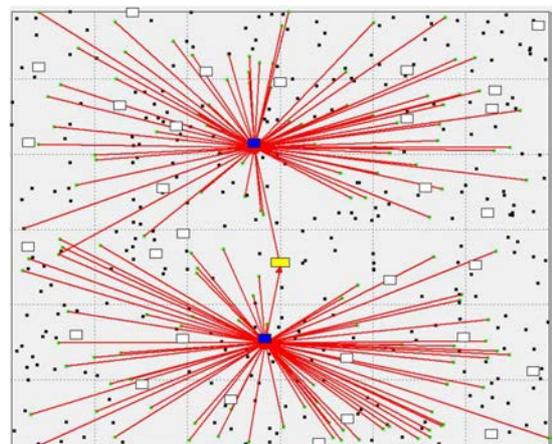


Figure 24. Balanites : Réseau d'approvisionnement pour le Scénario 4

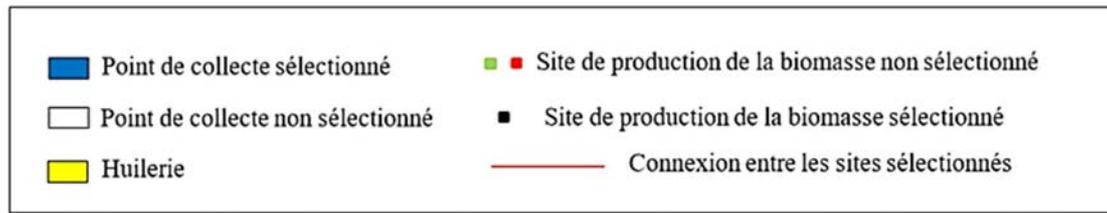


Figure 25. Légende des figures 17 à 24

En somme, il ressort que :

- Le système de culture intercalaire (système de culture intercalaire sans apport d'engrais et de soins à la plante énergétique) est optimal pour la culture du *Jatropha* en raison de son coût opérationnel unitaire qui est cinq fois plus bas que celui du système de culture intercalaire intensif.
- La productivité (et non la proximité de l'huilerie) est le paramètre à considérer pour la sélection des sites de production de la biomasse à exploiter. Ainsi, les sites de production de la biomasse ayant une grande productivité sont optimaux pour la production de la biomasse.

En outre, le prétraitement sur les sites de récolte et avant transport n'est pas l'option optimale pour le prétraitement de la biomasse oléagineuse. Il est vrai que le prétraitement sur les sites de production de la biomasse (parce qu'il permet de densifier la biomasse avant le transport, le stockage et la manutention) a été rapporté dans la littérature (Bajwa et al., 2018; Rentizelas et al., 2009) comme un facteur optimisant les coûts d'approvisionnement. Cependant, il est important de noter que la technologie de prétraitement sur ces sites de récolte induit généralement des coûts de prétraitement élevés en raison de leur faible capacité de traitement (liée aux faibles quantités de matière disponible) et de leur coût opérationnel élevé. Ce constat a été également souligné par (Malladi and Sowlati, 2018) qui ont rapporté dans leur étude que le prétraitement de la biomasse était plus efficace sur les sites intermédiaires ou sur les sites de conversion de la biomasse.

Ainsi il peut être retenu que dans la chaîne logistique de la biomasse, les installations situées les plus en amont et disposant de la technologie de prétraitement la moins coûteuse sont optimaux pour la réalisation des opérations du prétraitement. Ceci est d'autant plus vrai dans le cas du *Balanites*, car quand la localisation du prétraitement a peu d'influence sur les coûts d'approvisionnement en graines de *Jatropha*, celle-ci impacte grandement les coûts d'approvisionnement en amandes de *Balanites*.

Au Burkina Faso et au Mali, le prétraitement motorisé est à préférer dans la conception de la chaîne d'approvisionnement de la biomasse oléagineuse en raison de son coût opérationnel qui est bas. Cette technologie de prétraitement n'est cependant possible qu'en cas d'accès à l'énergie, ce qui souligne encore une fois de plus les bénéfices et la nécessité d'accroître l'accès à l'énergie en milieu rural ouest-africain afin de favoriser le développement économique de ces zones. En attendant l'accroissement de l'accès à l'énergie dans ces zones rurales, une autre solution pouvant contribuer à réduire les coûts d'approvisionnement en biomasse oléagineuse pourrait consister à améliorer les opérations de prétraitement en développant des machines de prétraitement mécaniques à prix abordables.

Enfin, en raison des coûts d'acquisition élevés du tricycle, le meilleur moyen pour transporter la biomasse depuis les sites de récolte de la biomasse jusqu'aux points de collecte consiste à utiliser la charrette à traction animale. Les tricycles à moteur pourraient être plus économiques pour le transport de la biomasse si leur coût d'achat pouvait être réduit, car ils permettent de voyager plus vite et ont une capacité de charge qui est le double de celle de la charrette.

Afin de mieux percevoir les différences entre le Jatropha et le Balanites, une analyse comparative des coûts d'approvisionnement sera menée sur le scénario 3 (scénario ayant le coût total optimal d'approvisionnement le plus bas pour les 2 biomasses).

2.1.2. Analyse comparative des coûts et des impacts d'approvisionnement du Jatropha et du Balanites

Pour les deux biomasses, le coût total d'approvisionnement du scénario 3 (transport de la biomasse par charrette et prétraitement motorisé disponible aux points de collecte) ainsi que sa répartition sont présentés à la Figure 26.

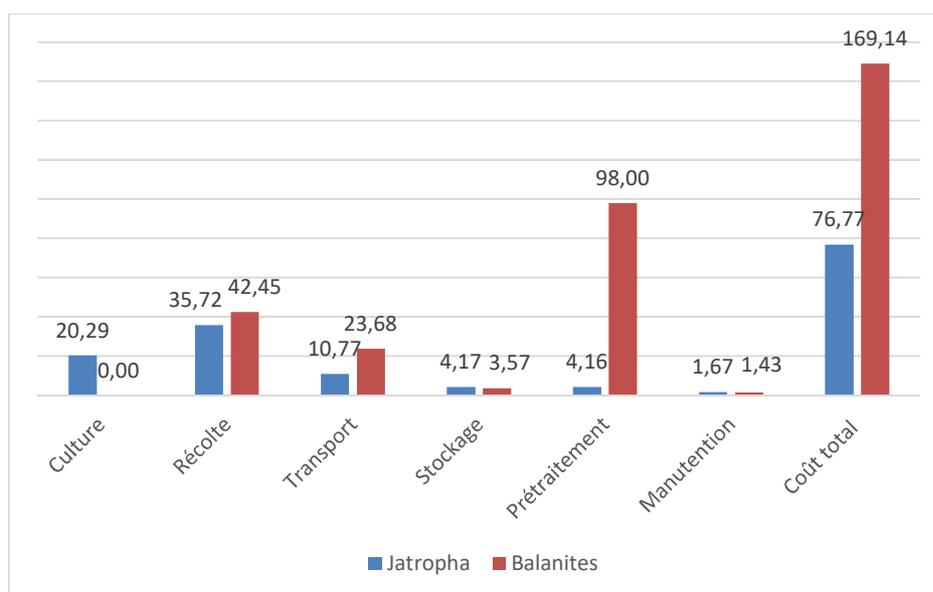


Figure 26. Coûts d'approvisionnement en biomasse du scénario 3 pour les deux biomasses

Les résultats de la Figure 26 montrent que le coût total d'approvisionnement en amande de Balanites est plus de deux fois supérieur au coût total d'approvisionnement en graine de Jatropha. En dehors de la récolte, du stockage et de la manutention, tous les autres coûts relatifs à l'approvisionnement en amande de Balanites sont supérieurs à ceux de l'approvisionnement en graines de Jatropha.

Concernant la production de biomasse, les résultats montrent également que le coût de culture et de récolte du Jatropha est plus de 1,3 fois supérieur à celui du Balanites. Ce coût de production de la biomasse représente environ 75% du coût total d'approvisionnement en graines de Jatropha. Pour le Balanites, ce coût de production de la biomasse se résume uniquement au coût de récolte et représente

25% du coût total d'approvisionnement en amande de Balanites. Le coût de production des fruits de Balanites, inférieur à celui du Jatropha est dû au fait que le Balanites est une plante sauvage. Aucun coût n'est donc induit par sa culture, car la plante pousse spontanément dans la nature sans l'action des Hommes. Cela présente l'avantage de n'engendrer aucun coût de culture comme décrit par (Angelsen and Wunder, 2003) dans (Pouliot and Treue, 2013) qui ont rapporté que la plupart des produits sauvages non cultivés nécessitent de faibles investissements pour être produits.

Toujours au sujet de la production de la biomasse, les résultats du Tableau 17 et Tableau 18 montrent que la superficie totale requise pour récolter les fruits du Balanites est plus de quatre fois supérieure à celle mobilisée par la culture et la récolte des fruits du Jatropha. Cela s'explique par la répartition disparate des arbres de Balanites (qui poussent de façon spontanée) à la différence des plants de Jatropha qui sont plantés et qui ont une densité plus élevée et contrôlée. Cependant, bien que le Balanites requiert plus de terres, il n'occupe pas des terres consacrées aux cultures vivrières ou aux cultures de rente et son exploitation ne nécessite pas non plus de défricher de nouvelles terres. De plus, il pousse dans des zones à climat semi-aride et aride souvent impropre aux cultures vivrières et de rente. Il n'engendre donc pas de concurrence pour l'utilisation du sol, comme cela pourrait être le cas du Jatropha qui est cultivé.

Au sujet des coûts logistiques, les résultats de la Figure 26 montrent que le coût de transport du Jatropha est deux fois inférieur à celui du Balanites. Pour les deux biomasses, ce coût de transport représente 14% du coût total d'approvisionnement en graines et amandes.

Pour le coût du prétraitement, celui du Jatropha est environ 23 fois inférieur à celui du Balanites et représente uniquement 5 % du coût total d'approvisionnement en graines tandis que le coût de prétraitement du Balanites représente 58% du coût total d'approvisionnement en amande. Le coût du prétraitement est d'ailleurs le principal élément responsable du coût total d'approvisionnement en graines de Balanites qui est deux fois supérieur à celui du Jatropha. En effet ce coût de prétraitement qui a une valeur de 98 XOF/kg est à lui seul supérieur au coût total d'approvisionnement en graine de Jatropha qui est de 76,77 XOF/kg.

Pour ces deux éléments que sont le transport et le prétraitement, la différence de coût entre les deux biomasses peut s'expliquer par le fait que la graine et l'amande représentent respectivement 12% et 62,5% du poids total des fruits de Jatropha et de Balanites. En conséquence, il y a 5,2 fois plus de matières à transporter entre les sites de production de biomasse et les points de collecte pour le Balanites. De plus, le fait que les coûts fixes et opérationnels unitaires des deux opérations de prétraitement du Balanites soient plus de 5 fois plus élevés que ceux du Jatropha (Tableau 9) contribuent à accroître la différence de coût entre le prétraitement du Jatropha et celui du Balanites. (Aviara et al., 2005; E. Mamman et al., 2005) avaient déjà abordé cette difficulté à effectuer le prétraitement du Balanites et ont travaillé sur les propriétés physiques des noix de Balanites afin de permettre le développement de machines facilitant leur décorticage.

À propos des coûts de manutention et de stockage, ils sont similaires et représentent moins de 6% du coût total d'approvisionnement pour les deux cultures énergétiques ; cela est dû au fait que la même quantité de matière doit être manipulée entre les points de collecte et l'huilerie.

Pour clore cette étude comparative des coûts d'approvisionnement des deux biomasses, il peut être retenu que lorsque la configuration du réseau d'approvisionnement est optimisée, le coût total d'approvisionnement en amandes de Balanites est supérieur à celui de l'approvisionnement en graine de Jatropha, cela, malgré l'avantage qu'a le Balanites d'être une plante sauvage non cultivée. Ce coût élevé pour le Balanites est lié à la composition de son fruit dont l'amande oléagineuse ne représente que 12% du poids et aux coûts élevés de ses deux opérations que sont le dépulpage et le décorticage.

Il est également notable qu'environ 75% du coût total d'approvisionnement en amandes de Balanites est attribuable aux coûts logistiques, contre 27% dans le cas de l'approvisionnement en graines de Jatropha où la culture et la récolte représentent plus de 70% du coût total de la graine à l'huilerie. Ce résultat souligne l'importance de la bonne conception du réseau d'approvisionnement en amandes de Balanites et la nécessité de cultiver et récolter de façon appropriée les fruits du Jatropha. Il souligne également l'intérêt qu'il pourrait avoir à améliorer les opérations de prétraitement des fruits du Balanites par le développement de machines de prétraitement à prix abordable.

2.1.3. Résultats et discussion de l'implémentation de l'approvisionnement en biomasse avec prise en compte de la valorisation des sous-produits

L'objectif étant de minimiser les coûts totaux d'approvisionnement en biomasse et de valorisation des sous-produits, l'implémentation des deux cas particuliers sur les points de vente des sous-produits a été réalisée uniquement sur le scénario 3 (scénario optimal).

Les résultats de l'implémentation des deux cas particuliers sont présentés au Tableau 19 pour les capsules de Jatropha et les coques de Balanites et au Tableau 20 pour les tourteaux de Jatropha et de Balanites. En rappel, dans le cas 1, les points de retour des sous-produit sont inconnus. Dans le cas 2, les sous-produits doivent retourner sur les sites définis par l'huilerie.

Tableau 19. Résultats de l'implémentation des options de valorisation des sous-produits issus du prétraitement

Cas	Cas 1		Cas 2			
	Capsule de Jatropha	Coque de Balanites	Capsule de Jatropha	Coque de Balanites	Capsule de Jatropha	Coque de Balanites
Sous-produits issus du prétraitement	Aux points de collecte	Aux points de collecte	Sur les ³ SPB	Sur les SPB	À l'huilerie	À l'huilerie
Prix de vente (XOF/kg de sous-produit)	50	50	50	50	50	50
Gain (XOF/kg de biomasse prétraitée)	30	216,67	0	0	30	216,67

³ Sites de production de la biomasse

Coût total d'approvisionnement de la biomasse prétraitée	76,77	169,13	76,77	169,13	81,48	212,07
Coût de revient de la biomasse prétraitée avec valorisation des sous-produits	46,77	-47,54	76,77	169,13	51,48	-4,60
Localisation du prétraitement	Aux points de collecte	À l'huilerie	À l'huilerie			
Nombre de sites de production de la biomasse sélectionnés	179	166	179	166	188	158
Nombre de points de collecte sélectionnés	3	3	3	3	1	1

Tableau 20. Résultats de l'implémentation des options de valorisation des tourteaux

Cas	Cas 1		Cas 2			
	Jatropha	Balanites	Jatropha	Balanites	Jatropha	Balanites
Tourteau	Jatropha	Balanites	Jatropha	Balanites	Jatropha	Balanites
Points de retours des sous-produits	À l'huilerie	À l'huilerie	Aux points de collecte	Aux points de collecte	Sur les SPB	Sur les SPB
Prix de vente (XOF/kg de sous-produit)	120	50	120	50	120	50
Gain (XOF/kg de biomasse prétraitée)	84,48	27,5	83,26	26,71	82,04	25,33
Coût total d'approvisionnement de la biomasse prétraitée	76,77	169,13	76,80	169,14	76,86	169,84
Coût total d'approvisionnement de la biomasse prétraitée avec valorisation des sous-produits	-7,71	141,63	-6,46	142,43	-5,17	144,51
Localisation du prétraitement	Aux points de collecte					
Nombre de sites de production de la biomasse sélectionnés	179	166	189	166	201	169
Nombre de points de collecte sélectionnés	3	3	3	3	3	3

Les résultats du cas 1 montrent que pour chacune des biomasses étudiées, le gain de vente de tous les sous-produits est non nul et positif. Les éléments de configuration du réseau logistique sont en revanche

similaires aux résultats obtenus à l'issue de l'implémentation de l'approvisionnement de la biomasse sans les options de valorisation des sous-produits (résultats du scénario 3). Ces résultats du cas 1 s'expliquent par le fait qu'aucun transport des sous-produits n'est requis. Aucune modification de la configuration du réseau n'est donc nécessaire, car les sous-produits sont juste vendus sur leur site de production sans générer des coûts supplémentaires liés à leur valorisation.

Concernant les résultats du cas 2 lorsque les sous-produits sont vendus sur des sites autres que ceux de leur production, il est observable que le coût total d'approvisionnement de la biomasse prétraitée avec valorisation des sous-produits a une valeur toujours supérieure à sa valeur la plus basse (du cas 1). De plus :

- Le gain de vente des capsules et coques est nul lorsque ceux-ci doivent être retournés sur les sites de production de la biomasse.
- Le gain de vente des capsules et coques a une valeur identique à celle du cas 1 lorsque les capsules et coques doivent être retournées à l'huilerie.
- Le gain de vente des tourteaux est toujours inférieur à sa valeur la plus basse au cas 1 lorsque ceux-ci doivent être retournés aux points de collecte ou à l'huilerie.

Concernant les éléments de configuration du réseau logistique, les résultats du cas 2 montrent qu'en dehors du retour des coques et capsules sur les sites de production de la biomasse, ces éléments de configuration sont différents de la configuration du réseau logistique du cas 1. À cet effet,

- La valorisation des capsules de Jatropha et des coques de Balanites à l'huilerie entraîne la délocalisation des opérations du prétraitement à l'huilerie.
- La valorisation des tourteaux de Balanites et Jatropha sur les sites autres que l'huilerie entraîne une augmentation du nombre de sites de production de la biomasse. La superficie totale exploitée reste cependant la même.

Ces gains de valorisation et de coût total d'approvisionnement de la biomasse prétraitée avec valorisation des sous-produits observés dans le cas 2 sont liés aux transports des sous-produits qui sont nécessaires pour acheminer ceux-ci vers leur point de retour. Ces transports retour engendrent des coûts qui réduisent le gain de valorisation et entraînent une augmentation du coût de revient de la biomasse prétraitée lorsque les sous-produits sont valorisés.

De plus, ces transports retour de sous-produits, en raison de leur coût, auraient certainement induit un gain négatif si la configuration du réseau devait rester inchangée. C'est ce qui explique les modifications de la configuration du réseau logistique observées dans le cas 2. Ces changements sont opérés afin d'optimiser simultanément les distances à parcourir pour l'approvisionnement en biomasse de l'huilerie et pour le retour des tourteaux. C'est ainsi que la délocalisation des opérations du prétraitement à l'huilerie lorsque les coques et capsules doivent y être retournées permet de supprimer les coûts de transport. L'augmentation du nombre de sites de production de la biomasse lorsque les tourteaux doivent y être retournés permet également de réduire la distance totale de transport retour des tourteaux. En effet, les sites de production de la biomasse à grande productivité qui sont les plus éloignés de l'huilerie sont

éliminés et remplacés par des sites de moins grande productivité, mais plus proches de l'huilerie (voir Figure 27 et Figure 28).

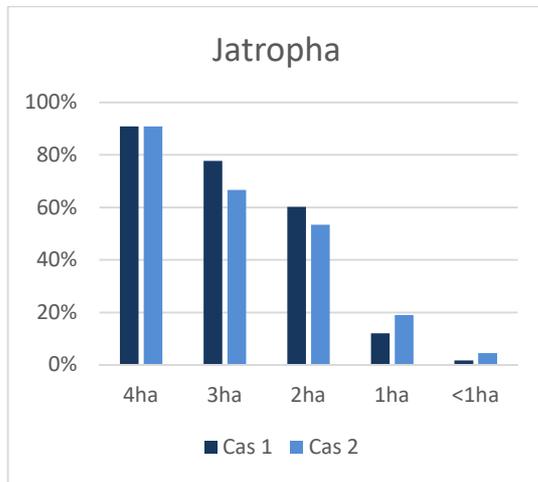


Figure 27. Pourcentage de sites de la biomasse sélectionnés dans les cas 1 et 2 lorsque les tourteaux de Jatropa sont retournés sur les sites de production de la biomasse

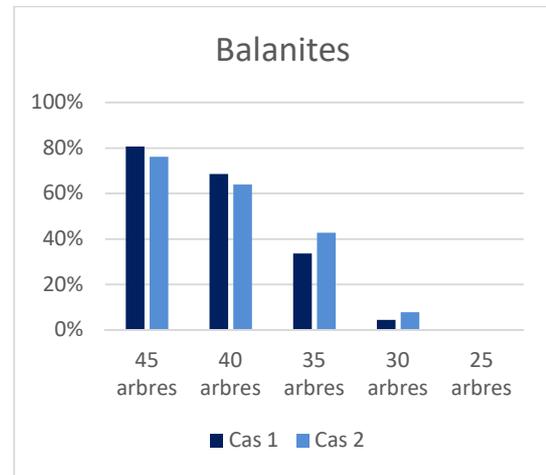


Figure 28. Pourcentage de sites de la biomasse sélectionnés dans les cas 1 et 2 lorsque les tourteaux de Balanites sont retournés sur les sites de production de la biomasse

Le résultat particulier observé pour le retour des coques et capsules sur les sites de production de la biomasse dans le cas 2 s'explique également par le fait que la recette de leur vente au prix fixé serait insuffisante pour couvrir le coût qu'engendrerait leur transport retour. Le retour des coques et des capsules sur les sites de production de la biomasse conduirait ainsi à un gain négatif (perte), raison pour laquelle la vente des coques et capsules n'est effectuée.

De tout ce qui précède, il ressort que la valorisation des sous-produits sur leur site de production permet d'éliminer les coûts liés à leur transport et de conserver la configuration du réseau d'approvisionnement en biomasse. Cela a pour conséquence l'obtention de la valeur la plus basse du coût total d'approvisionnement de la biomasse prétraitée avec valorisation des sous-produits. Lorsque les sous-produits doivent en revanche être retournés sur des sites différents de leur lieu de production (cas 2), les coûts de transport des sous-produits entraînent une augmentation du coût total d'approvisionnement de la biomasse prétraitée avec valorisation des sous-produits. La solution pour respecter la contrainte sur le point de retour dans ce cas peut consister soit à augmenter le prix de vente du sous-produit, soit à modifier la configuration du réseau logistique.

Ces résultats montrent que lorsque la valorisation des sous-produits est structurée suivant certaines configurations, cette valorisation améliore les performances économiques de l'approvisionnement en biomasse en entraînant la réduction du prix de revient de celle-ci.

2.2. Résultats et discussion de l'implémentation de la fonction environnement

2.2.1. Résultats des impacts du potentiel de réchauffement global de l'approvisionnement en biomasse des quatre scénarios

Les impacts totaux optimaux des émissions de GES générées par l'approvisionnement en biomasse des quatre scénarios, obtenus à l'issue de l'implémentation de la fonction environnement, sont présentés au Tableau 21 pour les deux biomasses étudiées. Ces impacts totaux concernent les impacts des opérations de culture, récolte, transport, stockage et prétraitement.

Tableau 21. Impact total des émissions de GES générées par l'approvisionnement en biomasse des quatre scénarios

Scénarios	Jatropha	Balanites
	Impact total d'émissions de GES de l'approvisionnement en biomasse (kg eq CO ₂)	Impact total d'émissions de GES de l'approvisionnement en biomasse (kg eq CO ₂)
Scénario 1	962,6	1283,83
Scénario 2	941,4	1253,78
Scénario 3	962,6	1283,83
Scénario 4	941,4	1253,8

Ces résultats montrent que les scénarios 1 et 3 (où la charrette est utilisée) possèdent les mêmes impacts. Il en est de même pour les scénarios 2 et 4 (où le tricycle est utilisé). Ces résultats montrent également que les scénarios 1 et 3 où la charrette est utilisée ont les impacts les plus élevés. Ces impacts sont plus élevés d'environ 20 kg eq CO₂ pour le Jatropha et 30 kg eq CO₂ pour le Balanites.

L'explication et la compréhension de ces résultats se trouvent dans l'analyse et la discussion de la répartition de l'impact total d'approvisionnement de chaque scénario (voir Figure 29 pour le Jatropha et Figure 30 pour le Balanites). Les éléments de configuration du réseau logistique obtenue après l'implémentation de chacun des scénarios (voir Tableau 22 pour le Jatropha et Tableau 23 pour le Balanites) contribuent également à la compréhension de ces résultats.

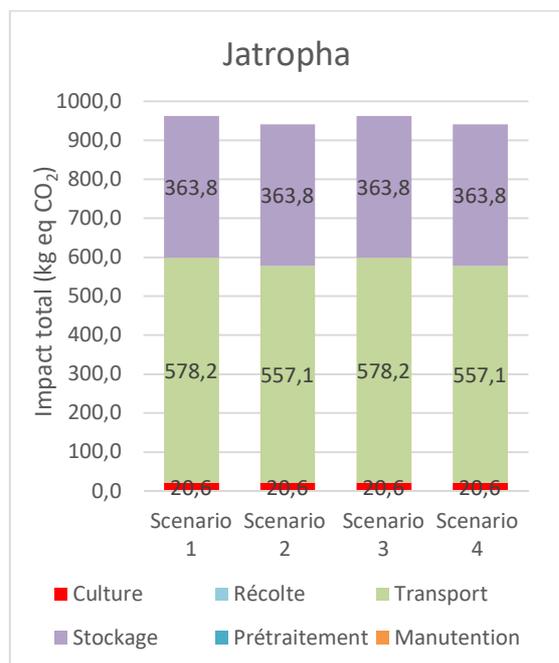


Figure 29. Jatropha : répartition des impacts des émissions de GES de l'approvisionnement en biomasse pour les quatre scénarios

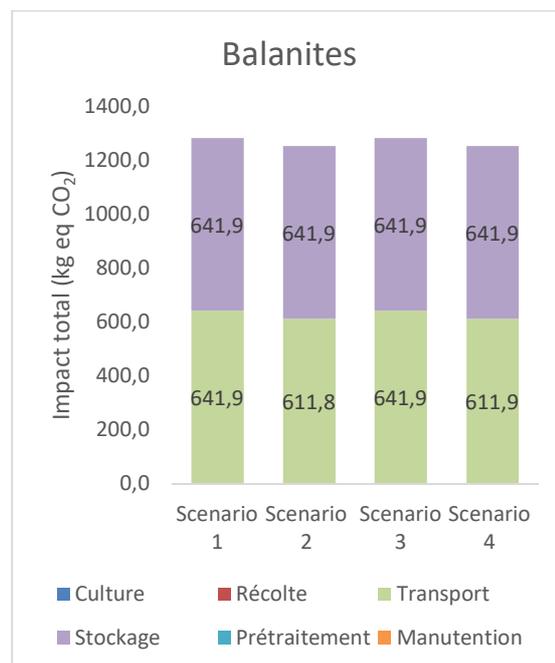


Figure 30. Balanites : répartition des impacts des émissions de GES de l'approvisionnement en biomasse pour les quatre scénarios

Tableau 22. Jatropha : résultats relatifs aux éléments du réseau logistique

Scénarios	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Moyens de transport disponible	Charrette	Tricycle	Charrette	Tricycle
Technologie de prétraitement aux points de collecte	Manuelle	Manuelle	Motorisé	Motorisé
Nombre de sites de production de la biomasse	394	349	394	349
Nombre de points de collecte	13	12	13	12
Localisation du Prétraitement et technologie disponible	Aux champs (Manuelle)	Aux champs (Manuelle)	Aux champs (Manuelle)	Aux champs (Manuelle)
Superficie totale cultivée (ha)	320	320	320	320
Système de culture choisi	Système de culture intercalaire intensif			
Quantité totale transportée entre les champs et les points de collecte (t)	300	300	300	300
Nombre total de voyages à effectuer entre les champs et les points de collecte	600	273	600	273
Quantité totale transportée entre les points de collecte et l'huilerie (t)	300	300	300	300
Nombre total de voyages à effectuer entre les points de collecte et l'huilerie	30	30	30	30

Tableau 23. Balanites : résultats relatifs aux éléments du réseau logistique

Scénarios	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Moyens de transport disponible	Charrette	Tricycle	Charrette	Tricycle
Technologie de prétraitement aux points de collecte	Manuelle	Manuelle	Motorisé	Motorisé
Localisation du Prétraitement et technologie disponible	Sur les sites de production de la biomasse (Manuelle)	Sur les sites de production de la biomasse (Manuelle)	Sur les sites de production de la biomasse (Manuelle)	Sur les sites de production de la biomasse (Manuelle)
Superficie totale cultivée (ha)	1348,53	1344,88	1342,8	1345,19
Quantité totale transportée entre les champs et les points de collecte (t)	300	300	300	300
Nombre total de voyages à effectuer entre les champs et les points de collecte	600	273	600	273
Quantité totale transportée entre les points de collecte et l'huilerie (t)	300	300	300	300
Nombre total de voyages à effectuer entre les points de collecte et l'huilerie	30	30	30	30

2.2.1.1. Composantes de l'impact total d'approvisionnement en biomasse

La répartition des impacts totaux d'approvisionnement en biomasse présentée sur la Figure 29 pour le Jatropha et sur la Figure 30 pour le Balanites, montre qu'en dehors du transport, tous les autres éléments constituant l'impact total (impacts de culture, récolte, prétraitement, stockage et manutention) ont des valeurs d'impact identiques. De plus, seuls la culture du Jatropha, le transport et le stockage ont des valeurs d'impact non nulles.

- *Impacts de la récolte de la manutention et du stockage*

La valeur de l'impact des émissions de GES identiques et nulles pour les opérations de récolte, et de manutention est liée au fait qu'aucune émission de GES n'ait été attribuée à ces opérations parce qu'elles sont réalisées manuellement et que le travail humain n'a pas été pris en compte dans l'étude des émissions de GES.

La valeur identique de l'impact du stockage dans les quatre scénarios pour chacune des biomasses s'explique par le fait que la même quantité de biomasses (300 t) est stockée à l'huilerie (voir Tableau 22 et Tableau 23).

- *Impact du Prétraitement*

Concernant le prétraitement, la valeur identique et nulle de son impact dans les quatre scénarios est liée au fait que la localisation du prétraitement sur les sites de production de la biomasse est toujours choisie pour les deux biomasses étudiées. La raison du choix de cette localisation sur les sites de production de la biomasse est liée au double avantage qui y est attaché. En effet, lorsque le prétraitement est localisé sur les sites de production de la biomasse, premièrement, le fait qu'il y soit réalisé manuellement n'engendre pas d'émissions de GES. Deuxièmement, le fait qu'uniquement la biomasse prétraitée est transportée, chargée, déchargée dans tout le réseau logistique et stockée à l'huilerie, entraîne une réduction des quantités de biomasses à transporter. Cette réduction des quantités de biomasses concerne 1,6 fois et 8,3 fois moins de quantité de biomasse à transporter, manipuler et stocker respectivement pour le Jatropha et pour le Balanites. Au vu de ces deux avantages, il est donc compréhensible que la localisation des opérations du prétraitement sur les sites de production de la biomasse soit optimale.

- *Impacts de la culture*

À propos de la culture (qui concerne uniquement le Jatropha), la valeur identique de l'impact de cette opération dans les quatre scénarios est liée au fait que la demande en biomasse brute des huileries a la même valeur dans les quatre scénarios.

La valeur non nulle de l'impact de la culture est quant à elle liée au choix par le modèle du même système de culture intercalaire intensif pour la production des fruits du Jatropha. L'adoption du système de culture intercalaire intensif s'explique par son rendement en graines plus élevé que celui du système de culture intercalaire. Elle s'explique aussi par la réduction de la distance totale à parcourir pour l'approvisionnement de la biomasse de la biomasse qu'engendre l'adoption de ce système de culture décrite au paragraphe suivant.

- *Impacts du transport*

Concernant le transport, les résultats sur les Figure 29 et Figure 30 montrent que pour les deux biomasses, les impacts relatifs aux émissions de GES générées par le transport dans les scénarios avec la charrette sont plus élevés que ceux avec le tricycle. Cette différence s'explique principalement par l'indicateur d'impact d'émission de la charrette qui est plus élevé que celui du tricycle (voir Tableau 11), en raison des émissions de méthane entérique de l'âne qui tracte la charrette.

Les résultats sur les Figure 29 et Figure 30 montrent également que l'impact du transport représente à lui seul environ 60 % de l'impact total de l'approvisionnement en biomasse dans les scénarios du Jatropha. Pour le Balanites, l'impact du transport représente à lui seul environ 50 % de l'impact total de l'approvisionnement en biomasse. Un résultat similaire a été rapporté par (Ahmed and Sarkar, 2018) dont les travaux sur l'approvisionnement en biomasse pour la production de biocarburants de 2^{ème} génération ont montré que le transport de la biomasse des zones agricoles vers les bioraffineries constituait une source majeure d'émission de carbone et représentait 51,20% des émissions totales de carbone dans toute la chaîne d'approvisionnement des biocarburants.

En raison de cet impact élevé du transport, les alternatives permettant de réduire les distances à parcourir pour approvisionner l'huilerie sont sélectionnées. C'est cette exigence de réduction des distances à parcourir qui a pour conséquence :

- Le choix de l'emplacement du prétraitement sur les sites de production de la biomasse (souligné plus haut) qui permet de réduire la quantité de matière à transporter entre les sites de production de la biomasse et les points de collecte réduisant ainsi le nombre de voyages à effectuer pour la collecte de la biomasse.
- Le choix systématique par le modèle du système de culture intercalaire intensif pour la culture du Jatropha. L'adoption du système de culture intercalaire intensif qui a un rendement en graines supérieur à celui du système de culture intercalaire permet en effet de produire plus de biomasses sur des superficies moins grandes. Ainsi, la demande en biomasse brute de l'huilerie peut être produite sans avoir à exploiter des sites de production de la biomasse qui sont éloignés de l'huilerie.
- La structure du réseau logistique dont la description est faite au paragraphe suivant.

2.2.1.2. Structure du réseau logistique

La structure du réseau logistique obtenu après l'implémentation de la fonction environnement sur chacun des quatre scénarios est présentée sur les Figure 31 à Figure 34 pour le Jatropha et sur les Figure 35 à Figure 38 pour le Balanites.

Ce résultat montre que, contrairement au cas de la fonction économique où les sites de production de la biomasse les plus productifs étaient choisis, ici, les sites de production de la biomasse et les points de collecte les plus proches de l'huilerie sont ceux qui sont sélectionnés. Ce choix est fait indépendamment de la productivité des sites de production de la biomasse (comme le montrent les Figure 40 et Figure 41), afin de réduire les distances à parcourir pour la collecte de la biomasse. Les deux contraintes que sont la capacité d'accueil de chaque point de collecte et la distance de couverture du moyen de transport utilisé sont toujours cependant respectées.

Ce résultat sur l'aspect du réseau logistique montre également que plusieurs (plus de la moitié) des points de collecte sont ouverts et les sites de production de la biomasse situés à moins de 10 km de ceux-ci leur sont affectés, quel que soit le moyen de transport utilisé. C'est la raison pour laquelle l'effet de la distance de couverture des moyens de transport sur l'aspect du réseau logistique est moins perceptible ici lorsque le tricycle est utilisé. Cette observation a pour cause la réduction de la distance à parcourir entre les sites de production de la biomasse et les points de collecte au détriment de la distance à parcourir entre les points de collecte et l'huilerie en raison du fait que les indicateurs d'impact du tricycle et de la charrette sont supérieurs à celui du camion (voir Tableau 11).

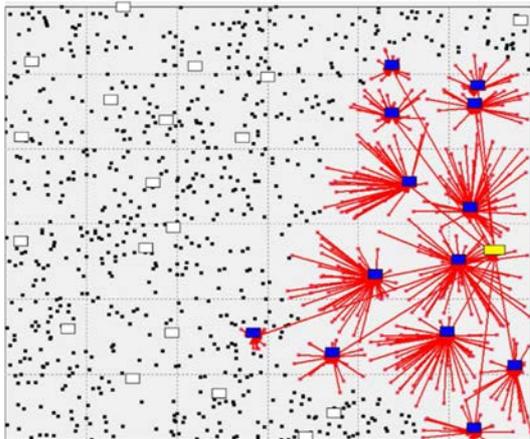


Figure 31. Jatropha : réseau d'approvisionnement pour le Scénario 1

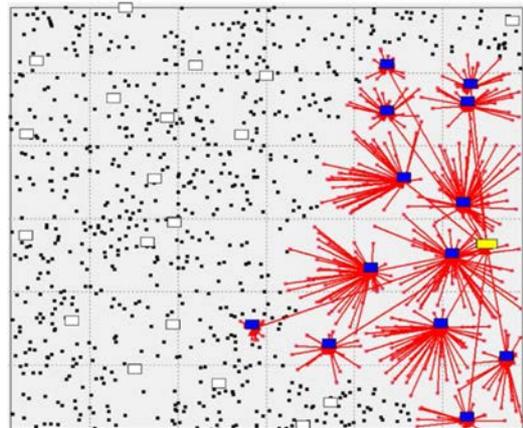


Figure 32. Jatropha : réseau d'approvisionnement pour le Scénario 2

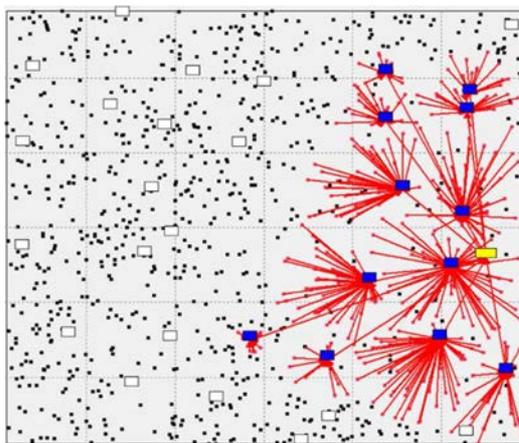


Figure 33. Jatropha : réseau d'approvisionnement pour le Scénario 3

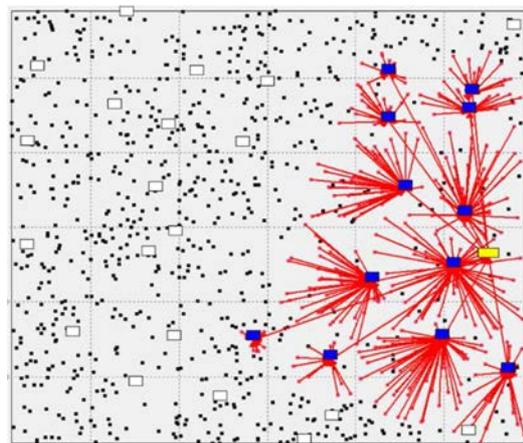


Figure 34. Jatropha : réseau d'approvisionnement pour le Scénario 4

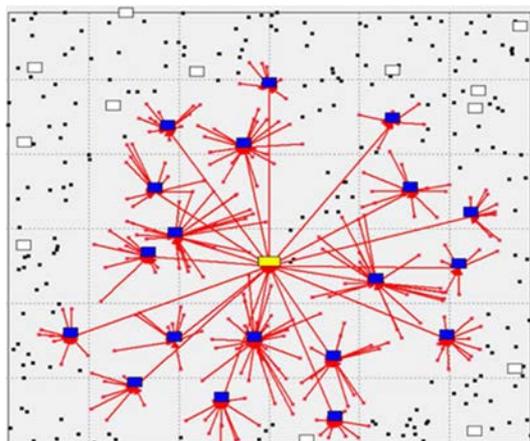


Figure 35. Balanites : Réseau d'approvisionnement pour le Scénario 1

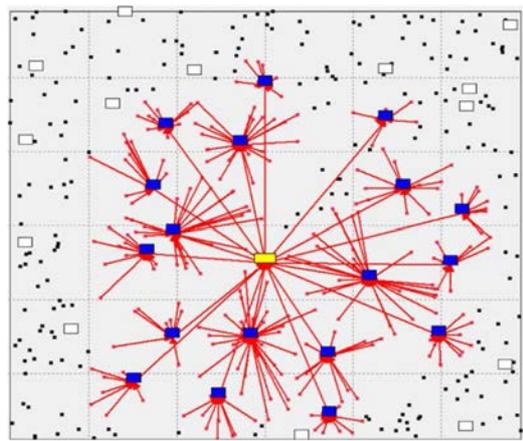


Figure 36. Balanites : Réseau d'approvisionnement pour le Scénario 2

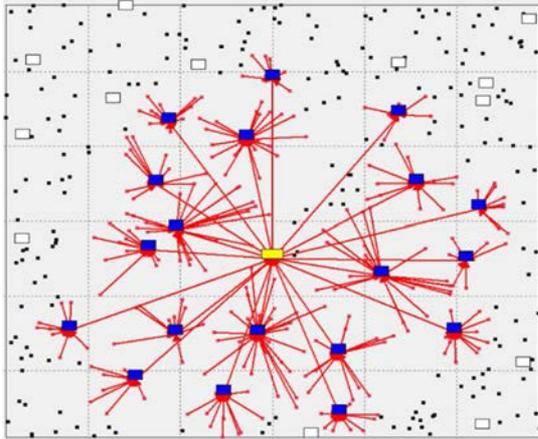


Figure 37. Balanites : Réseau d'approvisionnement pour le Scénario 3

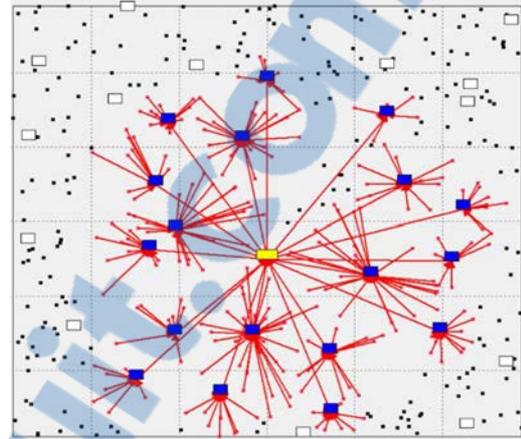


Figure 38. Balanites : Réseau d'approvisionnement pour le Scénario 4

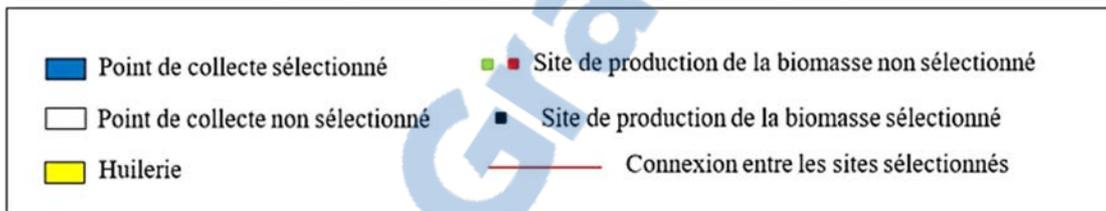


Figure 39. Légende des figures 31 à 38

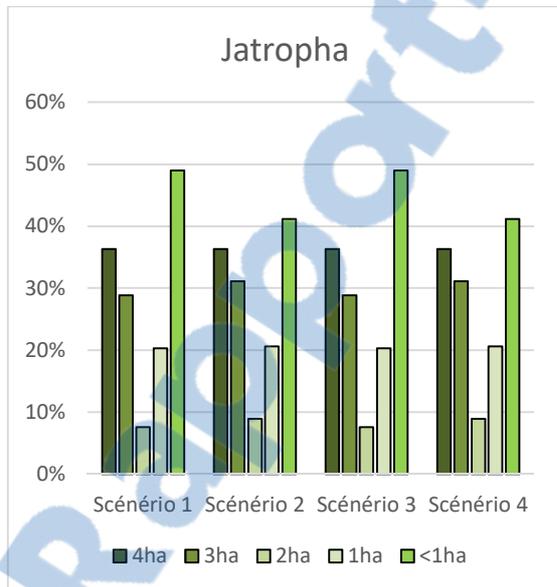


Figure 40. Pourcentage de sites de culture du Jatropha sélectionnés en fonction de leur superficie

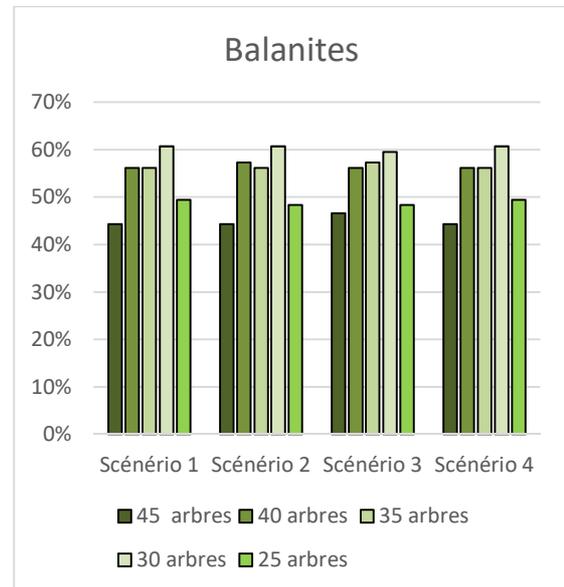


Figure 41. Pourcentage de sites de production de fruits de Balanites sélectionnés en fonction du nombre d'arbres par unité de surface

De l'analyse et de la discussion des résultats de la fonction objectif environnement implémentée sur les quatre scénarios, il ressort premièrement que le système de culture intercalaire intensif (système de culture intercalaire avec apport d'engrais et de soins à la plante énergétique) est optimal pour la culture du *Jatropha*, et est donc toujours privilégié par le modèle au système de culture intercalaire en raison de son rendement qui est plus élevé.

Il ressort de cela que les sites situés à proximité de l'huilerie sont optimaux pour la production de la biomasse, car ils permettent de réduire la distance à parcourir pour la collecte de la biomasse, réduisant de ce fait les impacts du transport. Un résultat similaire a été rapporté par (Ahmed and Sarkar, 2018) dont les travaux ont montré que les distances de transport entre les nœuds dans un réseau d'approvisionnement en biomasse jouaient un rôle important dans les émissions de carbone en ce sens que l'augmentation de la distance entre les nœuds dans le réseau d'approvisionnement entraînait une augmentation des émissions de carbone.

En outre, le prétraitement manuel sur les sites de récolte et avant transport de la biomasse est l'option optimale pour le prétraitement de la biomasse oléagineuse parce qu'il n'engendre pas d'émissions de GES et permet de réduire les quantités de biomasses avant le transport, le stockage et la manutention.

Enfin, en raison des émissions de GES élevées de la charrette comparé au tricycle, le moyen le plus optimal pour transporter la biomasse depuis les sites de récolte de la biomasse jusqu'aux points de collecte consiste à utiliser le tricycle.

Ces résultats sont discordants de ceux trouvés après implémentation de la fonction objectif économique qui avaient montré que le système de culture intercalaire, les sites de production de la biomasse les plus productifs, le prétraitement motorisé aux points de collecte et la charrette étaient optimaux pour la production et l'approvisionnement de la biomasse oléagineuse. Ces résultats discordant selon le critère d'optimisation considéré mettent en évidence les décisions souvent contradictoires qui apparaissent lorsque plusieurs critères d'optimisation sont considérés et qui ont conduit au développement de modèle d'optimisation multi objectif (Branke et al., 2008; Collette and Siarry, 2004).

Afin de mieux percevoir les différences entre le *Jatropha* et le *Balanites*, une étude comparative des impacts de l'approvisionnement en biomasse des deux cultures énergétique dont les résultats sont présentés dans le paragraphe suivant.

2.2.2. Analyse comparative des impacts d'approvisionnement du *Jatropha* et du *Balanites*

Pour les deux biomasses, l'impact total des émissions de GES de l'approvisionnement en biomasse du scénario 3 ainsi que sa répartition sont présentés à la Figure 42.

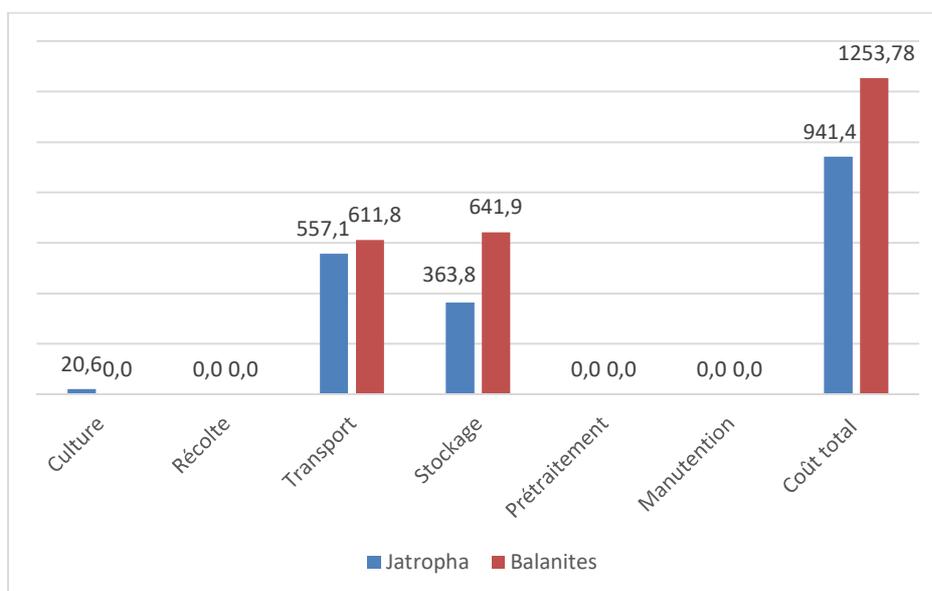


Figure 42. Impact des émissions de GES de l'approvisionnement en biomasse du scénario 3 pour le Balanites et le Jatropha

Ces résultats montrent que l'impact total des émissions de GES de l'approvisionnement en amandes de Balanites est supérieur à celui de l'approvisionnement en graines de Jatropha. Il en est de même pour l'impact du stockage et du transport du Balanites qui sont supérieurs à ceux du Jatropha. Pour le Jatropha, seul l'impact de la culture est supérieur à celui du Balanites qui a une valeur nulle.

Concernant le transport, la différence d'impact entre le Jatropha et le Balanites (malgré le fait que les mêmes quantités de biomasses prétraitées —300 t— soient transportées) est liée à répartition éparse des sites de production de la Biomasse dans le réseau d'approvisionnement. En effet, les sites de production de la biomasse sont moins denses dans le cas du Balanites qui est une espèce sauvage non plantée. Cela augmente la distance à parcourir entre les différents sites dans le réseau logistique.

Au sujet de l'impact du stockage, sa valeur pour le Balanites représente près du double de sa valeur pour le Jatropha. Cette différence est liée à l'usage unique du sac en polypropylène de stockage du Balanites mentionné au paragraphe 1.4 qui induit un indicateur d'impact d'émissions de GES élevé (voir Tableau 8).

Pour clore cette étude comparative des impacts de l'approvisionnement des deux biomasses, il peut être retenu que lorsque la configuration du réseau d'approvisionnement est optimisée, l'impact total d'approvisionnement en amandes de Balanites est supérieur à celui de l'approvisionnement en graines de Jatropha. Cet impact élevé pour le Balanites est lié surtout à l'impact du stockage qui représente environ 50% de l'impact total d'approvisionnement en amandes de Balanites est attribuable aux stockages, contre 38 % dans le cas de l'approvisionnement en graines de Jatropha. Ce résultat souligne l'intérêt qu'il pourrait avoir à explorer d'autres options de stockage telles que le stockage dans des contenants réutilisables. Cela pourrait permettre de réduire considérablement l'impact des émissions de GES de l'approvisionnement de la biomasse, surtout de l'amande de Balanites.



2.2.3. Implémentation de la valorisation du tourteau de Jatropha sur la fonction environnement

Les résultats de l'implémentation de la valorisation des tourteaux sont présentés au Tableau 24 ci-dessous.

Tableau 24. Résultats des impacts d'émissions de GES de l'approvisionnement en biomasse avec valorisation du tourteau

Impacts (kg eq CO ₂)	Scénario 3 sans valorisation	Scénario 3 avec valorisation du tourteau
Culture	20,58	17,06
Récolte	0	0
Transport	578,234	557,27
Stockage	363,76	363,76
Prétraitement	0	0
Manutention	0	0
Impact total	962,574	1182,4
Gain	0	-244,307
Nombre de sites de production de la biomasse	393	350
Nombre de points de collecte ouverts	13	13
Localisation du Prétraitement	Sur les sites de production de la biomasse	Sur les sites de production de la biomasse

Il est observable de ces résultats que la substitution de l'engrais NPK par le tourteau de Jatropha entraîne une réduction de l'impact de la culture du Jatropha qui passe de 20,58 à 17,06 kg eq CO₂ quand le tourteau de Jatropha est utilisé aux champs.

L'impact total de l'approvisionnement en biomasse est cependant plus élevé lorsque le tourteau de Jatropha est utilisé comme engrais organique. Cette valeur élevée de l'impact total est liée au transport retour des tourteaux vers les champs de culture engendre un impact de 249,18 kg eq CO₂ conduisant à un coût environnemental de 244,31 kg eq CO₂.

Ce résultat signifie que la réutilisation du tourteau n'améliore pas les performances environnementales de l'approvisionnement en graines de Jatropha en raison de leur transport retour qui génère d'importantes émissions de GES. Cela implique que le gain environnemental de la valorisation des tourteaux serait meilleur si ceux-ci étaient réutilisés à proximité de l'huilerie afin de réduire l'impact de leur transport retour.

2.3. Analyse de sensibilité

2.3.1. Influence de la taille du réseau sur les coûts et impacts d'approvisionnement

Afin d'observer l'influence de la taille du réseau logistique sur les différents coûts et impacts des émissions de GES de l'approvisionnement en biomasse, le scénario 3 a été réimplémenté en faisant varier le rayon du réseau logistique de 20 km à 100 km.

Les résultats des coûts obtenus à l'issue de cette réimplémentation sont présentés sur la Figure 43 pour le Jatropha et sur la Figure 44 pour le Balanites.

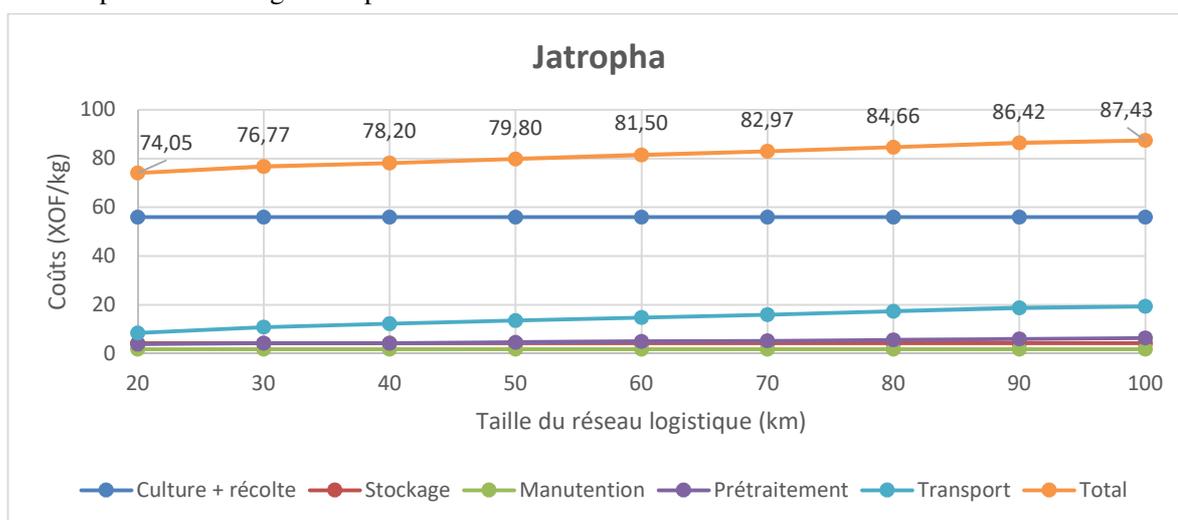


Figure 43. Jatropha : variation des coûts d'approvisionnement en biomasse en fonction de la taille du réseau logistique

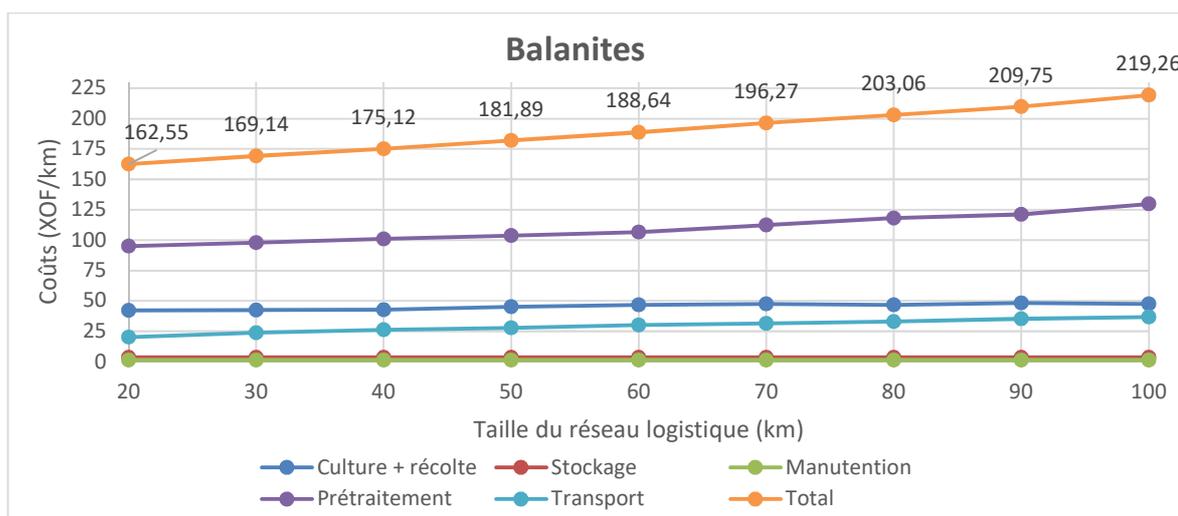


Figure 44. Balanites : variation des coûts d'approvisionnement en biomasse en fonction de la taille du réseau logistique

Les résultats des impacts des émissions de GES obtenus sont quant à eux présentés sur la Figure 45 pour le Jatropha et sur la Figure 46 pour le Balanites.

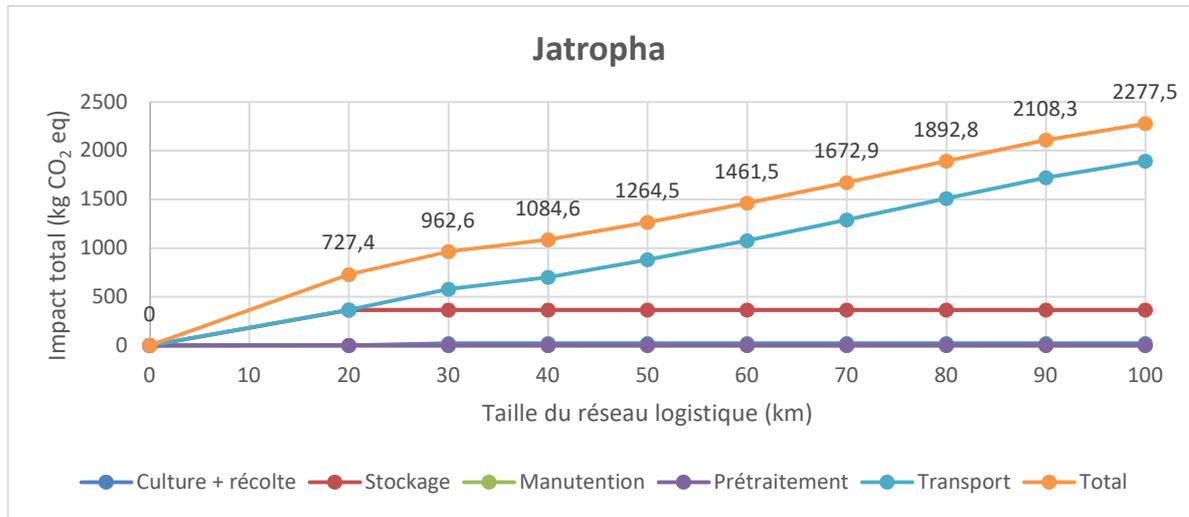


Figure 45. Jatropha : variation des impacts des émissions de GES en fonction de la taille du réseau logistique

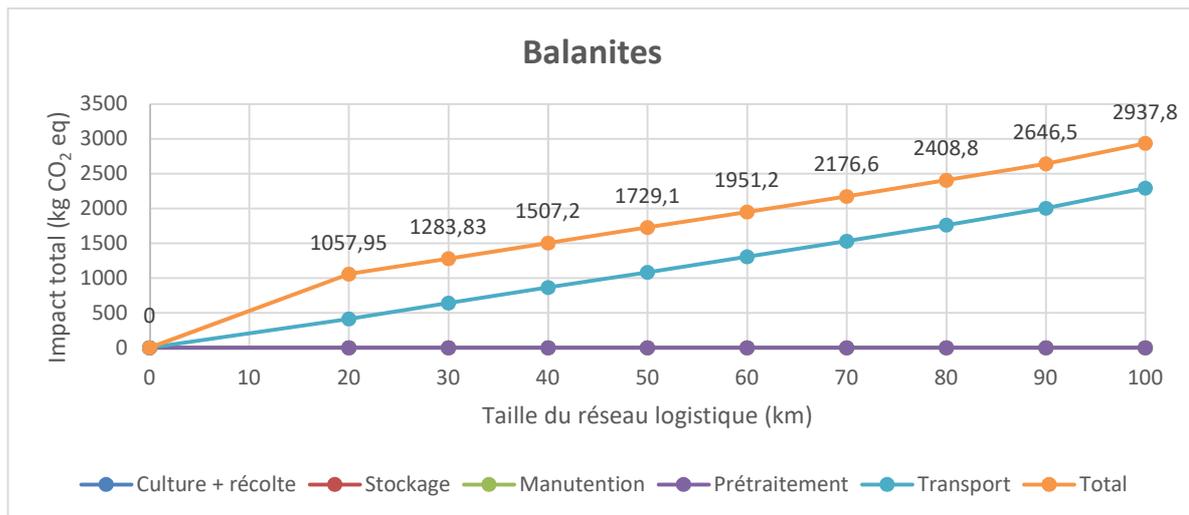


Figure 46. Balanites : variation des impacts des émissions de GES en fonction de la taille du réseau logistique

Ces résultats permettent d'observer que pour le Jatropha, l'augmentation du rayon logistique entraîne une augmentation du coût et de l'impact du transport avec pour conséquence, l'augmentation du coût total et de l'impact total d'approvisionnement en graine de Jatropha. Tous les autres coûts et impacts des opérations de culture, récolte, stockage, prétraitement et manutention restent constants quand la taille du réseau logistique augmente. Dans le cas du Balanites, l'augmentation du rayon logistique entraîne une augmentation des coûts et de l'impact du transport ainsi que du coût de prétraitement avec également pour conséquence, l'augmentation du coût total et de l'impact total d'approvisionnement en amandes de Balanites. Et comme dans le cas du Jatropha, tous les autres coûts et impacts des opérations de culture,

récolte, stockage, manutention, ainsi que l'impact du prétraitement, restent constants quand la taille du réseau logistique augmente.

Pour les deux biomasses, les augmentations des coûts et des impacts du transport observées sont logique, car les distances à parcourir entre les différents sites du réseau logistique augmentent lorsque la taille du réseau augmente.

Concernant les coûts et les impacts de la culture et de la récolte, ceux-ci ne varient pas, car la superficie totale cultivée et récoltée demeure la même, quelle que soit la taille du réseau logistique. Il en est de même pour les coûts et les impacts du stockage et de la manutention qui sont constants, car les mêmes quantités de biomasses sont toujours manipulées indépendamment de la taille du réseau.

Au sujet de l'augmentation des coûts de prétraitement observée dans le cas du Balanites, celle-ci est en relation avec l'augmentation du nombre de points de collecte sélectionnés. En effet, la nécessité de sélectionner les sites de production de la biomasse à grande productivité et les deux contraintes que sont : la distance de couverture de la charrette et la capacité d'accueil de chaque point de collecte contraignent à la sélection d'un nombre croissant de points de collecte lorsque la taille du réseau logistique augmente. Le prétraitement étant toujours localisé aux points de collecte, l'augmentation du nombre de points de collecte entraîne donc une augmentation des coûts fixes de prétraitement par l'accroissement du nombre de machines de prétraitement à acheter.

Au vu de tout ce qui précède, il peut être conclu que la taille du réseau logistique influence grandement les coûts et impacts totaux de l'approvisionnement en biomasse. L'étude de l'influence de la taille du réseau logistique sur les coûts d'approvisionnement confirme également le résultat déjà souligné plus tôt dans le document et selon lequel les coûts d'approvisionnement en amandes de Balanites sont affectés par le coût du prétraitement quand les coûts d'approvisionnement en graines de Jatropha eux, sont affectés par le coût du transport.

2.3.2. Influence de la variation du prix de vente des sous-produits

Afin également d'observer l'influence de l'augmentation ou de la diminution du prix de vente des sous-produits sur le coût de revient de la biomasse et sur le coût de l'HVC, le scénario 3 a été réimplémentée en faisant varier le prix de vente des sous-produits. Les résultats obtenus sont présentés à la Figure 47 pour le Jatropha et à la Figure 48 pour le Balanites.

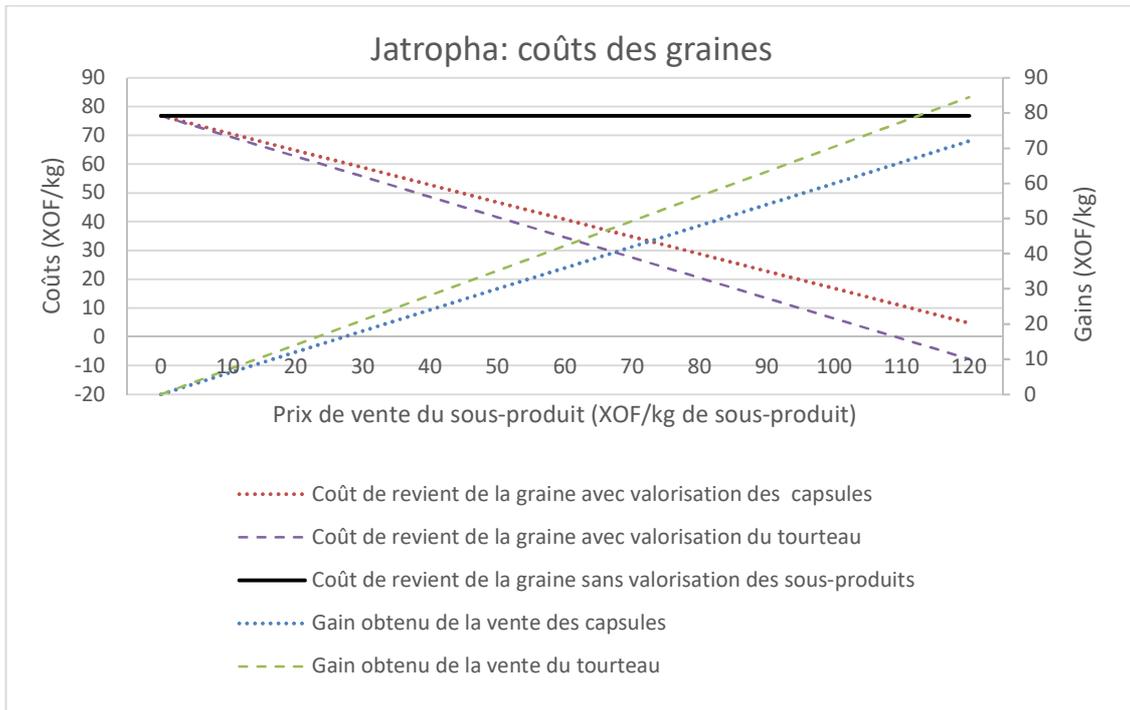


Figure 47. Évolution du coût de revient de la biomasse lorsque les sous-produits du Jatropha sont vendus

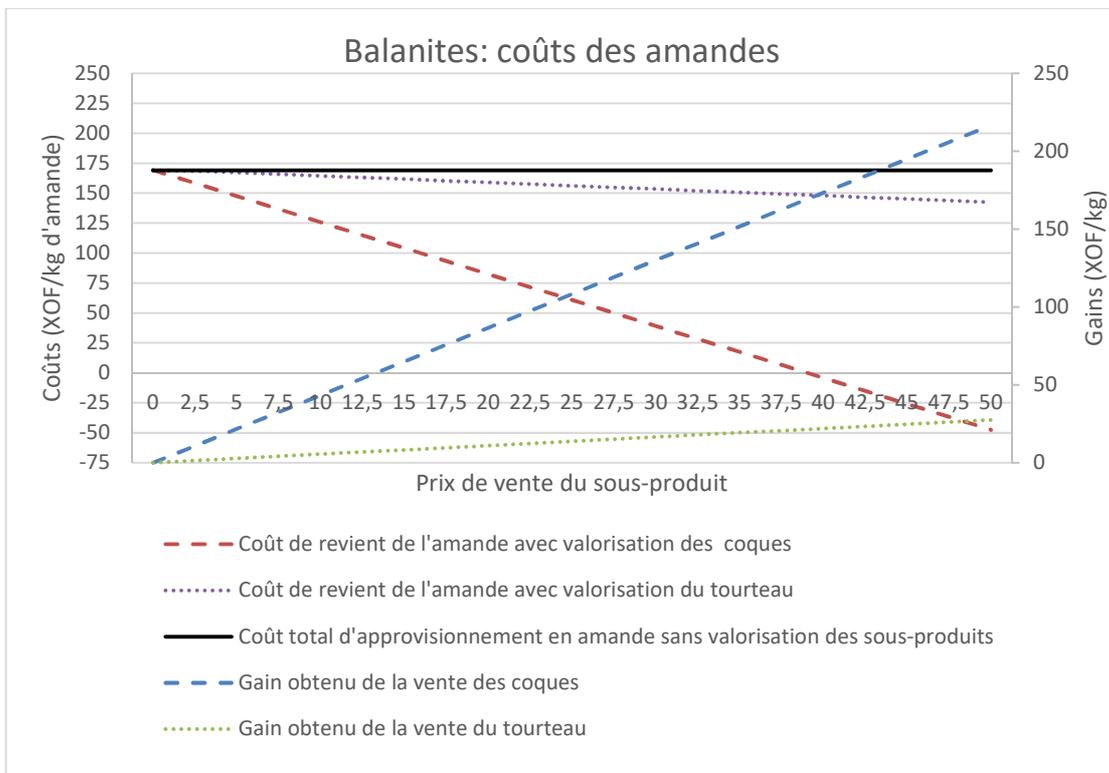


Figure 48. Évolution du coût de revient de la biomasse lorsque les sous-produits du Balanites sont vendus

Ces résultats montrent que l'augmentation du prix de vente de chaque sous-produit engendre une diminution du coût de revient de la biomasse prétraitée lorsque le sous-produit est valorisé.

Ces résultats montrent en outre que pour les tourteaux des deux biomasses, il existe une valeur seuil du prix de vente à partir duquel le coût de revient devient négatif et le gain devient supérieur au coût total d'approvisionnement. Ce prix seuil qui est appelé prix bénéfique dans la suite du document se situe à l'intersection de la courbe du gain de valorisation et de la courbe du coût total d'approvisionnement. Sa valeur est d'environ 110 XOF/kg pour le tourteau de Jatropha et de 39 XOF/kg pour le tourteau de Balanites.

Au-dessus de ce prix bénéfique, si tous les tourteaux sont vendus, les sous-produits génèrent plus de recette que l'approvisionnement de l'huilerie en graines de Jatropha et amande de Balanites. Pour les capsules de Jatropha et les coques de Balanites, le prix bénéfique se situe au-delà de la valeur de leur prix de vente maximale admis qui est de 50 XOF/kg dans ce cas d'étude (voir paragraphe 1.6.3 du présent chapitre).

Il est également observable des Figure 47 et Figure 48 qu'à égal prix de vente, la courbe du gain de valorisation des tourteaux de Jatropha est toujours supérieure à la courbe du gain de valorisation des capsules de Jatropha. À l'inverse, à égal prix de vente, la courbe du gain de valorisation des tourteaux de Balanites est toujours inférieure à la courbe du gain de valorisation des coques. Ces observations impliquent que lorsque toute la quantité de sous-produits générée est vendue, il y a un plus grand bénéfice économique à vendre les coques de Balanites qu'à vendre les tourteaux de Balanites. De même, il y a un plus grand bénéfice économique à vendre les tourteaux de Jatropha qu'à vendre les capsules de Jatropha. Ces différences s'expliquent par les quantités générées de chacun des sous-produits. En effet, il y a 44 kg de tourteaux et 37,5 kg de capsules générés dans le traitement de 100 kg de fruits de Jatropha et 6,6 kg de tourteaux et 52 kg de coques générés dans le traitement de dans 100 kg de fruits de Balanites (voir Figure 10 et Figure 11)

Les résultats de l'évolution du coût de l'HVC obtenu sont présentés à la Figure 49Figure 47 pour le Jatropha et à la Figure 50 pour le Balanites.

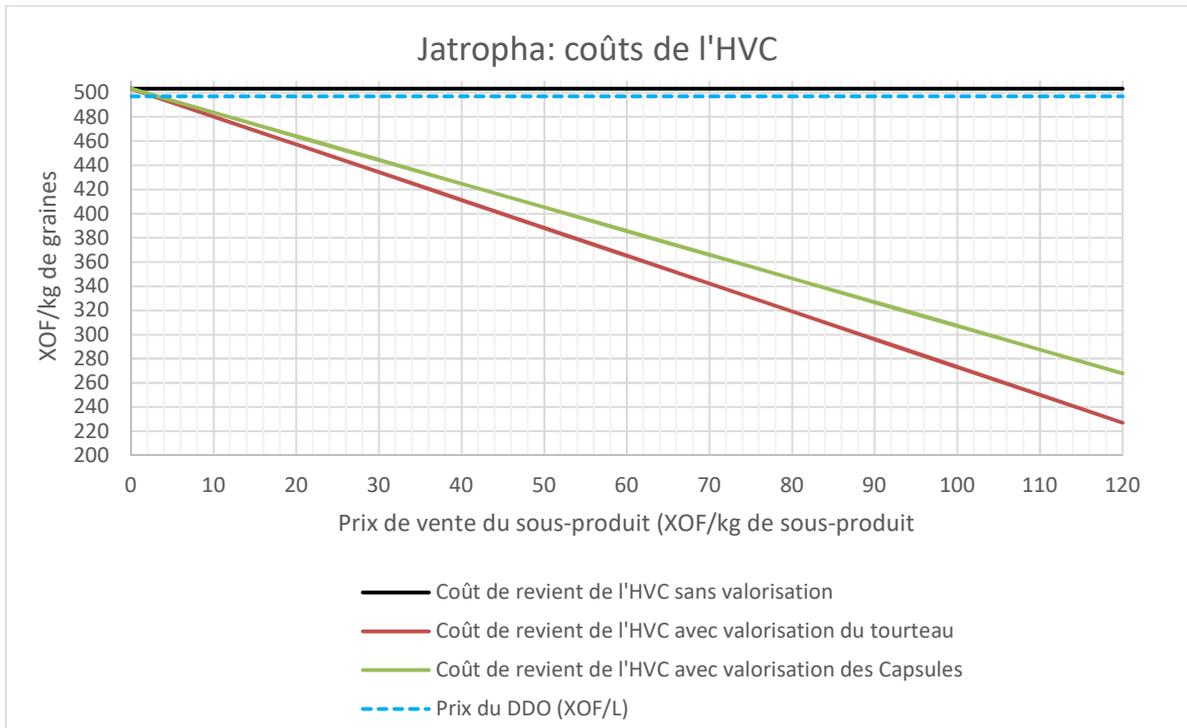


Figure 49. Évolution du coût de l'HVC lorsque les sous-produits du Jatropha sont vendus

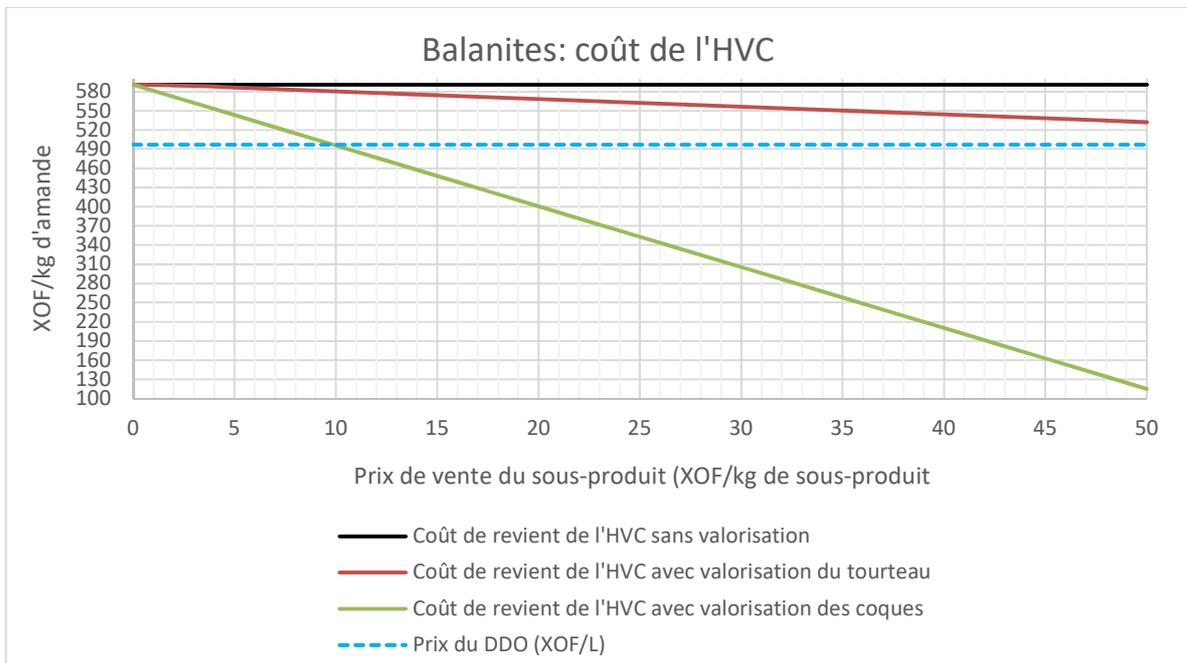


Figure 50. Évolution du coût de l'HVC lorsque les sous-produits du Balanites sont vendus

Lorsque les sous-produits sont vendus, ces résultats montrent que l'augmentation du prix de vente de chaque sous-produit entraîne la diminution du coût de revient de l'HVC.

Pour le *Jatropha*, ce coût de revient de l'HVC diminue jusqu'à aux valeurs de 405 XOF/L et 230 XOF/L respectivement lorsque les capsules sont vendues au prix du bois qui est de 50 XOF/kg et le tourteau au prix de l'engrais NPK qui est de 120 XOF/kg. À partir de la valeur du prix de vente des capsules et tourteau de 2 XOF/kg, le prix de l'HVC devient inférieur aux prix du DDO. Pour le *Balanites*, ce coût de revient de l'HVC diminue jusqu'à la valeur de 110 XOF/L lorsque les coques sont vendues au prix du bois qui est de 50 XOF/kg. À partir de la valeur du prix de vente des coques de 10 XOF/kg, le prix de l'HVC devient également inférieur aux prix du DDO.

Conclusion

Dans ce chapitre, le modèle d'optimisation de l'approvisionnement en biomasse oléagineuse décrit au chapitre 3 a été implémenté sur un cas d'étude en Afrique de l'Ouest. Dans ce cas d'étude, deux biomasses que sont le *Balanites aegyptiaca* et le *Jatropha curcas*, différents systèmes de culture du *Jatropha*, différents moyens de transport, différentes options de prétraitement, et différentes options de valorisation des sous-produits ont été considérés et étudiés.

L'analyse des résultats de l'implémentation du modèle a révélé que dans le contexte de l'étude, les coûts d'approvisionnement en graines de *Jatropha* sont inférieurs à ceux du *Balanites*. Il en est de même pour les impacts de l'approvisionnement en graines de *Jatropha* qui sont toujours inférieurs à ceux du *Balanites*. Ces résultats montrent également qu'un système de culture intercalaire produisant un rendement d'au moins 810 kg/ha permet de produire la demande en graines de *Jatropha* afin d'alimenter une petite unité de production de biocarburant au Burkina Faso ou au Mali. Ce qui est intéressant avec ce résultat c'est qu'il implique qu'il est possible de cultiver le *Jatropha* en adoptant le système de culture intercalaire permettant ainsi aux agriculteurs d'exploiter leurs terres pour la production simultanée de cultures vivrières et énergétiques. Cela pourrait permettre d'atténuer, voire de réduire la potentielle concurrence qui pourrait apparaître pour l'utilisation des terres agricoles, car force est de se rappeler que le contexte agricole de la majorité des pays ouest-africains est marqué par la pratique de l'agriculture familiale de subsistance.

Les résultats de l'implémentation du cas d'étude ont permis aussi d'observer que du point de vue économique, la charrette à traction animale et le prétraitement motorisé aux points de collecte sont optimaux pour l'approvisionnement en biomasse des unités de production de biocarburants oléagineux en Afrique de l'Ouest. Du point de vue environnemental en revanche, les résultats discordent, car c'est plutôt le tricycle et le prétraitement manuel sur les sites de production de la biomasse et avant transport qui sont optimaux pour l'approvisionnement en biomasse des unités de production de biocarburants oléagineux.

En outre, les résultats présentés dans ce chapitre montrent que lorsque les points de retour sont bien choisis, la vente des sous-produits et leur valorisation conduit à la réduction du prix de revient et de la biomasse et de l'HVC. Cependant, malgré le fait que le tourteau soit un bon engrais, son transport retour génère des émissions de GES qui font décroître les performances environnementales de la chaîne logistique de la biomasse.

Tous ces résultats soulignent encore une fois l'importance de la bonne conception de la chaîne logistique de la biomasse comme un facteur permettant d'en accroître les performances économiques et environnementales. Ces résultats démontrent également l'aptitude du modèle développé à être un outil d'aide à la décision pour la conception et l'organisation des filières de production de biocarburants oléagineux en Afrique de l'Ouest.

Chapitre 5 : Conclusion générale et perspectives

Les travaux de cette thèse ont porté sur la détermination des conditions de durabilité de l'approvisionnement en biomasse des systèmes de production de biocarburants oléagineux en Afrique de l'Ouest. Le premier objectif spécifique visait à déterminer les paramètres et variables, techniques, économiques, environnementaux qui caractérisent (i) les processus de la chaîne logistique d'approvisionnement en biomasse oléagineuse et (ii) la valorisation des sous-produits dans le contexte ouest-africain. Le second objectif spécifique quant à lui a porté sur la conception d'un modèle d'optimisation de la configuration de l'approvisionnement des filières de production de biocarburants oléagineux. La finalité de ce modèle d'optimisation est d'être un système d'aide à la décision pour les acteurs du domaine de la production des biocarburants en Afrique de l'Ouest.

Le premier chapitre qui a servi de chapitre introductif à ce travail a présenté le contexte ayant justifié le sujet de la thèse et les objectifs à atteindre à l'issue des travaux de recherche. C'est ainsi que le contexte énergétique des pays de l'Afrique de l'Ouest et le contexte ayant favorisé l'essor des projets de production de biocarburant au Burkina Faso et au Mali ont été d'abord présentés. La problématique de la production de biocarburants et de l'approvisionnement en biomasse oléagineuse au Burkina Faso et au Mali a été ensuite exposée tout en soulignant les raisons du focus sur le *Jatropha curcas* et les échecs relatifs à son exploitation pour la production de biocarburants. Les stratégies pour pallier ces échecs, notamment les études sur l'agronomie du *Jatropha* et l'intérêt pour d'autres plantes telles que le *Balanites aegyptiaca* ont été également abordés avant de clore le chapitre par la présentation des objectifs de la thèse et par la présentation de la méthodologie et du plan de recherche mise en place pour l'atteinte des objectifs fixés.

Le deuxième chapitre a été consacré à un état de l'art sur la chaîne logistique dans les systèmes de production de bioénergies.

Ainsi dans la première partie du chapitre, les concepts relatifs aux bioénergies et à la biomasse ont été premièrement introduits et définis. La chaîne logistique des systèmes de production de façon générale et la chaîne logistiques dans les systèmes de production de bioénergies ont été également définis tout en soulignant les particularités de la matière première « biomasse » et de sa chaîne d'approvisionnement ainsi que des différentes opérations y afférant. Les enjeux de la conception du réseau logistique ont ensuite été présentés et les notions de durabilités, notamment la réutilisation et le recyclage des déchets et sous-produits dans chaîne logistique ont été présentés tout en définissant le concept de chaîne logistique inverse et de chaîne logistique en boucle fermée. Dans cette première partie, un état des connaissances sur les systèmes de production de biocarburants oléagineux à base de *Jatropha* et de *Balanites* en Afrique de l'Ouest a été également présenté. Cet état des connaissances résume les résultats de l'analyse des filières de production de biocarburant oléagineux à base de *Jatropha* et de *Balanites* qui a été réalisée afin de rassembler des données sur les systèmes d'approvisionnement de la biomasse en Afrique de l'Ouest et dont l'objectif était de déterminer les hypothèses, paramètres et variables techniques, économiques et environnementaux pertinents pour la construction d'un modèle d'optimisation.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, les problèmes de conception de réseau logistique ont été abordés. Ces problèmes concernent la conception de la chaîne logistique de façon générale. Les modèles

courants ainsi que les approches de résolution des problèmes de conceptions de la chaîne logistique ont ensuite été présentés. Ces problèmes sont entre autres les problèmes de conception générale et de localisation et allocation d'installations. Les travaux existant dans le domaine des bioénergies et ayant abordé ces problèmes de conception de réseau logistique ont été revus selon la nature de la biomasse étudiée et selon la prise en compte des retours dans la chaîne logistique. Quelques vides dans la littérature concernant la conception de la chaîne d'approvisionnement ont enfin été évoqués avant de clore cette première partie par la présentation des contributions des travaux de thèse objet de ce document.

Ce deuxième chapitre a contribué à apporter des réponses à la première question de recherche identifiant les paramètres et variables qui caractérisent (i) les opérations dans la chaîne logistique (ii) la configuration des chaînes logistiques (iii) la valorisation des sous-produits ? Ces paramètres et variables ont servi à la construction du modèle d'optimisation objet du chapitre 3.

Le troisième chapitre a porté sur la construction du modèle d'optimisation de la configuration de l'approvisionnement des systèmes de production de biocarburants oléagineux en Afrique de l'Ouest. Par conséquent, le problème à modéliser notamment, les hypothèses et les limites qui soutiennent la construction du modèle, les critères d'évaluation des performances de la chaîne logistique ainsi que les données et attributs du modèle, ont premièrement été présentés et définis. La formulation mathématique du problème à savoir : les différentes alternatives possibles pour l'approvisionnement de la biomasse ainsi que les paramètres et les variables qui ont ensuite été recensées et modélisées à travers un programme linéaire à variable mixte. En plus des paramètres économiques et environnementaux, la modélisation a pris en compte certains aspects techniques de la production de la biomasse et de sa logistique d'approvisionnement que sont le type de technologie employée, l'efficacité ou le rendement ainsi que la taille ou capacité de traitement liée à la technologie.

Le travail présenté dans ce troisième chapitre a permis d'atteindre le deuxième objectif spécifique ci-dessus rappelé et de vérifier la première hypothèse de recherche à savoir qu'il est possible d'obtenir un modèle générique qui permettra d'optimiser la durabilité des filières de production de biocarburants oléagineux en Afrique de l'Ouest.

Le quatrième chapitre a été la résolution du problème d'optimisation par l'implémentation du modèle construit sur un cas d'étude de l'approvisionnement en graines de *Jatropha* et en amandes de *Balanites* et pour chacun des critères d'optimisation retenus. Les résultats obtenus ont été analysés et interprétés afin de démontrer l'aptitude du modèle développé à trouver les meilleures alternatives et options de configuration de la chaîne d'approvisionnement en biomasse oléagineuse dans le contexte ouest-africain.

Ces résultats ont révélé que dans le contexte de l'étude, les coûts d'approvisionnement en graines de *Jatropha* sont toujours inférieurs à ceux du *Balanites*. Il en est de même pour les impacts en termes d'émissions de GES de l'approvisionnement en graines de *Jatropha* qui sont inférieurs à ceux du *Jatropha*. Ces résultats ont montré également qu'un système de culture intercalaire produisant un rendement d'au moins 810 kg/ha permet de produire la demande en graines de *Jatropha* afin d'alimenter une petite unité de production de biocarburant au Burkina Faso.

En plus de ces résultats, ce dernier chapitre a aussi permis de vérifier la deuxième hypothèse de recherche qui était que la durabilité des filières de production de biocarburants oléagineux est inhérente à la valorisation des sous-produits. Les résultats présentés dans ce chapitre ont effectivement montré que lorsque les points de retour pour la revente des sous-produits sont bien choisis, cette co-valorisation conduit à la réduction du prix de revient et de la biomasse et de l'HVC. Cependant, malgré le fait que le tourteau soit un bon engrais, son transport retour génère des émissions de GES qui font décroître les performances environnementales de la chaîne logistique de la biomasse.

Ce dernier chapitre a également apporté des réponses à la deuxième question de recherche à savoir quelle est la typologie de filières de production de biocarburants les plus durables et acceptables dans le contexte ouest-africain ? En effet, les résultats de l'implémentation du cas d'étude ont permis d'observer que du point de vue économique : les sites de production de la biomasse les plus productifs sont optimaux pour la production de la biomasse indépendamment de leur proximité de l'huilerie ; les sites situés les plus en amont et disposant de la technologie de prétraitement ayant les coûts de traitement les plus bas sont optimaux pour la réalisation des opérations de prétraitement. La technologie de prétraitement la moins chère correspond au prétraitement motorisé dans le contexte de l'étude ; la charrette à traction animale est optimale pour le transport de la biomasse. Du point de vue environnemental en revanche, les résultats discordent d'avec ceux de la fonction économique, car ce sont : les sites les productions de la biomasse les plus proches de l'huilerie (indépendamment de leur productivité) qui sont optimaux pour la production de la biomasse ; les sites situés les plus en amont et disposant de la technologie de prétraitement ayant les plus basses émissions de GES (qui correspond au prétraitement manuel sur les sites de production de la biomasse dans le contexte de l'étude) qui sont optimaux pour la réalisation des opérations de prétraitement ; les tricycles motorisés qui sont optimaux pour le transport de la biomasse.

Ces résultats discordant selon le critère d'optimisation considéré mettent en évidence les décisions contradictoires qui apparaissent lorsque plusieurs critères d'optimisation sont considérés. Ils démontrent également l'aptitude du modèle développé à être un outil d'aide à la décision pour la conception et l'organisation des filières de production de biocarburants oléagineux en Afrique de l'Ouest. Les décisions finales quant à l'organisation reviennent cependant aux décideurs qui sont libres d'appliquer ou pas les solutions proposées par le modèle.

En termes de perspectives, quelque points de recherche ont été identifiés comme pouvant permettre d'améliorer ces travaux de thèse.

Dans cette thèse en effet, le modèle construit a été implémenté sur la chaîne logistique de deux biomasses pérennes (l'une cultivée et l'autre sauvage). Le modèle a pourtant été conçu de sorte à pouvoir prendre en compte la majorité des biomasses oléagineuses terrestre. C'est la raison pour laquelle l'implémentation du modèle sur une biomasse oléagineuse issue de plante annuelle telle que le tournesol pourrait améliorer ces travaux de thèse en permettant de réaliser une étude comparative des coûts et impacts environnementaux des biomasses oléagineuses suivant leur mode de production et leur durée de vie. Les résultats de cette étude comparative pourraient constituer une base d'information qui permettrait de guider les agriculteurs et les décideurs du domaine de la production des biocarburants pour le choix

biomasses optimale en termes de minimisation des coûts et de minimisation des émissions de gaz à effet de serre en Afrique de l'Ouest.

En plus de l'application du modèle à la chaîne logistique d'une biomasse oléagineuse issue de plante annuelle, la prise en compte des retours à vide dans le modèle pour le transport de la biomasse pourrait permettre d'améliorer les coûts et impacts d'approvisionnement de la biomasse et de valorisation des sous-produits. En effet, ces retours à vides pourraient être exploités pour le transport retour des sous-produits. La prise en compte des retours à vide pourrait cependant nécessiter l'utilisation de variables entière pour l'optimisation du transport de la biomasse, ce qui pourrait avoir pour conséquence d'augmenter le temps de résolution du modèle.

L'intégration des aspects sociétaux dans la prise en compte de la durabilité des systèmes de production de biocarburants oléagineux en Afrique de l'Ouest est également un point de recherche à explorer. En effet, la durabilité dans cette thèse a consisté à optimiser les coûts et impacts des émissions de GES de la chaîne logistique de la biomasse oléagineuse. C'est pourquoi la construction d'un modèle d'optimisation des aspects sociétaux des filières de production de biocarburants en Afrique de l'Ouest permettrait d'améliorer l'aide à la décision pour la conception et l'organisation des filières de production de biocarburants par la prise en compte des trois domaines du développement durable. Pour cela, la réponse aux questions suivantes peut constituer des pistes de recherche : quels sont les critères pertinents à prendre en compte et quels sont les paramètres et variables à considérer pour évaluer les aspects sociétaux des filières de production de biocarburants oléagineux en Afrique de l'Ouest ?

Enfin, les résultats de l'implémentation du cas d'étude ont fait ressortir la contradiction qui existe entre les résultats suivant chaque critères économique et environnemental. C'est la raison pour laquelle optimiser les critères économique, environnementaux et sociétaux au moyen d'un modèle d'optimisation multi objectif permettrait d'optimiser simultanément ces critères d'optimisation de sorte à améliorer l'aide à la décision pour les acteurs du domaine de la production des biocarburants en Afrique de l'Ouest.

Bibliographie

- Achten, W.M.J., Nielsen, L.R., Aerts, R., Lengkeek, A.G., Kijär, E.D., Trabucco, A., Hansen, J.K., Maes, W.H., Graudal, L., Akinnifesi, F.K., Muys, B., 2010. Towards domestication of *Jatropha curcas*. *Biofuels* 1, 91–107. <https://doi.org/10.4155/bfs.09.4>
- Achten, W.M.J., Verchot, L., Franken, Y.J., Mathijs, E., Singh, V.P., Aerts, R., Muys, B., 2008. *Jatropha* bio-diesel production and use. *Biomass and Bioenergy* 32, 1063–1084. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.03.003>
- Adecia-FFEM, 2015. Etudes dans le cadre du projet d'appui au développement et à la structuration de la filière paysanne de *Jatropha* biocarburant en Afrique de l'Ouest.
- AFO, 2016. Analyse et Validation des Statistiques 2015 sur les Engrais au Burkina Faso, en Côte d'Ivoire, au Mali et au Sénégal.
- Ahmed, W., Sarkar, B., 2018. Impact of carbon emissions in a sustainable supply chain management for a second generation biofuel. *J. Clean. Prod.* 186, 807–820. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.289>
- Akçali, E., Çetinkaya, S., Üster, H., 2009. Network design for reverse and closed-loop supply chains: An annotated bibliography of models and solution approaches. *Networks* 53, 231–248. <https://doi.org/10.1002/net.20267>
- Alemán-Nava, G.S., Gatti, I.A., Parra-Saldivar, R., Dallemand, J.-F., Rittmann, B.E., Iqbal, H.M.N., 2018. Biotechnological revalorization of Tequila waste and by-product streams for cleaner production – A review from bio-refinery perspective. *J. Clean. Prod.* 172, 3713–3720. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.134>
- Allard, B., 2010. Evaluation de la rentabilité économique de la filière *Jatropha* dans la région de Teriya Bugu (Mali).
- AMASSA Afrique Verte Mali, 2009. Manuel d'information sur le transport des produits agricoles au Mali.
- Amin, S.H., Baki, F., 2017. A facility location model for global closed-loop supply chain network design. *Appl. Math. Model.* 41, 316–330. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.08.030>
- Andersen, F., Iturmendi, F., Espinosa, S., Diaz, M.S., 2012. Optimal design and planning of biodiesel supply chain with land competition. *Comput. Chem. Eng.* 47, 170–182. <https://doi.org/10.1016/J.COMPCHEMENG.2012.06.044>
- Angelsen, A., Wunder, S., 2003. Exploring the forest–poverty link: key concepts, issues and research implications. *Cent. Int. For. Res.* <https://doi.org/10.17528/cifor/001211>
- Aviara, N.A., Mamman, E., Umar, B., 2005. Some Physical Properties of Balanites *Aegyptiaca* Nuts. *Biosyst. Eng.* 92, 325–334. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.07.011>
- Ba, B.H., Prins, C., Prodhon, C., 2016. Models for optimization and performance evaluation of biomass supply chains: An Operations Research perspective. *Renew. Energy, Optimization Methods in Renewable Energy Systems Design* 87, Part 2, 977–989. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.045>
- Babazadeh, R., Razmi, J., Rabbani, M., Pishvae, M.S., 2017. An integrated data envelopment analysis–mathematical programming approach to strategic biodiesel supply chain network design problem. *J. Clean. Prod.* 147, 694–707. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.038>
- Bajwa, D.S., Peterson, T., Sharma, N., Shojaeiarani, J., Bajwa, S.G., 2018. A review of densified solid biomass for energy production. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 96, 296–305. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.040>
- Bambara, L.D.F., 2014. Développement de charbons actifs a base de coques de balanites en vue de la purification du biogaz.

- Bambara, L.D.F., Sawadogo, M., Blin, J., Roy, D., Anciaux, D., 2017. Optimization of an oilseed-based biofuels upstream supply chain in West Africa. *IFAC-PapersOnLine* 50, 6601–6606. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.619>
- Barbier, J., Malang, C., Tacourou, B., Cissé, C., Loch, F., Grand, C., Mergeai, G., 2012. Intérêts de mettre en place une filière courte basée sur la culture du *Jatropha* (*Jatropha curcas* L.).
- Barbosa-Póvoa, A.P., da Silva, C., Carvalho, A., 2017. Opportunities and Challenges in Sustainable Supply Chain: An Operations Research Perspective. *Eur. J. Oper. Res.* <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.10.036>
- Baumert, S., Khamzina, A., Vlek, P.L.G., 2018. Greenhouse gas and energy balance of *Jatropha* biofuel production systems of Burkina Faso. *Energy Sustain. Dev.* 42, 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.09.007>
- Bazongo, P., Traore, K., Traore, O., Bilgo, A., Yelemou, B., Sanon, K.B., Hien, V., Nacro, B.H., 2016. Caractérisation des systèmes de production de *Jatropha* dans les exploitations agricoles de la zone Ouest du Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 9, 2432–2445.
- Beamon, B.M., 1998. Supply chain design and analysis: Models and methods. *Int. J. Prod. Econ.* 55, 281–294.
- Behera, S.K., Srivastava, P., Tripathi, R., Singh, J.P., Singh, N., 2010. Evaluation of plant performance of *Jatropha curcas* L. under different agro-practices for optimizing biomass “ A case study. *Biomass and Bioenergy* 34, 30–41. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.09.008>
- Bensch, G., Grimm, M., Peter, K., Peters, J., Tasciotti, L., 2013. Impact evaluation of improved stove use in Burkina Faso–FAFASO. *Eval. Dep. Minist. Foreign Aff. Netherlands.*
- Blin, J., Brunschwig, C., Chapuis, A., Changotade, O., Sidibe, S.S., Noumi, E.S., Girard, P., 2013. Characteristics of vegetable oils for use as fuel in stationary diesel engines—Towards specifications for a standard in West Africa. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 22, 580–597. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2013.02.018>
- Blin, J., Dabat, M.H., Faugere, G., Hanff, E., Weisman, N., 2008. Opportunités de développement des biocarburants au Burkina Faso. Ministère l’Agriculture, l’Hydraulique des Ressources Halieutiques, Burkina Faso.
- Blin, J., Mouras, S., Sidibe, S., Girard, P., Vaitilingom, G., Pechine, B., 2014. Guide technique pour l’utilisation d’huile végétale carburant dans les moteurs diesel stationnaires, Editions S. ed.
- Blin, J., Mouras, S., Sidibe, S., Girard, P., Vaitilingom, G., Pechine, B., 2014. Guide technique pour l’utilisation d’huile végétale carburant dans les moteurs diesel stationnaires, Editions S. ed.
- Boffa, J.-M., 2000. Les parcs agroforestiers en Afrique subsaharienne. *Food & Agriculture Org.*
- Borman, G.D., von Maltitz, G.P., Tiwari, S., Scholes, M.C., 2013. Modelling the economic returns to labour for *Jatropha* cultivation in southern Africa and India at different local fuel prices. *Biomass and Bioenergy* 59, 70–83. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2012.06.020>
- Borman, G.D., von Maltitz, G.P., Tiwari, S., Scholes, M.C., 2013. Modelling the economic returns to labour for *Jatropha* cultivation in southern Africa and India at different local fuel prices. *Biomass and Bioenergy* 59, 70–83.
- Bouffaron, P., Castagno, F., Herold, S., 2012. Straight vegetable oil from *Jatropha curcas* L. for rural electrification in Mali - A techno-economic assessment. *Biomass and Bioenergy* 37, 298–308. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.11.008>
- Boukar, M.A., 2014. Optimisation de la production d’huile de *Balanites* de Barsalogo.
- Bouwman, A.F., Boumans, L.J.M., Batjes, N.H., 2002. Emissions of N₂O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data. *Global Biogeochem. Cycles* 16, 6–1.
- Branke, J., Deb, K., Miettinen, K., Słowiński, R. (Eds.), 2008. *Multiobjective Optimization, Lecture Notes in Computer Science.* Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88908-3>
- Burnod, P., Gautier, D., Gazull, L., 2010. Les agrocarburants au Mali : nouveau produit, vieilles recettes ? une analyse de l’émergence et des enjeux du système d’innovation “ agrocarburant ”, in: Emilie COUDEL, B.H. (Ed.), ISDA 2010. Cirad-Inra-SupAgro, Montpellier, France, p. 20-.

- Camero, C., Sowlati, T., 2014. Assessment and optimization of forest biomass supply chains from economic, social and environmental perspectives – A review of literature. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 36, 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.041>
- Carels, N., 2009. Chapter 2 *Jatropha curcas*: A Review, in: Delseny, J.-C.K. and M. (Ed.), *Advances in Botanical Research*. Academic Press, pp. 39–86.
- Castel, V., Kamara, A., 2009. Investissements étrangers dans les terres agricoles d’Afrique: incidence sur le développement du secteur rural et la réduction de la pauvreté. *Synthèse Rech.*
- Chapagain, B., Wiesman, Z., 2005. Variation in diosgenin level in seed kernels among different provenances of *Balanites aegyptiaca* Del (Zygophyllaceae) and its correlation with oil content. *African J. Biotechnol.* 4. <https://doi.org/10.4314/ajb.v4i11.71381>
- Chapagain, B.P., 2006. Characterization of Desert Date (*balanites Aegyptiaca*) Saponins and Their Biological Activities. Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva.
- Chapagain, B.P., Yehoshua, Y., Wiesman, Z., 2009. Desert date (*Balanites aegyptiaca*) as an arid lands sustainable bioresource for biodiesel. *Bioresour. Technol.* 100, 1221–1226. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.09.005>
- Chapuis, A., 2014. Sustainable design of oilseed-based biofuel supply chains: the case of *Jatropha* in Burkina Faso. *École nationale des Mines d’Albi-Carmaux*.
- Chapuis, A., Blin, J., Carre, P., Lecomte, D., 2014. Separation efficiency and energy consumption of oil expression using a screw-press: The case of *Jatropha curcas* L. seeds. *Ind. Crops Prod.* 52, 752–761. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.11.046>
- Chapuis, A., Blin, J., Codina, V., Ensinas, A., Lecomte, D., 2013. Performances technico-économiques des procédés de production de biocarburants à partir du *Jatropha*.
- Chardine-Baumann, E., Botta-Genoulaz, V., 2014. A framework for sustainable performance assessment of supply chain management practices. *Comput. Ind. Eng.* 76, 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.07.029>
- Cirad, G., 2002. *Mémento de l’Agronome*. Paris Ministère des Aff. Etrangères-GRETCIRAD 1, 691.
- Collette, Y., Siarry, P., 2004. *Multiobjective Optimization, Decision Engineering*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-08883-8>
- Council, N.R., 2008. *Lost Crops of Africa: Volume III: Fruits*.
- D’Amours, S., Epstein, R., Weintraub, A., Rönqvist, M., 2011. Operations Research in Forestry and Forest Products Industry, in: *Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. <https://doi.org/10.1002/9780470400531.eorms1044>
- Dabat, M.-H., 2011. Les nouveaux investissements dans les agrocarburants. *Afr. Contemp.* 237, 97–109.
- Dabat, M.-H., Blin, J., Rivier, M., 2010. Affronter le défi énergétique et alimentaire au Burkina Faso. *Cirad-Inra-SupAgro*, p. 14–p.
- Dabat, M.H., Hanff, E., Blin, J., 2009. Les biocarburants, une opportunité pour réduire la pauvreté au Burkina Faso?
- De Jong, J., Nielsen, F., 2011. Lessons Learned: *Jatropha* for local development.
- De Klein, C., Novoa, R.S., Ogle, S., Smith, K.A., Rochette, P., Wirth, T.C., McConkey, B.G., Mosier, A., Rypdal, K., Walsh, M., 2006. N₂O emissions from managed soils, and CO₂ emissions from lime and urea application. *IPCC Guidel. Natl. Greenh. gas Invent. Prep. by Natl. Greenh. gas Invent. Program.* 4, 1–54.
- De Meyer, A., Cattrysse, D., Van Orshoven, J., 2015. A generic mathematical model to optimise strategic and tactical decisions in biomass-based supply chains (OPTIMASS). *Eur. J. Oper. Res.* 245, 247–264. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.02.045>
- Département régional Ouest II (ORWB), 2010. *Stratégie de développement de la maîtrise de l’énergie au Mali*.
- Derra, S., 2014. Déterminants de l’innovation technologique sur la biomasse agricole : cas du *Jatropha curcas* au Burkina Faso. Montpellier, SupAgro.
- Deshmukh, S.J., Bhuyar, L.B., Thakre, S.B., 2008. Investigation on performance and emission characteristics of CI engine fuelled with producer gas and esters of Hingan (*Balanites*) oil in dual

- fuel mode. *Int. J. Mech. Ind. Aerosp. Eng.* 2.
- Divakara, B.N., Upadhyaya, H.D., Wani, S.P., Gowda, C.L.L., 2010. Biology and genetic improvement of *Jatropha curcas* L.: A review. *Appl. Energy* 87, 732–742. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.07.013>
- Djerma, C.G., Dabat, M.-H., 2013. Développement des agrocarburants en Afrique de l’Ouest. Une analyse institutionnelle comparative. en cours Publ.
- Domergue, M., Pirot, R., 2008. *Jatropha curcas* L Rapport de synthèse bibliographique.
- Duarte, A.E., Sarache, W.A., Costa, Y.J., 2014. A facility-location model for biofuel plants: Applications in the Colombian context. *Energy* 72, 476–483. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.069>
- Dyken, S. van, Bakken, B.H., Skjelbred, H.I., 2010. Linear mixed-integer models for biomass supply chains with transport, storage and processing. *Energy* 35, 1338–1350. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.11.017>
- E. Mamman, E., Umar, B., Aviara, N.A., 2005. Effect of Moisture Content and Loading Orientation on the Mechanical Properties of Balanites Aegyptiaca Nuts.
- Eksioglu, S.D., Acharya, A., Leightley, L.E., Arora, S., 2009. Analyzing the design and management of biomass-to-biorefinery supply chain. *Comput. Ind. Eng.* 57, 1342–1352. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.07.003>
- Eskandarpour, M., Dejax, P., Miemczyk, J., Péton, O., 2015. Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review. *Omega* 54, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.01.006>
- Everson, C.S., Mengistu, M.G., Gush, M.B., 2013. A field assessment of the agronomic performance and water use of *Jatropha curcas* in South Africa. *Biomass and Bioenergy* 59, 59–69. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.03.013>
- Everson, C.S., Mengistu, M.G., Gush, M.B., 2013. A field assessment of the agronomic performance and water use of *Jatropha curcas* in South Africa. *Biomass and Bioenergy* 59, 59–69. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.03.013>
- Fan, K.-Q., Zhang, P.-F., Pei, Z.J., 2013. An assessment model for collecting and transporting cellulosic biomass. *Renew. Energy* 50, 786–794. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.08.022>
- FAO, 2008. La situation mondiale de l’alimentation et de l’agriculture.
- Favretto, N., Stringer, L.C., Dougill, A.J., 2015. Towards Improved Policy and Institutional Coherence in the Promotion of Sustainable Biofuels in Mali. *Environ. Policy Gov.* 25, 36–54. <https://doi.org/10.1002/eet.1663>
- Favretto, N., Stringer, L.C., Dougill, A.J., 2012. Policy and institutional frameworks for the promotion of sustainable biofuels in Mali. Citeseer.
- Fülleemann, Y., 2015. Evaluation of vegetable fuel oil production potential in rural Burkina Faso. EPFL.
- Gan, J., Smith, C.T., 2011. Optimal plant size and feedstock supply radius: A modeling approach to minimize bioenergy production costs. *Biomass and Bioenergy, Proceedings of a workshop of IEA bioenergy task 31 on ‘sustainable forestry systems for bioenergy: integration, innovation and information’* 35, 3350–3359. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.08.062>
- Gasparatos, A., Lee, L.Y., Von Maltitz, G.P., Mathai, M. V, Puppim de Oliveira, J.A., Willis, K.J., 2012. Biofuels in Africa: impacts on ecosystem services, biodiversity and human well-being. United Nations University Institute of Advanced Studies.
- Gasparatos, A., von Maltitz, G.P., Johnson, F.X., Lee, L., Mathai, M., Puppim de Oliveira, J.A., Willis, K.J., 2015. Biofuels in sub-Sahara Africa: Drivers, impacts and priority policy areas. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 45, 879–901. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.006>
- Gatete, C., Dabat, M.-H., 2014. Développement des agrocarburants en Afrique de l’Ouest. Une analyse institutionnelle comparative. *Économie Rural. Agric. Aliment. Territ.* 9–27. <https://doi.org/10.4000/economierurale.4488>
- Ghaderi, H., Pishvae, M.S., Moini, A., 2016. Biomass supply chain network design: An optimization-oriented review and analysis. *Ind. Crops Prod.* 94, 972–1000. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.027>
- Ghosh, A., Chikara, J., Chaudhary, D.R., 2011. Diminution of economic yield as affected by pruning and

- chemical manipulation of *Jatropha curcas* L. *Biomass and Bioenergy* 35, 1021–1029. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.11.019>
- Giannini Pereira, M., Vasconcelos Freitas, M.A., da Silva, N.F., 2011. The challenge of energy poverty: Brazilian case study. *Energy Policy* 39, 167–175. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.09.025>
- Gold, S., Seuring, S., 2011. Supply chain and logistics issues of bio-energy production. *J. Clean. Prod.* 19, 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.08.009>
- Govindan, K., Soleimani, H., Kannan, D., 2015. Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *Eur. J. Oper. Res.* 240, 603–626. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012>
- Groupe e-sud, 2014. Etude sur la structuration, l'organisation et le fonctionnement des filières *Jatropha* en Afrique de l'ouest.
- Guide, V.D.R., Van Wassenhove, L.N., 2009. The Evolution of Closed-Loop Supply Chain Research. *Oper. Res.* 57, 10–18.
- Guinko, S., Pasgo, L.J., 1992. Harvesting and marketing of edible products from local woody species in Zitenga, Burkina Faso. *Unasylya* 43, 16–19.
- Gurtler, J.-L., 2008. Biocarburants: développement et perspectives. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides* 15, 235–239.
- Hall, J.B., 1992. Ecology of a key African multipurpose tree species, *Balanites aegyptiaca* (Balanitaceae): the state-of-knowledge. *For. Ecol. Manage.* 50, 1–30.
- Hall, J.B., 1992. Ecology of a key African multipurpose tree species, *Balanites aegyptiaca* (Balanitaceae): the state-of-knowledge. *For. Ecol. Manage.* 50, 1–30.
- Hammami, A., 2003. Modélisation technico-économique d'une chaîne logistique dans une entreprise réseau (Theses). École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Laval.
- Harris, I., 2011. Multi-objective optimisation for environmentally friendly logistics network (phd). Cardiff University.
- Hazelton, J.A., Tiwari, S., Amezaga, J.M., 2013. Stakeholder dynamics in bioenergy feedstock production; The case of *Jatropha curcas* L. for biofuel in Chhattisgarh State, India. *Biomass and Bioenergy* 59, 16–32. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.04.007>
- Henning, R., Sanankoua, O., Sidibé, Y., 1996. Production et utilisation de l'huile végétale comme carburant, rapport annuel de Projet Ministère des mines, d'énergie et de l'hydraulique. Dir. Natl. l'Hydraulique l'Énergie, Proj. pourghère DHNE-GTZ Bamako.
- Hillier, F.S., Lieberman, G.J., 2001. *Introduction to Operations Research*, 7 edition. ed. McGraw-Hill.
- IEA., 2017. *World Energy Outlook 2017*. Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD.
- IEA, 2014. *Africa Energy Outlook 2014 : Electricity Access Database*.
- Iiyama, M., Newman, D., Munster, C., Nyabenge, M., Sileshi, G.W., Moraa, V., Onchieku, J., Mowo, J.G., Jamnadass, R., 2012. Productivity of *Jatropha curcas* under smallholder farm conditions in Kenya. *Agrofor. Syst.* 87, 729–746. <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9592-7>
- IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Ivanov, D., 2010. An adaptive framework for aligning (re)planning decisions on supply chain strategy, design, tactics, and operations. *Int. J. Prod. Res.* 48, 3999–4017. <https://doi.org/10.1080/00207540902893417>
- Janin, P., Ouedraogo, F. de C., 2009. Enjeux des agrocarburants au Burkina Faso : le cas du *Jatropha curcas* L.
- Jayaram, J., Avittathur, B., 2015. Green supply chains: A perspective from an emerging economy. *Int. J. Prod. Econ.* 164, 234–244. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.12.003>
- Jerbia, R., Kchaou Boujelben, M., Sehli, M.A., Jemai, Z., 2018. A stochastic closed-loop supply chain network design problem with multiple recovery options. *Comput. Ind. Eng.* 118, 23–32.

- <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.02.011>
- Jingura, R.M., Matengaifa, R., Musadamba, D., Musiyiwa, K., 2011. Characterisation of land types and agro-ecological conditions for production of *Jatropha* as a feedstock for biofuels in Zimbabwe. *Biomass and Bioenergy* 35, 2080–2086. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.004>
- Johnson, D.M., Jenkins, T.L., Zhang, F., 2012. Methods for optimally locating a forest biomass-to-biofuel facility. *Biofuels* 3, 489–503. <https://doi.org/10.4155/bfs.12.34>
- Jongh, J.A., Van der Putten, E., 2010. *The Jatropha Handbook: From Cultivation to Application*. FACT Foundation.
- Kaboré-Zoungrana, C., Diarra, B., Adandedjan, C., Savadogo, S., 2008. Valeur nutritive de *Balanites aegyptiaca* pour l'alimentation des ruminants. *Livest. Res. Rural Dev.* 20, 2008.
- Karanam, K.R., Bhavanasi, J.K., 2012. Cultivation Technology for *Jatropha curcas*, in: Carels, N., Sujatha, M., Bahadur, B. (Eds.), *Jatropha, Challenges for a New Energy Crop*. Springer New York, pp. 165–174.
- Katiyar, R., Meena, P.L., Barua, M.K., Tibrewala, R., Kumar, G., 2018. Impact of sustainability and manufacturing practices on supply chain performance: Findings from an emerging economy. *Int. J. Prod. Econ.* 197, 303–316. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.12.007>
- Kesava Rao, A.V.R., Wani, S.P., Singh, P., Srinivas, K., Srinivasa Rao, C., 2012. Water requirement and use by *Jatropha curcas* in a semi-arid tropical location. *Biomass and Bioenergy, Biorefinery* 39, 175–181. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.01.013>
- Koala, O., Bélem, J., 2018. Effects of Split Mineral Fertilizer Applications on the Growth and Productivity of Three Tomato Varieties (*Lycopersicon esculentum* Mill.) in Rainy Season Cropping, in: *Improving the Profitability, Sustainability and Efficiency of Nutrients Through Site Specific Fertilizer Recommendations in West Africa Agro-Ecosystems*. Springer, Cham, pp. 139–160.
- Konaté, S., Kafando, G., Daho, T., Henry, E., 2017. Elaboration d'une stratégie pour le développement des filières de production des agrocarburants Etat des lieux et plan d'actions. *Initiatives Conseil Intrnational (ici)*.
- Koné, O., 2009. *Nouvelles approches pour la résolution du problème d'ordonnancement de projet à moyens limités*. Université Paul Sabatier - Toulouse III.
- Kple, M., Coulibaly, A., Coulibaly, D., Yattara, A., 2010. Impacts de la substitution d'une proportion des hydrocarbures par du biocarburant dans les industries énergétiques au Mali. p. 59.
- Kumar, A., Sharma, S., 2008. An evaluation of multipurpose oil seed crop for industrial uses (*Jatropha curcas* L.): A review. *Ind. Crops Prod.* 28, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.01.001>
- Kumar, D., Singh, B., 2017. Role of biomass supply chain management in sustainable bioenergy production. *Biofuels* 0, 1–11. <https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1368060>
- l'Énergie, D.N. de, 2008. *Stratégie nationale pour le développement des biocarburants*.
- Lama, A.D., Klemola, T., Saloniemi, I., Niemelä, P., Vuorisalo, T., 2017. Factors affecting genetic and seed yield variability of *Jatropha curcas* (L.) across the globe: A review. *Energy Sustain. Dev.* <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.09.002>
- Leão, R.R. de C.C., Hamacher, S., Oliveira, F., 2011. Optimization of biodiesel supply chains based on small farmers: A case study in Brazil. *Bioresour. Technol.* 102, 8958–8963. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.07.002>
- Lecomte, P., Boval, M., Guérin, H., Ickowicz, A., Huguenin, J., Limbourg, P., 2002. Carbone et élevage de ruminants.
- Lhoste, P., Havard, M., Vall, É., 2010. *La traction animale*. Quae.
- Lim, B.Y., Shamsudin, R., Baharudin, B.T.H.T., Yunus, R., 2015. A review of processing and machinery for *Jatropha curcas* L. fruits and seeds in biodiesel production: Harvesting, shelling, pretreatment and storage. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 52, 991–1002. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.077>
- Lohlum, S.A., Forcados, E.G., Agida, O.G., Ozele, N., Gotep, J.G., 2012. Enhancing the Chemical Composition of *Balanites aegyptiaca* Seeds through Ethanol Extraction for Use as a Protein Source in Feed Formulation. *Sustain. Agric. Res.* 1.

- MAAH, 2017. Circulaire N°2017-117/MAAH/SG/DGPC.
- Maes, W.H., Trabucco, A., Achten, W.M.J., Muys, B., 2009. Climatic growing conditions of *Jatropha curcas* L. *Biomass and Bioenergy* 33, 1481–1485. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.06.001>
- Mafakheri, F., Nasiri, F., 2014. Modeling of biomass-to-energy supply chain operations: Applications, challenges and research directions. *Energy Policy* 67, 116–126. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.11.071>
- Malladi, K.T., Sowlati, T., 2018. Biomass logistics: A review of important features, optimization modeling and the new trends. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 94, 587–599. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.052>
- McKendry, P., 2002. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresour. Technol., Reviews Issue* 83, 37–46. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3)
- Meher, L.C., Vidya Sagar, D., Naik, S.N., 2006. Technical aspects of biodiesel production by transesterification - a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 10, 248–268. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.09.002>
- Mele, F.D., Kostin, A.M., Guillén-Gosálbez, G., Jiménez, L., 2011. Multiobjective model for more sustainable fuel supply chains. A case study of the sugar cane industry in Argentina. *Ind. Eng. Chem. Res.* 50, 4939–4958.
- Melkote, S., Daskin, M.S., 2001a. An integrated model of facility location and transportation network design. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 35, 515–538. [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(00\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(00)00005-7)
- Melkote, S., Daskin, M.S., 2001b. Capacitated facility location/network design problems. *Eur. J. Oper. Res.* 129, 481–495. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00464-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00464-6)
- Meneghel Fonseca Leticia, 2011. Analyse des impacts environnementaux et bilan énergétique de la production et l'utilisation de l'huile du *Jatropha curcas* au Mali. École des Mines d'Alès Cirad.
- Mergeai, G., Dieu Minengu, J. de, Mobambo, P., 2014. Influence de l'environnement et des pratiques culturelles sur la productivité de *Jatropha curcas* L. en Afrique subsaharienne (synthèse bibliographique). Base.
- Min, H., Zhou, G., 2002. Supply chain modeling: past, present and future. *Comput. Ind. Eng.* 43, 231–249. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(02\)00066-9](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(02)00066-9)
- Minengu, J. de D., Mobambo, P., Mergeai, G., 2013. Effets de la couverture du sol avec *Stylosanthes guianensis* (Aublet) Swartz, de la taille et de la fumure minérale sur la production de *Jatropha curcas* L. dans la région de Kinshasa. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides* 21, 1–8.
- Mirchandani, P.B., 1990. *Discrete location theory*. Wiley.
- Mota, B., Gomes, M.I., Carvalho, A., Barbosa-Povoa, A.P., 2015. Towards supply chain sustainability: economic, environmental and social design and planning. *J. Clean. Prod., Decision-support models and tools for helping to make real progress to more sustainable societies* 105, 14–27. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.052>
- Murillo-Alvarado, P.E., Guillén-Gosálbez, G., Ponce-Ortega, J.M., Castro-Montoya, A.J., Serna-González, M., Jiménez, L., 2015. Multi-objective optimization of the supply chain of biofuels from residues of the tequila industry in Mexico. *J. Clean. Prod.* 108, 422–441. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.052>
- Navarro-Pineda, F.S., Baz-Rodríguez, S.A., Handler, R., Sacramento-Rivero, J.C., 2016. Advances on the processing of *Jatropha curcas* towards a whole-crop biorefinery. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 54, 247–269. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.009>
- Ndoye, M., Diallo, I., Gassama/Dia, Y.K., 2004. Reproductive biology in *Balanites aegyptiaca* (L.) Del., a semi-arid forest tree. *African J. Biotechnol.* 3, 40–46.
- Nemecek, T., Kägi, T., Blaser, S., 2007. Life cycle inventories of agricultural production systems. *Ecoinvent Rep. version* 2, 15.
- Obidah, W., Nadro, M., ... G.T.-J. of A., 2009, U., 2009. Toxicity of crude *Balanites aegyptiaca* seed oil in rats. jofamericanscience.org.
- Okia, C.A., 2010. *Balanites aegyptiaca*: A resource for Improving Nutrition and Income of Dryland

- Communities in Uganda. Prifysgol Bangor University.
- Okia, C.A., Agea, J.G., Kimondo, J.M., Abohassan, R.A.A., Obua, J., Teklehaima, Z., 2011. Harvesting and Processing of *Balanites aegyptiaca* Leaves and Fruits for Local Consumption by Rural Communities in Uganda. *J. Food Technol.* 9, 83–90. <https://doi.org/10.3923/jftech.2011.83.90>
- Okia, C.A., Kwetegyeka, J., Okiror, P., Kimondo, J.M., Teklehaimanot, Z., Obua, J., 2013. Physico-chemical characteristics and fatty acid profile of desert date kernel oil. *African Crop Sci. J.* 21, 723–734.
- ONUDI, 1984. Production de l'huile de *Balanites aegyptiaca*.
- Ortiz-Astorquiza, C., Contreras, I., Laporte, G., 2018. Multi-level facility location problems. *Eur. J. Oper. Res.* 267, 791–805. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.10.019>
- Osmani, A., Zhang, J., 2017. Multi-period stochastic optimization of a sustainable multi-feedstock second generation bioethanol supply chain – A logistic case study in Midwestern United States. *Land use policy* 61, 420–450. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.10.028>
- Our common future, 1987. . Oxford University Press, Oxford; New York.
- Özceylan, E., 2016. Simultaneous optimization of closed- and open-loop supply chain networks with common components. *J. Manuf. Syst.* 41, 143–156. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.08.008>
- Pallièrè, G., Fauveaud, S., 2009. Les enjeux des agrocarburants pour le monde paysan au Mali. GERES, AMEDD, ICD, Available <http://www.geres.eu/images/stories/publis/Enjeux-Jatropha-paysans-maliens>.
- Pandey, V.C., Singh, K., Singh, J.S., Kumar, A., Singh, B., Singh, R.P., 2012. *Jatropha curcas*: A potential biofuel plant for sustainable environmental development. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 2870–2883. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.004>
- Papageorgiou, L.G., 2009. Supply chain optimisation for the process industries: Advances and opportunities. *Comput. Chem. Eng., FOCAP0 2008 : Selected Papers from the Fifth International Conference on Foundations of Computer-Aided Process Operations* 33, 1931–1938. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.06.014>
- Pereira, M.G., Sena, J.A., Freitas, M.A.V., Silva, N.F. da, 2011. Evaluation of the impact of access to electricity: A comparative analysis of South Africa, China, India and Brazil. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, 1427–1441. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.005>
- Pimentel, D., Cerasale, D., Stanley, R.C., Perlman, R., Newman, E.M., Brent, L.C., Mullan, A., Chang, D.T.-I., 2012. Annual vs. perennial grain production. *Agric. Ecosyst. Environ.* 161, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.05.025>
- Pouliot, M., Treue, T., 2013. Rural People's Reliance on Forests and the Non-Forest Environment in West Africa: Evidence from Ghana and Burkina Faso. *World Dev.* 43, 180–193. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2012.09.010>
- Pramanik, K., 2003. Properties and use of *Jatropha curcas* oil and diesel fuel blends in compression ignition engine. *Renew. Energy* 28, 239–248. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(02\)00027-7](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00027-7)
- Rabier, L., 2012. L'alimentation de l'âne et ses relations avec les maladies asines (PhD Thesis).
- Rajaona, A.M., Brueck, H., Asch, F., 2011. Effect of pruning history on growth and dry mass partitioning of *Jatropha* on a plantation site in Madagascar. *Biomass and Bioenergy, Land use impacts of bioenergy. Selected papers from the IEA Bioenergy Task 38 Meetings in Helsinki, 2009 and Brussels, 2010* 35, 4892–4900. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.10.017>
- Rakshit, K.D., Darukeshwara, J., Rathina Raj, K., Narasimhamurthy, K., Saibaba, P., Bhagya, S., 2008. Toxicity studies of detoxified *Jatropha* meal (*Jatropha curcas*) in rats. *Food Chem. Toxicol.* 46, 3621–3625. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2008.09.010>
- Ramezani, M., Kimiagari, A.M., Karimi, B., 2014. Closed-loop supply chain network design: A financial approach. *Appl. Math. Model.* 38, 4099–4119. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.02.004>
- Rentizelas, A.A., 2013. 2 - Biomass supply chains, in: Rosendahl, L. (Ed.), *Biomass Combustion Science, Technology and Engineering*, Woodhead Publishing Series in Energy. Woodhead Publishing, pp. 9–35.
- Rentizelas, A.A., Tolis, A.J., Tatsiopoulou, I.P., 2009. Logistics issues of biomass: The storage problem

- and the multi-biomass supply chain. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13, 887–894. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.01.003>
- Rérolle, T., 2014. Réflexion prospective sur l'évolution du cadre réglementaire et fiscal pour le développement durable des agro-carburants au Burkina Faso. EPFL.
- Rezapour, S., Farahani, R.Z., Fahimnia, B., Govindan, K., Mansouri, Y., 2015. Competitive closed-loop supply chain network design with price-dependent demands. *J. Clean. Prod.* 93, 251–272. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.095>
- Rodrigues, J., Miranda, I., Gominho, J., Vasconcelos, M., Barradas, G., Pereira, H., Bianchi-de-Aguiar, F., Ferreira-Dias, S., 2013. Variability in oil content and composition and storage stability of seeds from *Jatropha curcas* L. grown in Mozambique. *Ind. Crops Prod.* 50, 828–837. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.08.038>
- Rogers, D.S., Tibben-Lembke, R.S., 1999. *Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices*. Reverse Logistics Executive Council.
- Rohde, A., Bhalerao, R.P., 2007. Plant dormancy in the perennial context. *Trends Plant Sci.* 12, 217–223. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2007.03.012>
- Şahin, G., Süral, H., 2007. A review of hierarchical facility location models. *Comput. Oper. Res.* 34, 2310–2331. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.09.005>
- Samaké, B., 2007. Rapport d'étude sur le développement des biocarburants au Mali. CILSS/PREDAS.
- Sanon, B., Serme, I., Pouya, M., Kiba, I., Gnankambary, Z., Sedogo, M.P., 2015. Valorisation des tourteaux de *Jatropha curcas* L. sous forme de fertilisant.
- Santibañez-Aguilar, J.E., González-Campos, J.B., Ponce-Ortega, J.M., Serna-González, M., El-Halwagi, M.M., 2014. Optimal planning and site selection for distributed multiproduct biorefineries involving economic, environmental and social objectives. *J. Clean. Prod.* 65, 270–294. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.004>
- Sarr, M.B., 2015. Etude sur le décorticage et la valorisation des coques de *Jatropha* en Afrique de l'Ouest.
- Sawadogo, M., 2011. Intégration de l'impact environnemental, sociétal et économique du transport intermodal au sein des chaînes logistiques vertes : optimisation multiobjectif par les colonies de fourmis. Metz.
- Sawadogo, M., Anciaux, D., 2011. Intermodal transportation within the green supply chain: an approach based on ELECTRE method. *Int. J. Bus. Perform. Supply Chain Model.* 3, 43–65. <https://doi.org/10.1504/IJBPSM.2011.039973>
- Sawadogo, M., Bambara, L.D.F., Blin, J., Anciaux, D., Roy, D., 2017. Optimization of *Balanites aegyptiaca* seeds supply chain for biofuel production in West Africa sahelian regions, in: 2017 8th International Renewable Energy Congress (IREC). pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/IREC.2017.7926017>
- Searcy, E., Flynn, P., Ghafoori, E., Kumar, A., 2007. The Relative Cost of Biomass Energy Transport, in: Mielenz, J.R., Klasson, K.T., Adney, W.S., McMillan, J.D. (Eds.), *Applied Biochemistry and Biotechnology*, ABAB Symposium. Humana Press, pp. 639–652.
- Segura, J.-M., 2011. Localisation et affectation : application aux réseaux de contenus. Paris 6.
- Shapiro, J.F., 2004. Challenges of strategic supply chain planning and modeling. *Comput. Chem. Eng., FOCAPO 2003 Special issue* 28, 855–861. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2003.09.013>
- Sharma, B., Ingalls, R.G., Jones, C.L., Huhnke, R.L., Khanchi, A., 2013. Scenario optimization modeling approach for design and management of biomass-to-biorefinery supply chain system. *Bioresour. Technol.* 150, 163–171. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.09.120>
- Sharma, B., Ingalls, R.G., Jones, C.L., Khanchi, A., 2013. Biomass supply chain design and analysis: Basis, overview, modeling, challenges, and future. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 24, 608–627. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.049>
- Sidibe, S.S., Blin, J., Vaitilingom, G., Azoumah, Y., 2010. Use of crude filtered vegetable oil as a fuel in diesel engines state of the art: Literature review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14, 2748–2759.
- Singh, R.N., Vyas, D.K., Srivastava, N.S.L., Narra, M., 2008. SPRERI experience on holistic approach to utilize all parts of *Jatropha curcas* fruit for energy. *Renew. Energy* 33, 1868–1873.

- <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.10.007>
- Slabinac, M., 2013. Approaches To Distribution Centre'S Location Problem And Its Role In Green Supply Chain Management. *Bus. Logist. Mod. Manag.* 13, 95–102.
- SONABHY, 2018. Structure des prix | SONABHY [WWW Document].
- Sop, T.K., Oldeland, J., Schmiedel, U., Ouedraogo, I., Thiombiano, A., 2011. Population structure of three woody species in four ethnic domains of the sub-sahel of Burkina Faso. *L. Degrad. Dev.* 22, 519–529. <https://doi.org/10.1002/ldr.1026>
- Sosa, A., Acuna, M., McDonnell, K., Devlin, G., 2015. Controlling moisture content and truck configurations to model and optimise biomass supply chain logistics in Ireland. *Appl. Energy* 137, 338–351. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.018>
- SP/CPSA, 2002. Etude-diagnostic sur l'organisation, les performances et perspectives de la filière niébé burkinabè. Ministère de l'Agriculture, Ouagadougou Burkina Faso.
- Sulaiman, C., Abdul-Rahim, A.S., Mohd-Shahwahid, H.O., Chin, L., 2017. Wood fuel consumption, institutional quality, and forest degradation in sub-Saharan Africa: Evidence from a dynamic panel framework. *Ecol. Indic.* 74, 414–419. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.045>
- Sultana, A., Kumar, A., 2011. Optimal configuration and combination of multiple lignocellulosic biomass feedstocks delivery to a biorefinery. *Bioresour. Technol.* 102, 9947–9956. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.07.119>
- Suon, M., 2011. Optimisation de la logistique internationale à horizon stratégique. Application à un constructeur automobile (phdthesis). Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.
- Suurs, R. a. A., 2002. Long Distance Bioenergy Logistics: An assessment of costs and energy consumption for various biomass transport chains. Utrecht University.
- Tatsidjoudong, P., Dabat, M.-H., Blin, J., 2012. Insights into biofuel development in Burkina Faso: Potential and strategies for sustainable energy policies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 5319–5330. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.028>
- Tayeau, F., Faure, F., Séchet-Sirat, J., 1955. Etude sur le Soumpe (*Balanites Aegyptiaca*). Valeur alimentaire de ses protéines. *J. Agric. Trop. Bot. Appl.* 2, 40–49. <https://doi.org/10.3406/jatba.1955.2201>
- Tiétiambou, F., Bazongo, P., Diallo, A., Kouyaté, A., 2015. Production de l'huile de *Balanites aegyptiaca*.
- Tjeuw, J., Slingerland, M., Giller, K., 2015. Relationships among *Jatropha curcas* seed yield and vegetative plant components under different management and cropping systems in Indonesia. *Biomass and Bioenergy* 80, 128–139. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.05.003>
- Torkestani, S.S., Seyedhosseini, S.M., Makui, A., Shahanaghi, K., 2016. Hierarchical Facility Location and Hub Network Problems: A literature review. *J. Ind. Syst. Eng.* 9, 1–22.
- Trabucco, A., Achten, W.M.J., Bowe, C., Aerts, R., Orshoven, J. Van, Norgrove, L., Muys, B., 2010. Global mapping of *Jatropha curcas* yield based on response of fitness to present and future climate. *GCB Bioenergy* 2, 139–151. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2010.01049.x>
- Traore, M., Nacro, H.B., Doamba, W.F., Tabo, R., Nikiema, A., 2015. Effets de doses variées du tourteau de *Jatropha curcas* sur la productivité du mil (variété HKP) en condition pluviale en Afrique de l'Ouest. *TROPICULTURA* 33, 19–25.
- Traore, M., Nacro, H.B., Tabo, R., Nikiema, A., Ousmane, H., 2012. Potential for agronomical enhancement of millet yield via *Jatropha curcas* oilcake fertilizer amendment using placed application technique. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 6, 808–819.
- Tréboux, M., Desquilbet, S., 2013. Pratiques culturales appliquées au *Jatropha* par les producteurs du Sud-Est du Mali.
- Tschirley, D.L., Poulton, C., Labaste, P., 2009. Organization and Performance of Cotton Sectors in Africa: Learning from Reform Experience. World Bank Publications.
- Uduma, K., Arciszewski, T., 2010. Sustainable Energy Development: The Key to a Stable Nigeria. *Sustainability* 2, 1558–1570. <https://doi.org/10.3390/su2061558>
- Uslu, A., Faaij, A.P.C., Bergman, P.C.A., 2008. Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast

- pyrolysis and pelletisation. *Energy* 33, 1206–1223. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.03.007>
- Varshney, A., Anis, M., 2014. *Trees: Propagation and Conservation: Biotechnological Approaches for Propagation of a Multipurpose Tree, Balanites aegyptiaca Del.* Springer Science & Business Media.
- Vinay, B., Vermeulen, G., 2013. Dynamique de production du Jatropha au Burkina.
- von Maltitz, G., Gasparatos, A., Fabricius, C., 2014. The Rise, Fall and Potential Resilience Benefits of Jatropha in Southern Africa. *Sustainability* 6, 3615–3643. <https://doi.org/10.3390/su6063615>
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *Int. J. Life Cycle Assess.* 21, 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>
- Wyman, C.E., Dale, B.E., Elander, R.T., Holtzapple, M., Ladisch, M.R., Lee, Y.Y., 2005. Coordinated development of leading biomass pretreatment technologies. *Bioresour. Technol.*, Coordinated Development of Leading Biomass Pretreatment Technologies 96, 1959–1966. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.01.010>
- You, F., Tao, L., Graziano, D.J., Snyder, S.W., 2012. Optimal design of sustainable cellulosic biofuel supply chains: Multiobjective optimization coupled with life cycle assessment and input–output analysis. *AIChE J.* 58, 1157–1180. <https://doi.org/10.1002/aic.12637>
- Yue, D., You, F., Snyder, S.W., 2014. Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization: Overview, key issues and challenges. *Comput. Chem. Eng.*, Selected papers from ESCAPE-23 (European Symposium on Computer Aided Process Engineering - 23), 9-12 June 2013, Lappeenranta, Finland 66, 36–56. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.11.016>
- Zamboni, A., Bezzo, F., Shah, N., 2009. Spatially Explicit Static Model for the Strategic Design of Future Bioethanol Production Systems. 2. Multi-Objective Environmental Optimization. *Energy & Fuels* 23, 5134–5143. <https://doi.org/10.1021/ef9004779>
- Zerhouni, M.H., 2009. *Intégration des flux inverses dans la gestion des stocks et de la production.* Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
- Zhu, X., Li, X., Yao, Q., Chen, Y., 2011. Challenges and models in supporting logistics system design for dedicated-biomass-based bioenergy industry. *Bioresour. Technol.* 102, 1344–1351. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.122>
- Zongo, N., Serme, I., Somda, B., Gnankambary, Z., P. Sedogo, M., 2015. Identification des modes de propagation et des techniques culturelles les mieux adoptés du Jatropha curcas. 83–109.

Annexes

Annexe 1. Évaluation environnementale

1. Hypothèses pour le calcul des émissions de GES liés à l'utilisation des fertilisants

Éléments azotés	Taux	Source
Émissions directes		
NH ₃	4%	(Nemecek et al., 2007)
N ₂ O	0,8%	(Bouwman et al., 2002)
NO	0,6%	(Bouwman et al., 2002)
Émissions indirectes		
N ₂ O volatilisé	0,1%	(De Klein et al., 2006)
N ₂ O lixiviation	0,225%	(De Klein et al., 2006)

2. Hypothèses pour le calcul des émissions de GES liés à l'utilisation des tourteaux comme fertilisant

Éléments azotés	Taux	Source
Émissions directes		
NH ₃	4%	(Nemecek et al., 2007)
N ₂ O	0,67%	(Bouwman et al., 2002)
NO	0,24%	(Bouwman et al., 2002)
Émissions indirectes		
N ₂ O volatilisé	0,2%	(De Klein et al., 2006)
N ₂ O lixiviation	0,225%	(De Klein et al., 2006)

3. Hypothèses de calcul des émissions des moyens de transport

La charrette à traction asine a été considérée.

L'âne a un poids moyen $P_d = 110$ kg (Cirad, 2002). Il consomme journalièrement $T_{MS} = 2$ % de son poids en matière sèche et $T_{eau} = 9$ % de son poids en eau (Rabier, 2012). Sur la base des travaux de (Lecomte et al., 2002), il a été considéré que l'aliment de l'âne contient en moyenne 40 % de carbone, et que 12 % de ce carbone ingéré est transformé en CO₂ et 3,8 % en CH₄.

Le calcul des émissions par km parcouru avec la charrette a été réalisé suivant les équations ci-dessous en considérant sa distance de couverture qui est de 20 km.

$$\text{Émission de CO}_2 = \frac{P_d \times T_{MS} \times T_{eau} \times T_{CO_2}}{\text{Distance de couverture}}$$

$$\text{Émission de CH}_4 = \frac{P_d \times T_{MS} \times T_{eau} \times T_{CH_4}}{\text{Distance de couverture}}$$

En considérant la demande en biomasse prétraitée de l'huilerie de 300 t et les capacités de charge des différents moyens de transport, le nombre de voyages par an à effectuer pour le transport de la biomasse est de 600, 275 et 30 respectivement pour la charrette, le tricycle et le camion. Les distances moyennes parcourues par voyage sont pour chacun de ces moyens de transport respectivement de 15, 35 et 45 km.

En raison des durées de vie des moyens de transport mentionnés au Tableau 11, trois charrettes, trois tricycles et l'équivalent d'un camion et demi ont été utilisés sur la durée de fonctionnement de l'huilerie qui est de 15 ans.

Annexe 2. Extraction de l'huile végétale carburant

1. Équations de calcul du prix d'achat des équipements d'une unité d'extraction d'HVC

- Prix d'achat de la presse (C_{pr}) en euro :

$$\log(C_{pr}) = k1 + k2 \times \log(ms) + k3 \times (\log(ms))^2$$

$$k1 = 2.3694; k2 = 1.1247; k3 = -0.0613$$

- Prix d'achat des autres équipements (C_{ep}) en euro :

$$\log(C_{eq}) = k1 + k2 \times \log(mo) + k3 \times (\log(mo))^2$$

$$k1 = 4.4967; k2 = 0.0778; k3 = 0.1103;$$

Le paramètre ms et mo désignent respectivement la capacité de la presse et le débit d'huile.

2. Hypothèses et calculs pour des différents coûts considérés dans la phase d'extraction de l'HVC.

Coûts	Formule de calcul	Valeur (XOF)	
		Jatropha	Balanites
Salaire (Sal)	Nombre × Rémunération	11 000 000	11 000 000
Presse (C_{pr})	$\log(C_{pr}) = k1 + k2 \times \log(ms) + k3 \times (\log(ms))^2$	12 012 596	12 012 596
Autres équipements (C_{eq})	$\log(C_{eq}) = k1 + k2 \times \log(mo) + k3 \times (\log(mo))^2$	42 300 307	42 008 201
Total machines (CT_{eq})	$C_{pr} + C_{eq}$	54 312 903	54 020 797
Bâtiment (C_{bat})	$30\% \times CT_{eq}$ (Chapuis, 2014)	16 293 871	16 206 239
Importation (C_{imp})	$20\% \times CT_{eq}$ (Chapuis, 2014)	10 862 581	10 804 159
Total investissement (C_{inv})	$CT_{ep} + C_{bat} + C_{imp}$	81 469 354	81 031 195
Coûts fixes (C_{fix})	Coût total $\times \frac{i \cdot (i+1)^n}{(i+1)^n - 1}$	1 629 387	1 620 624

Maintenance (C _{Maint})	3%×CT _{eq} (Chapuis, 2014)	543 129	540 208
Assurance (C _{Assu})	1%×CT _{eq} (Chapuis, 2014)	7 848 944	7 806 731
Divers (C _{Div})	0.5 FCFA/ kg graine	150 000	150 000
Energie (C _{Ener})		1 970 966	8 882 000
Total	C _{fix} + Sal + C _{Maint} + C _{Assu} + C _{Ener} + C _{Div}	23 142 427	29 999 563
Coût / kg graine	Total	77	100
Coût / kg huile	Total	280	244
Coût /L huile	Total	252	220

3. Formule de calcul des coûts annualisé

$$\text{Coût annuel} = \text{coût total} \times \frac{i \cdot (i+1)^n}{(i+1)^n - 1}$$

i est le taux d'intérêt et n la durée de vie du moyen de transport.

Annexe 3. Résultats de performance de l'algorithme de résolution du problème d'optimisation

1. Implémentation de la fonction économique

	Scenarios	Temps (s)	Gap (%)
Jatropha	1	36	0,01
	2	4	0,00
	3	197	0,02
	4	29	0,00
	20 km	189	0,01
	40 km	161	0,00
	50 km	129	0,01
	60 km	143	0,02
	70 km	124	0,02
	80 km	130	0,01
	90 km	121	0,00
100 km	90	0,01	
Balanites	1	5	0,00
	2	3	0,00
	3	50	0,01
	4	92	0,01
	20 km	81	0,00
	40 km	43	0,01

	50 km	41	0,01
	60 km	72	0,01
	70 km	68	0,01
	80 km	70	0,01
	90 km	36	0,03
	100 km	31	0,00

2. Implémentation de la fonction environnement

	Scenarios	Temps (s)	Gap (%)
Jatropha	1	26	0,00
	2	19	0,00
	3	26	0,00
	4	16	0,00
	20 km	20	0,00
	40 km	32	0,00
	50 km	44	0,00
	60 km	32	0,00
	70 km	36	0,00
	80 km	37	0,01
	90 km	27	0,00
	100 km	17	0,00
Balanites	1	4	0,00
	2	3	0,01
	3	5	0,00
	4	4	0,01
	20 km	3	0,00
	40 km	6	0,00
	50 km	4	0,00
	60 km	10	0,00
	70 km	4	0,00
	80 km	23	0,01
	90 km	7	0,01
	100 km	7	0,00